

Conceptos obsoletos

Friedrich Herrmann
Georg Job
Nelson Arias Ávila
Heiner Schwarze

en Física

Friedrich Herrmann y Georg Job

Conceptos obsoletos en Física Volumen total

Octubre 2022

Concepto y Edición:
Heiner Schwarze

Versión en español:
Nelson Arias Ávila

Con aportes de:
Peter Würfel, Ralph von Baltz, Peter Schmälzle, Holger Hauptmann, Michael Pohlig

Reservados todos los derechos. No se permite la reproducción de los textos e imágenes sin el consentimiento de los autores.

Autores de los artículos individuales:

F. Herrmann: 1.1 a 1.34, 2.2 a 2.6, 3.1 a 3.36, 4.1 a 4.18, 5.2 a 5.4, 5.6 a 5.13, 5.16, 5.19 a 5.27, 5.29 a 5.40, 5.42, 5.44 a 5.49, 6.1 a 6.27, 7.1 a 7.5, 8.1 a 8.17, 9.1 a 9.5, 10.1 a 10.5, 11.1 a 11.13, 12.1, 12.6 a 12.10

G. Job: 2.1, 5.1, 5.5, 5.14 y 5.15, 5.17 y 5.18, 5.28, 5.41, 5.43, 12.2 a 12.5

P. Würfel: 5.36, 9.1, 9.2, 9.3

H. Hauptmann: 7.3

M. Pohlig: 9.4

R. von Baltz: 9.4

P. Schmälzle: 3.25

PRESENTACIÓN

Desde que los griegos se percataron del poder que tiene la abstracción para la interpretación científica del universo, los científicos han venido construyendo continuamente un lenguaje (la Ciencia) para explicar y predecir los fenómenos naturales. Este cambio continuo ha sido evolutivo en el sentido de que las nuevas formas que ha venido adoptando dicho lenguaje han estado siempre basadas en las anteriores, lo que ha motivado la acumulación de palabras que responden a conceptos obsoletos. Desde hace bastantes años, el Grupo de Didáctica de la Física de la Universidad de Karlsruhe, bajo la dirección del Profesor Friedrich Herrmann, ha venido trabajando sobre este tema, publicando una serie periódica de artículos breves bajo el nombre general de *Altlästen der Physik* (Conceptos Obsoletos en Física, COF). A esta actividad se unieron los Profesores Georg Job, de la Universidad de Hamburgo, y Nelson Arias Ávila, de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de Bogotá, con sendos artículos sobre el tema: *The historical burden on scientific knowledge*, que Herrmann y Job publicaron en Eur. J. Phys. 17, 1996, p. 159, y “*Fósiles*” en la *enseñanza de las ciencias*, que Herrmann y Arias Ávila publicaron en la Revista Española de Física, 21, No. 1, 2007, p. 46. Se presenta hoy la versión completa en castellano de los Conceptos obsoletos en Física.

La lectura del libro es una delicia, porque cuando se trata de analizar un concepto obsoleto, cuáles son los aspectos que se pueden conservar de él y cuáles no, se aprende mucha Física y se toma conciencia de las cosas que se saben y de las que se ignoran. Es un ejercicio saludable para los profesores, para los estudiosos de la Física y, en última instancia, para los estudiantes que tengan ganas de conocer en profundidad las ideas científicas. A buen seguro que el libro provocará polémicas, ya que trata en esencia de la evolución del lenguaje científico, buscando en el pasado las causas de la obsolescencia de algunas ideas, para lo cual es necesario analizar la influencia cultural, social y política sobre el desarrollo de la Ciencia.

Los ejemplos que los autores ofrecen en el libro son todos muy atractivos y servirán como embrión para construir un espacio académico para la discusión de dichos conceptos obsoletos, donde maestros y estudiantes se lancen en su búsqueda para erradicarlos, y construyan un lenguaje científico más claro y coherente.

Manuel Yuste Llandrés, UNED (España)

INTRODUCCIÓN

Las ciencias naturales se encuentran en desarrollo permanente, el cual se asemeja de cierta manera al desarrollo de los sistemas biológicos. Cada ser humano que aprende o enseña ciencias naturales asimila hechos, los procesa y transmite de manera incompleta, por diferentes causas:

- porque dichos procesos no están exentos de dificultades y errores,
- porque lo que se considera importante cambia con el tiempo,
- porque la investigación revela continuamente nuevos resultados.

Desde hace mucho tiempo los diferentes conocimientos sobre las ciencias naturales se han incrementado de tal forma que solo es posible enseñarlos de manera parcial. Un investigador o usuario conoce de manera precisa únicamente una pequeña parte de ellos, el resto solamente grosso modo. Quien enseña conocimientos básicos suele tener poca o ninguna oportunidad de examinar la actualidad científica o de mejorarla; por esta razón hay menor “presión selectiva” para actualizar dichos conocimientos, y lo nuevo se agrega a lo conocido sin tocar la base. Cualquier cambio significa un esfuerzo adicional frente al cual se presenta cada vez más resistencia y falta de motivación, ya que, cuanto más complejo es un sistema más conservador se vuelve.

Como consecuencia de ello los conocimientos básicos de una ciencia natural reflejan su desarrollo histórico, el cual en cierta forma es repetido por el estudiante. El proceso de aprendizaje se desarrolla, hasta en detalles, según el mismo esquema de la evolución de las ciencias naturales, lo que recuerda la regla básica biogeética de E. Haeckel, según la cual el crecimiento embrionario de un ser vivo representa una abreviada repetición de la historia de su especie. El desarrollo histórico “no lineal” de las ciencias y ciertas ideas que en un contexto moderno se revelan como inapropiadas, se han conservado hasta el día de hoy; errores evidentes han podido sobrevivir durante décadas porque la cantidad de información nueva ahoga la atención sobre aquellos. Tradiciones educativas y viejas costumbres obnubilan la mente y una serie de prejuicios frenan la motivación para realizar cambios, por lo cual se exige una particular atención para detectar y reconocer dichas incongruencias, las cuales hemos agrupado bajo el nombre genérico de “conceptos obsoletos”.

Existen “conceptos obsoletos” de naturaleza muy diferente: pequeños y grandes, muy antiguos y otros que

acaban de crearse. Hay “conceptos obsoletos” que consisten solo en una palabra mal empleada o seleccionada y otros que se refieren a un concepto básico de las ciencias naturales. Algunos temas se volvieron “obsoletos” porque nuestras ideas respecto a las bases de la Física cambiaron, otros solamente porque las técnicas experimentales mejoraron.

Queremos atraer la atención hacia este tipo de “conceptos obsoletos” y la manera de deshacerse de ellos, con una serie de artículos breves, que estarán identificados por un número y un título y tendrán la misma estructura general. Primero se presenta el objeto de estudio (Tema) y luego se analizan las principales fallas que tiene la representación usual (Defectos). A continuación, en lo posible, se habla de la procedencia del “concepto obsoleto” (Origen) y finalmente se propone cómo deshacerse de él (Eliminación). Cuando sea necesario se incluirán algunos comentarios y citas bibliográficas (Referencias).

Algunos de estos artículos pondrán en duda la “doctrina” actual de la enseñanza de la Física. No todos nuestros lectores clasificarán un tema u otro como concepto obsoleto, seguramente es cuestión de juicio individual definir si una determinada temática se presenta, dentro del proceso de enseñanza-aprendizaje, como inapropiada o superflua. Por supuesto, no esperamos que cada lector juzgue como nosotros. Dada la brevedad de los artículos, es probable que nuestra argumentación no pueda convencer a algunos lectores en la totalidad de sus partes. Nos gustaría poner en marcha una discusión sobre lo adecuado de los contenidos en la enseñanza de la Física y nos complacería animar a tantos como sea posible a buscar y eliminar “conceptos obsoletos”.

Los autores agradecen a Oscar Ocaña Gómez, profesor de la Licenciatura en Física de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, por sus comentarios y aportes en la revisión de los borradores.

Friedrich Herrmann, Universidad de Karlsruhe,
Karlsruhe, Alemania

Georg Job, Universidad de Hamburgo, Hamburgo,
Alemania

Nelson Arias Ávila, Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Bogotá, Colombia

CONTENIDO

1 TEMAS GENERALES

1.1 Los últimos secretos de la naturaleza	9
1.2 El yo, el observador y el buen Dios	10
1.3 Derivación y comprensión	12
1.4 ¿Existen magnitudes físicas en la naturaleza?	13
1.5 Historia de la física en las clases de física	14
1.6 ¿Cómo se fabrica? ¿Cómo se detecta?	15
1.7 El principio de causalidad en la física	16
1.8 Definiciones	17
1.9 ¿Es exacta la terminología técnica?	18
1.10 Léxico que oculta	20
1.11 Nombres compuestos de magnitudes físicas	21
1.12 Formulación original	22
1.13 Si una fuerza actúa sobre la carga de la masa, su momentum cambia	23
1.14 Transformaciones	24
1.15 Para qué la didáctica de la física	25
1.16 Autoras de libros de física	27
1.17 Mecánica y Termodinámica	27
1.18 Medición directa e indirecta	28
1.19 La exactitud de la medición	29
1.20 La variable independiente	30
1.21 Leyes de conservación	32
1.22 Sistemas aislados	32
1.23 Partículas en todas partes	34
1.24 Interacciones	35
1.25 El reloj de cuarzo y el contador GEIGER	36
1.26 Acciones a distancia	37
1.27 Los efectos de las fuerzas y de las corrientes eléctricas	38
1.28 Curvas características lineales	39
1.29 Falsos amigos	40
1.30 Para qué hacerlo fácil si se puede hacer difícil	41
1.31 Campos de fuerza	42
1.32 Resistencias equivalentes	43
1.33 La dualidad onda-partícula	44
1.34 Masa y materia	46

2 ENERGÍA

2.1 Formas de energía	48
2.2 La potencia	48
2.3 La ley de conservación de la energía	49
2.4 ¿Dónde está la energía?	50
2.5 El móvil perpetuo	51

9	2.6 Pura energía	52
48	3 MECÁNICA	54
3.1 Las leyes de NEWTON	54	
3.2 Equilibrio de fuerzas y tercera ley de NEWTON	54	
3.3 La tercera ley de NEWTON	55	
3.4 La tercera ley de NEWTON (por tercera vez)	56	
3.5 Tira y afloja	58	
3.6 La fuerza en el tablero	59	
3.7 El principio de superposición	61	
3.8 El momentum como producto de la masa y la velocidad	63	
3.9 Momentum y choques	64	
3.10 La cantidad de movimiento: una magnitud relegada	64	
3.11 La dirección de las corrientes de momentum	66	
3.12 Corrientes de momentum en conductores estacionarios	68	
3.13 Dirección de la corriente de momentum y cambio del sistema de referencia	70	
3.14 El impulso	72	
3.15 La definición de la fuerza	73	
3.16 Una idea intuitiva de fuerza	74	
3.17 Fuerza central y fuerza centrípeta	75	
3.18 La fuerza centrífuga	77	
3.19 Aceleración de la gravedad	78	
3.20 Punto de aplicación y línea de acción	80	
3.21 Presión y fuerza	80	
3.22 La polea y el sentido de la fuerza	81	
3.23 Velocidad instantánea y velocidad media	83	
3.24 La aceleración	84	
3.25 Movimiento con velocidad constante	85	
3.26 Constantes de movimiento	87	
3.27 Ecuaciones de movimiento	88	
3.28 El punto en la mecánica	89	
3.29 La fricción estática	90	
3.30 Transmisión de la fuerza, de un par de fuerzas y de la potencia	91	
3.31 Energía potencial	92	
3.32 Una vez más, la energía potencial	94	
3.33 La ley de conservación del momentum angular	96	
3.34 La presión dinámica	97	
3.35 El vuelo del avión	98	
3.36 La caída del gato	99	

4 FÍSICA RELATIVISTA

	102		
4.1 El nombre teoría de la relatividad	102	5.23 Energía libre	149
4.2 Los postulados de la teoría de la relatividad	103	5.24 Calor latente y calor sensible	152
4.3 Sistema de referencia inercial y ley de inercia	103	5.25 Exotérmico y endotérmico	153
4.4 El modo de escribir la ecuación $E = mc^2$	106	5.26 ¿Qué es la energía en realidad? ¿Qué es la entropía en realidad?	155
4.5 La equivalencia masa-energía	107	5.27 Calor de evaporación, energía de evaporación, entalpía de evaporación	156
4.6 Masa, masa en reposo, masa invariante, masa relativista, energía, energía en reposo y energía interna	107	5.28 Escalas preliminares de temperatura	158
4.7 Masa longitudinal y transversal	108	5.29 Dilatación térmica de líquidos y sólidos	159
4.8 Velocidad de la luz o velocidad límite	110	5.30 Magnitudes de estado	159
4.9 ¿La paradoja de los gemelos en la escuela?	111	5.31 Tres formas de transferencia de calor	160
4.10 Teoría de la relatividad y cambio de sistema de referencia	114	5.32 La ley de los gases ideales	162
4.11 Dilatación, contracción, expansión	115	5.33 La ley de los gases ideales y las magnitudes olvidadas entropía y potencial químico	163
4.12 Movimientos en el espacio-tiempo	117	5.34 Calor y capacidad calorífica	165
4.13 Relatividad de la simultaneidad	118	5.35 Las ecuaciones adiabáticas	166
4.14 Suma o adición de velocidades	119	5.36 Radiación térmica	167
4.15 Corrección GPS y la teoría de la relatividad general	119	5.37 Expansión libre en el vacío	169
4.16 El éter y el vacío	120	5.38 La máquina de vapor	169
4.17 El espacio absoluto	121	5.39 Evaporación y ebullición	171
4.18 El espacio-tiempo absoluto	122	5.40 Refrigeración con nitrógeno líquido	172
		5.41 Clima marítimo y clima continental	173
		5.42 La transmisión del calor a través de la atmósfera	174
		5.43 La estratificación de la atmósfera por temperaturas	175
	124	5.44 La fórmula barométrica	176
		5.45 Estrellas fugaces y cápsulas espaciales	178
5.1 Entropía	124	5.46 Temperatura y energía cinética de las partículas	180
5.2 El segundo principio	124	5.47 Distribución de MAXWELL-BOLTZMANN	181
5.3 Medición de la entropía	127	5.48 Microscópico versus macroscópico	182
5.4 Nuevamente: la medición de la entropía	128	5.49 El modelo de partículas	184
5.5 El tercer principio de la Termodinámica	130		
5.6 La ley cero de la Termodinámica			
5.7 La entropía como medida de la irreversibilidad	131		
5.8 El aumento de la entropía al mezclar pimienta y sal	132	6 ELECTRODINÁMICA	186
5.9 Entropía y vida	133	6.1 Simetrías en el electromagnetismo	186
5.10 Entropía negativa y neguentropía	134	6.2 Déficit y exceso de electrones	188
5.11 La entropía de mezcla	136	6.3 Dos tipos de carga eléctrica	189
5.12 ¿Nada de temperatura, nada de entropía?	137	6.4 El sentido convencional de la corriente eléctrica	190
5.13 La entropía del universo	138	6.5 Polos magnéticos	191
5.14 Equivalencia entre calor y trabajo	139	6.6 La curva de histéresis	192
5.15 El principio de mínima energía	140	6.7 Monopolo magnético y carga magnética	193
5.16 Energía útil	141	6.8 El campo de los imanes permanentes	194
5.17 La degradación de la energía	142	6.9 Electroimanes	196
5.18 Rendimiento de CARNOT	144	6.10 La permeabilidad magnética	197
5.19 Rendimiento y factor de CARNOT	144	6.11 La inductancia	199
5.20 El ciclo de CARNOT	146	6.12 El campo como región del espacio con propiedades	200
5.21 Energía interna y calor	147	6.13 Superficies equipotenciales	202
5.22 Energía térmica	148		

5 TERMODINÁMICA

5.1 Entropía	124		
5.2 El segundo principio	124		
5.3 Medición de la entropía	124		
5.4 Nuevamente: la medición de la entropía	127		
5.5 El tercer principio de la Termodinámica	128		
5.6 La ley cero de la Termodinámica	130		
5.7 La entropía como medida de la irreversibilidad	131		
5.8 El aumento de la entropía al mezclar pimienta y sal	132	6 ELECTRODINÁMICA	186
5.9 Entropía y vida	133	6.1 Simetrías en el electromagnetismo	186
5.10 Entropía negativa y neguentropía	134	6.2 Déficit y exceso de electrones	188
5.11 La entropía de mezcla	136	6.3 Dos tipos de carga eléctrica	189
5.12 ¿Nada de temperatura, nada de entropía?	137	6.4 El sentido convencional de la corriente eléctrica	190
5.13 La entropía del universo	138	6.5 Polos magnéticos	191
5.14 Equivalencia entre calor y trabajo	139	6.6 La curva de histéresis	192
5.15 El principio de mínima energía	140	6.7 Monopolo magnético y carga magnética	193
5.16 Energía útil	141	6.8 El campo de los imanes permanentes	194
5.17 La degradación de la energía	142	6.9 Electroimanes	196
5.18 Rendimiento de CARNOT	144	6.10 La permeabilidad magnética	197
5.19 Rendimiento y factor de CARNOT	144	6.11 La inductancia	199
5.20 El ciclo de CARNOT	146	6.12 El campo como región del espacio con propiedades	200
5.21 Energía interna y calor	147	6.13 Superficies equipotenciales	202
5.22 Energía térmica	148		

6.14 ¿Dónde está el campo?	204	9 FÍSICA DEL ESTADO SÓLIDO	252
6.15 Campo conservativo y no-conservativo	205		
6.16 La carga de prueba	206	9.1 Corrientes de difusión y de deriva	252
6.17 Tensión mecánica en los campos eléctrico y magnético	207	9.2 El diodo semiconductor como rectificador	253
6.18 Las líneas cerradas del campo magnético	208	9.3 El diodo semiconductor como célula fotoeléctrica	254
6.19 Los polos magnéticos de un solenoide	210	9.4 El efecto fotoeléctrico	254
6.20 La ley de LENZ y el signo “menos” en la ley de inducción	212	9.5 Determinación de la constante de PLANCK por medio de diodos luminosos	257
6.21 Dos causas para la inducción electromagnética	213		
6.22 Tensión de inducción	216	10 ASTROFÍSICA	261
6.23 El campo de dispersión del transformador	218		
6.24 El oscilador de HERTZ	221	10.1 El diagrama de HERTZSPRUNG-RUSSEL	261
6.25 El vector de POYNTING y el tensor de MAXWELL	221	10.2 Fotones en el sol	262
6.26 La chispa de encendido y la radiación electromagnética	222	10.3 Cómo funciona el Sol	263
6.27 Amplificadores	223	10.4 Enanas blancas – primera parte: ¿Equilibrio de presión o de fuerza?	264
		10.5 Enanas blancas – segunda parte: Rituales de explicación	266
7 OSCILACIONES Y ONDAS	225		
7.1 Frecuencia de resonancia y frecuencia propia	225	11 FÍSICA ATÓMICA, NUCLEAR Y CUÁNTICA	268
7.2 La fuerza recuperadora	225		
7.3 Las diferencias de fase en las oscilaciones forzadas	227	11.1 Imágenes del átomo	268
7.4 Diapasón y caja de resonancia	228	11.2 Las capas electrónicas	268
7.5 Péndulos acoplados, oscilaciones acopladas y sincronización	229	11.3 El átomo vacío	270
8 ÓPTICA	231	11.4 Partículas indistinguibles	270
8.1 Los componentes de la luz	231	11.5 Uno y otro electrón	272
8.2 El principio de HUYGENS	232	11.6 Reglas de selección y transiciones prohibidas	273
8.3 El experimento de la doble rendija	233	11.7 Degeneración	273
8.4 Coherencia	235	11.8 El concepto de trayectoria en la mecánica cuántica	274
8.5 Luz no polarizada	237	11.9 El significado físico de la función de onda	275
8.6 Ondas electromagnéticas transversales	239	11.10 Orbitales atómicos	276
8.7 Óptica ondulatoria y óptica geométrica	240	11.11 Fuerzas de enlace	277
8.8 La relación entre senos en la óptica	241	11.12 Reacciones nucleares y radiactividad	278
8.9 La óptica con y sin imagen	242	11.13 El cuanto y la cuantificación	279
8.10 La radiancia	243	12 QUÍMICA	281
8.11 El sol y las lámparas espectrales	244		
8.12 Fotones y fonones	246	12.1 Procesos físicos y procesos químicos	281
8.13 La forma de los fotones	247	12.2 Energía química	282
8.14 El condensador óptico	248	12.3 Cantidad de sustancia y número de partículas	282
8.15 Luz monocromática	249	12.4 La constante de AVOGADRO	284
8.16 Colores primarios y el espacio de color	249	12.5 El potencial químico	285
8.17 Blanco y negro y el azul del cielo	250	12.6 La fuerza motriz de los flujos de sustancias: ¿densidad numérica de las partículas o potencial químico?	286

12.7 La fuerza motriz de los flujos de sustancias:	
flujos de sustancias a través de interfases	287
12.8 El equilibrio químico	288
12.9 Celdas electroquímicas	289
12.10 Electrolitos y semiconductores dopados	291
12.11 Contenidos en la enseñanza de la Química	292

1 TEMAS GENERALES

1.1 Los últimos secretos de la naturaleza

Tema

1 “If physicists could answer these questions, we would finally begin to comprehend how matter functions at its most fundamental level. [...] The technologies being developed today give us hope that by the time another 40 years roll around, we will have finally cracked the essential mystery of how matter, at its most fundamental level, is made.” [1]

Del mismo modo, aunque no siempre formulado de forma tan ampulosa, también lo escuchamos de otros físicos: en algún momentum, en un futuro no muy lejano, habremos resuelto el enigma, descifrado el código, etc.

Si los periodistas quieren hacerlo comprensible para el ciudadano de a pie puede sonar así:

2 “La esperanza es que con él [el LHC] se pueda descubrir la fórmula del mundo, una fórmula que explique lo que mantiene al mundo unido en su esencia”

3 o bien “En la búsqueda de los últimos secretos del universo, los investigadores pueden... utilizar el mayor acelerador de partículas del mundo.”

Defectos

El “nivel fundamental” (fundamental level), el “misterio esencial” (essential mystery), el “último secreto”, todo ello es expresión de un anhelo: que el mundo sea sencillo y transparente.

El hecho de que los científicos estén convencidos, y probablemente siempre lo han estado, de que pronto acabarán con su trabajo, se expresa también en los nombres que dan a los objetos y resultados de sus investigaciones: lo indivisible (átomo), la partícula elemental, la partícula puntiforme..., el principio, los “first principles”, la Teoría del Todo... Son todos conceptos que no pueden ser superados, que expresan un final. Los atributos “elemental”, “fundamental” y “de principio”, no pueden ser aumentados; más pequeño que puntiforme no es posible.

El hecho de que estas afirmaciones suelan provenir de físicos de partículas no significa que el punto de vista expresado en ellas no lo compartan también los físicos del estado sólido, del plasma y otros, y por supuesto también los legos en ciencia.

No es una idea nueva, ni mucho menos. Ha sido defendida por todas las generaciones de físicos. Las perspectivas de haber comprendido todo lo fundamental en algún momentum fueron a veces mejores y a veces peores, pero en general la situación no ha cambiado mucho. Hacia finales del siglo 19, en particular, el futuro de la ciencia parecía bastante prometedor. Con la termodinámica estadística y la electrodinámica de MAXWELL —James Clerk MAXWELL (1831–1879)—, que el propio MAXWELL entendía como una teoría esencialmente mecánica del éter, las perspectivas de que en un futuro no muy lejano todos los sucesos físicos pudieran remontarse a la mecánica, parecían buenas, y se creía que esto estaba perfectamente comprendido. PLANCK —Max Karl Ernst Ludwig PLANCK (1858–1947)—, invitado a una conferencia en la Universidad de Múnich en 1924, señaló lo lejana que estaba dicha idea [2].

Y hoy, es decir, otros 90 años después, tenemos aún más material para demostrar que esas previsiones no se cumplen. Lo sabemos porque hemos visto lo que vino después. Conocemos el futuro de entonces, pero no conocemos el futuro de hoy. Y si queremos aprender algo del pasado, no solo debería ser la idea de que fue prematuro concluir que la física culminaría pronto, sino también que tal conclusión sería hoy muy imprudente, ya que no conocemos el futuro. Más concretamente, se podría decir: se puede aprender del pasado de la ciencia que cada problema resuelto produce al menos uno nuevo por resolver.

Esta extrapolación no es tan descabellada como la expectativa de que pronto habremos llegado al final.

Origen

Puede haber varias causas.

- Una explicación sencilla podría ser: cada uno necesita algo que le motive para hacer su trabajo. Cuando uno sube una montaña, quiere tener la certeza de que la

El yo, el observador y el buen Dios

- montaña tiene una cima. El llegar a la cima es lo que nos satisface, lo que nos recompensa por el esfuerzo.
- La expectativa de llegar finalmente al fondo de la naturaleza es la expresión de un anhelo: el anhelo de seguridad. Aparentemente, una sólida competencia no protege contra las expectativas ingenuas. La creencia de que existe una explicación física final y exhaustiva para todo solo puede compararse con la creencia en un Dios omnipotente cuya omnipotencia no necesita más explicación. La pregunta sobre cómo funciona Dios no se considera legítima y, por tanto, no se plantea.
 - Por último, la mercadotecnia. Los equipos son caros. Hay que hacerles un poco de publicidad. Eso es comprensible. Se podría opinar que la física de partículas no es básicamente más apasionante que, por ejemplo, la química en el siglo 19, cuando quedó claro que la infinita variedad de sustancias podía explicarse con la ayuda de muy pocas sustancias básicas. Fue una gran revelación, pero se consiguió de forma algo más barata.

Los aparatos de física del estado sólido, optoelectrónica, etc. son menos costosos. Y los físicos implicados solo pueden prometernos una mejor memoria para nuestro teléfono inteligente o similar (que luego tendremos que pagar nosotros).

Es diferente para la física de partículas. La infraestructura necesaria es especialmente costosa y resuelve problemas que ella misma ha creado. Por fin sabemos de dónde viene la masa, nos dicen. El ciudadano de a pie casi se avergüenza de no haber tenido nunca este problema.

Hay que justificar el gasto de dinero y, por tanto, se promete al ciudadano lo trascendente. Ya no cree realmente en Dios, así que en su lugar tiene las últimas partículas elementales sin estructura o la Teoría del Todo.

Se puede perdonar que los periodistas a veces exagernen un poco; al fin y al cabo, tienen que contentar a sus lectores.

Eliminación

La física de partículas es una de las áreas de la física en la que se están superando los límites de la física anterior. Es costoso, pero una sociedad que vive en la abundancia puede y debe permitirse los aceleradores y telescopios. Solo por favor: con un paradigma diferente. Cada problema resuelto crea al menos uno nuevo. ¿Es tan difícil de soportar esta visión? ¿No es una motivación mucho más fuerte para hacer física que la esperanza de que se acabe la investigación, incluida la física de partículas? De todos modos, la satisfacción de haber llegado a la cima de la montaña no duraría mucho.

Eso puede recordarnos a Sísifo. Pero la comparación no encaja: Sísifo hizo rodar la piedra por la misma montaña una y otra vez. Pero esto no se corresponde con los problemas siempre nuevos de la ciencia natural. Cada nueva altura alcanzada abre una vista más lejana y hermosa.

Referencias

- [1] Sci. Am. May 2015, p.34f.
- [2] M. Planck, *Vom Relativism zum Absoluten*, Gastvorlesung in der Universität München am 1. Dezember 1924, in „Wege zur Physikalischen Erkenntnis. Reden und Vorträge“, Band 1, S. Hirzel Verlag, Leipzig, 1944, p.142: *“Cuando comencé mis estudios de física y pedí consejo a mi venerable profesor Philipp v. Jolly sobre las condiciones y perspectivas de mis estudios, me describió la física como una ciencia muy desarrollada, casi totalmente madura, que, ahora que el descubrimiento del principio de conservación de la energía la había coronado en cierta medida, pronto habría asumido su forma estable y definitiva. Todavía podría haber una mota de polvo o una burbuja que examinar y clasificar en una u otra esquina, pero el sistema en su conjunto era bastante fiable, y la física teórica se acercaba notablemente al grado de perfección que la geometría, por ejemplo, había poseído durante siglos. Hace cincuenta años, esta era la opinión de un físico que estaba a la altura de su tiempo.”*

1.2 El yo, el observador y el buen Dios

Tema

En la Física, el “observador” desempeña un papel importante, a diferencia de la Química o la Biología, por ejemplo. En las conversaciones sobre fenómenos físicos, el observador suele convertirse en el “yo”. “Veo la vara del metro acortada”, “para mí la vida del muón es...”, “cuando conduzco por una curva cerrada me empujan hacia un lado”.

En la física cuántica, el papel del observador es aún más importante: es él (sí, el observador es aparentemente siempre masculino) quien gusta de hacer mediciones, perturbando así de alguna manera el sistema sobre el que esta midiendo.

Defectos

En la Física se utilizan dos perspectivas del mundo, que explicaremos con un ejemplo sencillo, la idea que tenemos sobre la tierra.

La tierra desde una perspectiva cotidiana

Solo se ve una pequeña parte de ella, limitada por el horizonte. Además, lo que está lejos parece pequeño; lo que está cerca parece grande. En pueblos pequeños, desde la casa se puede ver la torre de la iglesia del pueblo vecino, se ve en un ángulo de 1° . Se puede ver la torre de la iglesia del propio pueblo a 20° .

Cuando se adopta este punto de vista en Física se habla de “observación”; uno es “el observador”.

La tierra desde la perspectiva del conocedor

En este caso surge una idea muy diferente: la tierra es una esfera, las dos torres de las iglesias tienen la misma altura; tanto los europeos como los australianos tienen los pies “en el suelo”... También se podría decir que así es como el buen Dios ve la tierra y nosotros intentamos hacer lo mismo. El buen Dios no necesita un lugar de observación concreto, para él no existe ningún horizonte, ni siquiera un momentum concreto de observación. Y cuando imagina un sistema mecánico cuántico, no lo perturba midiéndolo.

¿Cuál de las dos perspectivas es la de la Física? Quizá se podría pensar que es su preocupación por ver el mundo como lo hace el buen Dios. Así pues, no se está limitado por los horizontes, la simetría del mundo real no se rompe por la arbitrariedad de los sistemas de coordenadas y otros sistemas de referencia, el átomo de hidrógeno no se ve perturbado por una medición.

Pero la Física no es así, ni debería serlo. Porque los físicos deben o quieren describir lo que ve una persona, una persona a la que les gusta llamar observador; un “yo”, en otras palabras. Tienen que especificar cómo se pueden probar sus afirmaciones. La regla graduada del metro es lo que es, pero la Física también debería decírnos cómo aparece. Parece más corta desde una gran distancia, y también parece más corta de cerca cuando se mueve rápidamente.

Sin embargo, una consecuencia de esto es que la descripción del mundo se vuelve más complicada de lo que sería sin este requisito. Pero como nosotros, y también los físicos, somos seres humanos y no Dios, la descripción de los efectos implicados en la observación es indispensable. Entonces, ¿cuál es la crítica?

El punto de vista del observador, del experimentador, del “yo”, juega un papel demasiado importante en el discurso físico y especialmente en la enseñanza.

Una parte considerable de la dificultad que tiene cualquier persona con la relatividad especial proviene simplemente de la respuesta a la pregunta de cómo aparece la longitud de un objeto para algún observador, o la duración entre dos eventos. Una cantidad considerable

de tiempo de clase se dedica a describir los artefactos que resultan de la elección y los cambios de los marcos de referencia. Una consecuencia fatal en este caso es que los alumnos ni siquiera se dan cuenta de que hay cambios reales de longitud en el mismo contexto, es decir, en la relatividad, por ejemplo, la distancia entre los espejos de un detector de ondas gravitacionales.

De forma similar ocurre en la física cuántica. El átomo de hidrógeno podría ser tan simple. Pero, por supuesto, también se quiere discutir lo que un observador “ve” y mide. Y se supone que el observador quiere saber dónde está exactamente un electrón en cada momentum. Así que se deja que el observador haga una medición de la posición, destruyendo el bello y simple estado del átomo no perturbado.

Otro ejemplo: la materia cae en un agujero negro. Nosotros, las personas y observadores que vivimos en el exterior, “vemos” que la materia que cae hacia el horizonte se hace cada vez más lenta y nunca llega al horizonte. Un observador imaginario, que cae junto con la materia en caída libre, atraviesa el horizonte sin darse cuenta de nada. ¿Cómo encaja todo esto? No es muy diferente de los campanarios de las iglesias. Si se quiere saber cómo es el mundo, no hay que preguntar por lo que ven los diferentes observadores, sino por la descripción física del propio objeto, que lo dice todo. Por supuesto, también nos dice lo que ven y experimentan los distintos observadores, pero esto son solo detalles. Sirven menos para entender el mundo que para entender el oficio del físico.

Origen

Possiblemente por la tradicional actitud positivista de las ciencias naturales, solo se acepta lo que se puede medir y verificar. Es una actitud razonable. En cierto sentido, un comportamiento adecuado que es un requisito previo para que las ciencias naturales puedan hacer afirmaciones más vinculantes que muchos otros campos de la ciencia. Pero ciertamente es igual de razonable suponer que las cosas, los objetos de nuestra observación, los sistemas físicos, existen aunque no los observemos ni midamos.

Probablemente fue incluso peor en el pasado. Los mayores recordarán que, cuando eran estudiantes, no solo tenían que saber lo que media el observador, sino que debían ser capaces de recitar en el examen el funcionamiento del instrumento de medida, el galvanómetro, el medidor de fuerza y el contador GEIGER.

Eliminación

Se recomienda utilizar el término observador con moderación. Dar preferencia a las descripciones que son

Derivación y comprensión

independientes del observador. El “yo” puede, por supuesto, hacer que una cosa sea vívida, especialmente en la presentación oral, pero en realidad no debería aparecer en nuestros argumentos.

Especialmente en la escuela, en la relatividad especial, dejemos de lado de momentum las transformaciones de LORENTZ, y en la física cuántica las permanentes mediciones.

resultado de la derivación pueda entenderse fácilmente. Un ejemplo de ello es la descomposición de FOURIER —Jean-Baptiste Joseph FOURIER (1768–1830)—. La demostración del proceso es demasiado complicada para la escuela, por lo que este tema no aparece en las lecciones escolares. Sin embargo, si el procedimiento se estudia con la ayuda de una sencilla aplicación informática, la serie de FOURIER puede entenderse ya en la escuela media.

Por supuesto, es satisfactorio derivar toda la electrodinámica de las ecuaciones de MAXWELL —James Clerk MAXWELL (1831–1879)—. El empeño de los físicos por la axiomática, es decir, por la derivación de todas las fórmulas a partir de unas pocas que la naturaleza nos presenta aparentemente sin justificación, es humanamente comprensible. Esta relacionado con la búsqueda de los “primeros principios”, las verdades últimas, las partículas más elementales, las ecuaciones más definitivas.

Abandonar temporalmente la rigurosidad no significa privar a la física de su exactitud. La ecuación que simplemente escribimos en la pizarra y cuyo enunciado hacemos plausible es una relación matemática, es exacta en el sentido que queremos para un objetivo concreto.

1.3 Derivación y comprensión

Tema

Al tutelar trabajos de grado de licenciatura y maestría, así como en algunos exámenes, se observa que a los estudiantes les gusta “deducir”.

Esta tendencia también se acentúa en las clases en la escuela: una relación recién introducida entre magnitudes físicas debe derivarse o inferirse a partir de un experimento.

Defectos

No preocupa aquí la filosofía de la ciencia, sino algo más modesto: ¿cuál es la mejor manera de llegar a la comprensión de una relación entre magnitudes físicas, es decir, a la comprensión de una ecuación o fórmula?

A menudo se tiene la impresión de que la principal preocupación en la enseñanza de la física es demostrar la validez de una ecuación. Con eso, parece que uno ha cumplido con su deber; es decir, el deber de conseguir que algo sea comprendido.

- 1 La “demostración” puede hacerse de dos maneras: derivando la ecuación,
- 2 probándola en un experimento.

Ahora bien, basándonos en décadas de experiencia en el manejo de los problemas de los estudiantes, se puede afirmar que la real comprensión no se consigue en absoluto con la demostración de una ecuación. En muchos casos se observa que, a pesar de una correcta derivación, los alumnos no tienen la más mínima comprensión de la ecuación en cuestión. Incluso ocurre que, aparte de la derivación, no han entendido ni lo que se derivó ni de lo que se derivó. Así que no han entendido nada más que la manera mecánica de calcular.

Además, en muchos casos la derivación es más difícil de entender que lo derivado (así como un teléfono inteligente o un automóvil en general son más fáciles de entender que su proceso de fabricación).

Además, si el proceso de derivación es demasiado difícil, se debe renunciar a ese tema en la escuela, aunque el

Origen

Se puede suponer que existen varias causas:

- Calcular hace que no tengamos que pensar mucho. Es más cómodo hacer un cálculo que entender la física que hay detrás de una ecuación.
- Hasta no hace mucho tiempo —mientras no había ordenadores— el cálculo analítico era la herramienta más importante para la descripción exacta de los hechos físicos. Sin embargo, el análisis como herramienta de la física podría correr pronto la misma suerte que la geometría en el pasado. En la época de GALILEO —GALILEO di Vincenzo Bonaiuti de' Galilei (1564–1642)—, la geometría se consideraba el único medio fiable para describir con exactitud un fenómeno físico. (“Quien entiende la geometría es capaz de entender todo lo que hay en este mundo” o “La naturaleza habla el lenguaje de las matemáticas: las letras de este lenguaje son triángulos, círculos y otras figuras matemáticas”). Esto cambió completamente después de que NEWTON —Isaac NEWTON (1643–1727)— introdujera el cálculo diferencial.

Se podría objetar con KANT —Immanuel KANT (1724–1804)— que “... toda ciencia natural pura solo contiene tanta ciencia real como matemáticas puedan aplicarse a ella”. Eso es cierto, pero las matemáticas no son solamente la derivación de una cosa a partir de otra.

- En las clases de física, es tradicionalmente importante que no se diga nada que no esté demostrado. Para

¿Existen magnitudes físicas en la naturaleza?

muchos autores de libros de texto clásicos sobre física experimental, este énfasis era casi obsesivo. El profesor no podía decir nada en el aula de clase que no hubiera demostrado mediante un experimento. Ahora la cuestión es si los estudiantes en las clases dudan de su credibilidad con cada nueva afirmación. Al fin y al cabo, la reputación de la física no da motivos para ello, en contraste con otras asignaturas escolares y universitarias, en las que una escuela de pensamiento, una moda o una ideología sustituyen a otra, y en las que apenas se pueden hacer derivaciones o experimentos.

Eliminación

Lo más importante al introducir una nueva fórmula es discutirla en sí, para que al final los alumnos tengan la impresión de que podrían haberla escrito ellos mismos.

He aquí un ejemplo sencillo de la escuela, para la energía cinética, la ecuación:

$$E_{\text{cin}} = \frac{m}{2} v^2$$

La derivación a partir de otra ecuación conocida y familiar, por ejemplo, de:

$$\Delta E = F \cdot \Delta s$$

es complicada, ya que se debe integrar, y es posible que aún el estudiante no disponga de conocimientos de cálculo integral. Además, la integración corresponde a un proceso físico que no juega ningún papel en el resultado final.

De hecho, la ecuación, o al menos su parte esencial, puede obtenerse sin cálculos con un poco de sentido común. En primer lugar, se hace notar que la contribución energética que se busca depende de la masa y de la velocidad, y de nada más. Entonces es fácil colegir que la energía debe ser proporcional a la masa, porque la energía es una magnitud extensiva, y por tanto en el lado derecho de la ecuación también debe haber una magnitud extensiva a la primera potencia. (A la misma velocidad, dos cuerpos con la misma masa deben tener el doble de energía cinética que un solo cuerpo.) Por último, la dependencia de v . La energía es ciertamente independiente de la dirección del movimiento, o en una dimensión, del signo de la velocidad. La función más sencilla que sirve para esto es v^2 . Incluso hay un argumento para el factor $1/2$. Si ya se han discutido otras fórmulas de energía, este factor ya se ha encontrado una o más veces: en la energía que se almacena al tensar un resorte, en la energía de un condensador o de una bobina.

Una recomendación para las derivaciones en la universidad, donde el número de pasos de cálculo puede ser considerablemente mayor: intentar interpretar cada resultado intermedio, porque cada resultado intermedio también es una enunciación física.

Por último, una alternativa a la derivación es el *software* de modelización. Esta herramienta no se utiliza lo suficiente en las clases de física y es fácil aprender a utilizarla. Proporciona una buena comprensión y conduce a una penetración lógica de los procesos físicos liberándonos del trabajo de cálculo.

1.4 ¿Existen magnitudes físicas en la naturaleza?

Tema

En la literatura física, se encuentra el concepto de corriente de momentum. La magnitud física fuerza no es otra cosa que la intensidad de esta corriente de momentum, el tensor de tensión mecánica es idéntico al tensor de densidad de la corriente de momentum. En un informe de la Sociedad Alemana de Física (SAF) sobre el Curso de Física de Karlsruhe, se afirma que no hay corrientes de momentum en la naturaleza [1]. ¿Cuál es la verdad?

Defectos

Ambas, porque: 1. No existen en la naturaleza; 2. Existen en los libros de texto. Sin embargo, esta afirmación también se aplica a todas las demás magnitudes físicas. Una magnitud física es una variable en una teoría, que a su vez es una invención del hombre [2, 3].

En este sentido, en la naturaleza no solo no hay corrientes de momentum, sino tampoco corrientes eléctricas, ni fuerzas, etc.

La carga eléctrica no puede fluir; al igual que “una” masa no puede colgar de un resorte o un gas puede estar en “un” volumen. Los electrones pueden fluir, un cuerpo puede estar suspendido del resorte y el gas puede estar en un recipiente. Los electrones tienen una propiedad que describimos por su carga eléctrica, el cuerpo tiene una propiedad que describimos por su masa, y el gas esta en un recipiente que describimos por su volumen.

Se podría decir que es pedante argumentar de esta manera. Estaría bien tener razón; estaría bien que todo el mundo supiera que cuando hablamos de corrientes de cantidades físicas —de corrientes eléctricas, de masas o de energía— estamos utilizando un modelo. Si uno es consciente de esto, no hay nada malo en decir que la

História de la física en las clases de física

carga eléctrica fluye en el cable. Todos los físicos hablan así, y eso está bien. Pero por ello no debe haber ninguna objeción a la introducción de corrientes de momenum, ya sean convectivas o conductivas.

El hecho de que estemos operando con un modelo cuando hablamos de corrientes eléctricas o de energía no parece estar claro para todos los que utilizan estos términos.

Esto queda especialmente claro en el informe de la SAF en relación con el calor.

La cuestión de qué es el calor, qué es “realmente”, no solo se la plantean los expertos; es tan antigua como la física. Que era una pregunta errónea solo quedó claro cuando la física entró en una etapa más desarrollada. Pero incluso hoy, esta visión no ha llegado a todas partes.

La gente discutió durante mucho tiempo si el calor era una sustancia o el movimiento de partículas, como si no hubiera duda de que había algo en el mundo que era independiente de los seres humanos, que la gente llamaba entonces calor, o quería llamarlo así. Solo había que encontrarlo, había que descubrir el calor, y explorar sus propiedades poco a poco. De ahí la equivocación.

El hecho de que se hayan introducido toda una serie de magnitudes con la pretensión de medir lo que se llama o se quiere llamar calor en la vida cotidiana, así como en la física y la química, es considerado por algunos como un escollo particular de la termodinámica; como una de las razones por las cuales la termodinámica es en principio una asignatura difícil. Así, la medida de calor de los físicos es oficialmente la variable de proceso Q , pero para que el concepto de calor quede claro para los alumnos y estudiantes, también se recurre a la variable U , llamada energía interna. Para los químicos, la cantidad H , llamada entalpía, sigue siendo la medida más popular del calor.

Origen

Un enfoque poco acertado de los conceptos básicos de la ciencia natural.

Eliminación

Dejar claro desde el principio que las magnitudes físicas son inventadas, o más exactamente, construidas por el ser humano.

Referencias

[1] Informe de la Sociedad Alemana de Física sobre el Curso de Física de Karlsruhe: M. Bartelmann, F. Bühler, S. Großmann, W. Herzog, J. Hüfner, R. Lehn, R. Löhken, K. Meier, D. Meschede, P. Reineker, M. Tolan, J. Wambach y W. Weber.

[2] A. Einstein, L. Infeld: La evolución de la Física, rororo 1956, p. 29: “Los conceptos físicos son creaciones libres de la mente y no resultan necesariamente, como se tiende a creer fácilmente, de las condiciones del mundo exterior.”

[3] Falk, G., Ruppel, W.: Mechanik, Relativität, Gravitation, Springer-Verlag Berlin 1973, p. 2: “Finalmente, es erróneo suponer que la objetividad de la física consiste en que sus conceptos no tienen nada que ver con la imaginación humana o con los seres humanos. De hecho, las magnitudes físicas son invenciones de la mente humana que sirven para hacer manejable la desconcertante abundancia de fenómenos que nos rodean mediante reglas sencillas.”

1.5 Historia de la física en las clases de física

Tema

La historia de las ciencias naturales es una parte importante de nuestra cultura, y merece ser objeto de enseñanza. Aunque no se pueda hacer justicia a la historia de las ideas científicas en las clases de física debido a la falta de tiempo, al menos se intenta presentar los desarrollos más importantes de la ciencia y nombrar a los actores más influyentes. Cuáles son los investigadores que se nombran puede ser un indicador de cómo se trata la historia de la física.

Defectos

Ya a la hora de decidir qué investigadores se mencionan con qué obras, surgen problemas que están más o menos resueltos en los libros de texto.

1 Se nombran a algunos investigadores, aunque uno no decidiera hacerlo: todos aquellos que han tenido la suerte de que un efecto, una ecuación, una ley, una unidad de medida, una constante natural o un experimento lleven su nombre. No se quiere abordar aquí las razones que llevan a honrar a las personas de esta manera. En cualquier caso, el hecho tiene implicaciones que son problemáticas en dos aspectos.

Un enunciado físico nos parece más importante si tiene un nombre propio que si no lo tiene y, por tanto, a veces parece más importante de lo que realmente es.

Además, la asociación con su nombre puede hacer parecer que la contribución del científico homenajeado es más importante de lo que realmente sería apropiado.

Se presentan casos en los que, si no existiera esta conexión con el nombre de un investigador, ni si-

¿Cómo se fabrica? ¿Cómo se detecta?

quiera se mencionaría en clase al propio investigador, al efecto o la ecuación que lleva su nombre.

Algunos ejemplos son la serie BALMER, el efecto HALL, el contador GEIGER y la cámara de nubes de WILSON. Los numerosos nombres de la ley de los gases ideales ya se han tratado en [1].

Estamos acostumbrados a estos nombres y ya no nos preguntamos: ¿Por qué la relación $p \sim 1/V$ tiene un nombre propio, pero no la ecuación $p = m \cdot v$? ¿Por qué $F = D \cdot s$ tiene un nombre, pero no $\Phi = L \cdot I$, ó $Q = C \cdot U$? La regla de LENZ es probablemente la única regla cuyo enunciado no consiste más que en un signo. ¿Y las decenas de otros signos en otras ecuaciones?

- 2 Si se mira qué científicos se nombran explícita e intencionadamente, se verá que la elección se hace a veces de forma algo descuidada. Se puede ver sobre todo en el hecho de que algunos de los verdaderamente eminentes no suelen ser mencionados en absoluto, como, por ejemplo, EULER, DESCARTES, LEIBNIZ o GIBBS.

Es interesante en este contexto el tratamiento de las leyes de balance, es decir, la cuestión de si se puede establecer un balance para una magnitud y, en relación con ello, si esta conservada.

La conservación de la energía se suele discutir y se nombra a JOULE, MAYER y quizás a HELMHOLTZ como autores.

¿Cómo entró en la ciencia la convicción de que la masa se conserva? Solo se puede saber si se estudia química; entonces se aprenderá algo de LOMONOSOV y LAVOISIER. La física, en cambio, solo trata de la negación de la conservación de la masa: del defecto de masa.

Rara vez se dice algo sobre quién introdujo el momentum en la física y quién descubrió su conservación; por tanto, nada en este contexto sobre DESCARTES y HUYGENS. Y ni una palabra sobre la introducción del momentum angular, por lo que EULER, si acaso, solo es conocido como matemático.

- 3 Por último, otra “injusticia”: se menciona y elogia a varios investigadores importantes, pero por algo que no es su mayor mérito. Por ejemplo, HUYGENS por sus ondas elementales (en lugar del momentum) [2], Daniel BERNOULLI por la ecuación de BERNOULLI (pero no por su contribución a la introducción del momentum angular), CARNOT por su ciclo con los cuatro subprocesos de este (y no por la ingeniosa idea de comparar la máquina de calor con una rueda de agua) [3]. FARADAY es recordado sobre todo por los dispositivos un tanto curiosos de la copa de FARADAY y la jaula de FARADAY, así como por la unidad

de medida de la capacidad. También se sabe que descubrió la inducción, lo que sin duda fue un descubrimiento importante. El hecho de que introdujera el concepto de campo, o también se puede decir que descubriera el campo eléctrico y magnético, se suele pasar por alto.

Origen

Se puede examinar cada caso individual, encontrando cada vez una historia diferente. Pero de todo esto en conjunto se puede sacar una conclusión: las causas de la elección no siempre adecuada son la mera casualidad. Una ecuación recibe un nombre de forma parecida a como se nombran las calles por las personas que se consideran importantes en ese momentum o que tienen el *lobby* adecuado. Y una vez que se ha dado un nombre, este se mantiene.

Eliminación

Me siento incómodo en este contexto. Estoy convencido de que la historia de la física necesita una revisión exhaustiva, sobre todo teniendo en cuenta el poco tiempo disponible para ello en las clases de física. En cuanto a nombrar a los investigadores, recomiendo, en primer lugar, moderación, y en segundo lugar, ocupación con la historia de las ideas en la física.

Referencias

- [1] Véase 5.32 *La ley de los gases ideales*, p.162
- [2] Véase 8.2 *El principio de Huygens*, p.232
- [3] Véase 5.20 *El ciclo de Carnot*, p.146

1.6 ¿Cómo se fabrica? ¿Cómo se detecta?

Tema

El campo eléctrico se introduce a través de la fuerza sobre una carga de prueba.

La onda electromagnética se introduce a través del circuito oscilante abierto.

La función de onda se explica midiendo la probabilidad de encontrar la partícula en un estado con un valor exacto de posición.

La coherencia de la luz se introduce a través de las propiedades de la fuente luminosa.

Defectos

La introducción de un nuevo sistema u objeto físico suele comenzar explicando cómo realizarlo, o también cómo demostrar su existencia.

El principio de causalidad en la física

Esto tiene dos desventajas:

- A menudo se obtiene que los alumnos aprendan métodos de elaboración o detección. Las propiedades del propio objeto de observación no se asimilan.
- Así aprenden a obtener imágenes de líneas de campo y cómo un cuerpo ejerce una fuerza sobre otro con la ayuda del campo. Solo que el propio campo sigue siendo algo vago y abstracto. Apenas se plantea la cuestión de los valores de las magnitudes físicas estandar, como la densidad de energía, la presión, la temperatura o la entropía. Como si se supiera todo lo esencial sobre un campo eléctrico cuando se sabe qué fuerza se ejerce sobre un cuerpo de prueba.
- La explicación del proceso de generación suele ser más complicada que la descripción del objeto del que se trata. Un ejemplo es la introducción de la onda electromagnética a través del oscilador hertziano. Es extraordinariamente complicado y da la impresión de que sin un dipolo hertziano no se puede comprender una onda.

Este procedimiento se presenta con fenómenos o sistemas que se consideran complicados. Sin embargo, cabe preguntarse si la impresión de complejidad no es causada por la explicación indirecta.

Si se tuviera que explicar a alguien qué es el aire, seguramente no se empezaría hablando de la formación del aire en el transcurso de la historia de la Tierra, ni se empezaría explicando cómo se puede demostrar la existencia del aire midiendo su presión, por ejemplo.

Origen

Debido a las coincidencias históricas, la entidad o el fenómeno parecía inicialmente difícil. Surgió la impresión de que no se podía hablar de ello de la misma manera que se suele hablar de procesos o sistemas físicos. Así que se ofreció un procedimiento que ha demostrado su eficacia en otros contextos: la definición operacional. Se describe un procedimiento (una operación) con el que se realiza o se comprueba el fenómeno o el sistema.

Eliminación

Explicar el campo eléctrico y el magnético hablando de sus propiedades, especialmente de la densidad de energía y las tensiones mecánicas en los campos, pero también de la temperatura y la entropía.

Explicar la onda electromagnética hablando de las propiedades de una onda libre, comenzando con la onda sinusoidal plana.

Explicar la coherencia hablando de las propiedades de la luz coherente, en la ubicación de la luz que se

quiere caracterizar (la coherencia suele cambiar de una locación a otra).

Explicar la función de onda de un estado mientras no se altera por una medición, es decir, por una transición forzada a otro estado.

1.7 El principio de causalidad en la física

Tema

En los libros de física se suele mencionar el principio de causalidad solo en un lugar, para justificar la relación KRAMERS-KRONIG —Hendrik Anthony “Hans” KRAMERS (1894–1952) y Ralph KRONIG (1904–1995)—, es decir, en el contexto de un tema especial de la óptica del estado sólido, Fig. 1.1. Los estudiantes de la enseñanza de la física apenas tendrán nada que ver con él:

- “Hay que tener en cuenta que la conclusión de que $\epsilon(\omega)$ es regular en el semiplano superior es una consecuencia física del principio de causalidad.” [1].
- “Si se considera una relación lineal de este tipo en función de la frecuencia, es decir, en función del tiempo, debe cumplir la condición de causalidad;...” [2].

Defectos

Para un estudiante que nunca ha estudiado esta parte de la física, no hay ningún problema. Si se le pregunta por el principio de causalidad, responderá que es un concepto filosófico; que se aplique en la Física es natural, porque lo presupone toda teoría física. Pero el estudiante que escucha una conferencia sobre las propiedades ópticas de los sólidos, tiene un problema: de repente escucha al profesor decir que esta utilizando el principio de causalidad para el siguiente cálculo. ¿Tuvo que estudiar durante cinco semestres para llegar finalmente al punto en que el principio de causalidad se hace sentir en la física?

Origen

Probablemente sea un hábito transmitido de generación en generación.

Eliminación

Es cierto que no hay nada esencial que objetar al principio de causalidad en este punto. Pero si se piensa emplear un concepto completamente nuevo en una temática determinada, se podría haber abordado un poco antes su existencia. Y si uno se hubiera ocupado un poco de los fundamentos conceptuales de la física, se habría dado cuenta de que el principio de causalidad es efectivo en todas partes.

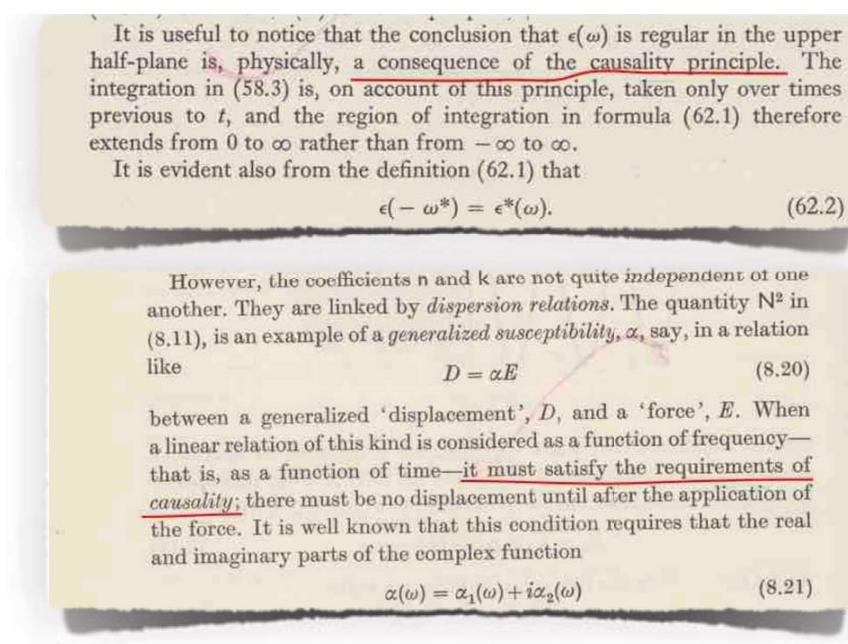


Fig.1.1 Tomado de dos libros de texto de física del estado sólido

Referencias

- [1] L. D. Landau und E. M. Lifshitz, *Electrodynamics of Continuous Media*, Pergamon Press, Oxford, 1960, p.257
- [2] J. M. Ziman, *Principles of the Theory of Solids*, University Press, Cambridge, 1969, p.222

1.8 Definiciones

Tema

Para hablar de un proceso físico es necesario tener claro el significado de los términos utilizados. Puede ser que se conozca el significado de un término, si no es así, se debe explicarlo, por ejemplo, con una definición, como la que figura al principio de la entrada correspondiente en un diccionario.

Una definición debe indicar claramente lo que incluye y lo que excluye. Los profesores acostumbran inclusive escribir la definición de un nuevo término en la pizarra a modo de mnemotecnia.

Defectos

Ocurre que semejante definición en general no es posible. Cuando se intenta definir, a menudo se presenta el siguiente dilema: se intenta una formulación, pero se descubre que incluye situaciones, sistemas o procesos que no son deseables que estén en ella. Así que se cambia la definición, el resultado es que ahora ya no contie-

ne elementos extraños, sino que excluye cosas que no debería excluir.

Como ejemplo, analicemos el concepto conocido en física como oscilación. ¿Qué es una oscilación?

He aquí algunos ejemplos de libros de física de la escuela superior:

- 1 “Las secuencias de movimiento en las que la dirección se invierte repetidamente y que parecen repetirse al cabo de cierto tiempo se denominan oscilaciones.”
 - 2 “Una oscilación mecánica es un movimiento temporalmente periódico de un cuerpo alrededor de una posición de equilibrio [...] Una oscilación es un cambio temporalmente periódico de magnitudes físicas.”
 - 3 “Nos encontramos con procesos periódicos de muchas maneras diferentes. Ya sea un columpio, una cuerda de guitarra, el voltaje en el enchufe o la presión sanguínea en nuestras venas, en todas partes una cantidad física cambia a un ritmo determinado. Cuando una magnitud física “oscila” hasta un determinado valor y más allá una y otra vez, se denomina oscilación. Los objetos que oscilan se llaman osciladores.”
- O de un libro universitario:
- 4 “Las oscilaciones pueden producirse cuando un sistema se desvía ligeramente de una posición de equilibrio estable. Lo notable de las oscilaciones es que su movimiento es periódico, es decir, se repite. Muchos fenómenos de oscilación nos resultan familiares: el vaivén de pequeñas embarcaciones, el vaivén de los

¿Es exacta la terminología técnica?

péndulos de los relojes y las vibraciones de las cuerdas y cañas de los instrumentos musicales. Además, hay ejemplos de oscilaciones que no nos resultan tan familiares: la oscilaciones de las moléculas de aire en las ondas sonoras y las oscilaciones de las corrientes eléctricas en los aparatos de radio y televisión.”

Comentarios sobre cada cita:

- 1 La definición es demasiado amplia. No toda secuencia de movimientos que se repite al cabo de cierto tiempo se llamaría oscilación, por ejemplo, el movimiento de un autobús entre sus dos terminales.
- 2 El criterio de periodicidad temporal excluye las oscilaciones amortiguadas.
- 3 Probablemente el autor se ha dado cuenta de que la definición no es fácil y ha optado por una conclusión. Simplemente declara que todo lo que es periódico es una oscilación. Sin embargo, no se refiere a lo que se entiende por una oscilación en física: la periodicidad por sí sola no indica una oscilación, además, la oscilación amortiguada quedaría de nuevo excluida. A continuación, trata de explicar el término diciendo que un oscilador es un objeto que oscila. Pero ¿cuál es el objeto oscilante en los casos citados? Por ejemplo, el voltaje en el enchufe. ¿Es el voltaje el objeto o el enchufe? ¿Es la sangre en las venas el oscilador?
- 4 Esta definición también excluye las oscilaciones amortiguadas. Por cierto, las moléculas de aire se mueven a unos 500 m/s entre dos impactos, se mueven con velocidad constante. La velocidad perteneciente a la vibración del sonido es de unos 0,5 mm/s. Llamar a este proceso oscilación de las moléculas no es acertado.

Además, en ninguna de las definiciones se indica si se incluye lo que en física se denomina oscilación forzada.

Cuando se define algo, es necesario suponer que se hace para alguien que aún no conoce el concepto. Este no es el caso en ninguna de las citas mencionadas.

Acá no se quiere mostrar la incompetencia de los autores con las citas, más bien se pretende corroborar:

- Lo difícil que es definir.
- Que obviamente no se necesita la definición porque a pesar de los intentos fallidos por obtenerla, todo el mundo sabe lo que se entiende por una oscilación en física.

Origen

Aquí no preocupa el origen del término definición, sino el deseo de definir. Posiblemente se deba al afán de certeza. La búsqueda de afirmaciones de un “solo bit” esta probablemente anclada en nuestros genes; los humanos (y los animales) a menudo tienen que tomar “decisiones de un bit”, como por ejemplo, huir o quedarse.

Por eso, las características que cambian continuamente suelen proyectarse en términos de sí-no. “El bien o el mal” (se puede ver en las discusiones políticas actuales) o “¿Qué es la vida?” Se quiere y se busca una verdad simple.

Eliminación

El hecho de que los “límites” sean difusos es normal para los términos del lenguaje cotidiano. En cuanto se quieren afinar, la definición se complica, se hace extensa y a menudo incomprensible, véase, por ejemplo, la jerga jurídica.

En la vida normal, sin embargo, la comunicación funciona bien sin definiciones precisas, e incluso teniendo en cuenta su vaguedad.

Y por último, se observa que la informática, que hasta hace poco se basaba en decisiones claras de sí o no, está desarrollando un nuevo poder en forma de redes neuronales e inteligencia artificial, es decir, procedimientos que funcionan sin definiciones inequívocas. El ordenador está entrenado, aprende como un niño, sin definiciones, pero a través de ejemplos.

¿Qué implica esto para la definición en el aula?

Se recomienda ser cauteloso a la hora de definir. En lugar de definiciones, los ejemplos suelen ser la mejor opción.

En el caso concreto de la oscilación, se sugiere abordar los procesos que se encuentran entre la oscilación y la no oscilación, esto puede requerir un poco más de tiempo, pero al final habrá valido la pena.

1.9 ¿Es exacta la terminología técnica?

Tema

- 1 “El léxico técnico-científico es monosémico y, como expresión solo de la objetividad de la ciencia, es denotativo y de significado fijo, es decir, unívoco.” [1]
- 2 “Término técnico...: designación fija y especial para algo bien determinado en una especialidad específica”. [2]
- 3 “La terminología técnica se distingue del lenguaje común entre otras cosas por el hecho de que sus conceptos son bien definidos, pero son válidos solamente en la especialidad considerada.” [3]

Defectos

Como se muestra en las citas anteriores, se da por hecho que la terminología técnica es un lenguaje exacto. Si se sabe a qué especialidad se refiere una proposición, esta

¿Es exacta la terminología técnica?

es unívoca, al menos esa es la opinión más extendida. Probablemente esa sea la opinión general entre los no especialistas; los especialistas por el contrario saben, o tendrían que saber, que eso no es correcto.

Son conocidos los diversos significados del término físico y técnico “fuerza”. En los siglos 17 y 18 el concepto de fuerza correspondía a lo que hoy día se llama momentum, pero también a lo que se llama energía mecánica, y finalmente a lo que hoy la mayoría llama fuerza. Se podría pensar que la causa de dicha ambigüedad radicó en el hecho de que en esa época no existía suficiente claridad al respecto, se estaba en un proceso de consolidación de conceptos; sin embargo, aun después el término seguía asignándose a conceptos distintos. Así, es posible encontrar en un libro publicado en 1912 lo siguiente: “Llamaremos al producto de la mitad de la masa y del cuadrado de la velocidad del peso movido, la fuerza viva.” [4]; incluso a veces hoy a la energía se le llama fuerza [5]. Cuando se hubiera podido clarificar la situación, surgió un nuevo pretendiente al nombre de fuerza; la termodinámica de los procesos irreversibles instituyó la palabra para sus fines como designación de los causantes de un proceso de transporte: “En el párrafo precedente hemos visto que existen varias causas para un fenómeno irreversible: p. ej. un gradiente de temperatura, un gradiente de concentración, un gradiente de potencial o una afinidad química. En la termodinámica de los procesos irreversibles estas magnitudes se llaman ‘fuerzas’...” [6]. Finalmente, también las antiguas expresiones “fuerza electromotriz” y “fuerza termoeléctrica”, para diferencias de potenciales, han sobrevivido hasta el día de hoy. Se podría pensar que ese trato poco cuidadoso con los términos fue cosa del pasado, de nuestros antecesores, pero no es así. Justamente en la actualidad es posible observar cómo la mencionada palabra se ve “acaparada” por otro grupo de especialistas, los físicos de partículas. No es fácil entender el porqué ellos llaman fuerzas a las cuatro interacciones [7]. “La interacción débil, frecuentemente llamada fuerza débil o fuerza nuclear débil, es una de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza.” [8] Aparentemente, aquí la palabra fuerza no se utiliza como nombre de una magnitud física.

El hecho de que la “transformación” del significado de un vocablo ocurra tanto hoy como antaño se puede observar en varios ejemplos y ocasiones.

Originalmente la palabra bit tenía un significado sencillo, dicho vocablo se había introducido como unidad de medición de la cantidad de datos o de información. Más tarde se revalorizó y fue empleado como sinónimo de “sistema de dos estados”, encontrándose en algunos casos en locuciones como “se pone el bit”. Esta “evolución” se “cuantizó” cuando al bit se juntó el qubit.

Otro ejemplo es el término “orbital”, el cual fue introducido como sustituto para la “órbita” del electrón que se consideró inapropiada. Entre tanto fueron agregándose dos significados más a la palabra, se utiliza para designar la función de onda monoelectrónica: “En la literatura química a las funciones de onda monoelectrónicas se les llama orbitales...” [9] y: “Cada una de estas funciones de onda monoelectrónicas deslocalizadas se denomina orbital molecular.” [10], y en algunos casos para el cuadrado de dicha función: “... se emplea la designación orbital atómico (orbital) para la probabilidad de encontrar un electrón en el átomo (distribución de la densidad electrónica).” [11], y: “ORBITAL... Función matemática que sirve para describir en términos de probabilidades el movimiento de los electrones alrededor de los núcleos atómicos.” [12].

A pesar de los esfuerzos de organismos como ISO, CGPM, DIN, IUPAP, e ICONTEC, entre otros, los términos técnicos no se emplean con un significado único, la terminología técnica no es tan exacta como a veces se hace creer.

A la terminología técnica le ocurre lo mismo que al lenguaje común, cambia y se desarrolla continuamente. Para el lenguaje común dicho cambio no solo es tolerable, sino necesario, fenómeno que en lingüística se conoce en general como cambio léxico-semántico. En la terminología técnica tales cambios a menudo traen consigo malentendidos y problemas en el proceso de enseñanza-aprendizaje, en particular cuando el profesor no es consciente de que se presentan tales ambigüedades.

Origen

El lenguaje técnico experimenta las mismas leyes lingüísticas que el lenguaje común, esto significa en particular que se desarrolla y cambia. Nuevos significados para los mismos términos se deben principalmente a un trato despreocupado del vocabulario técnico. Al inicio, cuando surge una nueva especialidad científica o técnica, se habla una “jerga” que no se considera definitiva, pero que rápidamente se transforma en lenguaje estandar.

Eliminación

Se sugiere no seguir cada “moda” o capricho de los representantes de una especialidad científica o técnica, así como no fomentar el uso de un término técnico que tenga varios significados. Por ejemplo, se debe distinguir entre la palabra “campo” para designar un sistema físico e “intensidad del campo” para una magnitud física. Si una palabra ya se ha establecido con varios significados y todos son indispensables, entonces se debe llamar la atención de los estudiantes sobre dicha coincidencia (ambigüedad).

Léxico que oculta

Referencias

- [1] J. Martín et ál., *Los lenguajes especiales*, Granada: Editorial Comares, 1996, p.115.
- [2] Duden, *Deutsches Universalwörterbuch*, Dudenverlag, Mannheim, 1989, Stichwort: Fachausdruck
- [3] Fachsprache. [en línea]. En: <http://de.wiktionary.org/wiki/Fachsprache> [consultado el 22 de noviembre de 2022].
- [4] E. Riecke, *Lehrbuch der Physik*, Verlag von Veit & Comp. Leipzig, 1912, S. 63
- [5] Véase 3.21 *Presión y fuerza*, p.80
- [6] S. R. de Groot, *Thermodynamik irreversibler Prozesse*, Bibliographisches Institut Mannheim, 1960, p.4
- [7] Véase 1.24 *Interacciones*, p.35
- [8] La interacción débil. [en línea]. En: http://es.wikipedia.org/wiki/Interacción_débil [consultado el 17 de junio de 2022].
- [9] K. Bethge und G. Gruber, *Physik der Atome und Moleküle*, VCH Weinheim, 1990, S. 199: „In der chemischen Literatur werden Einteilchenwellenfunktionen als Orbitale bezeichnet...“
- [10] J. Casabó, *Estructura atómica y enlace químico*, Barcelona: Reverté, 1997, p.175.
- [11] dtv-Atlas zur Chemie, dtv München, 1983, p.23: „Stattdessen gilt die Bezeichnung Atomorbital (Orbital) für die Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Elektrons (ElektronendichteVerteilung) innerhalb eines Atoms.“
- [12] Gran Enciclopedia de la Ciencia y de la Tecnología. Vol. 4, Barcelona: Grupo Editorial Océano, 2001. p.1846.

1.10 Léxico que oculta

Tema

Las siguientes expresiones son bien conocidas por los profesores de Física, a quienes no les causa extrañeza que se utilicen en libros escolares de dicha ciencia o en revistas científicas, y tal vez sean empleadas con frecuencia por ellos mismos.

- 1 “Los sistemas... intercambian carga eléctrica.”
- 2 “Los sistemas... interactúan entre sí.”
- 3 “... provoca una fuerza.”
- 4 “... esta presente un campo eléctrico.”
- 5 “... Al sistema... se asocia la energía...”
- 6 “Al electrón le corresponde una función de onda.”

Defectos

Estas locuciones tienen en común que manifiestan alguna cosa, pero al mismo tiempo dejan algo pendiente, lo

cual puede estar justificado en ciertos casos. Veamos como ejemplo inicial el verbo “intercambiar”, tan apreciado y empleado en Física, en la primera frase:

- 1 “Los sistemas A y B intercambian carga eléctrica”, aquí se asevera que la carga eléctrica va de A a B, o bien de B a A sin indicar cuál de las dos posibilidades se realiza. La razón de no precisar entre las dos opciones puede ser que en el contexto en cuestión no importa la dirección del transporte, o también podría ser que no se sabe o conoce dicha dirección. Sin embargo, a menudo ocurre que siendo conocida la dirección y útil indicarla, no se lo dice. Es este último caso el que acá interesa: se deja “abierto” algo que podría decirse o precisarse. Dicho verbo presenta generalmente otro inconveniente: no corresponde al uso en el lenguaje común, en el cual intercambiar significa que A recibe algo de B y a su vez B algo de A. Consideremos los demás ejemplos citados:
- 2 Cuando se dice que dos sistemas A y B “interactúan”, se quiere decir que algo es transferido de A a B o de B a A (similar al caso de “intercambio”). Sin embargo, esta vez no solo se deja “abierta” la dirección de la transferencia, sino que tampoco se dice qué se transfiere. En la mayoría de casos se trata de la cantidad de movimiento; si es así, ¿por qué no decirlo?
- 3 De una fuerza se puede precisar cuál es el cuerpo (o sistema) que la ejerce y cuál es el cuerpo sobre el cual es ejercida, una excepción la presentan las fuerzas inerciales, donde no existe un cuerpo que ejerza la fuerza. Siempre contribuye a la claridad el mencionar los dos cuerpos o sistemas.
- 4 La locución “esta presente” es el modo más impreciso de expresar la presencia de algo. No solamente deja “abierto” dónde se encuentra el “algo”, sino que también se utiliza cuando el “algo” no es localizable, o no tiene una posición definida. En el caso de un campo, en general se puede precisar exactamente dónde se encuentra. El simplemente “estar presente” puede llevar al estudiante a concluir que un campo no tiene un lugar inequívoco.
- 5 El “asociar” energía a un sistema deja algo “abierto” que se puede afirmar con precisión: dónde se encuentra localizada la energía.
- 6 La cautela o prudencia de esta locución es apenas superable. ¿Por qué no se dice que el electrón tiene una función de onda? Tiene función de onda no más y no menos que tiene masa y carga.

Origen

No se trata aquí simplemente de errores estilísticos, los cuales —sea dicho— existen en muchos textos de Física,

Nombres compuestos de magnitudes físicas

se trata de buscar que se diga de un modo claro aquello que puede decirse de esa manera.

A veces el lenguaje de la Física no es claro porque cierto hecho, en cierta época, no era conocido, no era posible entonces expresarse de modo inequívoco. Ejemplos son muchas de las aseveraciones sobre la energía. Hasta finales del siglo 19 no era posible localizar ni la energía ni sus corrientes, y por lo tanto el lenguaje que surgió en esa época tenía que operar con expresiones que dejaban “abierta” la distribución espacial de la misma. Corresponden a esta clase de expresiones la “potencia” como nombre para la corriente de energía, la locución “realizar trabajo”, o la “transmisión” de energía. Las expresiones vagas eran entonces parte del lenguaje científico, justificado en la época, que se han conservado hasta el día de hoy. Para el físico experimentado y conocedor de los fenómenos dichas frases no deberían representar mayor problema, este lo podrían tener los estudiantes principiantes y las personas no relacionadas con la Física.

Eliminación

Una de las tareas de la escuela debe ser el cultivo y cuidado del idioma, y este también debe reflejarse en las clases de ciencias. Parte de dicho cuidado es aprender a expresarse de modo claro, preciso y conciso. Aquí cabe recordar la frase del filósofo Ludwig WITTGENSTEIN (1889–1951) en su famoso *Tractatus logico-philosophicus*: “Todo lo que se deja decir, se deja decir claramente”

1.11 Nombres compuestos de magnitudes físicas

Tema

Es costumbre formar nombres compuestos con magnitudes físicas, existen muchos con la magnitud fuerza: fuerza peso, fuerza gravitacional, fuerza elástica, fuerza de extensión, fuerza muscular, fuerzas eléctrica y magnética, fuerza de fricción, fuerza de resistencia aerodinámica, fuerza de rozamiento estatico, fuerza de deslizamiento, fuerza de rozamiento por rodadura, fuerza de frenado, fuerza de accionamiento, fuerza de propulsión, fuerzas de tensión y de presión, fuerza de empuje, fuerza de atracción y de repulsión, fuerzas normal, axial y radial, fuerza parcial, fuerza de compensación, fuerza de reacción, fuerza antagónica, fuerzas centrífuga y centrípeta, fuerza aparente, fuerza ficticia, fuerza inercial, fuerza ascensional, fuerza aceleratriz, fuerzas recuperadora y amortiguadora, fuerzas de CORIOLIS, de COULOMB, de LORENTZ, fuerza cohesiva y adhesiva,

fuerza motriz, etc.; encontramos todas estas fuerzas en libros escolares y diversas publicaciones. Algo similar ocurre con el término tensión: tensión de batería, tensión en los bornes, tensión en vacío, tensiones continua y alterna, tensión instantánea, tensión efectiva, tensión de deflexión, tensión de cresta, alta tensión, tensión disruptiva, tensiones parcial y total, tensión difusa, tensión HALL, tensión de umbral, tensión inversa, tensión anódica, tensión de saturación, tensión de inducción, tensión excitadora, tensión moduladora, etc. También existen diversas temperaturas (ambiental, de ebullición, de equilibrio, etc.) y presiones (hidrostática, parcial, interna, de saturación, etc.), se habla de resistencias aparente y equivalente, de momentum angular orbital y carga puntual, y sobre todo existen muchos trabajos y energías.

Defectos

Generalmente se forman nombres compuestos para compactar el lenguaje, utilizándolos se puede ahorrar una oración subordinada o una explicación más amplia, sin embargo a menudo se paga caro esta ventaja. Cada uno de estos nombres compuestos representa un tecnicismo cuyo significado tiene que ser aprendido y memorizado.

En muchos casos el beneficio que aporta el vocablo compuesto es poco, a veces se introduce el término y después no se lo vuelve a emplear. Sospechamos que la razón para la introducción de algunos de dichos términos, en los textos escolares, no siempre fue el provecho que para la comprensión y la enseñanza podría obtenerse, sino el mero deseo de “enriquecer” los textos con terminología científica.

El empleo de términos compuestos, como los referidos, permite expresarnos más concisamente, sin embargo al emplearlos se pierde información ya que la relación entre la palabra básica o sustantivo (fuerza, en fuerza inercial) y el complemento o adjetivo (inercial, en el mismo caso) puede ser muy diversa.

A veces, con el complemento se designa simplemente el sistema al cual se refiere el valor de la magnitud: la masa solar, la carga electrónica, etc., en otros casos se caracteriza cierto valor o intervalo de valores: alta tensión, temperatura normal, etc.

En ocasiones con el complemento se indica la aparición de cierto fenómeno o el desarrollo de algún proceso: presión de saturación (presión a la cual al gas está saturado), temperatura de fusión (temperatura a la cual una sustancia sólida se licua), corriente de cortocircuito (intensidad de la corriente cuando se presenta cortocircuito). Hay casos en los cuales por medio del adjetivo se resumen situaciones más complicadas: la

Formulación original

tensión alterna designa una tensión con una variación sinusoidal en el tiempo.

El hecho de que la relación entre la palabra básica y el complemento no sea la misma en todos los casos, propicia que en tales construcciones gramaticales no todo quede completamente claro. Algunos ejemplos de esto se encuentran en los vocablos con el término “fuerza”.

Una fuerza siempre es ejercida por un sistema o cuerpo sobre otro; si se habla de una fuerza normalmente se debe hacer referencia a dos sistemas, en un orden bien determinado y esta situación no es posible expresarla con una palabra, es decir, por medio del complemento. Así, se puede preguntar: ¿Qué es la fuerza de tensión en una cuerda? ¿Es la fuerza que ejerce la cuerda sobre el cuerpo colocado en uno de sus extremos o sobre el situado en el extremo opuesto? o ¿Es la fuerza que una parte de la cuerda ejerce sobre la otra?

Otro problema en este contexto radica en que los vocablos compuestos sugieren que se está tratando con magnitudes diferentes según el complemento que acompaña al sustantivo. Cuando hablamos de energía elástica o magnética se trata de la misma magnitud física, o sea la energía, medida en dos sistemas distintos, sin embargo, debido a los adjetivos “elástica” y “magnética” da la impresión de que se trata de dos magnitudes distintas. Una de las fortalezas de la descripción de los fenómenos en la física, consiste en que con una magnitud se puede describir la misma característica en sistemas completamente distintos; con el empleo de los vocablos compuestos mencionados se pierde dicha posibilidad.

Origen

Los términos compuestos, así como otros tecnicismos, son inventados o introducidos por especialistas de la disciplina o subdisciplina correspondiente, es decir, personas para las cuales utilizar una abreviación tiene sentido y vale la pena; pero de la literatura especializada dichos vocablos pasan fácilmente, sin ser analizados, a los textos de enseñanza general.

Tampoco se puede descartar completamente la sospecha de que algunas veces dichos términos se utilizan para solapar una duda o confusión.

Eliminación

Lógicamente no recomendamos prescindir por completo de los términos compuestos, no existe ninguna objeción en utilizarlos cuando la relación entre el sustantivo y el adjetivo sea completamente clara como en “alta tensión”, “masa solar” o “fuerza total”. Muchos de los vocablos compuestos más usuales se podrían reemplazar fá-

cilmente por una oración subordinada, sin que la claridad de la frase disminuya; esto es válido para la mayoría de las “fuerzas”. A veces una frase se hace más clara con la sencilla operación de suprimir el complemento.

1.12 Formulación original

Tema

En la escuela, al preguntar a los alumnos, o en la universidad en los exámenes orales, los estudiantes suelen reproducir textualmente ciertas formulaciones que han aprendido de memoria en clase, o que estaban escritas en la pizarra o en un libro. He aquí algunos ejemplos:

- En relación con el átomo de hidrógeno: “**Es falso asignarle una trayectoria a una partícula.**”
- Al introducir el campo eléctrico: “**El campo eléctrico es la región del espacio cuyas propiedades son alteradas por... .**”
- En relación con las leyes de NEWTON: “**Todo cuerpo continúa en su estado de reposo o movimiento uniforme en línea recta... .**”
- En la discusión de las cuatro interacciones de la física de partículas: “**La fuerza nuclear débil es la responsable de la desintegración radiactiva de las partículas beta.**”

Defectos

Por lo general, las formulaciones no provienen del maestro o del profesor, sino que este también las ha tomado de otra parte. Y si se sigue el camino hacia atrás, al final se llega al inventor o descubridor del hecho descrito. En nuestros ejemplos, serían HEISENBERG —Werner Karl HEISENBERG (1901–1976)—, MAXWELL —James Clerk MAXWELL (1831–1879)—, NEWTON —Isaac NEWTON (1642–1727)— y (probablemente) FERMI —Enrico FERMI (1901–1954)—.

Sería preferible que los alumnos describieran la situación correspondiente con sus propias palabras, incluso en el dialecto local. Por supuesto, emplear la formulación del libro o del profesor tiene una ventaja estratégica para ellos: no se les puede decir que es incorrecta. Después de todo, el propio maestro lo dijo así. Se puede ocultar la falta de comprensión, incluso de uno mismo. Si uno lo dijera con sus propias palabras, podría descubrir que la frase no se entiende, o a veces que el “emperador no tiene traje nuevo”.

Volvamos a ver las frases o fragmentos de frases citadas:

Hay partículas que no tienen trayectoria. Pero también se dice que se mueven. ¿No resulta de esto que el

Si una fuerza actúa sobre la carga de la masa, su momentum cambia

concepto de partículas pierde su significado? Es mejor no preguntar [1].

Si el campo es una región del espacio, pero el espacio esta vacío, como aprendimos antes, entonces el espacio no contiene nada, y tendríamos una “nada” con propiedades. ¿Cómo se sale de esta contradicción? Es mejor no preguntar [2].

¿Por qué nadie se atreve a formular la primera ley de NEWTON en términos modernos? El momentum de un cuerpo no cambia, si no recibe ni cede momentum. ¿Es realmente tan sencillo? Es mejor no preguntar.

¿Por qué solo la interacción débil es “responsable” de algo? Interacción significa que dos cuerpos o partículas ejercen fuerzas opuestas el uno sobre el otro. Así es como se aprendió. Las otras tres interacciones se describen mediante una ley de fuerza. ¿Cuál es la ley de fuerza de la interacción débil? Es mejor no preguntar [3].

Origen

No tenemos tiempo suficiente para tratar los fundamentos conceptuales de la física. Por parte de los estudiantes, se trata de aprobar los exámenes.

Eliminación

“Lo que habéis heredado de vuestros padres, adquiridlo para poseerlo”, dice Fausto. Sin embargo, a menudo lo que se hereda no se adquiere, sino que solo se hereda. Tomemos a GOETHE —Johann Wolfgang von GOETHE (1749–1832)— en serio.

Referencias

- [1] Véase 11.8 *El concepto de trayectoria en la mecánica cuántica*, p.274
- [2] Véase 6.12 *El campo como región del espacio con propiedades*, p.200
- [3] Véase 1.1 *Los últimos secretos de la naturaleza*, p.9

1.13 Si una fuerza actúa sobre la carga de la masa, su momentum cambia

Tema

“Una masa esta suspendida de un resorte”, “en el campo eléctrico la carga esta acelerada”, “en el volumen hay un gas”, “el filtro solo deja pasar las longitudes de onda largas”. En estas frases, que todo físico entiende, se sustituye el nombre de un objeto o sistema físico por el de una magnitud física. Lo que en realidad se quiere decir es: “un cuerpo esta suspendido de un resorte”, “la partícula

cargada esta acelerada”, “en el recipiente hay un gas”, “el filtro solo deja pasar la luz de grandes longitudes de onda”.

Defectos

- 1 Las magnitudes físicas son variables en el sentido de la matemática. No se pueden suspender ni acelerar, no pueden contener gas y no pueden pasar por un filtro. Si, como ha sucedido aquí, se nombra la magnitud física cuando en realidad se trata de un objeto o de una partícula, se está ante una metonimia en sentido lingüístico. Las metonimias están muy extendidas en el lenguaje coloquial. Por ejemplo, se dice: “Me he preparado para el examen de física experimental con el Tippler”, cuando se quiere decir: “Me he preparado para el examen de física experimental con el libro de TIPPLER.”

En el caso de nuestras citas, se sustituye el objeto por una de las magnitudes físicas que lo caracterizan, es decir, por la magnitud que importa en el contexto considerado. Solo la masa del cuerpo que está suspendido del resorte tiene importancia cuando uno se interesa por su oscilación —no su temperatura o su color—; solo la longitud de onda de la luz importa cuando se describe el efecto del filtro...

- 2 La identificación del objeto y la medida es particularmente común con las magnitudes masa y carga eléctrica. Por tanto, no se dice que la energía, la entropía o el momentum estén suspendidos del resorte. Deben ser magnitudes que consideramos características del cuerpo. Se dice que la carga está acelerada solo si se trata de una partícula cuya carga eléctrica consideramos característica, por ejemplo, un electrón o un protón. En un experimento electrostático macroscópico, se diría más bien (aunque no siempre) que el cuerpo cargado está acelerado.
- 3 En los casos en que el nombre de la magnitud expresa claramente que se trata de una medida, no es habitual referirse al cuerpo por el nombre de la magnitud. Por lo tanto, no se dice: el cuerpo está suspendido de la constante elástica, sino del resorte, aunque en el contexto considerado solo importa la constante elástica. La palabra “constante” se interpone en la identificación.
- 4 A veces se va más allá, cuando se dice, por ejemplo, “el momentum de la masa”, “el volumen de la masa”, “el potencial de la carga”. Aquí también se ve el tratamiento especial de la masa y la carga eléctrica. Probablemente no se hablaría del “momentum de la energía”, ni de la “temperatura de la entropía”, ni mucho menos de la “temperatura de la presión” o de la “duración de la longitud”.

Transformaciones

Entonces, ¿cuáles son los problemas o las deficiencias? A menudo ninguno, a veces pequeños y a veces grandes, pero normalmente no se notan. Por ejemplo, si se intercambian el nombre del sistema “campo eléctrico” y el nombre de la magnitud física “intensidad del campo eléctrico”, si se identifica la partícula cargada magnéticamente con la carga magnética o si solo se ve la carga eléctrica en el electrón y solo la energía en el fotón [1].

Origen

Las metonimias forman parte del lenguaje común. No suelen dar lugar a malentendidos, sino que enriquecen el lenguaje.

Es bien sabido que la física se esfuerza por lograr un mayor rigor; al menos así lo ven los físicos. Sin embargo, el rigor conceptual no siempre es el adecuado. A menudo se emplea una jerga que los físicos utilizan para comunicarse bastante bien entre ellos. Uno no se da cuenta de que muchos malentendidos y disputas científicas solo se basan en términos mal utilizados y, por tanto, en conceptos no bien definidos.

Históricamente, el papel de las magnitudes extensivas masa, carga y entropía solo se ha puesto de manifiesto bastante tarde. Cuando se reconoció que un proceso podía describirse con una magnitud extensiva, se asumió inicialmente que se trataba de una sustancia que existía realmente. La carga eléctrica parecía ser algo más que una herramienta matemática para describir los procesos eléctricos. Se creía que se trataba de dos tipos de fluidos eléctricos. Asimismo, se creía en la existencia de fluidos magnéticos, o de una sustancia calorífica. La magnitud física masa se sigue utilizando hoy en día como si la palabra fuera sinónimo de materia. En todos estos casos, la magnitud extensiva era la medida de la cantidad de algo presente en la naturaleza, y no se hacía distinción entre la medida y el fluido correspondiente. El fluido eléctrico solo tenía una única propiedad, la descrita por la carga, la sustancia térmica solo tenía una única propiedad, la descrita por la cantidad “calor” (o “calórico”).

Eliminación

La identificación del objeto y la magnitud física, es decir, del objeto y su medida, es especialmente aceptada entre los especialistas en una materia.

Sin embargo, como profesor en la escuela, hay que preguntarse si realmente vale la pena dejar suspender la masa del resorte. ¿Por qué no: “*El cuerpo esta suspendido del resorte*”? ¿Por qué no “*la partícula cargada se acelera*” en lugar de “*la carga se acelera*”? Es un poco más complicado, pero contribuye a la claridad conceptual.

Pero sobre todo se deben evitar formulaciones como: la energía de la masa, la fuerza sobre la carga, la carga de la masa, el momentum de la masa.

Los dos extremos del uso son la pedantería, por un lado, y la jerga, por otro. Se sugiere dejar la jerga para los expertos, y aspirar más bien a la claridad conceptual en la escuela, aunque sea un poco más largo decir que el amperaje de la corriente de carga es de 2 A, en lugar de que la corriente es de 2 A. O “el cuerpo de masa 2 kg esta suspendido del resorte”, en lugar de “una masa de 2 kg esta suspendida del resorte”.

Referencias

[1] Véase 2.6 *Pura energía*, p.52

1.14 Transformaciones

Tema

En física a menudo se habla de transformaciones. Así, la energía se transforma de una forma a otra. Pero no solo una magnitud física se transforma en la misma magnitud, sino a veces en otra: “... ya dentro del píxel se convierte la carga en una tensión con la ayuda de un circuito amplificador.”

También puede ser más complicado: “... convierte la intensidad y la dirección de la luz incidente en una carga eléctrica.”

De hecho, no solo las magnitudes físicas se transforman o se convierten la una en la otra. Los objetos del mundo real también se transforman en magnitudes físicas, como cuando se dice que la luz se transforma en energía, o como en esta cita: “*La conversión de la luz en carga eléctrica se basa en el efecto fotoeléctrico interno.*”

Defectos

Las citas referidas no están tomadas de la edición de fin de semana de un diario local, sino de la revista para los miembros de la Sociedad Alemana de Física. En primer lugar, una aclaración de términos. Según el lexicón, transformar significa: “convertir en otra cosa”. Por tanto, la transformación describe un proceso: algo era A antes y es B después. No era B antes y ya no es A después. Por ejemplo, según el relato, en las bodas de Caná lo que era agua, después de la transformación se convirtió en vino.

¿Obvio, evidente, trivial? Aparentemente no es tan trivial y no es tan obvio cuando se observa el uso de la palabra en la física.

No se quiere abordar acá la transformación de la energía, ya fue objeto de otro COF. Tampoco la transformación de la masa en energía.

Empecemos con la carga, que se transforma en una tensión. ¿Desaparece la carga en el píxel y en su lugar aparece una tensión? Probablemente no. Más llamativa aún es la incoherencia de la cita posterior, en la que una dirección se transforma en una carga.

Y más grave aún cuando se lee que la luz se transforma en energía, o incluso, como en nuestra última cita, en carga eléctrica. No solo la física habla en contra de esto, sino sobre todo la lógica. ¿Cómo se puede transformar la luz, es decir, un objeto del mundo real, en una magnitud física, es decir, en una variable en el sentido de las matemáticas?

Se podría objetar que esto no es más que el lenguaje coloquial de la física. Eso puede ser cierto, por desgracia.

Usted, querido lector, probablemente perteneció al 10 o 15 % de alumnos de la escuela que son inmunes a las malas lecciones de física, y no le resultaba difícil enfrentarse a este lenguaje un tanto incoherente. Pero solo son el 10 o el 15 %.

No hay que sorprenderse entonces de que surja un caos conceptual en las mentes de los estudiantes y que es posible que, en el examen, por ejemplo —se puede dar fe de ello— propongan transformaciones cada vez más disparatadas: energía en momentum, momentum en momentum angular, energía en entropía y similares.

Origen

Como tantas veces, una incongruencia al tratar los fundamentos conceptuales de la física.

El precursor de todas las transformaciones es, por supuesto, la transformación de la energía, es decir, el trabajo en calor, el calor en trabajo, el calor en energía eléctrica, la eléctrica en química, etc.

La segunda causa es la recurrente confusión entre los enunciados sobre el mundo real y los enunciados sobre la descripción matemática. Por razones lógicas, la luz no puede transformarse en energía. La luz tiene energía, al igual que tiene momentum, momentum angular y entropía. Y la luz no tiene carga eléctrica, y fundamentalmente no puede transformarse en tal.

Eliminación

- Es necesario prestar atención en cómo se habla. Hablar con un poco más de cuidado no significa que nuestras declaraciones se vuelvan más complicadas o difíciles. Por el contrario, se vuelven más claras y fáciles de entender.
- Solo hay unas pocas situaciones en la física en las que se necesita el término transformación o conversión. Por lo tanto, en la etapa inicial, simplemente deshágase del concepto, y con ello del término.

1.15 Para qué la didáctica de la física

Tema

La enseñanza de la física en la escuela y la universidad sigue el desarrollo histórico de la física actual en muchos detalles.

Defectos

La estructura de la asignatura es innecesariamente complicada, y contiene temas superfluos y obsoletos.

Origen

La física se desarrolló o evolucionó esencialmente sin un objetivo específico. Por supuesto, existían motivaciones generales: la aspiración general al conocimiento y la búsqueda del progreso técnico. Pero nunca se pudo saber de antemano cuál sería el siguiente descubrimiento o invento. Y así sigue siendo hoy: se investiga y se busca en todas las direcciones. También existen muchos trabajos y desarrollos que no llevan a ninguna parte, pero casi nadie se entera de esos "fracasos".

Así, en la época de NEWTON —Isaac NEWTON (1643–1727)—, nadie podía prever que 150 años más tarde surgiría una teoría de campo para los fenómenos eléctricos, la electrodinámica. Nadie podía prever en 1800 que en el siglo que acababa de empezar la estadística se convertiría en una fantástica herramienta de la física. Nadie hubiera creído a finales de ese mismo siglo que se estaba a punto de establecer una teoría que desafiaría un principio fundamental de la física de la época, el determinismo.

Pero incluso en una escala de tiempo mucho más corta, se pueden observar los resultados imprevisibles de la investigación científica: en su famoso artículo de 1905, EINSTEIN —Albert EINSTEIN (1879–1955)— declara que el éter es un concepto superfluo. Diez años después, se retracta de esta afirmación: "Según la teoría general de la relatividad, un espacio sin éter es impensable". [1]. Asimismo, en su artículo de 1905, EINSTEIN explica de forma prolífica en las tres primeras páginas que es un problema importante sincronizar los relojes para poder decidir sobre la simultaneidad de dos eventos. Diez años más tarde, con su teoría de la gravedad, demuestra que la sincronización de los relojes en un espacio curvo (es decir, realista) es, en principio, imposible, y que, en general, no se puede hablar de simultaneidad de dos eventos en lugares diferentes.

Se puede imaginar el desarrollo de la física como el avance hacia un país todavía desconocido, como lo ocurrido en el oeste de Estados Unidos a principios del siglo 19: siempre se avanzaba hacia donde era más conve-

Para qué la didáctica de la física

niente. Luego, se encontraron itinerarios más cortos y se construyeron túneles y puentes, de modo que el viaje entre el punto de partida y el de llegada fue mucho más rápido.

Así que la física no empezó con el objetivo de llegar al estado en que se encuentra hoy, sino que siempre tomó el camino que se acaba de abrir.

Actualmente, este camino en zigzag se está siguiendo en la enseñanza de forma asombrosamente exacta, con graves consecuencias:

- Se pierde tiempo innecesariamente.
- Estructuras y relaciones que solo se reconocen en retrospectiva no se presentan en las lecciones.

Se podría pensar que lo lógico y razonable sería eliminar las deficiencias que conlleva un recorrido tan zigzagueante en cuanto aquellas aparecen. Pero esto no ha ocurrido prácticamente nunca. ¿Por qué no?

La enseñanza de la física está anclada en un sistema que se resiste al cambio. Este sistema incluye a maestros, profesores universitarios, libros de texto, directivos de planteles, Ministerios de Educación, planes de estudio, asociaciones profesionales y demás. Es así como la física se convirtió en una de las materias escolares más conservadoras.

Para poder calificar mejor el fenómeno, planteemos algunas preguntas sobre los tiempos característicos de diferentes procesos de desarrollo natural y social.

Por ejemplo: ¿Cuál es la duración típica de una guerra? (10 años). ¿Cuánto tiempo sobrevive un régimen totalitario? (30 años). ¿Cuánto dura una moda de ropa? (2 años). ¿Cuánto dura un hábito de consumo, como el de fumar? (100 años). ¿Cuánto duran las condiciones meteorológicas? (unos días). ¿Cuánto dura una religión? (1000 años). ¿Cuánto tiempo se tarda en introducir una nueva tecnología? (5 años). Y por último, ¿cuánto dura un concepto de enseñanza?

La idea de estas preguntas y de las estimadas respuestas provino de un colega de física de altas energías. Era su manera de caracterizar la inercia de las convenciones en materia de enseñanza. Su respuesta a la última pregunta fue: 300 años.

Lo que es particularmente notable aquí es la diferencia en las escalas de tiempo de la introducción de un nuevo concepto de enseñanza —unos cientos de años— y una innovación técnica —unos pocos años— o a lo sumo décadas. Cabría esperar que ambos se desarrollaran en la misma escala temporal. De hecho, la diferencia es enorme.

¿Por qué un desarrollo técnico puede imponerse tan rápidamente y un nuevo concepto de enseñanza no?

En tecnología, es la fuerte competencia la que garantiza un rápido desarrollo. La utilidad se mide en dólares, euros, pesos o yuanes. Los que no progresan se quedan atrás. La recompensa está en un futuro próximo, es decir, en unos pocos años.

Este tipo de retorno no parece existir en la enseñanza. Un libro de texto demasiado innovador fracasa porque no se ajusta al plan de estudios. Los planes de estudio no pueden modernizarse de forma significativa porque no se confía en que los profesores reaprendan y repiensen. Un libro universitario demasiado innovador no tiene ninguna oportunidad con las editoriales porque no se vende.

Y por último, otro obstáculo: no existe la correspondiente y adecuada estructura de investigación en las universidades. En realidad, cabría pensar que la tarea de la didáctica de las asignaturas sería precisamente cuestionar constantemente el contenido de la enseñanza, reelaborarlo, reestructurarlo, desechar lo superfluo. Pero hay un problema, esta actividad en general no es apreciada por la mayoría de físicos. Y, por otra parte, los responsables de la asignatura de didáctica generalmente rehusan entrar en conflicto con ellos. Así que se opta por ocuparse de la investigación en la enseñanza-aprendizaje, con lo cual no se incurre en discrepancias con nadie. O se hace algo que quizás podría llamarse “música ligera” para la física, se investiga sobre bonitos y divertidos efectos físicos del deporte, los juegos u otros aspectos de la vida cotidiana; así se hace publicidad para la asignatura de física, y el departamento de física no tiene ninguna objeción al respecto.

Eliminación

Hay que experimentar con la educación en física. Solo así se podrá saber qué conceptos hacen justicia a los problemas actuales.

Esto requiere una didáctica de la asignatura competente, y segura de sí misma que no se fije únicamente en lo que piensan los colegas de la física de partículas o la nanofísica.

Su tarea consistiría en ocuparse de los planes de estudio y los programas de enseñanza de las universidades, así como en procesar constantemente los resultados de la investigación actual en física.

Por último, una idea que no parece encajar en absoluto con la forma de pensar de los educadores y didactas (sugerida por un empresario de éxito). Intentar evaluar la enseñanza en términos monetarios. Por ejemplo, desarrollando un nuevo enfoque de un tema que también se trata en las lecciones tradicionales. Si se necesita una lección menos para la nueva unidad, esto significa una ganancia en términos económicos.

Referencias

[1] A. Einstein, *Äther und Relativitätstheorie*, Verlag von Julius Springer, Berlin, 1920, S. 12

1.16 Autoras de libros de física

Tema

“... se decidió equipar las unidades de tracción rápida con motores asíncronos trifásicos. Los convertidores de potencia y los tiristores (dispositivos de electrónica de potencia) convierten la corriente alterna monofásica extraída por el colector de corriente primera en corriente continua y luego en corriente trifásica de frecuencia variable. Los convertidores de potencia permiten devolver a la red la energía liberada durante el frenado en forma de energía eléctrica con la frecuencia y la fase correctas cuando los motores de tracción se comutan como generadores...”

Defectos

Esperamos que todos los autores de libros de texto, especialmente para bachillerato, piensen que esas frases nunca saldrán de su pluma. Y sin embargo, vienen de un libro de física escolar. Son una cita demostrativa para la clase cuando se intenta mostrar a los estudiantes por qué no es nada sorprendente que la física (junto con la química) sea una de las materias escolares más impopulares.

La frase no es típico —afortunadamente— pero es una expresión extrema de un estilo que sí es típico.

En las clases de física del primer ciclo de secundaria se introducen unos 2000 términos técnicos, esto corresponde al vocabulario básico de una lengua extranjera. Una de cada seis palabras de un libro de texto de Física típico es un término técnico (la cita récord de arriba llega a una de cada tres palabras). La mitad de los términos técnicos se utilizan una sola vez. Independientemente de sus otras cualidades, un libro de física (o también de química) no puede cumplir su objetivo mientras no se ponga remedio a este deplorable estado de cosas.

Existe una minoría de alumnos que tienen la habilidad de repetir ese tipo de verborrea, una observación que debe hacerse, de vez en cuando, también a los estudiantes de la universidad. Esto puede tener algún “beneficio”: cuanto más exuberante sea el lenguaje, menos se notará lo poco que se ha entendido. Puede ser especialmente propicio para aprobar un examen oral.

Origen

Un científico del comportamiento diagnosticaría presunción o “pavoneo”, como la que se da en los primates

macho. ¿O se imagina, querido lector, que el texto citado fue escrito por una mujer?

No sé saber quién lo escribió, pero no había una sola autora entre los 16 autores del libro.

Eliminación

No malinterpreten, no se quiere complacer a los alumnos con un lenguaje infantil o demasiado simple. El lenguaje debe ser sencillo y claro. Un primer paso podría ser: eliminar la mitad de los términos técnicos de un libro de texto. ¿No es posible? Por supuesto que sí, como se dijo antes, el 50% de los términos técnicos no se volverán a utilizar. Y una vez que se ha encontrado la forma de eliminarlos, se verá que el texto es más conciso y que se puede volver a reducir. Al final sorprenderá lo claro que ha quedado todo.

Una sugerencia práctica para los autores: déle el texto a un familiar para que lo lea. Debe marcar cada palabra cuyo significado desconozca. (Por supuesto, la editora (o editor) también podría hacerlo).

Otra sugerencia: establecer un límite superior para el número máximo de términos técnicos. Esto podría controlarse fácilmente cuando se apruebe el libro de texto. Por supuesto, debería estar muy por debajo del número de palabras de vocabulario de las clases de lengua extranjera.

1.17 Mecánica y Termodinámica

Tema

La mecánica es la parte más importante de la Física, es su fundamento, la termodinámica es una de las demás partes. La diferencia en la consideración se nota en los currículos, planes de estudio y libros de texto. Así, en la mayoría de planes de estudio de las carreras universitarias de Física o Licenciatura en Física la mecánica comprende el doble o más de horas que la termodinámica, en los libros de texto universitarios y escolares la relación no es muy diferente.

A menudo se dice explícitamente que la mecánica debe ocupar una posición privilegiada, por ejemplo en un libro de texto escolar en el contexto de la ecuación

$$F = m \cdot a:$$

“Esta es realmente la ecuación más importante de este libro; ha cambiado el mundo desde 1686.” [1]

“En esta unidad nos encontramos analizando uno de los principios más importantes de la física: el principio de la conservación del ímpetu. En la sección 3.1 llega-

Medición directa e indirecta

mos al enunciado de este principio a partir de la tercera ley de NEWTON...” [2].

Defectos

El tiempo asignado a la termodinámica no solo es muy corto en ciertos currículos, en algunos ha desaparecido por completo. Además, incluso cuando se encuentra en un currículo escolar, a menudo no se alcanza a abordar ni siquiera durante el poco tiempo asignado, ya que generalmente es una temática prevista para el final del año escolar, con todo lo que ello significa. Algo parecido ocurre en algunas carreras universitarias, donde por ejemplo la termodinámica se estudia junto con la óptica en un solo semestre, y generalmente se comienza por la óptica. De este modo muchos alumnos terminan el colegio o la universidad como “analfabetos termodinámicos”.

Desde un punto de vista contemporáneo la mecánica no merece este trato preferencial, y la termodinámica tampoco ese trato de “menosprecio” a que ha sido sometida. ¿Por qué es tan importante la ecuación $F = m \cdot a$? Es esencialmente la segunda ley de NEWTON, es decir,

$$F = dp/dt,$$

que expresa nada más que la conservación del momentum. Pero la ley de conservación del momentum no es tan exclusiva, existen leyes análogas para la energía, el momentum angular y la carga eléctrica. También pertenece a esta serie una ley que sí es muy importante, la que afirma la no-conservación de la entropía: la entropía puede ser producida pero no aniquilada.

Origen

Es difícil expresarlo más correctamente que como lo hizo MACH —Ernst Waldfried Josef Wenzel MACH (1838–1916)—: “Si los enciclopedistas franceses del siglo 18, creyeron que estaba cercana la meta de explicar la naturaleza entera de modo físico-mecánico, si Laplace finge un espíritu que sería capaz de especificar el curso del mundo en todos los períodos futuros si se le dieran solamente todas las masas con sus posiciones y velocidades iniciales, entonces esta alegre sobreestimación de la envergadura de los conocimientos físico-mecánicos del siglo 18 es perdonable, incluso es un espectáculo amable, noble y edificante, y podemos vívidamente compartir esta alegría sin parangón en la historia.

Sin embargo, después de un siglo, luego de habernos vuelto más reflexivos y sensatos la cosmovisión de los enciclopedistas aparece como una mitología mecánica, en analogía con las antiguas religiones animistas. Ambas contienen exageraciones indebidas y fantásticas de un conocimiento simplista (unidireccional).” [3]

Eliminación

No es fácil, ya que se está en presencia de una larga tradición educativa. Se recomienda empezar el “desmantelamiento” de la mecánica por la cinemática.

Referencias

- [1] F. Dorn u. F. Bader, *Physik*, Gymnasium Sek II, Gesamtbänd, Hannover: Schroedel Verlag, 2000. S. 34.
- [2] A. Lara, G. Cerpa, M. Rodríguez y H. Núñez, *Física para Bachillerato*, México: Pearson Educación, 2006. p.94.
- [3] E. Mach, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt*. Leipzig: Brockhaus, 1897. S.455. Existe traducción al castellano El desarrollo histórico-crítico de la mecánica. Buenos Aires: Espasa Calpe, 1949. p.433

1.18 Medición directa e indirecta

Tema

Se suele distinguir entre mediciones directas e indirectas:

- 1 “La medida o medición diremos que es directa, cuando disponemos de un instrumento de medida que la obtiene comparando la variable a medir con una de la misma naturaleza física. [...] Medición indirecta es aquella que realizando la medición de una variable, podemos calcular otra distinta, por la que estamos interesados.” [1].
- 2 “Medida directa es aquella que se realiza aplicando un aparato para medir una magnitud, por ejemplo, medir una longitud con una cinta métrica. Las medidas indirectas calculan el valor de la medida mediante una fórmula (expresión matemática), previo cálculo de las magnitudes que intervienen en la fórmula por medidas directas. Un ejemplo sería calcular el volumen de una habitación.” [2].

Defectos

Aparentemente la distinción entre una medición directa e indirecta se considera tan importante que se explica o define su clasificación explícitamente; las definiciones arriba mencionadas (y similares) pretenden responder a la pregunta: ¿es la medición directa o indirecta? Ya es difícil encontrar respuesta empleando las definiciones anteriores si se trata, por ejemplo, de la medición de una diferencia de potencial con un galvanómetro. Pero, ¿cuál es la respuesta en el caso de que se utilice un voltímetro digital o un sistema de captación de datos que muestra el resultado en la pantalla de un computador? ¿Es la medición de la potencia eléctrica con un vatímetro clásico (con una bobina de tensión y una de corrien-

te) directa o indirecta? ¿Y qué dicen las definiciones de la medición de una tensión o también de una carga eléctrica mediante un electroscopio?

Se observa que las definiciones no pueden dar respuestas claras a estas preguntas, pero además que la respuesta en un sentido o en otro no tendría ninguna implicación y no resolvería ningún problema. A veces una clasificación es útil para generar cierto orden en nuestra mente, pero esto no se cumple en el presente caso.

Origen

Probablemente dichas definiciones provengan de una época en la cual los instrumentos de medida eran más sencillos que hoy, pero incluso en esa época el concepto era prescindible.

Eliminación

No es objetable decir que se ha medido una magnitud directamente, si se emplea la palabra “directo” con el significado del lenguaje común. Se diría que se ha realizado una medición directa para afirmar que se ha leído el valor directamente del instrumento o aparato de medida, independientemente de cuáles son los procesos que se emplean en él o en el sistema de medición.

Referencias

- [1] Medición. [en línea]. En: <http://es.wikipedia.org/wiki/Medición>
[consultado el 26 de octubre de 2022].
- [2] Medidas directas. [en línea]. En: <https://www.docscopy.com/es/medidas-directas-e-indirectas/7857362>
[consultado el 03 de enero de 2023]

1.19 La exactitud de la medición

Tema

Con cierta frecuencia se encuentran citas como la siguiente: “Medición: Es comparar la cantidad desconocida que queremos determinar y una cantidad conocida de la misma magnitud, que elegimos como unidad.”

A veces se dice que: una medición es la determinación empírica del valor verdadero de una magnitud física.

Defectos

Medir los valores de magnitudes (o cantidades) físicas es una de las tareas típicas del físico, se mide para determinar o comprobar la relación entre dos o más magnitudes físicas. Al justificar la importancia de la medida a

menudo se sugiere que antes de una medición no se conoce el valor de la magnitud a medir, mientras después sí, presentándose entonces dos estados: “no medido” y “medido”.

A veces se indica que se supone la existencia de un valor verdadero. En ocasiones se acentúa que es necesario realizar medidas porque nuestra percepción no es precisa ni fiable. Este enfoque de los hechos no es conveniente en dos aspectos, primero: en general no es correcto afirmar que antes de la medición nada se sabe acerca del valor de la magnitud a medir, y segundo: tampoco es correcto que después de la medición se conozca el valor exacto o verdadero. Lo más factible es que antes de la medición se conozca el intervalo donde está ubicado el valor a medir, aunque dicho intervalo pueda ser muy grande; después de la medición se encuentra que el valor también se sitúa en un intervalo. En una medición se pretende que el intervalo obtenido después de esta sea menor que el que se tenía antes, si esto ocurre la medición es buena, si ha disminuido solo un poco, la medición no es tan buena.

Con base en esa idea es posible definir una forma de determinar la calidad de la medición de una magnitud cualquiera X , por ejemplo, por medio del cociente entre los intervalos de incertidumbre antes y después de la medición:

$$\frac{X_{a2} - X_{a1}}{X_{d2} - X_{d1}},$$

donde el subíndice a indica antes, y el d después.

Una mejor definición de la medida de calidad es el logaritmo binario (ld , del latín *logarithmus dualis*; a veces también se emplea lg) de dicho cociente, ya que representa directamente el aumento de información en bit debido a la medición:

$$M = ld\left(\frac{X_{a2} - X_{a1}}{X_{d2} - X_{d1}}\right) \text{bit}, \quad (1.1)$$

Por ejemplo, si antes de una medición se conoce que el valor de una magnitud se encuentra entre 10 y 12, y después se obtiene un intervalo entre 10,6234 y 10,6236, se tendrá que:

$$M = ld\left(\frac{12 - 10}{10,6236 - 10,6234}\right) \text{bit} = 13,3 \text{bit}.$$

Es claro que la medición ha aportado algo, el cálculo indica además que el instrumento de medición ha suministrado 13 bit de información [1].

Origen

Parece ser una costumbre clasificar una medición como buena, si la precisión es del 1% al 5%, más o menos, y

La variable independiente

mala si la precisión es del 30 % por ejemplo; esta forma de evaluar las mediciones es algo arbitraria. Posiblemente se deba a que en los antiguos instrumentos se indicaba una precisión en porcentajes, o a que con los sentidos es posible determinar algunas magnitudes, como distancias, velocidades y pesos con una precisión entre el 10 % y el 50 %. Con base en eso se podría argumentar que una medición es algo que debe realizarse con un instrumento apropiado de medición, y no con los sentidos.

Eliminación

Se sugiere algo más de decisión para realizar mediciones que normalmente se desprecian por “imprecisas”; determinar el valor de una magnitud empleando solamente los sentidos no forzosamente es una mala “medición”. Tampoco una medición realizada con los instrumentos que habitualmente se encuentran en un colegio debe ser una mala medición, aunque el valor obtenido discrepe del valor reportado en la literatura. Una recomendación sería pedir a los alumnos estimar el valor de la magnitud a medir —desde luego con el correspondiente intervalo de incertidumbre—, y luego realizar la medición, estimando el nuevo intervalo de incertidumbre. Así se observará que la medición ha aportado algo. En especial se sugiere no hacer un “dogma” de las mediciones; muchas generaciones de estudiantes en general, y de físicos en particular, fueron “torturadas” en sus prácticas de laboratorio.

Referencias

[1] La ecuación (1.1) es válida únicamente mientras la incertidumbre sea pequeña comparada con el valor medido, pero se puede modificar de manera que también sea válida cuando no se cumpla dicha condición:

$$M = \text{ld} \left(\frac{\log \frac{X_{a2}}{X_{d2}}}{\log \frac{X_{a1}}{X_{d1}}} \right) \text{bit.} \quad (1.2)$$

Por ejemplo, si se conoce que el número de protones en el universo se sitúa entre 10^{70} y 10^{90} , y alguien deduce de sus mediciones cosmológicas que el valor debe situarse entre 10^{75} y 10^{85} , entonces la ecuación (1.2) indicará que se ha obtenido una ganancia en información de:

$$M = \text{ld} \left(\frac{\lg 10^{20}}{\lg 10^{10}} \right) \text{bit} = \ln 2 \text{ bit} = 1 \text{ bit}$$

En caso que la incertidumbre sea pequeña comparada con el valor medido, la ecuación (1.2) se transforma en (1.1).

1.20 La variable independiente

Tema

A menudo se representa la entropía (al igual que la entalpía) en función de la temperatura, como en la Fig. 1.2. A la temperatura en que se presenta una transición de fase, la entropía da un salto.

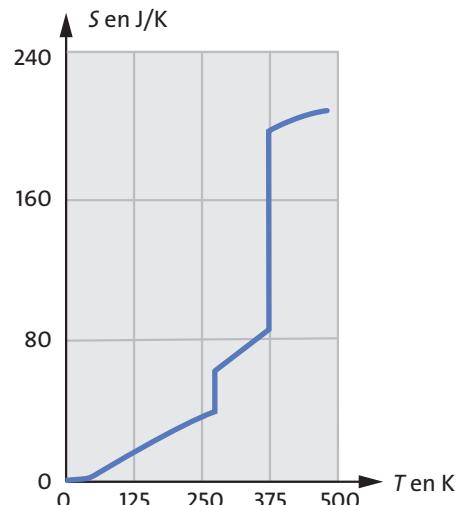


Fig. 1.2 Entropía de 1 mol de agua en función de la temperatura

También se acostumbra representar el momentum en función de la velocidad, como en la Fig. 1.3:

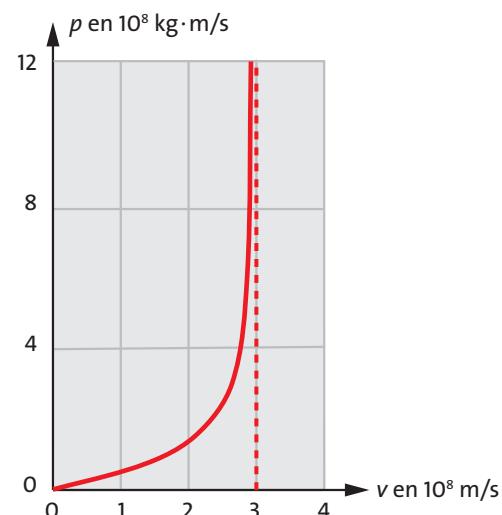


Fig. 1.3 Momentum de un cuerpo de masa 1 kg en función de la velocidad.

La variable independiente

A la velocidad límite c , la curva tiene un “pico”, se presenta una singularidad.

Defectos

Ambas imágenes sugieren que algo no está bien. Quizás venga a la mente el dicho *natura non facit saltus*, pero el asunto es aún más fácil. Basta con invertir la asignación de las dos variables a los ejes de abscisas y ordenadas respectivamente, Fig. 1.4 y Fig. 1.5. Lo que antes era la variable independiente se convierte en la dependiente, y viceversa.

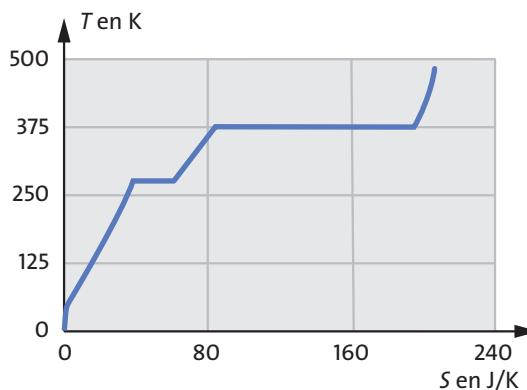


Fig. 1.4 Temperatura de 1 mol de agua en función de la entropía

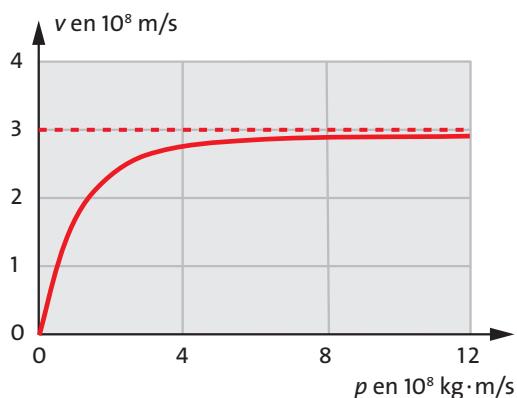


Fig. 1.5 Velocidad de un cuerpo de masa 1 kg en función del momentum

Tanto los saltos como el “pico”, o singularidad, han desaparecido.

¿Pero, no se trata solo de un truco sin consecuencias? En absoluto. Los diagramas no solamente informan de la relación entre S y T , o entre p y v . También muestran

cuál es la variable “independiente”, y por independiente se entiende aquella a la que se puede fijar su valor. Veamos de nuevo los dos casos.

La Fig. 1.2 dice, o sugiere que si se cambia la temperatura, el contenido de entropía del sistema considerado cambia como indica la curva. En particular, muestra que la entropía aumenta abruptamente a 273 K.

En la Fig. 1.3 cambia la velocidad y se observa que a medida que se acerca a los 300 000 km/s, el momentum aumenta cada vez más y adquiere valores gigantescos.

El problema es que no es posible aumentar a corto plazo la temperatura de 273 K a 274 K. Simplemente no es posible. No funciona. Al parecer, la variable independiente no es tan independiente como se pensaba. ¿Cómo es posible aumentar la temperatura en primer lugar? Suministrando entropía. Lo que se puede hacer es añadir o quitar entropía; el cuerpo o sistema reacciona entonces como le parece.

Lo mismo ocurre con el momentum y la velocidad. La magnitud que se puede manejar más fácilmente es el momentum. Se pisa el acelerador para que el motor bombee momentum de la tierra al coche, en el velocímetro se ve cuál es el efecto. O se carga una partícula con momentum, la partícula inicialmente se acelera, y a medida que se sigue suministrando momentum, el aumento de la velocidad se hace cada vez más pequeño. En un acelerador de partículas, la mayor parte del momentum se suministra cuando las partículas ya han alcanzado la velocidad límite, de modo que su velocidad (casi) no aumenta más.

Una vez más, cuando se calienta se añade entropía; cómo reacciona el cuerpo es cosa suya. Puede calentarse pero no tiene porqué hacerlo. Cuando se “acelera”, se añade momentum. La reacción del cuerpo es cosa suya, puede volverse más rápido, pero no tiene porqué.

Origen

Se eligió como variable independiente la magnitud sobre la cual se cree tener una mejor visión. En mecánica, se trata por supuesto de la velocidad, sobre todo después de tres semanas de enseñanza de la cinemática y de la degradación del momentum como variable auxiliar para describir los choques.

En termodinámica, la temperatura parecía ser la magnitud simple y descriptiva, mientras que la entropía, según el malentendido común, era una construcción abstracta y no descriptiva.

Eliminación

Se sugiere dibujar el diagrama $T(S)$, en lugar del $S(T)$. Asimismo, dibujar el diagrama $v(p)$, en lugar del $p(v)$. Y también, dibujar el diagrama $E(p)$, y no el $E(v)$.

Leyes de conservación

1.21 Leyes de conservación

Tema

De cada magnitud extensiva es posible afirmar si esta se conserva o no; algunas de ellas, según nuestros conocimientos actuales, obedecen a una ley universal de conservación: la energía, el momentum, el momentum angular, la carga eléctrica, el número leptónico, el número bariónico y la carga de color. De una única magnitud física sabemos que obedece a la “mitad de un principio de conservación”: la entropía puede ser producida pero no destruida. Cada magnitud no-conservada (no conservativa) puede “conservarse” bajo ciertas circunstancias, la entropía se comporta como una magnitud que se conserva en procesos reversibles. La cantidad de sustancia, que en general es una magnitud no-conservada, durante muchos procesos no cambia su valor.

Defectos

Cuando se ponen de relieve las magnitudes extensivas, se obtiene una representación de la Física en la cual sus diferentes áreas tienen la misma estructura, entonces la mecánica, la termodinámica, la electrodinámica e incluso la química aparecen como casos especiales de un sistema conceptual unificado. Para poder aprovechar dicha estructura común es preciso tratar de manera análoga a las magnitudes que se corresponden, se debe dar el mismo tratamiento a la conservación (o no conservación) de las magnitudes extensivas y en la enseñanza tradicional esto no siempre se hace.

La conservación de la energía se presenta como uno de los principios más importantes de toda la Física, la conservación del momentum se viste de un traje extrañamente complicado —las leyes de NEWTON— de tal forma que la sencilla ley de conservación casi no se reconoce. Muy distinto es el tratamiento que se da a la carga eléctrica: al introducirla no se menciona nada sobre su conservación, simplemente se presupone. La sencilla afirmación de que la entropía se puede producir pero no destruir se encuentra, en algunos textos escolares, solamente en letra menuda, en notas complementarias o en un capítulo final, el cual nunca alcanzará a estudiarse. La no conservación de la cantidad de sustancia nunca se formula como teorema o ley, tampoco el hecho de que para cierto tipo de procesos esta se conserva. Finalmente, en lugar de formular los sencillos y útiles teoremas de conservación en física nuclear y de partículas, se malgasta tiempo precioso, en esta etapa de la enseñanza, en discutir detalles de poca importancia sobre medidores de radiactividad y temas similares.

Origen

Las leyes de conservación o no conservación de las magnitudes extensivas reflejan el desarrollo histórico de la Física.

Si el descubrir y formular alguno de dichos teoremas fue difícil y laborioso, o si su formulación estuvo en duda por largo tiempo, entonces aún hoy día se emplea mucho tiempo en su enseñanza, además de presentarlo como una ley o teorema importante. El ejemplo más destacado de esto es la ley de conservación de la energía, sobre la cual ha existido un exagerado interés basado posiblemente en el hecho de querer violarla, creando un *perpetuum mobile*, lo cual generaría grandes ingresos económicos.

Esto puede ser, sin embargo mostraría la falta de imaginación de los potenciales inventores, ya que al encontrar un método de violar cualquier otro principio de conservación también se podrían obtener pingües ganancias.

Si el descubrimiento y formulación de un principio de conservación o no conservación fue rápido y sin oposición o cuestionamiento, su enseñanza también será rápida e incluso puede omitirse y no enseñarse.

Eliminación

Se ganará en el proceso de enseñanza — aprendizaje si:

- 1 Se formula claramente la conservación o no conservación para cada magnitud extensiva.
- 2 Se destaca la importancia de la conservación o no conservación en cada caso, sin olvidar la carga eléctrica, la cantidad de sustancia, los números leptónico y bariónico.
- 3 No se exagera la importancia de la conservación, como en el caso de la energía.

1.22 Sistemas aislados

Tema

Para formular la conservación de la energía y de otras magnitudes, a menudo se hace referencia a un sistema aislado, el cual se puede imaginar como una región del espacio, donde “aislado” significa que a través de su superficie de delimitación no hay un flujo de la magnitud considerada.

Refiriéndose a la conservación de la energía, se encuentran frases como las siguientes o similares:

- 1 “La ley de conservación de la energía establece que el valor de la energía de un sistema aislado (sin interacción con ningún otro sistema) permanece invariable con el tiempo.” [1]

- 2 “Un sistema aislado es uno para el cual no hay transferencias de energía por la frontera. La energía en tal sistema se conserva.” [2]
- 3 “La tercera ley fundamental es la conservación de la energía, la cual también se conoce como la primera ley de la termodinámica. La energía total de un sistema aislado permanece constante.” [3]
- 4 “La energía de un sistema aislado es constante con el tiempo.” [4]

Defectos

El concepto de conservación de una magnitud extensiva no es un concepto difícil, esto se debe al hecho de que es posible tener una idea intuitiva simple de cada una de dichas magnitudes, imaginándolas como una especie de fluido o sustancia. Lo cual permite formular la conservación de una magnitud extensiva X así: “ **X no puede ser creada ni destruida**”. La formulación exacta no importa mucho, la conservación es algo que se puede expresar fácilmente con el vocabulario del lenguaje cotidiano.

Una consecuencia de esta formulación es que el valor de X en una región de espacio puede cambiar solamente gracias a una corriente de X que entra en o sale de la región. Matemáticamente este hecho se puede expresar así:

$$\frac{dX}{dt} + I_x = 0$$

Aquí dX/dt indica la rapidez de cambio del valor de X dentro de la región, siendo I_x la corriente a través de la superficie de la región.

Las formulaciones de la conservación de la energía que se refieren a un sistema aislado son un caso particular de este teorema. “Un sistema se encuentra aislado” significa que no existe un flujo a través de su superficie. Pero el aislamiento es una restricción innecesaria, ya que la conservación es válida independientemente de que el sistema esté aislado o no.

Para certificar que el número de estudiantes se conserva no hace falta cerrar la puerta del aula, no altera la situación el hecho que de vez en cuando alguien entre o salga, siempre y cuando se pueda comprobar que el número de estudiantes disminuye solamente cuando alguno sale y aumenta cuando alguno entra.

Origen

Formular la conservación refiriéndose a un sistema aislado, es una reliquia del penoso desarrollo de la idea de que la energía es una magnitud extensiva. Hasta poco antes de comienzos del siglo 20 la posibilidad de localizar la energía era algo no probado, aún no era posible

atribuir a la energía una densidad, una corriente y una densidad de corriente. En su libro sobre la conservación de la energía, publicado inicialmente en 1887, Max PLANCK (1858–1947) escribe: “... porque, por dicha definición, la cantidad de la energía se mide solo por estos efectos externos, y si se quiere imaginar la energía como un sustrato material, hay que buscarlo en las interacciones del sistema; solo aquí la energía encuentra su explicación y por lo tanto su existencia conceptual. Mientras se abstraen de los efectos externos de un sistema material, no se puede hablar de su energía, ya que no está definida... Por otra parte del principio tal como lo acabamos de derivar deducimos que la energía de un sistema permanece constante si el proceso que se ejecuta con ello no produce efectos externos, cualquiera sean los efectos internos. Esta propuesta nos lleva a concebir la energía contenida en un sistema como una magnitud que es independiente de los efectos externos.” Y más adelante: “Sin embargo, es evidente que la interpretación del concepto de energía como algo sustancial no solo conlleva un aumento de claridad, sino también un avance directo del conocimiento científico... Tan pronto como se entra en esta cuestión, la incertidumbre, que antes estaba relacionada con el mismo concepto, la transforma en un problema físico que se puede solucionar...” [5].

La mencionada solución llegó pocos años más tarde con Gustav MIE (1869–1957) [6], quien demostró que es posible formular la ley de conservación de la energía de manera local, es decir, en la forma de una ecuación de continuidad. Desde entonces la separación entre el sistema y su ambiente ya no era necesaria.

Aunque transcurrieron unos 50 años hasta que fue comprobado el carácter extensivo o “sustancial” de la energía, la idea de que esto fuera así estuvo presente desde antes. En su libro *La Energía* publicado en 1908, Wilhelm OSTWALD (1853–1932) —premio Nobel de Química en 1909— califica el trabajo de Robert MAYER (1814–1878) con las siguientes palabras: “Para nuestro análisis general lo más esencial que Mayer ha hecho, es la idea de sustancia de lo que él llama fuerza, es decir, de la energía. Para él esto es una realidad, un ser propio y bien definido; su indestructibilidad e increabilidad caracteriza su realidad”. [7]

Eliminación

Formular la ley de conservación de una magnitud X así: “La energía, el momentum, el momentum angular, la carga eléctrica,... no se pueden crear ni destruir.” Igualmente importantes son las afirmaciones sobre la no conservación de una magnitud extensiva, por ejemplo: “La entropía se puede crear, pero no destruir”.

Partículas en todas partes

Referencias

- [1] Principio de conservación de la energía. [en línea]. En: https://es.wikibooks.org/wiki/Física/Magnitudes_mecánicas_fundamentales/Principio_de Conservación_de_la_energía [consultado el 26 de octubre de 2022]
- [2] J. Jewett, y R. Serway, *Física para Ciencias e Ingenierías*, México, Thomson Paraninfo, 2006, v.1, p.221.
- [3] M. Potter, y D. Wiggert, *Mecánica de fluidos*, México, Thomson Paraninfo, 2003, p.22.
- [4] S. Burbano, E. Burbano, y C. Gracia, *Física general*, 32a ed, Madrid, Editorial Tébar, 2003, p.159.
- [5] M. Planck, *Das Prinzip der Erhaltung der Energie*, B. G. Teubner, Leipzig, 1908, p.115
- [6] G. Mie, *Entwurf einer allgemeinen Theorie der Energieübertragung*, Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, CVII, Band VIII, Heft, 1898, p.1113
- [7] W. Ostwald, *Die Energie*, Verlag Johann Ambrosius Barth, Leipzig, 1908, p.59

1.23 Partículas en todas partes

Tema

Se encuentran citas como las siguientes:

- 1 “Cada vez que las partículas del vapor de agua caliente chocan contra la paleta haciendo retroceder el rodet [de la turbina], transfieren una parte de su energía cinética a esta última y rebotan con menor velocidad.”
- 2 “Ya que a menudo la demanda de electricidad es menor, cuando el viento sopla con mayor fuerza, Dinamarca tiene que vender su exceso de electrones por peniques a los países vecinos...”
- 3 “Debido a su gran longitud de onda y a la pequeña fricción entre las moléculas del agua un Tsunami casi no se amortigua.”

Defectos

Concerniente a la primera cita: en la turbina solo pocas moléculas experimentarán el contacto con las paletas, entonces, decir “las” moléculas es algo exagerado, lo correcto sería “algunas pocas”. La segunda cita pertenece a una revista de divulgación científica de alta reputación. Una persona con cultura científica comprenderá lo que se quiere decir, pero otra cosa es lo que se dice en realidad. (En una corriente alterna con densidad de corriente típica los electrones oscilan adelante y atrás algunas micras, decir que se mueven de Dinamarca a países vecinos parece algo exagerado. Además no hay que olvidar que existen dos conductores). Una

persona sin educación especial en Física, es decir el lector promedio de la revista, puede creer que los electrones van de Dinamarca a Alemania o Suecia. La tercera cita: no puede haber rozamiento entre las moléculas de agua.

Se podrían considerar estos ejemplos como pequeños deslices y no merecería la pena comentarlos, a no ser por el hecho de que son sintomáticos para una tendencia muy pronunciada de muchos físicos: reducir cada explicación a una afirmación sobre las partículas. Mientras un fenómeno no es interpretado por el comportamiento de algún tipo de partículas, no es comprendido; esta parece ser la opinión.

Se habla de las moléculas del agua cuando en realidad se refiere al agua, de los fotones cuando se piensa en la luz, de los electrones cuando en verdad se quiere hablar de la carga eléctrica o, como en el caso de la segunda cita, de la energía.

Por supuesto en cada caso se puede comentar sobre el comportamiento de las partículas, ya que estas existen y hacen alguna cosa. Sin embargo, lo que hacen no siempre es esclarecedor de lo que interesa en realidad. No se entiende mejor el funcionamiento de la turbina empleando las moléculas en lugar del vapor, tampoco los fenómenos eléctricos con los electrones en lugar de la carga eléctrica, ni el Tsunami con las moléculas de agua en cambio del agua misma, o el evaporarse del alcohol empleando las moléculas de alcohol en remplazo del potencial químico.

La Física se sirve de magnitudes físicas, las cuales son empleadas por profesores y estudiantes sin mayor dificultad. Es cierto que las partículas son intuitivas, pero de las magnitudes también es fácil y necesario hacerse una idea intuitiva, se puede representar la carga eléctrica o la energía como fluidos, por ejemplo. Si solo se recurre a las partículas, en muchos casos resulta difícil llegar a una adecuada comprensión, o a una descripción física y matemática sencilla, y dicha descripción casi nunca corresponde a una verdad más profunda.

De la combinación intrincada de muchas partículas surgen en un nivel superior nuevos fenómenos que se pueden describir por una teoría sencilla. En la teoría del conocimiento este fenómeno se ha llamado emergencia. Al reconducir el comportamiento de un sistema macroscópico a las partículas, a veces se explica lo sencillo de manera complicada.

Origen

La tendencia, la moda, la costumbre, y la actual es el reduccionismo. Este cosechó grandes éxitos en el siglo 19 y así se ha impuesto en la Física. Lo que no se podía

reducir al movimiento de las partículas, y esto quiere decir esencialmente a la mecánica, era considerado como no comprendido.

Eliminación

En la turbina el vapor se dilata y empuja sobre las paleas del rodete. En este proceso su presión y temperatura disminuyen del mismo modo que decrece la temperatura del aire atmosférico que sube. Dinamarca no exporta electrones sino energía eléctrica. Respecto al Tsunami se puede afirmar que el agua es lo suficientemente “fluida”, en lugar de hablar de la fricción de las moléculas.

1.24 Interacciones

Tema

La palabra “interacción” se emplea en Física en diferentes contextos.

Ya en el año 1899 Felix AUERBACH (1856–1933) escribía: “*Las fuerzas con las cuales dos cuerpos actúan el uno con el otro son opuestas y de igual módulo. O bien, en términos más generales: A cada fuerza abstraída de los fenómenos pertenece una fuerza contraria opuesta del mismo módulo, que con la primera representa una interacción.*” [1]

En diversas enciclopedias de ciencia y tecnología se encuentran definiciones como las siguientes: “*Interacción: Expresión empleada en la Física para la manera en que partículas elementales entran en relación dinámica mutuamente o con un campo respectivamente.*” [2].

“*Interacción, designación general para la mutua influencia de objetos físicos. El concepto incluye los efectos sobre puntos de masa y cuerpos, descritos en la Física clásica por vectores de fuerza (campos de fuerza), así como las relaciones mutuas entre partículas elementales o de los campos que las representan, donde la idea de vectores fuerza presenta problemas.*” [3].

“*Interacción: Influencia recíproca entre cuerpos o entes de cualquier naturaleza.*” [4].

Definiciones similares se encuentran en textos de diversos países e idiomas.

Defectos

Las citas muestran que en Física se llama interacción a varios fenómenos y procesos.

- Se habla de interacción cuando dos cuerpos ejercen fuerzas el uno al otro (entre sí) en el sentido de la tercera ley de NEWTON. En este caso, a primera vista, parece que el término interacción es apropiado, si un cuerpo A ejerce una fuerza sobre otro cuerpo B, se-

gún la tercera ley de NEWTON, B ejerce una fuerza sobre A. Ya que se dice que una fuerza “actúa” sobre un cuerpo, se está en presencia de dos efectos: de A sobre B y de B sobre A, entonces es una interacción aún en el sentido común de la palabra. Sin embargo ya se nota un problema, la palabra es adecuada mientras se describe el fenómeno con el modelo de acciones a distancia introducido por NEWTON. En el fenómeno participan dos sistemas parciales claramente separados: un cuerpo A y un cuerpo B, y nada más, pero desde hace más de cien años se sabe que no es necesaria la solución provisional de una acción a distancia, en un trabajo publicado en 1887 PLANCK dice lo siguiente: “... porque si bien se necesitó el trabajo laborioso de muchos siglos para hacer una costumbre viva la idea de una acción inmediata a distancia, así debe ser posible despojarse de dicha costumbre una vez se ha notado que ya no sirve.” [5]; hoy se tiene el convencimiento que todas las acciones están basadas en el transporte de magnitudes físicas. En particular las fuerzas newtonianas no son otra cosa que transportes de momentum. Si el resorte (que se supone sin masa) atrae los dos cuerpos hacia el centro y sobre ellos no “actúan otras fuerzas”, el momentum de A aumenta mientras el de B disminuye (suponiendo para el sistema de referencia positivo a la derecha), Fig. 1.6.

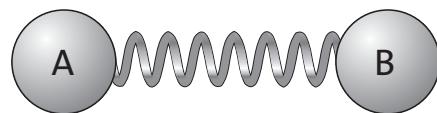


Fig.1.6 Transporte de momentum.

Pero no es que el momentum de B simplemente desaparezca mientras aparece momentum en A, sino que es transportado entre B y A a través de un tercer sistema que se encuentra entre los dos cuerpos, en este caso el resorte. Entonces, es posible indicar con precisión por cuál “camino” el momentum va de B a A. Visto así el fenómeno, se nota que el término “interacción” no es muy correcto. Si un sistema B entrega algo y A lo recibe, es más “natural” decir que se presenta una transmisión o un transporte. Al verter agua de un cubo a otro no se caracterizaría el proceso como una interacción.

- En la Física de partículas se distingue entre las partículas fermiónicas de la materia (hadrones y leptones) y las bosónicas, partículas de “interacción” que a veces son llamadas partículas de campo o de fuerza. Se habla de “interacción” cuando una partícula de interacción es generada o aniquilada. Ya que existen cuatro tipos

El reloj de cuarzo y el contador Geiger

de campos bosónicos también existen cuatro tipos de interacción: la electromagnética, la gravitatoria, la fuerte y la débil. Pertenecen también a estos procesos la interacción en el sentido clásico, cuando se transmite momentum entre dos partículas de materia permaneciendo inalterada la naturaleza de estas (ejemplo: dispersión electrón-electrón), además pertenecen a esta clase de interacción, la interacción entre dos partículas de campo (ejemplo: dispersión fotón-fotón o gluón-gluón). También entran en esta clase los procesos en los cuales las partículas cambian su naturaleza (ejemplo: el decaimiento beta, en el cual de un neutrón se “obtiene” un protón, un electrón y un antineutrino). Se ve que en este caso el uso de la palabra “interacción” ya no coincide con el del lenguaje común. El término es utilizado para lo que se caracterizaría más adecuadamente con la palabra reacción, en el sentido químico.

- En otros dominios de la Física la palabra se emplea en un sentido aún más amplio, para la descripción de diversos procesos en los cuales participan dos (o más) subsistemas, es decir, que no existe nada que no sea interacción. La palabra “suena” a ciencia, aún cuando no se dice nada en concreto.

Origen

NEWTON no utilizó el término “*interactio*”, pero sí empleó los términos “*actio*” y “*reactio*”; al comienzo, su tercera ley fue llamada “principio de acciones opuestas”. A finales del siglo 19 se encuentra en la literatura científica la designación “interacción”, véase por ejemplo la obra de MACH —Ernst Waldfried Josef Wenzel MACH (1838–1916)— [6], pero dicho término ha adquirido su gran popularidad mucho más tarde, en la segunda mitad del siglo 20, cuando todo proceso en el cual participan dos subsistemas se convirtió en interacción.

Eliminación

Se proponen tres aspectos

- Formular la tercera ley de NEWTON con el lenguaje de acciones locales: El momentum que entrega el cuerpo B se trasladada al cuerpo A.
- En el contexto de los cuatro campos bosónicos la palabra ha adquirido un significado tan específico que debe aceptarse como nuevo término técnico, aunque no sea una solución completamente acertada.
- Utilizar el término “interacción” con parquedad, lo cual siempre será provechoso.

Referencias

- [1] F. Auerbach, *Kanon der Physik*, Verlag von Veit & Comp., Leipzig, 1899, p.41

[2] *Enzyklopädie Naturwissenschaft und Technik*, Verlag Moderne Industrie, Landsberg, 1981

[3] *Lexikon Technik und exakte Naturwissenschaften*, Fischer Taschenbuchverlag, Frankfurt am Main, 1972

[4] Gran Enciclopedia de la Ciencia y la Tecnología. Vol. 3. Barcelona: Grupo Editorial Océano, 2001, p.1366.

[5] M. Planck, *Das Prinzip der Erhaltung der Energie*, Verlag von B. G. Teubner, Leipzig, 1908, S. 274: „... denn so gut es der mühsamen Arbeit vieler Jahrhunderte bedurfte, die Vorstellung einer unmittelbaren Fernewirkung zur lebendigen Gewohnheit zu machen, so gut muß es gelingen, diese Gewohnheit wieder abzustreifen, wenn einmal wirklich festgestellt ist, daß jene Vorstellung ihren Dienst getan hat.“

[6] E. Mach, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*, Verlag F. A. Brockhaus, Leipzig, 1897, p.193

1.25 El reloj de cuarzo y el contador GEIGER

Tema

Según varios libros de texto es necesario conocer cómo funciona el contador GEIGER —Hans GEIGER (1882–1945)—, pero no el reloj de cuarzo; se estudia a fondo el termómetro de mercurio pero apenas se menciona (no siempre se hace) el termopar. Se analizan procesos a nivel atómico en un láser, pero no en una lámpara de incandescencia o en la llama de una vela, se presenta con detalle el espectrómetro de masas pero no el espectrómetro de FOURIER —Joseph FOURIER (1768–1830)—. Los procesos isotérmicos se tratan cuantitativamente, los isentrópicos no del todo. En libros (inclusive universitarios) se analiza el porqué el cielo es azul pero no porqué el resto del mundo es rojo, verde, gris, negro o blanco.

Defectos

Al plantear y diseñar un currículo o un plan de estudios, al definir los estándares de educación, pero también al preparar un curso, o una clase, se está ante la obligación de seleccionar y elegir entre diferentes opciones y posibilidades; obligación que se hace más determinante en la medida que avanza el desarrollo científico y son más los temas y aspectos a tratar en el mismo (o menor) tiempo. Por ejemplo: ¿Cuáles magnitudes físicas se estudiarán y cuáles no? ¿Cuántas horas de clase se dedicarán a la mecánica, o a la termodinámica, cuántas a la electricidad, o a un tema en particular? ¿Para qué procesos o fenómenos se dará una explicación atomística, para cuáles una macroscópica? ¿Qué aparatos de medición o

sensores se analizarán y cuáles se emplearán? Al revisar los planes de estudio se puede notar que en muchos casos la elección no ha sido muy afortunada, como se muestra con los ejemplos mencionados en el *Tema*.

Origen

A menudo un tema entra en un currículo por casualidad o “accidentalidad” histórica, luego su estudio se convierte en costumbre y ya no se cuestiona su conveniencia e importancia. Además se desarrolla una tradición de ejercicios y problemas “típicos” para los exámenes —a diferentes niveles educativos—, (con los cuales generalmente se desarrollan “solucionarios”) que garantiza la supervivencia del estudio de ciertos temas. También influye en dicha supervivencia la serie de equipos de laboratorio ofertados por los diferentes fabricantes y los existentes previamente en las instituciones. La inercia del complejo sistema compuesto por maestros, profesores, instituciones de formación de docentes, libros universitarios y escolares, sus autores, las costumbres de evaluación (exámenes de estado, etc.), los planes de estudio, los currículos, etc., es muy grande.

Eliminación

Para seleccionar los temas para el currículo, un libro escolar, o las propias clases, se recomienda el siguiente procedimiento: comenzar con la escogencia de un tema o fenómeno cualquiera que pueda ser candidato para el efecto, luego se buscan temas o fenómenos afines que puedan “competir” en cualquier aspecto con el inicialmente elegido, pueden ser de la misma dificultad, de la misma “aplicabilidad”, o del mismo valor para una educación general. Sobrevivirá solamente la propuesta soportada en suficientes argumentos que demuestren que es más importante que sus competidores, los cuales no serán incluidos. Entonces, no basta dar argumentos por los cuales un tema puede considerarse importante, tales argumentos se encuentran casi para cualquiera y siempre se pueden presentar convincentemente. Para aceptar un tema o fenómeno no basta que pueda ser considerado importante, este debe “ganar” contra sus competidores, con sobradas razones académicas.

Un ejemplo: la propuesta inicial es introducir la intensidad del campo eléctrico \vec{E} , existiendo competidores de diversa índole. Primero, la otra magnitud vectorial que permite describir el campo eléctrico, es decir, el desplazamiento eléctrico \vec{D} , luego una magnitud escalar para describir el mismo campo, el potencial eléctrico. Otros competidores podrían ser la intensidad del campo magnético, la densidad de flujo del campo magnético, el potencial escalar magnético, la intensidad del campo gravitacional y el potencial gravitacional. Luego del análisis

se llegará a la formulación de la pregunta: ¿Si se introduce la intensidad del campo eléctrico, porqué no la del campo magnético y/o la del campo gravitacional? O bien: Si no se introduce la intensidad del campo gravitacional, ¿por qué introducir la del campo eléctrico?

Probablemente no sea difícil tomar decisiones correctas en el caso anterior, algo menos sencillo posiblemente ocurra con el siguiente fenómeno: se propone tratar en una clase (a nivel básico) la dilatación térmica de sustancias sólidas y líquidas, se buscan “competidores” que en este caso podrían ser otras propiedades de los materiales: mecánicas, térmicas, eléctricas, magnéticas u ópticas, comparándolas por ejemplo respecto al orden de magnitud, (la dilatación térmica es un efecto del orden de 10^{-3}), a la importancia para la comprensión de la Física en general, o respecto a las más representativas aplicaciones técnicas. La competencia para la dilatación térmica es tan grande que apenas le quedaría una muy pequeña posibilidad de supervivencia.

La situación es similar cuando se propone estudiar el contador GEIGER en una clase básica, acá los competidores son los incontables aparatos de medición, de los cuales algunos son tan “exóticos” como el mencionado contador y otros tan omnipresentes como el reloj de cuarzo o la matriz CCD de la cámara digital.

Al comienzo se han mencionado otros temas que figuran en muchos planes de estudio, pero que seguramente no hubieran sobrevivido al método de elección propuesto y cuyos “competidores” injustificadamente no han sido elegidos.

1.26 Acciones a distancia

Tema

Afirmaciones tales como: “la tierra atrae a la luna”, “el sol ejerce una fuerza sobre la tierra”, “polos iguales se repelen y polos opuestos se atraen”.

Defectos

Estas frases promueven la idea de que existen acciones de un cuerpo A sobre un cuerpo B distante, en las cuales no está involucrado un tercer sistema que vincule A con B y transmita la fuerza. Desde que existe la primera teoría de campos, la electrodinámica de FARADAY y MAXWELL, los científicos están convencidos de que una descripción en términos de acciones a distancia no es apropiada.

Origen

El lenguaje de las acciones a distancia, tal como figura en libros de texto, viene de la época de NEWTON. Antes

Los efectos de las fuerzas y de las corrientes eléctricas

de FARADAY y MAXWELL no se tenía otra elección que representar las fuerzas gravitacionales, eléctricas y magnéticas como acciones a distancia, sin embargo, el mismo NEWTON consideraba la idea de acciones a distancia como un defecto de su teoría.

Eliminación

Cuando se introducen los conceptos de fuerzas gravitacionales, eléctricas o magnéticas entre dos cuerpos, debe introducirse un campo como tercer participante, describiéndolo como un ente que es tan real como los dos cuerpos [1]. La repulsión y atracción eléctricas pueden describirse así: dos cuerpos con cargas iguales son empujados hacia afuera por el campo eléctrico, el campo tira hacia adentro (hala) a dos cuerpos con cargas opuestas.

Referencias

[1] Véase 6.12 *El campo como región del espacio con propiedades*, p.200

1.27 Los efectos de las fuerzas y de las corrientes eléctricas

Tema

- 1 Los efectos de las fuerzas son dos: un cambio del estado de movimiento de un cuerpo o una deformación.
- 2 Los efectos de las corrientes eléctricas se pueden clasificar en tres: calorífico, magnético y químico. Según algunos textos la corriente eléctrica tiene más efectos. Además de los ya mencionados hay un efecto luminoso y un efecto fisiológico.

Defectos

Para comprender mejor la naturaleza de estas clasificaciones vale la pena comparar las dos afirmaciones, ya que la fuerza no es otra cosa que una corriente de momentum. Entonces, en las dos clasificaciones se trata de los efectos de una corriente, una eléctrica y otra de momentum. Una comparación muestra algunas incoherencias.

- Empecemos con el primer efecto de una fuerza, el de hacer cambiar el estado de movimiento. Esto se puede expresar también de la siguiente forma: una fuerza puede ocasionar el cambio del momentum de un cuerpo, o en otros términos, si una corriente de momentum entra o sale de un cuerpo, el momentum del cuerpo cambia. La afirmación análoga en el caso eléctrico sería: si una corriente eléctrica entra o sale de un cuerpo, la carga eléctrica de dicho cuerpo cambia. Es evidente que esta última afirma-

ción es acertada. Pero, ¿por qué no se incluye en la enumeración de los efectos de una corriente eléctrica? Posiblemente porque parece trivial. Se podría aducir el mismo argumento para el cambio del momentum de un cuerpo, producto de una corriente de momentum.

Las dos afirmaciones son tan evidentes como el decir que el contenido de agua de un recipiente aumenta cuando entra una corriente de agua en él.

- Pasemos al efecto calorífico de la corriente eléctrica. Es de notar que no solamente una corriente eléctrica genera calor, también lo hace una corriente de momentum (esto es una fuerza), lo cual ocurre, por ejemplo, en los procesos de fricción.
- Además la enumeración de los efectos de las corrientes eléctricas y de las fuerzas no es completa. Por ejemplo se podría tener un efecto eléctrico de las fuerzas (el efecto piezoelectrónico), un efecto óptico de las fuerzas (la fotoelasticidad), un efecto térmico pero en este caso de “enfriamiento” de la corriente eléctrica (en el termopar), etc.
- Las afirmaciones se presentan y tienen características de clasificación, pero en el sentido estricto de la palabra no existe tal clasificación, ya que por una parte no se incluyen todos los efectos y por otra algunos fenómenos entran en dos categorías a la vez. Por ejemplo, la incandescencia de un hilo conductor entra en la categoría del efecto calorífico y del luminoso.

Origen

La mecánica y la electricidad se desarrollaron independientemente, por lo cual se han establecido distintas formas de trabajo, costumbres y estrategias de enseñanza.

Se atribuye mucho más importancia a las Leyes de NEWTON (que no son otra cosa que la expresión de la conservación del momentum) que a la conservación de la carga eléctrica, que apenas se menciona y se considera casi evidente.

La resistencia eléctrica se presenta como un fenómeno importante y respetable al tratar los circuitos eléctricos. La resistencia mecánica por el contrario se presenta a menudo como un fenómeno “no deseable” que “interfiere” (y “molesta” o al menos complica) el actuar de las leyes fundamentales de la mecánica. Hace que la mecánica newtoniana se “contamine” de modo que los fenómenos sugieren la “incorrecta” interpretación aristotélica.

Eliminación

- O bien omitir el efecto de cambiar el estado de movimiento de una fuerza, o bien incluir el efecto correspondiente a la lista de los efectos de una corriente eléctrica.

Ecuación	Nombre	Comentario
$F = -D \cdot x$ (1.3)	Ley de Hooke	Para un resorte el alargamiento x y la fuerza F son proporcionales. El factor de proporcionalidad se llama constante del resorte.
$p = m \cdot v$ (1.4)	Ninguno	Definición del momentum.
$F = k \cdot v$ (1.5)	Ley de fricción de Stokes	Para medios viscosos la fuerza de fricción F es proporcional a la velocidad v . El factor de proporcionalidad se llama constante de amortiguamiento.
$n\Phi = L \cdot I$ (1.6)	Ninguno	El flujo magnético $n\Phi$ en un solenoide es proporcional a la intensidad de la corriente eléctrica I . El factor de proporcionalidad se llama inductancia.
$Q = C \cdot U$ (1.7)	Ninguno	La carga eléctrica Q de un condensador es proporcional a la tensión U entre las placas. El factor de proporcionalidad se llama capacidad.
$U = R \cdot I$ (1.8)	Ley de Ohm	La intensidad de la corriente eléctrica I en un conductor es proporcional a la tensión eléctrica entre los extremos del mismo.

Tab. 1.1 Relaciones lineales

- Incluir el efecto calorífico de las fuerzas.
- No presentar los efectos como clasificación.

1.28 Curvas características lineales

Tema

En los cursos de mecánica y electricidad se estudian las relaciones lineales mostradas en la Tab. 1.1.

Defectos

Las ecuaciones mencionadas están vinculadas entre sí, describen el comportamiento de cantidades físicas en términos de tres elementos “pasivos” mecánicos y eléctricos, según el caso, con curvas características lineales. Cada una de las seis ecuaciones es válida en un rango de valores en general pequeño o relativamente pequeño para la variable independiente respectiva. Así por ejemplo, un resorte no obedece la ley de Hooke —Robert Hooke (1635–1703)—, cuando se ha estirado demasiado, el momentum no es proporcional a la velocidad, cuando esta no es pequeña comparada con la de la luz c , etc.

Es decir, por una parte, la relación lineal es un caso particular y, por otra, dicho caso particular es importante, ya que siempre se cumple como aproximación para valores pequeños de las variables.

El vínculo entre dichas ecuaciones es más notorio al considerar el consabido caso del oscilador mecánico y del circuito resonante eléctrico. En cada una de las ecuaciones diferenciales correspondientes a las oscilaciones amortiguadas están representados los tres elementos, y a cada elemento del oscilador mecánico le corresponde uno del oscilador eléctrico.

Visto así, es clara la relación entre las seis ecuaciones. Sería conveniente mostrar y analizar esta situación de

“uniformidad” al enseñar mecánica y electricidad, pero en realidad se procede de otro modo.

La “diferenciación” empieza con los nombres: solo dos de las ecuaciones mencionadas tienen nombres propios establecidos, las leyes de Hooke y de Ohm —Georg Ohm (1789–1854)—. Esta situación no es marginal ni secundaria, una ecuación con nombre propio tiene más “peso” e impacto —especialmente en los estudiantes— que una ecuación sin nombre.

Pero más importante que lo anterior es la manera como se suele presentar las ecuaciones. Las ecuaciones (1.3), (1.7) y (1.8) son introducidas como la expresión de una proporcionalidad observable, y al mismo tiempo como ecuación de definición del factor de proporcionalidad.

La ecuación (1.4) al contrario, se concibe como ecuación de definición del momentum. Ya que es considerada como ecuación de definición pura, no aparece como expresión de una ley científica, por lo cual parece natural que no tenga nombre propio.

Respecto a la ecuación (1.5), que es análoga a la ley de Ohm, el estudiante de secundaria la conoce solo marginalmente: en general en la parte de mecánica de sus libros de texto no se la menciona; al parecer los procesos para los cuales la fuerza es proporcional a la velocidad no se consideran importantes. Por otro lado al tratar las oscilaciones mecánicas aparece como mecanismo típico de fricción por razones evidentes. La ecuación (1.6) fue analizada en [1].

Origen

Las seis ecuaciones han sido introducidas en la Física por diferentes personas en diversos contextos a lo largo de 200 años. A pesar de que las analogías son fáciles de notar, y a pesar de que son tema de cursos completos universitarios, en la enseñanza de la Física —particularmente en secundaria— poco ha cambiado al respecto.

Falsos amigos

Eliminación

Es inútil intentar suprimir el nombre a una ecuación que lo tiene desde siglos, y bastante difícil darle nombre a una conocida ecuación que todavía no lo tiene. En realidad no sería “descabellado” dar un nombre a la ecuación $p = m \cdot v$, el nombre de uno de sus descubridores, podría ser “Ley de DESCARTES”, o “Ley de HUYGENS”. Pero lo que si puede hacerse sin mayor dificultad al enseñar, es mostrar la analogía entre las ecuaciones y mencionar la falta de “equidad” referente a la asignación de nombres.

El hecho de que la proporcionalidad entre p y v se pueda observar en un experimento, permite mostrar que la relación (1.4) aparece como ecuación de definición de la masa inercial. Por medio de la segunda ley de NEWTON $dp/dt = F$ se deduce la apreciada ecuación $F = m \cdot a$.

Referencias

[1] Véase 6.11 *La inductancia*, p.199

1.29 Falsos amigos

Tema

El concepto de calor se introduce y utiliza en los libros de texto de la forma siguiente:

- “Si necesitamos agua caliente, tenemos que suministrar calor al agua, por ejemplo, poniéndola en una placa caliente o calentándola con un calentador de inmersión. El agua absorbe el calor, su energía térmica aumenta.”
- “La energía térmica Q suministrada a un cuerpo se mide por el cambio de su energía interna U . En el siguiente experimento, la energía térmica Q se genera por fricción, lo que provoca un aumento de la temperatura.”

Defectos

En este caso no preocupa principalmente el calor, sino el comportamiento de los autores, que no parece correcto.

Algunos temas de la física son más difíciles, otros más fáciles.

Es fácil de entender y explicar algo para lo que tenemos un modelo que funciona bien, por ejemplo, la electricidad: “Piensa en la carga eléctrica como algo que fluye por el cable o por la bombilla...”

Y hay temas que son más difíciles, porque no se puede encontrar un modelo adecuado; no hay un “es como...” Algunos ejemplos son los fenómenos de la física cuántica (el carácter onda-partícula de los electro-

nes) o la relatividad (la fusión del espacio y el tiempo). Si no se tiene un modelo adecuado para un fenómeno, no queda más remedio que narrar a los alumnos algo así como: “Lo que les contaré es extraño, casi increíble. Nunca han visto o experimentado algo así, pero no es contradictorio. Solo tienen que acostumbrarse a ello. Así esta hecho el mundo.”

Existe un tercer tipo de afirmaciones: se presentan como fáciles de entender, pero no lo son, y su dificultad se oculta a los alumnos. Se les deja sacar una conclusión errónea, pero se cree tener la conciencia tranquila porque no se ha dicho nada incorrecto.

Las siguientes citas son un ejemplo de ello.

- “El agua absorbe el calor, su energía térmica aumenta.”
- “La energía térmica Q suministrada a un cuerpo se mide por el cambio de su energía interna U .”

Por supuesto, los estudiantes entienden las frases de esta manera: el calor absorbido por el agua está contenido en ella después de haber sido absorbido, o el calor suministrado puede medirse de alguna manera después de haber sido suministrado.

Sin embargo, como saben los autores de las frases, y esperamos que todos los profesores que imparten asignaturas relacionadas, esto no es así. No se trata de que lo que se suministra solo cambie de nombre. Más bien, simplemente no tiene sentido hablar de un contenido de calor.

Pero la conclusión errónea es inevitable, porque se basa en el hecho de que los estudiantes interpretan la palabra escrita o hablada de una manera que corresponde a la semántica de la lengua, algo entregado por A estaba en A antes, pero no está después; y algo recibido por B no estaba allí antes, pero sí está después.

Este tipo de afirmaciones (y hay varios ejemplos más) son una de las razones por las que la física (junto con la química) se ha convertido en una de las asignaturas escolares menos apreciadas.

Y dentro de la física, la termodinámica sale especialmente mal librada.

Se muestra el resultado de una encuesta realizada a unos 20 estudiantes de Licenciatura (futuros profesores de Física en secundaria). Se les preguntó cómo se sentían de competentes en cinco áreas de la física. Se les pidió que se calificaran a sí mismos en una escala de 0 a 10 (0 = muy incompetente, 10 = muy competente):

- | | |
|------------------------|---|
| • Mecánica | 9 |
| • Electromagnetismo | 6 |
| • Oscilaciones y ondas | 7 |
| • Termodinámica | 1 |
| • Física moderna | 1 |

Para qué hacerlo fácil si se puede hacer difícil

Por supuesto, existen otros ámbitos de la vida en los que incluso las cosas más inverosímiles se cuentan con palabras complacientes, con la esperanza de que el destinatario no compruebe su coherencia, sino que las repita o recite. Pero la física debe mantener cierta distancia respecto a ellos.

Origen

El origen en este caso particular ha sido abordado anteriormente [1–5]. La cuestión principal aquí es de dónde viene nuestra disposición a decir algo que sabemos que será malinterpretado. Obviamente, todos tenemos tendencia a hacerlo.

Nos dejamos arrastrar por la física en nuestros estudios y no podemos permitirnos mirar tan de cerca cada punto que nos demos cuenta de que aquí se ha ocultado hábilmente un problema.

Por último, una sospecha. Los experimentos correspondientes que se hacen en la escuela o en la formación práctica en la universidad, específicamente los calorimétricos, en los que se determina la capacidad calorífica específica para el agua y quizás otras sustancias, sugieren, de hecho parecen demostrar, que es razonable y correcto imaginar que el calor está contenido en los cuerpos: se suministra x kJ de calor a un cuerpo, se mide el cambio de temperatura, y si se quiere volver al estado anterior, no hay más remedio que quitarle los mismos x kJ en forma de calor. ¿Por qué habría de ser incorrecto decir que x kJ de calor han estado en el cuerpo mientras tanto y que se puede calcular su valor a partir del cambio de temperatura? Es imposible ver el porqué esto es incorrecto. Y quien haya llegado a esta conclusión debe aceptar que las afirmaciones de las frases citadas, a saber, que no es el calor sino la energía térmica o interna la que aumenta, son una mera convención verbal o una moda. La causa de la falacia es, por supuesto, clara: dado que las sustancias líquidas y sólidas apenas cambian su volumen cuando se suministra calor, el error en la conclusión no puede reconocerse. Solo se puede reconocer si se estudian los gases.

Eliminación

En primer lugar, dos recomendaciones generales:

- Como estudiante, admite y pregunta cuando no hayas entendido algo.
- Como profesor, no ocultes las dificultades tras palabras cómodas.

Especialmente en el tema del contenido de calor.

- Se debe explicar el asunto adecuadamente. Esto solo se puede hacer si se está hablando de gases, y probablemente solo se recomienda para la universidad.

- Se sugiere no introducir la magnitud Q . El nombre de calor es un falso amigo. Sin ella, todo es más sencillo. Ocurre algo similar con la segunda magnitud con propiedades similares: el trabajo, que, afortunadamente, ya ha salido de muchos libros de texto y planes de estudio.

Referencias

- [1] Véase 5.14 *Equivalencia entre calor y trabajo*, p.139
- [2] Véase 5.21 *Energía interna y calor*, p.147
- [3] Véase 5.22 *Energía térmica*, p.148
- [4] Véase 5.30 *Magnitudes de estado*, p.159
- [5] Véase 5.34 *Calor y capacidad calorífica*, p.165

1.30 Para qué hacerlo fácil si se puede hacer difícil

Tema

- 1 Un vagón sale rodando y finalmente se detiene.

Descripción física: La tierra, la carretera o el aire ejercen una fuerza sobre el coche. Esto provoca una aceleración negativa del vagón.

- 2 Una esfera conductora cargada (positivamente) se descarga.

Descripción física: Los electrones fluyen desde la tierra a través de la conexión conductora hacia la esfera para que esta vuelva a ser neutra.

- 3 Una taza de café caliente se enfriá.

Descripción física: La energía interna del café disminuye a medida que libera energía en forma de calor al entorno, aumentando en consecuencia su entalpía.

Defectos

Los tres procesos son en gran medida análogos entre sí. En cada uno de ellos, se tiene un flujo de una magnitud extensiva y un gradiente de la magnitud intensiva asociada. En las tres situaciones se genera entropía. En los tres casos, una vez finalizado el proceso, no se percibe nada de la magnitud extensiva.

En cierto sentido, es la misma obra teatral repetida tres veces, representada con diferentes actores: en el primer caso, momentum y velocidad; en el segundo, carga y potencial eléctricos; y en el tercero, entropía y temperatura. Así de sencillo hizo el buen Dios (o quien sea) el mundo, pero la gente aún no se ha dado cuenta.

Origen

Se aprendió a describir los procesos en grandes intervalos de tiempo, hasta de 100 años, en condiciones muy

Campos de fuerza

diferentes y en distintos lugares. Cuando la relación existente pudo ser vista, o incluso fue vista, ya era demasiado tarde. No se puede hacer nada contra un patrón explicativo que está firmemente anclado en los libros de texto, en los planes de estudio y también en las mentes de las personas, no necesariamente porque no se pueda, sino probablemente también porque no se quiere. Si alguien se atreve a señalar esa posibilidad, el consejo de la comunidad correspondiente decidirá las medidas para castigar ese comportamiento.

Eliminación

- 1 El momentum fluye por sí mismo desde el cuerpo con la velocidad más alta hacia el cuerpo con la velocidad más baja.
- 2 La carga eléctrica fluye por sí misma desde el cuerpo con el potencial eléctrico más alto hacia el cuerpo con el potencial eléctrico más bajo.
- 3 La entropía fluye por sí misma desde el cuerpo con la temperatura más alta hacia el cuerpo con la temperatura más baja.

En los tres casos se genera entropía. Para su eliminación se requiere energía.

Al final, ya no se nota nada del momentum, la carga o la entropía, ya que el sistema que ha absorbido el momentum, la carga o la entropía es muy grande, es decir, las cantidades de las tres variables se han “diluido” mucho.

1.31 Campos de fuerza

Tema

- “Si sobre una partícula, en cada punto del espacio, actúa una fuerza determinada, el conjunto de todas estas fuerzas se denomina campo de fuerzas. En el caso general, las fuerzas del campo pueden variar de un punto a otro del mismo y depender también del tiempo.” [1]

Defectos

Al estudiar mecánica analítica se aprende, entre otras cosas, lo que expresa la cita, es decir, que la fuerza depende de la posición y del tiempo. La afirmación implica que la fuerza es una magnitud de campo, es decir, que existe una distribución en el espacio. Sin embargo, esta afirmación, por lo menos formulada de manera tan general, no es correcta, ¿por qué?

En general el valor de una magnitud física hace referencia a un ente geométrico, y si se indica su valor debe ser claro cuál es dicho ente. Existen magnitudes cuyos

valores se refieren a un punto, por ejemplo la temperatura, la presión o la intensidad del campo eléctrico; otras cuyos valores “corresponden” a una superficie, como todas las corrientes y todos los flujos: la intensidad de corriente eléctrica, la corriente de energía (o potencia), la corriente de momentum (o fuerza) y el flujo magnético. También existen magnitudes cuyos valores se refieren a un espacio tridimensional, como la masa, la energía, la carga eléctrica, la entropía, etc., y otras con una “relación” más complicada, como por ejemplo la resistencia eléctrica.

En este artículo se enfocará la atención en la fuerza. En general la relación entre fuerza \vec{F} y tensión mecánica $\vec{\sigma}$ (o entre la corriente de momentum y la densidad de dicha corriente) se puede expresar como:

$$\vec{F} = \iint_S \vec{\sigma} d\vec{A},$$

donde la tensión mecánica es un tensor y el elemento de área un vector. Para el caso particular de la fuerza en una barra que se encuentra en un estado de tensión uniaxial la relación se simplifica a:

$$|\vec{F}| = \sigma \cdot A,$$

donde σ es la tensión en la dirección de la barra (única componente del tensor tensión que no es cero), y A es la misma en cada punto de cualquier sección a través de la barra; A es la sección transversal de la barra.

En el caso de un gas o un líquido en reposo las componentes del tensor son idénticas e iguales en todas las direcciones, por lo que se suele llamar presión hidrostática, y se representa por la conocida relación:

$$\vec{F} = p \cdot \vec{A},$$

donde el área de referencia se puede orientar en cualquier dirección, y la fuerza siempre tendrá la misma dirección que el vector área.

También las fuerzas medidas por campos se pueden calcular por medio de la integral sobre la tensión mecánica; si se elige la superficie de integración de tal forma que encierre el cuerpo entero, se obtiene la fuerza que “actúa sobre el cuerpo”.

En el caso del campo electromagnético $\vec{\sigma}$ designa el llamado tensor de Faraday, denominado por algunos autores tensor de MAXWELL.

Estas consideraciones muestran que cada vez que se habla de una fuerza es necesario precisar el área a la cual “corresponde”; sin embargo, esta observación contrasta con la cita, en la cual se afirma que la fuerza se refiere a un punto.

Resistencias equivalentes

El contexto al cual pertenece la cita es la mecánica teórica (o analítica), que describe procesos mecánicos empleando el modelo de masa puntual o punto material; pero, ¿por qué es necesario introducir el concepto de campos de fuerza? La mecánica de las masas puntuales se estudia tan amplia y extensamente que al final se pierde de vista el hecho de que se trata de un modelo que, aunque muy útil, es algo extraño ya que los valores de algunas magnitudes mecánicas resultan infinitos, o más bien algunas magnitudes no existen en la mecánica de las masas puntuales: densidades, densidades de corrientes y tensiones mecánicas. La fuerza, esto es, el flujo de momentum, que en la “mecánica clásica” se refiere al área que encierra un cuerpo, en la mecánica analítica se refiere a un punto. Una consecuencia de dicha construcción es que por medio de un cuerpo de prueba puntual se puede atribuir una fuerza a cada punto del espacio; así se obtiene la función $\vec{F} = \vec{F}(\vec{r})$, llamada “campo de fuerza”. La fuerza que en la mecánica clásica es una magnitud “integral” en la mecánica de las masas puntuales se “convierte” en magnitud local. Es conocido que los campos de fuerza juegan un papel importante en las teorías de LAGRANGE —Joseph-Louis LAGRANGE (1736–1813)— y HAMILTON —William Rowan HAMILTON (1805–1865)— para las masas puntuales y que muchos sistemas reales pueden ser descritos en buena aproximación como sistemas de puntos materiales, pero así se olvida fácilmente que frases como la reportada en la cita no son válidas de manera general, sino que se refieren a un concepto de fuerza muy particular. Desde el punto de vista de la mecánica clásica, en la cual se trabaja con “masas extensas”, los campos de fuerza aparecen como una construcción algo “rara”, y bien cabría la pregunta si los dos conceptos de fuerza representan la misma magnitud física.

Origen

NEWTON no conocía el concepto de masa puntual, él atribuía una fuerza a un cuerpo, y no pudo hacer corresponder la fuerza a un área ya que todavía no existía el concepto de campo y por consiguiente no existía la posibilidad de definir un área de sección. En lugar de la superficie cerrada NEWTON consideraba que la fuerza actuaba sobre el cuerpo encerrado por dicha área. Con el modelo de corrientes de momentum esto se puede expresar así: NEWTON atribuía la intensidad de corriente a la fuente de la corriente en lugar de a la corriente misma.

La mecánica de los puntos materiales, que con los trabajos de LAGRANGE, HAMILTON y JACOBI —Carl Gustav JACOBI (1804–1851)— alcanzó su pleno desarrollo, y que más tarde serviría de modelo para la mecánica cuántica, se enseña hoy con tal naturalidad que las con-

secuencias extrañas de la hipótesis de las masas puntuales de los cuerpos fácilmente pasan desapercibidas.

Eliminación

Al introducir una magnitud física poner de relieve el hecho de que sus valores se refieren a algún ente geométrico, como un punto, una línea, una superficie o una región tridimensional. Se puede corroborar que al presentar a los estudiantes una lista con magnitudes físicas introducidas anteriormente y pedirles indicar el ente geométrico al cual se refiere cada una, se observará que varias magnitudes serán clasificadas en una categoría equivocada.

Mientras no se tenga que ver con la mecánica hamiltoniana, se sugiere evitar el término “campos de fuerza”. El modo de presentar el tema que se recomienda se puede ilustrar por medio de la conocida ecuación:

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{E} \quad (1.8)$$

donde la intensidad del campo eléctrico \vec{E} sí corresponde a una magnitud de campo, es decir, sus valores están distribuidos en el espacio, por lo cual es justificado escribir $\vec{E} = \vec{E}(\vec{r})$. El cuerpo de prueba con carga Q , o masa m , por el contrario tiene extensión, y para que la ecuación sea aplicable, dicha extensión debe ser tan pequeña que la intensidad del campo (antes de poner la carga o masa de prueba) pueda ser considerada como homogénea en la región correspondiente. Entonces \vec{F}_{es} la fuerza sobre el cuerpo de prueba, y su valor se refiere al área que encierra dicho cuerpo, o en el lenguaje de NEWTON, al cuerpo mismo.

Referencias

- [1] L. Landau, A. Ajiezer y E. Lifshitz, *Curso de Física general (Mecánica y Física molecular)*, Moscú: Editorial MIR, 1973, p.30.

1.32 Resistencias equivalentes

Tema

Si se conectan dispositivos con resistencias R_1, R_2, R_3, \dots en serie, el sistema global tiene la “resistencia equivalente”

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots ;$$

Si se conectan en paralelo, la resistencia equivalente es

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$

La dualidad onda-partícula

Defectos

Estas leyes han formado parte de las lecciones de física desde que existe la teoría de la electricidad, es decir, desde hace unos 150 años.

No hay nada incorrecto en ellas. Pero podríamos hacer algunas preguntas: ¿Por qué forman parte del canon obligatorio de la enseñanza de la física? ¿Por qué tienen el estatus de reglas mnemotécnicas? ¿Por qué se les dedica un capítulo entero? Puede que nos respondan: porque son muy importantes.

Pero si se consideran lo suficientemente importantes como para incluirlas en las lecciones, ¿por qué no toda una serie de reglas similares y análogas: sobre la conexión en serie y en paralelo de condensadores y bobinas, de resortes de Hooke y de amortiguadores, de resistencias térmicas y de resistencias de flujo hidráulico? La estructura matemática de las reglas es la misma que la de los resistores eléctricos. ¿Son las resistencias térmicas menos importantes que las eléctricas? ¿Son los condensadores menos importantes que los resistores eléctricos?

Si se tiene en cuenta que las reglas citadas al principio son consecuencia de las leyes de KIRCHHOFF —Gustav Robert KIRCHHOFF (1824–1887)—, se nota algo más.

La ley de tensiones de KIRCHHOFF es trivial si se introduce la tensión eléctrica razonablemente, es decir, como la diferencia de potenciales eléctricos. Entonces es tan evidente como la siguiente afirmación: si subes 2 pisos en el ascensor y luego otros 3, has subido un total de 5 pisos. También se puede expresar de forma más letrada: La regla de las tensiones se aplica porque, como en el caso del ascensor, estamos tratando con un campo conservativo. Pero es mejor no decirlo así.

La ley de nodos se deduce de la conservación de la magnitud que fluye. Se aplica a una gran variedad de corrientes: corrientes eléctricas, corrientes de masa y corrientes de momentum. Es una pena que solo se mencione en relación con las corrientes eléctricas.

Origen

Las leyes fueron formuladas por KIRCHHOFF en 1845 en una forma ligeramente diferente a la reproducida aquí, es decir, en los primeros días de la teoría de la electricidad. En esa época, cuando todo era todavía nuevo, no parecían triviales en absoluto. El hecho de que hayan sobrevivido hasta hoy como leyes propias se debe probablemente a que se les ha dado un nombre propio (en contraste con las reglas análogas mencionadas anteriormente).

Eliminación

Ciertamente, se pueden tratar las diferentes interconexiones de los resistores en el marco de una tarea; sin em-

bargo, no se dará a los resultados el estatus de teoremas mnemotécnicos. Y se tratarán problemas similares en relación con otros componentes, como los condensadores y las bobinas, y con otras corrientes, como las corrientes de agua, de momentum y de calor.

Por último, se formula una pauta o recomendación para la redacción del currículo: cuando alguien propone incluir un determinado tema en el programa de estudios (o, más generalmente, en la enseñanza o en un libro de texto), se recomienda buscar primero los temas competidores, es decir, los temas que, por alguna analogía, podrían tener la misma pretensión de ser incluidos en el canon de la enseñanza. Solo cuando se ha encontrado una razón para tratar el tema propuesto, pero no los competidores, se incluye dicho tema. Este método ha funcionado bien en muchos contextos.

1.33 La dualidad onda-partícula

Tema

Una definición (de Wikipedia en alemán) como recordatorio: “*La dualidad onda-partícula* es una idea de la física cuántica, según la cual las propiedades de las ondas clásicas y las de las partículas clásicas deben atribuirse igualmente a los objetos de la física cuántica. Las ondas clásicas se propagan en el espacio. Se debilitan o refuerzan por superposición y pueden estar presentes en diferentes lugares al mismo tiempo y asimismo tener diferentes efectos. Una partícula clásica solo puede estar presente en un lugar concreto en un momentum dado. Ambas propiedades parecen ser mutuamente excluyentes.”

Defectos

Muchos estudiantes se sienten incómodos cuando se menciona el dualismo onda-corpúsculo. ¿Qué se quiere decir? ¿Se tiene que explicar algo o simplemente nombrarlo o siquiera esconderlo?

- Al principio, el comportamiento de un electrón, un fotón u otros “objetos cuánticos” se presenta como contradictorio. Pero luego se aprende que no es realmente una contradicción, porque se presenta un dualismo. ¿Se entiende? Quizá no, pero ya se sabe qué decir, especialmente en el examen.

El problema con esto es que parece asumirse que solo es posible uno de los dos modelos dados, mutuamente excluyentes:

- O bien el electrón (o el fotón...) es una “partícula”. Y, en ese caso, ¿qué es una partícula? Un pequeño cuerpo, un pequeño ente, cuya ubicación se describe mediante las coordenadas de un único pun-

La dualidad onda-partícula

to. Esto no significa simplemente la posición del centro de masa, sino la “posición” de toda la partícula. Así que no queda más remedio que imaginar el pequeño cuerpo como un punto.

- O el electrón es una onda. La idea normal de una onda es algo así: existe un portador de ondas (por ejemplo, agua o aire) y sobre este portador o dentro de él se desplaza la onda, un cambio de estado que viaja y que, según el nombre, se supone que es ondulatorio, es decir, que hay algo arriba y abajo, o grande y pequeño; algo periódico, pero no completamente periódico. Una onda tiene una extensión, tanto en la dirección longitudinal como en las direcciones transversales (a menos que sea una onda de cuerda, o una onda de superficie). Que la onda tiene una extensión espacial es evidente, pero el físico educado en la mecánica de puntos parece creer necesario subrayar que una onda no es puntual, véase en la cita: “Las ondas pueden estar presentes en diferentes lugares al mismo tiempo.” ¿Es necesario explicar esto?

Como ni uno ni otro modelo acaban de encajar, hay que decir algo, y se dice que existe un dualismo.

El alumno se queda con un sentimiento de frustración, porque la palabra mágica dualismo no explica nada. Es solo una forma eufemística de decir que algo es lógicamente inconsistente.

Ahora bien, el problema no habría surgido en primer lugar si no se hubiera empezado por presentar al electrón o al fotón como un pequeño ente.

Se podría pensar que no hay otra opción; las partículas y las ondas son las únicas categorías del pensamiento humano que se plantean en este caso. Más bien, podría decirse que son categorías del pensamiento del físico. La persona sin formación física tiene ciertamente otros modelos o patrones en su caja de herramientas, incluidos los puntos de vista asociados, que pueden aplicarse a lo que la física, en su apuro, llama un objeto cuántico.

¿Es tan difícil imaginar un objeto que no esté representado por una única coordenada de posición, sino por una distribución? Además, todo el mundo conoce cosas que se dicen situadas en algún lugar, pero no se exige que la cosa siga siendo el mismo “ente” ahora y poco más tarde. Piense en algo como una nube o una llama, o incluso mejor, la “cresta” de una ola en el agua. Esta en algún lugar, pero no en un punto, se extiende, y dos de ellos incluso muestran interferencias. ¿Habrá alguien de dualismo en estos casos?

- 2 Se suele decir que el electrón (o el fotón) se comporta a veces como una partícula y a veces como una onda.

Así que un mismo electrón se presenta a veces así y a veces así. Estas afirmaciones se basan probablemente en el hecho de que solo se habla de las propiedades del electrón cuando se hace una medición: o se mira el patrón de interferencia o los píxeles del detector. ¿No queda clara aquí la doble naturaleza? La verdad es que no. Porque debería preguntarse: ¿la naturaleza de qué electrón en qué momentum? El patrón de interferencia se basa en la función de onda de los electrones antes de ser detectados, los píxeles ennegrecidos luego de serlo. Así que las dos propiedades se refieren a electrones en diferentes estados, en un estado con pequeña incertidumbre del momentum y gran incertidumbre de la posición, y otro con pequeña incertidumbre de la posición y gran incertidumbre del momentum. De ello se deduce que los electrones se comportan a veces de una manera y a veces de otra. Pero sería más claro decir que los electrones pueden estar en diferentes estados, y en un número infinito de estados diferentes. Entre ellos, hay dos tipos de estados extremos, en uno de ellos la incertidumbre de la posición es pequeña, en el otro la del momentum.

- 3 Probemos diseccionar lingüísticamente un poco más la definición tomada de Wikipedia: (El lenguaje de Wikipedia es una obra colectiva y, por tanto, probablemente bastante susceptible de consenso). Ella expresa, según creemos, una perplejidad típica en este contexto. Comencemos con el término genérico de “dualismo”. Se dice en la versión alemana de Wikipedia que el dualismo es una “idea” (Erkenntnis). ¿Será lo mismo en otras lenguas? Al revisar las versiones en otros idiomas del artículo de Wikipedia, se ve que no lo es. En inglés es un “concepto” (concept), en francés y holandés un “principio” (principe, beginsel), en español un “fenómeno”, en chino un “comportamiento” (行为) y en ruso una propiedad de la naturaleza (свойство природы). De estos, parece más apropiado el chino y el ruso.

También es interesante cómo los filósofos, los teólogos, etc. tratan el término “dualismo”. Eso por sí solo genera ciertas sospechas desde el punto de vista de un físico.

Pero sigamos leyendo: los objetos cuánticos tienen “igualmente” las propiedades de partícula y de onda. Igualmente, no es lo mismo que simultáneamente. También aquí son interesantes las formulaciones en otras lenguas. Veamos la francesa, por ejemplo: según ella, las partículas muestran a veces propiedades de partícula y a veces de onda, es decir, no simultáneamente.

Y, por último, la palabrita que tan a menudo causa “ofuscación” en las clases de física: las propiedades de

Masa y materia

las partículas y las ondas se “atribuyen” a los objetos cuánticos. No tienen las propiedades, pero se les atribuyen las propiedades. ¿Dónde más se utiliza la palabra atribuir? Se recomienda, como en otras ocasiones, buscarlo en *Linguee*.

Origen

Estas eran las dos categorías existentes a finales del siglo 19: la luz era una onda en el éter, los recién descubiertos electrones eran pequeños entes.

Cuando se puso de manifiesto que los electrones también presentan interferencia, y que la luz está cuantificada, la idea de que tanto la luz como los electrones tienen un carácter extraño y dual resultó sugestiva.

Solo poco después llegó la solución, en 1926 la ecuación de SCHRÖDINGER —Erwin Rudolf Josef Alexander SCHRÖDINGER (1887–1961)— y en 1927 la relación de incertidumbre.

Este orden ha determinado muy posiblemente el modo de enseñanza.

Si la función de onda se hubiera conocido antes, probablemente no habría surgido la idea del dualismo.

Eliminación

Evitar emplear términos que luego resulten inadecuados o “molestos”, es decir:

- no utilizar el concepto y la palabra dualismo;
- no generar la expectativa de que las partículas son puntuales;
- no limitar la posibilidad de interferencia a la onda sinusoidal.

Concebir al electrón como una estructura con carga e y masa m_e . A veces es más grande, a veces más pequeño, a veces más “monocromático”, a veces menos, pero siempre capaz de interferir.

La magnitud ψ en función de la posición y del tiempo —la solución de la ecuación de SCHRÖDINGER— contiene todo lo que hay que decir (al menos mientras no nos ocupemos de la física de partículas y del Modelo Estándar). Tampoco esconde nada que deba ser interpretado o puesto en palabras misteriosas y poco claras.

1.34 Masa y materia

Tema

1 “Un agujero negro es dramáticamente diferente de las estrellas de cualquier otro tipo. Otras estrellas contienen tanto materia como masa. Un agujero negro, en cambio, es masa incorpórea, masa sin materia... En el centro del agujero negro está el punto de

colapso. Allí, la materia que una vez formó la estrella es expulsada de la existencia. En este colapso, la materia desaparece, con todas sus partículas, presiones y propiedades. Queda la masa pura y sin materia.”

2 “En el proceso, parte de la materia se convierte en energía.”

3 “Transporte de materia, carga y energía...”

Defectos

No se quiere contribuir aquí a la centenaria discusión filosófica sobre el concepto de materia. Tampoco interesa la demarcación expresada en pares de términos como “espíritu y materia”, “materia y campo”, “luz y materia”, se trata de una cuestión más sencilla.

La materia es una parte del mundo real, algo que no fue inventado por el hombre, que también habría existido si nadie hubiera pensado en un nombre para ella.

La masa, en cambio, es una magnitud física, una variable en el sentido de las matemáticas, introducida por el hombre para describir ciertas propiedades de los objetos, a saber, su gravedad e inercia.

Cualquiera que esté de acuerdo con esta simple observación se dará cuenta de que las citas no solo son algo torpes. Son lógicamente inconsistentes, no tienen sentido. La masa pura no tiene sentido. La masa es una medida. La medida sin la entidad en la que se mide tampoco tiene sentido.

Un bulto de patatas tiene un peso determinado, el peso sin las patatas no tiene sentido.

Este tipo de cosas solo existen en el mundo de los cuentos de hadas: la sonrisa del gato sin el gato en Alicia en el País de las Maravillas [1], pero como sabemos, eso solo duró un breve momentum, y Alicia también está debidamente sorprendida.

Sin embargo, uno no se sorprenderá demasiado de las frases citadas si ya se ha dado cuenta de que a menudo se dice que la luz es energía, o que los fotones son cuantos de energía.

Con los estudiantes se puede hacer el siguiente “experimento mental” (juego), de hecho, se ha realizado. “Imaginemos un electrón, justo delante de nosotros, en reposo.” (Nadie parece tener problemas con el hecho de que esto contradice la física cuántica). “Ahora queremos quitarle la carga eléctrica al electrón, solo en nuestra mente. ¿Se pueden imaginar eso?”, “Sí, podemos. Tenemos entonces un electrón sin carga.” (En realidad, ahora deberíamos darle otro nombre, pero lo dejaremos con el nombre de electrón, porque de ahí salió la nueva estructura). Se pregunta, además: “El electrón tiene un espín, y se puede suponer a grandes rasgos que gira. Ahora queremos quitarle el espín. ¿Pueden imaginarlo?” “Sí, podemos. Se trata entonces de un electrón sin carga que

no gira.” Se puede no hablar sobre otras magnitudes extensivas que caracterizan al electrón, como la carga leptónica, y pasar directamente a la masa: “Ahora queremos quitarle la masa al electrón. ¿Pueden imaginarlo?” “No, eso no es posible. Entonces no quedaría nada del electrón.” “Pero quizás podríamos devolverle su espín y quitarle su masa a cambio. ¿Es eso posible?” “No, entonces no quedaría nada por girar.” etc., etc.*

Lo que se suprime en este juego son siempre magnitudes extensivas. Más exactamente: se hace que sus valores sean cero en nuestra mente.

No sorprendería que el lector se estremezca al leer estas líneas, pero, sin embargo: ¿no reflejan algo que tiene cierta verosimilitud?

Lo sorprendente es lo mucho que se puede suprimir sin que nuestra mente se resista. Sin embargo, con la masa parece llegar a su fin, se tiene la sensación de que no solo se está haciendo cero el valor de una magnitud, sino que se está quitando el objeto en cuestión, la esencia misma del electrón, quizás su alma. En el caso de las partículas, como el electrón, parece que siempre se sitúa el alma en la masa, más exactamente, en la masa en reposo.

Origen

Ciertamente hay algo de metafísica en ello, solo se pueden hacer suposiciones sobre lo que pasa por la mente de los estudiantes.

Tal vez lo siguiente: un cuerpo, una partícula, un trozo de materia es un ente, un individuo. Es más que el conjunto de los valores de sus magnitudes físicas. La cantidad de esta materia metafísica se mide (probablemente es la idea) por la masa. Si esta se cambia, el cuerpo ya no es el mismo que antes. Sigue siendo el mismo si cambia su momentum, o su momentum angular, o su entropía, y quizás su carga, pero no si cambia su masa. La masa mide la cantidad de la materia, y la materia es algo que va más allá de las magnitudes físicas.

De ahí la decisión de los físicos de partículas de utilizar la denominación de masa para describir la masa en reposo, es decir, la que no cambia cuando cambia el estado de movimiento.

Eliminación

Se sugiere distinguir cuidadosamente entre objeto y magnitud física. Intentar no interpretar la masa como algo que es más que la medida de una propiedad.

Referencias

[1] Carroll, Lewis. Alicia en el país de las maravillas, en: https://www.academia.edu/22820115/Alicia_en_el_de_las_maravillas: “No hay problema”, dijo el Gato; y esta

vez se desvaneció en el aire lentamente, comenzando por el final de la cola, y terminando con la sonrisa, la cual perduró un por un tiempo luego que el resto se hubo ido.

“¡Bueno! A menudo he visto un gato sin sonrisa”, pensó Alicia; “¡pero una sonrisa sin gato! ¡Es la cosa más curiosa que jamás he visto en mi vida!”

2 ENERGÍA

2.1 Formas de energía

Tema

Que la energía existe en formas diferentes es del conocimiento general de la Física: energía cinética, potencial, eléctrica, química y el calor son ejemplos que muchas personas conocen. La transformación de una forma de energía en otra, también es algo bastante conocido y una manera corriente de expresarse.

Defectos

Aunque se habla fácilmente de formas de energía, se presentan problemas al definirlas. Desde la distinción entre formas de almacenamiento y formas de transporte o de cambio no se ha sido consecuente, al contrario, se tiene la tendencia a hablar de ellas como si fueran iguales. Mientras que se han establecido reglas para distinguir algunas formas de transporte de energía, como el calor y varias formas de trabajo, la clasificación de las formas de almacenamiento parece vaga y arbitraria, excepto para algunos ejemplos mecánicos conocidos. ¿Qué parte de la energía de un resorte de acero o de una molécula de aire es mecánica, térmica, química, eléctrica o magnética?, ¿qué parte es de translación, rotatoria, osculatoria, electrónica, cinética o potencial?, ¿qué parte es ordenada o desordenada? El hecho de que puedan obtenerse resultados sensatos sin saber responder con exactitud a estas preguntas, hace sospechar que, desde el punto de vista de la Física, dicha clasificación no tiene mayor importancia.

Origen

Para identificar el papel de la energía en la naturaleza, la enumeración de sus “formas” representa un medio de expresión cómodo y difícilmente evitable. En un trabajo de Karl Friedrich Mohr (1806–1879), publicado en 1837 [1], cuando no se conocía el concepto de formas de energía, se encuentra una cita que puede demostrar este hecho: “Además de los 54 elementos químicos conocidos, existe en la naturaleza solo un agente más y se llama fuerza: en circunstancias apropiadas ella puede aparecer como movimiento, afinidad química, cohesión, electri-

cidad, luz, calor y magnetismo, y de cada una de ellas puede emerger cualquier otra forma”.

Eliminación

Se ahorrarán palabras y evitarán inconsistencias si se renuncia a esta diferenciación de poca utilidad. Aunque es práctico y usual hablar de leche de botella, de caja o de bolsa, no tiene sentido llamar transformación de la leche al hecho de tomarla directamente o de verterla en un recipiente, como tampoco definir el contenido de un vaso o cualquier otro recipiente como formas especiales de la leche. Con el concepto de energía esto no debería ser diferente. La manera más lógica, aunque no la más cómoda, es renunciar completamente al concepto de formas de energía. Naturalmente esto toma su tiempo, como ocurre con un paciente que deja sus muletas por primera vez después de una larga enfermedad, hasta que se acostumbra al nuevo estado de libertad y puede sortear distancias con muchos obstáculos.

Referencias

- [1] K. F. Mohr, *Ansichten über die Natur der Wärme*. Ann. der Pharm. 24 (1837); p.141–147.

2.2 La potencia

Tema

La denominación “potencia” para la magnitud P en la ecuación $P = dW/dt$

Defectos

La ecuación $P = dW/dt$ hace referencia a un área o sección predeterminada, donde dW es la energía transportada a través de dicha superficie o el trabajo realizado, como también se dice. Por consiguiente, P es la energía transportada a través del área en referencia por unidad de tiempo y por lo tanto no es otra cosa que la intensidad de la corriente de energía. Si la energía fluye por un camino bien definido, sin que la intensidad de su corriente disminuya a lo largo del mismo, entonces P es la

La ley de conservación de la energía

intensidad de la corriente en cualquier sección a través del camino recorrido.

Como se ve, existe una interpretación sencilla para P , sin embargo la denominación “potencia” no refleja dicho significado. El término “potencia” sugiere más bien una magnitud atribuida a una máquina o artefacto —un motor eléctrico por ejemplo— pero no al cable alimentador del mismo; un motor es más o menos potente, el cable no. Cuando se quiere resaltar el fenómeno de transporte se emplea otra formulación, se habla de la “potencia transmitida”, forma de expresión aún más desacertada, ya que lo transportado es la energía y no la energía dividida por el tiempo.

Origen

La palabra “potencia” viene de una época cuando no se podía localizar ni la energía ni la corriente de esta. Se sabía que el aumento de energía en un lugar estaba vinculado con su disminución en otro, pero no se conocía la distribución de su corriente. Se utilizaba entonces la magnitud P para la rapidez del cambio de la energía en un objeto o artefacto y se atribuía la magnitud a dicho objeto y no a un área determinada.

Eliminación

No llamemos “potencia” a la magnitud P , sino intensidad de la corriente de energía, o más brevemente corriente de energía o corriente energética.

ción con ningún otro sistema) permanece invariable con el tiempo. La conservación de la energía de un sistema está ligada al hecho de que las ecuaciones de evolución sean independientes del instante considerado. Dentro de los sistemas termodinámicos, una consecuencia de la ley de conservación de la energía es la llamada Primera ley de la termodinámica, que establece que, dada una cantidad de energía térmica ΔQ que fluye dentro de un sistema, debe aparecer como un incremento de la energía interna del sistema ΔU o como un trabajo ΔW efectuado por el sistema sobre sus alrededores: $Q = \Delta U + W$.^[2]

- “La ley de la conservación de la energía constituye el primer principio de la termodinámica y afirma que la cantidad total de energía en cualquier sistema aislado (sin interacción con ningún otro sistema) permanece invariable con el tiempo, aunque dicha energía puede transformarse en otra forma de energía.”^[3]

Defectos

Un hecho simple parece “enmarañado” por el innecesario “rodeo” lingüístico con que es presentado. Se puede tener la opinión de que antes de formular la ley de la conservación de la energía es necesario plantear y discutir algunos problemas, pero en algún momento se debe enunciar claramente la ley, claridad que evita confusiones y preocupaciones al respecto, de no ser así queda la impresión de que la conservación en sí misma es un concepto difícil.

Origen

Véase 1.22 Sistemas aislados, p.32

Eliminación

Formular la conservación de la energía tal como se formula la conservación de la carga eléctrica, es decir, sin ambages ni circunloquios, por ejemplo de una de las siguientes maneras: la energía ni se genera, crea o produce, ni se destruye, aniquila, o se hace desaparecer definitivamente.

Referencias

- C. García y M. Diettes, *Física I*. Bogotá, Pime editores Ltda., 1985. p.145.
- Principio de conservación de la energía. [en línea]. En: http://es.wikibooks.org/wiki/Física/Magnitudes_mecánicas_fundamentales/Principio_de_conservación_de_la_energía [consultado el 4 de mayo de 2022]
- Conservación de la energía. [en línea]. En: http://es.wikipedia.org/wiki/Conservación_de_la_energía [consultado el 4 de mayo de 2022]

¿Dónde está la energía?

2.4 ¿Dónde está la energía?

Tema

Son frecuentes descripciones verbales sobre el transporte y balance de energía como las siguientes:

“En un sistema cerrado la suma de todas las energías es constante.”

“El trabajo mecánico realizado en un cuerpo es igual al cambio de su energía.”

“La potencia mecánica indica, cuán rápido se realiza el trabajo mecánico.”

También se encuentran citas como las siguientes:

“Para un sistema aislado o cerrado, la suma de todas las formas de la energía permanece constante (la suma de las variaciones es cero), aunque la energía interna pueda tomar distintas formas.” [1].

“La energía total mecánica es la forma de energía asociada a los cambios en el estado mecánico de un cuerpo. [...] El trabajo realizado por la fuerza resultante sobre una partícula es igual al cambio de energía cinética...” [2].

“En primer lugar, recordemos que cuando un cuerpo experimenta variaciones en su energía cinética (que se ha realizado trabajo mecánico sobre el cuerpo), el valor del trabajo mecánico coincide con el valor del aumento o disminución de la energía cinética.” [3].

“En física, potencia (símbolo P) es la cantidad de trabajo efectuado por unidad de tiempo. [...] La potencia mecánica es la potencia transmitida mediante la acción de fuerzas físicas de contacto o elementos mecánicos asociados...” [4].

“La ley de la conservación de la energía constituye el primer principio de la termodinámica y afirma que la cantidad total de energía en cualquier sistema aislado (sin interacción con ningún otro sistema) permanece invariable con el tiempo, aunque dicha energía puede transformarse en otra forma de energía.” [5].

“En mecánica clásica, el trabajo que realiza una fuerza sobre un cuerpo equivale a la energía necesaria para desplazar este cuerpo.” [6].

Defectos

La energía es una magnitud extensiva para la cual es válido el principio de conservación: si la energía disminuye en un sistema cualquiera A, tiene que aumentar en otro sistema B en la misma cantidad. Desde finales del siglo 19 se sabe que dicho principio es válido no solamente en forma global, siendo posible establecer tanto la distribución espacial de la energía (por medio de la magnitud densidad de energía ρ_E), como su “recorrido” al desplazarse de A a B (por medio de la densidad de

corriente de energía j_E). En otros términos, se puede precisar dónde se encuentra la energía y cómo se desplaza de un lugar a otro.

Frases como las arriba formuladas emplean solo la forma más antigua del principio de conservación, dejando abierta la posibilidad de una acción a distancia, la energía de A podría disminuir y la de B aumentar sin que otro sistema cualquiera, que ligue a A y a B sea requerido.

La idea que de este modo se transmite sobre la energía es inapropiada en dos aspectos, primero no corresponde a la convicción de la Física contemporánea de que no existen acciones a distancia, y segundo la descripción de los balances energéticos se torna innecesariamente complicada.

Origen

Poco después de la introducción de la energía en la Física a mediados del siglo 19, no había otra elección, la conservación de la energía solamente se podía comprobar comparando los contenidos de energía de dos sistemas A y B. Aún no se sabía si en cada caso se podía indicar una distribución local de energía y sobre todo si esta fluía de A a B por un camino bien definido. Lo que ocurría con la energía entre A y B se conocía solamente para el transporte “en forma de calor”, pero no para transportes eléctricos ni mecánicos. La distribución local de la energía en los campos eléctricos y magnéticos fue mostrada por MAXWELL —James Clerk MAXWELL (1831–1879)— [7], pero la energía de los campos se convirtió definitivamente en una magnitud local solo a partir de los trabajos de HEAVISIDE —Oliver HEAVISIDE (1850–1925)— y de POYNTING —John Henry POYNTING (1852–1914)— en 1884 [8].

Sin embargo con dichos trabajos el problema no fue zanjado del todo, aún en 1892 Heinrich HERTZ (1857–1894), formulaba escépticamente en sus Investigaciones sobre la propagación de la fuerza eléctrica lo siguiente: “Me parece que existe una duda más grande en el problema, cómo con nuestros conocimientos actuales sobre la energía, la localización de esta y su seguimiento de punto a punto tienen sentido y significado. Tales consideraciones no han sido hechas para las transformaciones más sencillas de la mecánica ordinaria; por esta razón la pregunta de si y en qué medida el concepto de energía permite tal tratamiento sigue sin solventarse.” Más adelante, en la misma obra, se dice: “Las ambigüedades conceptuales que aquí son evidentes necesitan un esclarecimiento.” [9].

Cuando apareció publicado el libro de HERTZ, las dudas ya se habían esclarecido, en 1891 HEAVISIDE [10] había descrito teóricamente los transportes mecánicos

El móvil perpetuo

de energía como fenómeno local. La situación se tornó aún más clara cuando en 1898 MIE —Gustav MIE (1869–1957)— publicó su extenso trabajo *Esbozo de una teoría general de la transmisión de energía*, en el cual se dice: “Si entre dos sistemas A y B separados en el espacio, solo tienen lugar transiciones de energía relacionadas con magnitudes de estado en los puntos de un cuerpo C, que conecta a los cuerpos A y B, de modo que se pueda calcular la transición dE/dt sin más, a condición de conocer únicamente el estado en todos los puntos de C, entonces se dice que la energía entre A y B es transmitida por C. [...] Transiciones de energía, es decir, cambios de la distribución espacial de la energía, solo pueden realizarse por transmisión.” [11].

Las citas iniciales del *Tema*, típicas aun hoy día para describir transportes de energía, muestran que el lenguaje surgido inmediatamente después de la introducción de la energía se ha conservado —como si los trabajos de POYNTING, HEAVISIDE y MIE no existieran— en perjuicio de los estudiantes a quienes no se les facilita el proceso de desarrollo de una idea o concepción clara de dicha magnitud.

Eliminación

Se sugiere introducir la energía de tal modo que de manera explícita se reconozca desde el comienzo que esta está distribuida en el espacio y que puede fluir. El principio de conservación de la energía se puede formular de la siguiente forma: “La energía no puede ser producida (generada) ni destruida (aniquilada)”. Así los conceptos trabajo, potencia y formas de energía son superfluos [12, 13].

Referencias

- [1] G. Holton y S. Brush, *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias Físicas*, 2ed., Barcelona: Reverté, S.A., 2004. p.407.
- [2] A. Vázquez, *Física 1. Mecánica. Cuaderno de Trabajo*. México: Pearson Educación, 2007. p.78.
- [3] R. Tambutti y H. Muñoz, *Física 1*, México: Editorial Limusa, 2005, p.131.
- [4] Potencia (física). [en línea]. En: [http://es.wikipedia.org/wiki/Potencia_\(física\)#cite_note-0](http://es.wikipedia.org/wiki/Potencia_(física)#cite_note-0) [consultado el 3 de noviembre de 2022].
- [5] Conservación de la energía. [en línea]. En: http://es.wikipedia.org/wiki/Conservación_de_la_energía [consultado el 4 de noviembre de 2022].
- [6] Trabajo (física). [en línea]. En: http://es.wikipedia.org/wiki/Trabajo_física [consultado el 4 de noviembre de 2022].
- [7] J. C. Maxwell, *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*, Phil. Trans. 155, 1865, p.459–512.

- [8] J. H. Poynting, *On the Transfer of Energy in the Electromagnetic Field*, Phil. Trans. 175, 1884. p.343–361.
- [9] H. Hertz, *Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft*, Leipzig: Johann Ambrosius Barth, 1892, p.234y293.
- [10] O. Heaviside, *The Transfer of Energy*, The Electrician, 27, 1891. p.270–272.
- [11] G. Mie, *Entwurf einer allgemeinen Theorie der Energieübertragung*, Wien: Carl Gerold's Sohn, 1898, p.1123.
- [12] Véase 2.1 *Formas de energía*, p.48
- [13] Véase 2.2 *La potencia*, p.48

2.5 El móvil perpetuo

Tema

- 1 “Así, la primera ley de la termodinámica también podría enunciarse como ‘un móvil perpetuo de primera clase es imposible’.”
- 2 “A un sistema así se le llama móvil perpetuo de primera especie, porque viola el Primer Principio.”
- 3 “Las máquinas de movimiento perpetuo de primera especie, [...], son contrarias al primer principio de la Termodinámica.”

Defectos

La afirmación de que un móvil perpetuo (MP) no puede funcionar porque estaría violando la ley de conservación de la energía sería una subestimación del problema. Si no se conociera el principio de conservación de la energía, y se quisiera comprobar que una propuesta de MP no puede funcionar, sin realizar la construcción y comprobarlo experimentalmente, no sería difícil hacerlo. Además del principio de conservación de la energía se estarían violando otras leyes de la Física, otras leyes de conservación, las ecuaciones de MAXWELL, la ley de gravitación, etc. Los MP mecánicos generalmente fracasan debido a las leyes de NEWTON (es decir, a la ley de conservación del momentum), o a la ley de conservación del momentum angular.

Una observación que apoya el planteamiento anterior es la siguiente: cuando los físicos (para divertirse) discuten propuestas para un MP, no se contentan con concluir que no puede funcionar debido a la ley de conservación de la energía, sino que buscan y encuentran otros planteamientos teóricos que no se cumplen, es decir, violaciones a otras leyes.

El principio de conservación de la energía da un argumento cómodo, pero no desempeña un papel particular entre las demás leyes.

Pura energía

Origen

El objetivo de los inventores de los MP era precisamente violar la ley de conservación de la energía, incluso cuando en el pasado aún no se pudiera formular de ese modo; así, parecía razonable refutar la propuesta utilizando dicha ley. Aparentemente los inventores de los MP, los cuales existen aún hoy día [4], no poseen mucha fantasía. Siempre queriendo violar la ley de conservación de la energía, porque en ello ven una mercancía preciosa, sin percibirse que la violación de cualquier otra ley de la Física tendría el mismo potencial de generar ganancias económicas.

Eliminación

Los móviles perpetuos (que no funcionan) son siempre un tema físico interesante, pero no se debe reducir su explicación simplemente a la violación del principio de conservación de la energía. Procediendo así se crea la impresión de que la construcción de la Física en general es tal que se puede derogar o eliminar mentalmente una de sus leyes, sin que todo el edificio se derrumbe.

2.6 Pura energía

Tema

En libros de Física y revistas científicas se encuentran afirmaciones según las cuales la radiación electromagnética es pura energía. Por ejemplo: “Si un positrón encuentra un electrón, las dos partículas se aniquilan mutuamente y producen energía pura en forma de radiación gamma” [1],

o: “Una partícula con masa y su antipartícula pueden aniquilarse para dar energía, y un par partícula-antipartícula puede crearse a partir de la energía” [2].

Una concepción similar se expresa en la siguiente afirmación: “... También se puede describir la luz mediante los fotones, o sea cuantos de energía emitidos discretamente” [3].

Defectos

Es obvio que una onda electromagnética no es pura energía. El campo electromagnético es un sistema físico, es decir, un ente en el cual todas las magnitudes físicas tienen un valor, no solamente la energía.

En el campo electromagnético, aparte de la energía, otras magnitudes extensivas como la cantidad de movimiento (momentum lineal o momentum), el momentum angular y la entropía tienen valores diferentes de cero, de lo contrario la carga eléctrica sería cero en todos los estados del campo. Así como en otros sistemas,

también las magnitudes intensivas tienen cierto valor en el campo electromagnético; este tiene cierta presión en cada punto y dado que la presión depende de la dirección se tendrá una magnitud tensorial (el tensor de tensión mecánica). En los estados llamados radiación térmica el campo también tiene cierta temperatura y cierto potencial químico.

Identificar la radiación electromagnética con una sola magnitud es sencillamente incorrecto. La radiación es un sistema físico que es parte de la naturaleza, independientemente de que exista o no un observador. Las magnitudes físicas, por el contrario, son productos del intelecto humano, son herramientas para la descripción de los sistemas.

Por lo tanto el fotón, o sea la porción elemental del sistema “campo electromagnético”, es más que un cuantito de energía; además de energía tiene momentum y momentum angular.

La confusión entre los conceptos “magnitud” y “sistema” se manifiesta también en otra formulación de uso frecuente, según la cual la energía y la materia representan dos clases de “sustancias” que se encuentran en la naturaleza: “Si todas las galaxias se alejan unas de otras [...] parece lógico que en un pasado remoto estuvieran concentradas en un lago denso de materia y energía” [4].

Origen

Probablemente existieron dos causas para la errónea identificación de la magnitud “energía” y del sistema “campo electromagnético”. Por un lado, se veía en la energía algo más que una magnitud física y, por otro, no se tomó en serio el campo como sistema físico real.

Después de la introducción del concepto de energía a mediados del siglo 19, se percibió rápidamente su importancia universal para las ciencias; sin embargo, el entusiasmo de haber encontrado una magnitud de tal alcance llevó a los científicos a sobreestimarla y malinterpretarla; se consideraba la energía, en particular en el ambiente de los “energéticos”, como algo similar a una sustancia. En el libro *La energía*, de Wilhelm Friedrich OSTWALD (1853–1932), publicado en 1908, se puede leer: “Por esta razón, la energía está contenida en todos los objetos reales o concretos como componente esencial, que nunca falta, y así podemos decir que la energía encarna lo propiamente real” [5].

Por otra parte, el concepto de radiación electromagnética difería de lo que entendemos actualmente; hoy sabemos que dicha radiación es un sistema entre otros; como el gas ideal o el sistema de fonones en un sólido, y como los demás sistemas el campo electromagnético consta de partes elementales. Los fotones son para el

campo electromagnético lo que para el gas de hidrógeno son las moléculas de hidrógeno o para el sistema de la red cristalina de un sólido los fonones.

La errónea interpretación de la magnitud “energía”, así como del sistema “campo electromagnético” ha dejado huellas y aunque hoy tenemos unos conceptos más claros al respecto, frases como las antes citadas son frecuentes y se nos “escapan” fácilmente.

Eliminación

En lugar de afirmar que como producto de la reacción de un electrón con un positrón resulta pura energía, digamos que se obtienen fotones. Y en lugar de decir que la radiación electromagnética es pura energía, digamos que la radiación tiene energía, pero además tiene otras magnitudes extensivas, como momentum, momentum angular y entropía.

Referencias

- [1] N. Gehrels, C. Fichtel, G. Fishman, J. Kurfess, V. Schönfelder, *The Compton Gamma Ray Observatory*, Scientific American (December 1993); p.44. “When a positron encounters an electron, the two particles annihilate each other and produce pure energy in the form of gamma radiation.”
- [2] R. Penrose, *La nueva mente del emperador*. Barcelona: Grijalbo Mondadori, 1991. p.365. “Una partícula con masa y su antipartícula pueden aniquilarse para dar energía, y un par partícula-antipartícula puede crearse a partir de la energía.”
- [3] S. Haroche, J. Raimond, *Cavity Quantum Electrodynamics*, Scientific American (April 1993); p.26. “... light can also be described in terms of photons, discretely emitted quanta of energy.”
- [4] P. Peebles, D. Schramm, E. Turner, R. Kron, *The Evolution of the Universe*, Scientific American (October 1994); p.32. “So if galaxies are all moving away from one another [...] it seems logical that they were once crowded together in some dense sea of matter and energy.”
- [5] W. Ostwald, *Die Energie*, Verlag Johann Ambrosius Barth, Leipzig, 1908, S.5

3 MECÁNICA

3.1 Las leyes de NEWTON

Tema

Una formulación típica de las leyes de NEWTON es:

- 1 Todo cuerpo permanece en su estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme a menos que se apliquen fuerzas que lo obliguen a cambiar de estado.
- 2 La fuerza resultante que actúa sobre un cuerpo es directamente proporcional a su aceleración.
- 3 Cuando un cuerpo A ejerce una fuerza \vec{F}_{AB} sobre otro cuerpo B, B ejerce una fuerza opuesta igualmente grande sobre A, $\vec{F}_{BA} = -\vec{F}_{AB}$.

Defectos

Las tres leyes son casos especiales de una afirmación que se puede formular de manera mucho más sencilla: el momentum lineal no se puede producir ni destruir. Esto se ve más claramente al analizar que una fuerza no es otra cosa que una corriente de momentum lineal [1]; teniendo en cuenta este hecho se pueden reformular las leyes de NEWTON —Isaac NEWTON (1643–1727)— de la siguiente manera:

- 1 Todo cuerpo conserva su momentum a menos que otro cuerpo o cuerpos le suministren momentum.
- 2 La corriente de momentum que entra en un cuerpo es directamente proporcional al cambio del momentum de este.
- 3 Cuando una corriente de momentum fluye de un cuerpo A a otro cuerpo B, la intensidad de la corriente que sale de A es igual a la intensidad que entra en B.

Estas afirmaciones son consecuencia de la conservación del momentum lineal y son tan evidentes que no parece razonable atribuir a ellas el estatus de leyes o teoremas. Es fácil convencerse de ello al formular afirmaciones análogas para otras magnitudes extensivas o sencillamente para sustancias como el agua: “**Todo recipiente conserva el agua que contiene a menos que otro u otros recipientes le suministren agua**”.

Eliminación

Introduzcamos el momentum al comienzo de la enseñanza de la mecánica como magnitud autónoma: como

medida de la cantidad de movimiento, algo que en lenguaje común se llamaría “impetu”, “impulso” o “fuerza” (no confundir con el concepto de fuerza en Física). Cuando cambia el momentum de un cuerpo no se debe decir que actúa una fuerza \vec{F} , sino que fluye una corriente de momentum \vec{F} en el cuerpo. Este lenguaje, algo insólito para el físico experto, es más fácil para el principiante, porque evita algunas complicaciones que resultan de la discusión de las leyes de NEWTON, en particular de la tercera ley.

Referencias

- [1] M. Planck, *Bemerkungen zum Prinzip der Aktion und Reaktion in der allgemeinem Dynamik*. Phys. Z. 9 (1908); p.828–830.

3.2 Equilibrio de fuerzas y tercera ley de NEWTON

Tema

Las fuerzas actúan sobre los cuerpos. Si un cuerpo C, sobre el cual el cuerpo A ejerce una fuerza \vec{F}_{AC} , no está acelerado, entonces existe por lo menos un cuerpo adicional B que ejerce una fuerza \vec{F}_{BC} de modo que se presenta equilibrio entre \vec{F}_{AC} y \vec{F}_{BC} , es decir, que la fuerza resultante sobre C es cero. Sin embargo, si A ejerce una fuerza \vec{F}_{AC} sobre C entonces, según la tercera ley de NEWTON, C tiene que ejercer una fuerza \vec{F}_{CA} sobre A. Lo análogo es válido para B: ya que B ejerce una fuerza \vec{F}_{BC} sobre C, entonces C debe ejercer una fuerza \vec{F}_{CB} sobre B. Todas estas cuatro fuerzas \vec{F}_{AC} , \vec{F}_{BC} , \vec{F}_{CA} y \vec{F}_{CB} , tienen el mismo módulo mientras sus direcciones son opuestas por pares, es decir:

$$\vec{F}_{AC} = -\vec{F}_{BC}, \quad \vec{F}_{AC} = -\vec{F}_{CA}, \quad \vec{F}_{BC} = -\vec{F}_{CB}, \quad \vec{F}_{CB} = -\vec{F}_{CA}$$

Así se describe una situación en la cual el cuerpo C está en reposo. Fuera del caso trivial en que todas las fuerzas son iguales a cero, este es el caso más sencillo que existe, y quien desee comprender el concepto de fuerza, deberá distinguir y entender estas cuatro fuerzas.

Defectos

El problema así planteado es tan complicado que un alumno promedio no lo puede entender, muchos estudiantes de Física tienen dificultades para distinguir dichas fuerzas aún después de haber terminado el curso de mecánica. Sin embargo, se continúa con el inútil intento de introducir el concepto físico de fuerza en la enseñanza media.

Origen

El concepto de fuerza tal como se enseña hoy día viene del tiempo de NEWTON, es decir, de una época en la cual no había otro remedio que describir las interacciones mecánicas por medio de acciones a distancia [1], el concepto de campo surgió más de un siglo después. La fuerza se relacionaba siempre con dos cuerpos: uno que la ejerce y otro sobre él cual actúa. En el problema antes mencionado participan tres cuerpos, lo que implica considerar seis fuerzas de las cuales nos interesan solamente las cuatro fuerzas relacionadas con el cuerpo C.

Existió un momentum histórico en el cual hubiera sido posible una simplificación, cuando FARADAY y MAXWELL introdujeron el concepto de campo. Sin embargo, tal simplificación fue propuesta mucho más tarde, cuando quedó claro que el momentum lineal es una magnitud extensiva y autónoma, y no solamente una abreviación cómoda del producto de masa y velocidad. En 1908, es decir, tres años después de la publicación de la teoría de la relatividad especial, Max PLANCK demostró que la fuerza no es otra cosa que la intensidad de la corriente de momentum lineal [2]; el valor de una fuerza no se refiere a un cuerpo sino al área de la sección del conductor de la corriente de momentum, así como cualquier otra corriente se refiere a una sección o área.

Si se aplica esta idea a nuestro problema con los tres cuerpos C, A y B el galimatías de las cuatro fuerzas sencillamente desaparece: se trata de la intensidad de la misma corriente medida en cuatro lugares o secciones diferentes. \vec{F}_{CA} es la intensidad de corriente de momentum que fluye de A a C al salir de A, $-\vec{F}_{AC}$ es la intensidad de la misma corriente al entrar en C, F_{BC} es la intensidad de dicha corriente cuando sale de C y $-\vec{F}_{CB}$ su intensidad cuando llega a B. Es evidente que el valor de esta intensidad permanece constante, ya que no se acumula momentum en ningún lugar, ni en los cuerpos, ni el camino entre ellos. El hecho de que el signo no sea siempre el mismo se debe a que el área de referencia no se orienta de manera uniforme.

Eliminación

El fantasma se esfuma cuando operamos desde el comienzo con corrientes de momentum en lugar de fuerzas.

La descripción de la situación antes planteada puede expresarse así: existe una corriente de momentum de A a C y de C a B, y dado que no se presenta acumulación de momentum en ningún lugar, la intensidad de dicha corriente será la misma en cualquier sección a través de la corriente.

Referencias

- [1] Véase 1.26 *Acciones a distancia*, p.37
- [2] M. Planck, *Bemerkungen zum Prinzip der Aktion und Reaktion in der allgemeinen Dynamik*, Phys. Z. 9, 1908, p.828–830

3.3 La tercera ley de NEWTON

Tema

“Las fuerzas siempre se presentan en pares. Si un cuerpo A ejerce una fuerza sobre otro cuerpo B (*actio*), una fuerza de igual intensidad, pero de sentido contrario actúa desde el cuerpo B sobre el cuerpo A (*reactio*).”

La validez de la ley se suele demostrar con un experimento: dos personas sobre dos monopatines halan el uno hacia el otro con la ayuda de una cuerda; una vez halá uno, otra el otro, Fig. 3.1.

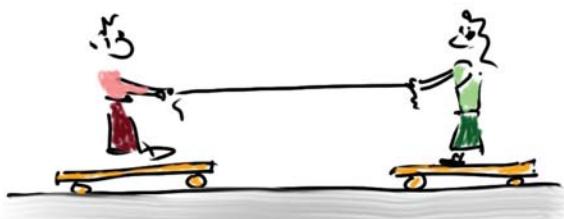


Fig. 3.1 Demonstración experimental de la tercera ley de NEWTON: una persona halá, la otra no.

Defectos

Muchos estudiantes de física no entienden esa ley durante mucho tiempo, ni siquiera al final de sus estudios. Pero tampoco les interesaba especialmente, ya que sabían qué decir en el momentum adecuado (en el momentum del examen). No era difícil repetir la frase. Pero eso es un problema particular.

Es de esperar de una ley que diga lo que es, pero también lo que no es. Para que la ley sea comprensible, es necesario poder imaginar un mundo en el que no sea válida. Tomemos como ejemplo la 2^a ley de NEWTON (o lo que así se llama hoy en día):

La tercera ley de Newton (por tercera vez)

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}.$$

Los que no la conocen tal vez podrían imaginar que es válido:

$$\vec{F} = k \cdot m^2 \cdot \vec{a}.$$

Pero simplemente no es posible imaginar un mundo en el que no se aplique la tercera ley. ¿Cómo debería ser si la fuerza que el cuerpo A ejerce sobre el cuerpo B no es igual a la fuerza que B ejerce sobre A, Fig. 3.2? ¿Debe B empezar a moverse y A no? Eso no puede ser por razones de simetría. ¿Por qué, entonces, se necesita una ley?

Dado que esta “incomodidad” probablemente la notaría cualquiera que observara la situación de la Fig. 3.2, a alguien se le ocurrió la dudosa idea del experimento de la Fig. 3.1.



Fig. 3.2 La situación es simétrica.

La estructura es inicialmente simétrica —dos vagones (¿monopatines?), dos personas— pero luego la simetría se rompe al hacer que solo uno de los dos protagonistas hale. Y las palabras que lo acompañan son: A hala, es decir, ejerce una fuerza, B no hala, es decir, no ejerce una fuerza, o al menos no intencionadamente, y sin embargo B ejerce una fuerza, porque si no, A no estaría acelerando. Que el “halón” de una u otra persona no tiene nada que ver con la tercera ley no se ve inmediatamente. Más bien, revela que el experimentador está confundiendo momentum y energía. Lo que distingue a los dos experimentos parciales —A halando o B halando— es solo la fuente de energía para la aceleración. Y lo que es un requisito para encontrar el experimento convincente, es que se crea en el dicho de que las fuerzas se pueden reconocer por una “sensación muscular”. En algunas versiones del experimento, se contempla incluso que la persona que no hala no sujete la cuerda con la mano, sino que se la ate a la cintura, para que esta persona que no hala, sino que solo sujetá, no tenga sensación muscular. (El experimentador no parece haber pensado en los músculos de las caderas y las piernas).

Origen

Viene del propio NEWTON. NEWTON era un genio, de eso no hay duda, pero en su época era la costumbre des-

cribir el mundo como un objeto de las matemáticas, es decir, axiomáticamente. Al fin y al cabo, su obra se llama “Principios matemáticos de la filosofía natural”, y esta repleta de *definitions, leges, scholia, corollaria, lemmata*, etc. Por supuesto, tuvo que fallar en este objetivo, como explica detalladamente MACH —Ernst Waldfried Josef Wenzel MACH (1838–1916)— [1]. No es de extrañar que aparezca como ley el teorema de la igualdad de las fuerzas que ejercen entre sí dos cuerpos.

Eliminación

- La tercera ley es una consecuencia (trivial) de la ley de conservación del momentum. Dado que esta última se aborda de todos modos, no es necesaria una ley que describe un caso especial.
- El experimento con los monopatines puede ser útil cuando se discute no solo el balance del momentum sino también el balance energético, es decir, cuando se pregunta por el recorrido de las corrientes de momentum y de las corrientes de energía.

Referencias

- [1] E. Mach, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*, F. A. Brockhaus, Leipzig, 1897, p.180f.

3.4 La tercera ley de NEWTON (por tercera vez)

Tema

“Si Willy y Lilly halan con la misma fuerza, Fig. 3.3, la cuerda no se mueve. Existe un equilibrio de fuerzas. Cuando la cuerda se mueve, por ejemplo, hacia la izquierda, Willy hala con mayor fuerza.”

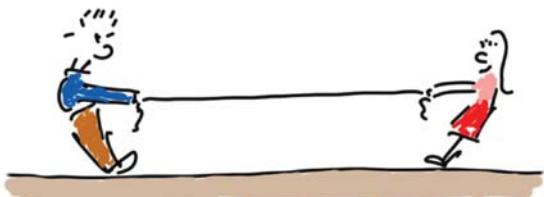


Fig. 3.3 ¿Esta Willy tirando con la mayor fuerza?

Defectos

No nos enfadaremos con el lector de los *Conceptos obsoletos* si no lee este artículo. Al fin y al cabo, la tercera ley de NEWTON ya ha sido objeto de dos artículos. Sin embargo, ahora, una vez más, por un motivo de actuabilidad.

Todo autor quiere tener muchos lectores. Pero no solo eso, desea lectores concretos. Los autores de esta serie de artículos también tienen esa esperanza: que los *Conceptos obsoletos* sean leídos por los autores de libros de texto. Por desgracia, no es así. Los lectores que no son escritores de libros de texto solo pueden ver con desesperación o gustazo como los escritores de libros de texto pasan los mismos errores de una generación a otra.

No obstante, he aquí una nota correctiva a un libro de texto que acaba de salir de la prensa, véase la cita ligeramente modificada de arriba: como la masa de la cuerda puede despreciarse en comparación con la de todos los demás participantes, la fuerza que Willy ejerce sobre la cuerda es siempre de igual magnitud que la ejercida por Lilly. Esta es la tercera ley de NEWTON. Quizá no hubiera sido mala idea medir dicha fuerza.

Si aplicamos la afirmación a otro sistema, surge una conclusión interesante: dos cuerpos cargados eléctricamente se atraen, hacen “tira y afloja”. La “cuerda” en este caso es el campo eléctrico. Si eso ocurriera según las reglas en las que se basa nuestra cita, un cuerpo podría ahora halar con más fuerza que el otro. Esto pondría en movimiento el centro de masas de todo el sistema. En tiempos de escasez de energía, quizás sea un modelo de negocio interesante —si es que funciona—.

Origen

- La mecánica es difícil cuando se formula en términos newtonianos.
- La afirmación de que se siente la fuerza a través de los músculos, es decir, a través del esfuerzo.
- Si una interpretación, explicación u otra afirmación errónea no tiene consecuencias negativas, la interpretación correcta tiene desventajas en comparación con la errónea. Lo sabemos por la evolución. Los bloques de construcción de proteínas de todos los organismos vivos son levógiros, aunque los dextrógiros no tendrían ninguna desventaja evolutiva. Por casualidad, una variedad superó en número a la otra, y a partir de entonces la otra variedad tuvo cada vez menos posibilidades de sobrevivir hasta que finalmente se extinguío. Aparentemente, no entender la tercera ley no tiene consecuencias negativas, ni en un examen ni en la vida cotidiana.

Eliminación

Si uno decide quedarse con la forma newtoniana de descripción (y no utilizar la representación con corrientes de momentum, en la que las mencionadas dificultades no surgen), entonces no queda más remedio que hacer suya realmente la mecánica newtoniana, lo que aparentemente no todo el mundo consigue.

Si se desea hablar del hala y afloja en la escuela, he aquí algunas sugerencias.

Se quiere averiguar si Willy es más fuerte que Lilly o viceversa, entendiendo por “más fuerte” no necesariamente una mayor fuerza. La cuestión es, en primer lugar, en qué se diferencian Willy y Lilly en este contexto. Para evitar el término fuerza, lo llamamos fortaleza.

Se podría hacer el siguiente experimento (mental). Se mide la fortaleza de Willy y Lilly por separado, de acuerdo con el esquema de la Fig. 3.4.

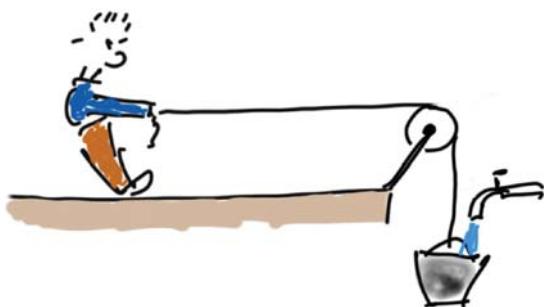


Fig. 3.4 Se mide la fuerza de Willy.

Primero, Willy tiene que mantener el cubo de agua suspendido con la ayuda de la cuerda. Mientras no haya mucha agua, no hay problema. Pero el agua sigue llegando hasta que el cubo se vuelve tan pesado que Willy ya no puede sostenerlo. La cantidad de agua es entonces una medida de la fortaleza de Willy. Así, la fuerza con la que Willy puede sostener el cubo es también una medida de su fortaleza.

Después se procede con Lilly de la misma manera y se puede decidir quién es “más fuerte” y también se sabe quién habría ganado en el hala y afloja. Sin embargo, queda la pregunta de qué característica o habilidad de las dos personas, expresada en términos físicos, se midió aquí. Puede ser que Willy tenga suelas más lisas y por eso pierda. Por supuesto, eso no es lo que se quería medir. Supongamos que el contacto con el suelo es perfecto, es decir, que no hay deslizamiento ni rozamiento. Ahora quizás se pueda ver lo que realmente importa. La persona, digamos Willy, ejerce fuerzas sobre la cuerda y sobre el suelo que son de igual magnitud. Existe un valor máximo para la magnitud de estas fuerzas que no puede ser superado porque entonces Willy se derrumba o cae. Cuál de sus músculos es el responsable depende de la postura que haya adoptado.

Así que lo que se mide es esa fuerza máxima. En un hala y afloja, uno de los dos competidores alcanza primero dicho valor. Entonces ha perdido.

Tira y afloja

Expresado en términos de corrientes de momentum: el cuerpo de Willy (o de Lilly) solo puede soportar una corriente de momentum de cierta intensidad; a un valor superior, el conductor de momentum se rompe, comparable, por ejemplo, a un fusible que solo puede soportar una determinada corriente eléctrica máxima, y rompe el circuito si la corriente se vuelve demasiado fuerte.

Ahora bien, el problema del hala y afloja tiene otro aspecto. Los cuerpos de Willy y Lilly no solo tienen que soportar (transmitir) la fuerza. Tienen que asegurarse en primer lugar de que las fuerzas se generan. Y los músculos también son necesarios para ello. Esta vez, sin embargo, no es su capacidad como transmisores de fuerza (conductores de momentum), sino en su capacidad como fuentes de energía mecánica. Esto es necesario incluso si no hay flujos de energía en el equilibrio.

Se puede ver que la explicación física del hala y afloja es más complicada de lo que se podía sospechar. El “tira y afloja” es inadecuado para explicar la tercera ley, ya que aquí la cuestión de la *actio* y la *reactio* es más bien secundaria en comparación con los otros problemas que se presentan.

Pero quizás se tenga otro comentario y sugerencia: si se explica algo mal y no tiene consecuencias para los alumnos, que sin embargo se convierten en buenos gestores de eventos, o contables o incluso ingenieros, también se podría pensar en dejar de lado el tema. Se ganaría tiempo para algo más sensato y provechoso. Tampoco se perjudicaría la reputación de la física.

En el caso del hala y afloja, un enunciado fácil de repetir, no del todo inverosímil, pero difícil de controlar, fue declarado un bien educativo general. En realidad, la física merece una mayor consideración.

3.5 Tira y afloja

Tema

Dos personas A y B están jugando al “tira y afloja”. A ejerce una fuerza sobre B y B sobre A por medio de la cuerda, Fig. 3.5.



Fig. 3.5 A ejerce una fuerza sobre B y B ejerce una fuerza sobre A.

Defectos

En un seminario, 17 estudiantes de enseñanza de la física (de 5º a 7º semestre) reciben la tarea de dibujar en una figura las fuerzas de un “tira y afloja” y de discutir las relaciones entre dichas fuerzas. Trabajan en pequeños grupos y se les permite hablar entre ellos. No reciben ninguna ayuda del profesor. Al final, tienen que presentar su resultado. Se comienza con el caso más sencillo: las dos personas A y B están en reposo y permanecen en reposo, por lo que la velocidad es cero y la aceleración es cero. Cada uno tira con una fuerza de 200 N.

Resulta que hay tres opiniones sobre “cuál es la fuerza en la cuerda”.

Opinión 1

La fuerza en la cuerda es cero, porque $(+200 \text{ N}) + (-200 \text{ N}) = 0$.

Opinión 2

La fuerza es de 400 N, porque $2 \cdot 200 \text{ N} = 400 \text{ N}$

Opinión 3

200 N.

Como no se llega a un acuerdo, se decide realizar una votación. Sorprendentemente, al final todos votan por 400 N. Pero como todavía no están seguros, piensan en cómo comprobar si la afirmación es correcta. Se sugiere instalar tres dinamómetros en la cuerda, Fig. 3.6: uno del lado de A para medir la “fuerza de A”, otro del lado de B para medir la “fuerza de B” y otro en el centro para medir la “fuerza en la cuerda”.

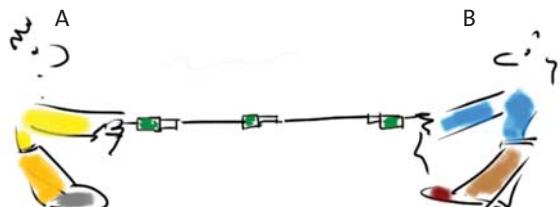


Fig. 3.6 El dinamómetro de la izquierda mide la fuerza de A, el de la derecha mide la fuerza de B. El del medio mide la fuerza en la cuerda.

Como la sala de prácticas (laboratorio) está cerca, el profesor sugiere que se pruebe, cosa que se hace. El resultado suscita sorpresa.

Origen

La culpa del lamentable resultado no es de los estudiantes, ni necesariamente de los maestros y profesores, al menos no de sus capacidades para enseñar física. El re-

sultado es, obviamente, independiente de con quién hayan aprendido física los estudiantes. Pero aquí no hay que preguntar por la culpa, sino por la causa. Porque es fácil de identificar: es la forma newtoniana de describir el transporte del momentum.

Consideremos la situación de la Fig. 3.7: dos cuerpos A y B están unidos por un resorte estirado. El momentum del cuerpo A aumenta, el del B disminuye.



Fig. 3.7 El resorte queda sometido a un estrés de tensión. El momentum fluye del cuerpo derecho al izquierdo.

Si tomamos en serio la conservación local del momentum, tenemos que decir que el momentum atraviesa el resorte desde B hasta A, o, en otras palabras, una corriente de momentum fluye en el resorte desde B hasta A. Si conocemos la intensidad de la corriente cuando sale de B, también la conocemos cuando entra en A y en todos los puntos intermedios —más precisamente: a través de cada intersección que se pueda colocar a través de la conexión entre A y B—. Hemos descrito aquí los hechos con un modelo que ha demostrado su eficacia en muchos campos de la física: el “modelo de sustancia”. Uno se imagina el momentum como un fluido que puede fluir, de forma similar a lo que se hace con la carga eléctrica o la masa. El cambio del contenido de momentum de un sistema se realiza entonces por medio de la entrada o salida de momentum.

NEWTON no podía recurrir a este sencillo modelo, porque habría necesitado el concepto de campo, y este aún no existía. Su objeto de investigación más importante era el cambio de momentum de los cuerpos celestes. ¿Cómo llega el momentum (“*quantitas motus*”) de la Tierra a la Luna o de la Luna a la Tierra? No tenía suficientes conocimientos sobre un sistema que media el transporte y que se encuentra entre la Tierra y la Luna, es decir, lo que hoy llamamos el campo gravitacional, de ahí su “*Hypotheses non fingo*”. Y de ahí su ingenioso pero muy poco manejable modelo de fuerzas: en lugar de “el momentum va de A a B”, dice: “A ejerce una fuerza sobre B y B ejerce una fuerza sobre A y, por tanto, el momentum de ambos cuerpos cambia”. Tenía claro que no era la última palabra sobre el tema [1]. El modelo de fuerzas de NEWTON permite una descripción coherente de las interacciones mecánicas, pero su tratamiento es, como hemos visto, difícil.

Eliminación

Hoy estamos en una posición mucho más cómoda que la de NEWTON. Podemos suponer sin temor a equivocarnos que NEWTON, si hubiera tenido a su disposición el concepto de campo, habría descrito los procesos de los que hablamos aquí con corrientes de momentum. (Dado que él llamaba cantidad de movimiento, o simplemente movimiento a lo que hoy llamamos momentum, probablemente habría llamado a la corriente correspondiente corriente de movimiento).

Referencias

- [1] Carta original de Isaac NEWTON a Richard BENTLEY; The Newton Project <http://www.newtonproject.sussex.ac.uk/view/texts/normalized/THEM00258>

„The last clause of your second Position I like very well. Tis unconceivable that inanimate brute matter should (without the mediation of something else which is not material) operate upon & affect other matter without mutual contact; as it must if gravitation in the sense of Epicurus be essential & inherent in it. And this is one reason why I desired you would not ascribe innate gravity to me. That gravity should be innate inherent & essential to matter so that one body may act upon another at a distance through a vacuum without the mediation of any thing else by & through which their action or force may be conveyed from one to another is to me so great an absurdity that I beleive no man who has in philosophical matters any competent faculty of thinking can ever fall into it. Gravity must be caused by an agent acting constantly according to certain laws, but whether this agent be material or immaterial is a question I have left to the consideration of my readers.“

3.6 La fuerza en el tablero

Tema

En la sección de mecánica de los libros de texto de física se abordan diversas fuerzas: la fuerza de gravedad (fuerza peso), la fuerza normal, la fuerza de frenado, la fuerza de fricción, la fuerza de flotación y muchas más. Se dice que una fuerza es ejercida por un cuerpo sobre otro. Si no se quiere mencionar el cuerpo que ejerce la fuerza, se dice que la fuerza actúa sobre el cuerpo. A veces también se dice que actúa en el “punto de ataque”. En ocasiones se utiliza otra formulación: en lugar de decir que un cuerpo pesado ejerce una fuerza sobre la tierra, se dice que la ejerce sobre su soporte, por ejemplo, sobre un plano inclinado.

La fuerza en el tablero

Defectos

De estos modismos lingüísticos se desprende que se trata de una magnitud difícil (en contraste con las afirmaciones de que todo ser humano tiene un sentimiento natural de las fuerzas). El hecho de que el tratamiento lingüístico de la magnitud fuerza sea tan inusual indica que el concepto también es difícil de entender. Es fácil convencerse de que la mayoría de los estudiantes de física no lo han entendido del todo.

Consideremos el caso de una caja que se encuentra en el suelo (es difícil imaginar un problema estático más sencillo.) En este caso, la tierra ejerce una fuerza sobre la caja, que se puede calcular según $m_{\text{caja}} \cdot g$. ¿La tierra ejerce la fuerza? ¿Toda la tierra? ¿Incluso la parte que se encuentra en Nueva Zelanda? Eso debe ser así. Se ha dicho que ejerce una fuerza sobre la caja. ¿En toda la caja? Sí y no. De hecho, en toda la caja. Pero “ataca”, como se acostumbra a decir, en un punto de ataque. Pero ¿cómo llega desde el llamado, por algunos, punto de ataque a los demás puntos de la caja? Especialmente si la caja está vacía y el punto de ataque se encuentra donde solo hay aire. ¿Y qué pasa con la tierra? ¿También tiene un “punto de ataque”? En cualquier caso, según la 3^a ley de NEWTON, existe una fuerza opuesta a la primera fuerza, y probablemente actuará en el punto de ataque de la tierra. ¿O no? ¿No sería mejor decir que la caja ejerce la fuerza sobre su base? Al menos es más plausible que sobre toda la Tierra. Ahora pongamos la caja sobre una mesa. Esto complica aún más las cosas. Ahora la caja ejerce una fuerza sobre la mesa, o para ser más exactos, sobre su superficie de contacto en el tablero. El tablero de la mesa la pasa de alguna manera a las patas de esta. (¿Pero esta permitido hablar así en general y en el examen en particular? ¿Cómo, entonces, se debe decir?) Y, además, cada pata de la mesa ejerce una fuerza sobre la tierra. De nuevo: ¿solo en las cuatro superficies de apoyo, o en toda la tierra, incluida Nueva Zelanda? También está el campo gravitatorio. ¿Qué papel juega? A veces se dice que “media” la fuerza. Es el mediador entre dos cuerpos, como el casamentero entre dos personas.

Por supuesto, usted ha notado, querido lector, y puede que nos lo recrimine, que aquí hemos pecado de ingenuos o “tontos” deliberadamente. Por supuesto que sí. Pero las preguntas, las torpes formulaciones que se han esbozado, ¿no son en realidad algo evidente? ¿No es necesario plantearse estas preguntas cuando se introduce la estática tanto en el colegio como también en la universidad?

El asunto es que en un problema estático siempre se está tratando con un recorrido cerrado, o al menos con una sección de dicho recorrido, solo que no siempre se lo menciona explícitamente. En su lugar, se habla, en el mejor de los casos, de unas pocas interfaces en este ca-

mino, y en el peor, de puntos de ataque, que, como en el caso de un anillo o de la caja vacía, también pueden encontrarse donde el cuerpo no está.

Así que la mayor parte del problema de nuestra caja, no se aborda. ¿Y las fuerzas en la caja, en el tablero, en las patas de la mesa, en la tierra, en el campo gravitacional? Hemos elegido dos o tres lugares para los que es fácil calcular la fuerza. Pero entonces difícilmente podemos afirmar que estamos hablando del mundo cotidiano de los alumnos.

Se podría pensar que aquí no se puede hacer nada: El tiempo de enseñanza es un bien escaso. Tenemos que limitarnos a los casos sencillos. Al fin y al cabo, solo tratamos los osciladores lineales, y dejamos los no lineales para la universidad. Tratamos el gas ideal y dejamos el gas real para la universidad, etc. Si quisieramos tratar toda la distribución de la fuerza en un problema estático (más precisamente: la distribución de las tensiones mecánicas), necesitaríamos, se podría pensar, el volumen 7 de Landau-Lifshitz o algo parecido, es decir, nada aplicable para la escuela. Por lo tanto, se concluirá, debemos limitarnos a describir las fuerzas en solo unos pocos puntos o secciones.

De hecho, la situación es diferente aquí que en el caso de la aproximación lineal para las vibraciones o la idealización para el gas. No se trata de que la fuerza en la caja sea menor que en el punto donde la caja toca el suelo. Así que lo que estamos haciendo no es una aproximación, sino que simplemente estamos ignorando la mayor parte del fenómeno.

Origen

Hoy en día, procedemos del mismo modo que en la época de NEWTON —Isaac NEWTON (1643–1727)—, cuando no había otra forma de hacerlo. EULER y BERNOULLI —Leonhard Paul EULER (1707–1783) y Daniel BERNOULLI (1700–1782)— fueron posteriores y apenas dejaron huella en las aulas. En la universidad, los futuros profesores de secundaria aprenden en cambio las teorías de HAMILTON y LAGRANGE —William Rowan HAMILTON (1805–1865) y Joseph-Louis LAGRANGE (1736–1813)—, que son muy elegantes, pero con las que apenas pueden hacer nada en su profesión.

La mecánica newtoniana utiliza un lenguaje que ni siquiera plantea la cuestión de la fuerza en una mesa, dentro de la tierra, dentro de la esfera que es empujada por otra, o incluso la fuerza en el campo gravitacional. Las fuerzas simplemente actúan sobre los cuerpos, en la tierra o en la luna, en un resorte, solo ocasionalmente en una cuerda. Y, por supuesto, ni sobre el campo gravitacional ni en el campo gravitacional, porque estos conceptos no existían en aquella época.

Eliminación

La metáfora barroca de “fuerza” introducida por NEWTON ya no es de actualidad. NEWTON la inventó precisamente con la intención de no tener que hablar de los problemas mencionados anteriormente, una idea brillante en su momentum. El principal problema era que aún no tenía el concepto de campo gravitacional. Y, por supuesto, aún estaba lejos de una mecánica del continuo.

Hoy en día, estamos en una posición mucho mejor y ya no tendríamos que soportar el lenguaje newtoniano, después de que EULER y BERNOULLI desarrollaran la mecánica de los medios continuos, y sobre todo desde que PLANCK —Max Karl Ludwig PLANCK (1858–1947)— demostró que las fuerzas pueden interpretarse como corrientes de momentum. Entonces, la descripción de nuestro problema de la caja es la siguiente: el momentum viene de la tierra, es decir, de todos los puntos de la tierra a través del campo gravitacional hacia la caja, en un amplio flujo hacia todos los puntos de la caja donde hay masa; es decir, si la caja está vacía, no hacia el interior. A continuación, fluye a través de la materia de la caja hasta su parte inferior, y de ahí a la tierra, en la que se distribuye ampliamente. Por lo tanto, el circuito es cerrado. Por supuesto, por la tierra circulan muchas más corrientes de momentum, pero la que acabamos de describir es la parte que tiene que ver con nuestra caja.

Todo esto se puede decir incluso antes de haber empezado con cualquier cálculo.

A veces se da la impresión de que, mientras no se calcule, no se trata de física real. No compartimos en absoluto dicha opinión: la esencia del proceso de comprensión es anterior al cálculo.

Cuando decimos que el agua del océano se evapora, se transporta con el aire a la tierra, se condensa, cae a la tierra en forma de lluvia, se acumula en arroyos y ríos, y así vuelve al mar, estamos diciendo una gran cantidad de cosas importantes sobre el ciclo del agua sin haber dado una intensidad de corriente para cualquier intersección a través del circuito del agua, o una densidad de corriente para cualquier punto. ¿Por qué no hacer lo mismo con el momentum? ¡Es tan sencillo!

Defectos

- 1 Al parecer diversos autores tienen distintas ideas sobre lo que es el principio de superposición. Según algunos textos, el principio establece la adición o suma vectorial de la fuerza y del momentum [1, 2], en otros es interpretado como un teorema sobre la adición de las magnitudes cinemáticas velocidad, posición y aceleración [3, 4], y otras veces se lo presenta como una formulación del principio de relatividad [5].
- 2 Si el principio se limita a la afirmación de que cierta magnitud vectorial es aditiva, no se está diciendo algo muy significativo, en todo caso se debería explicitar las circunstancias en las cuales es permitido sumar los valores de dicha magnitud. Se pueden sumar los valores de cualquier magnitud —sea escalar, vectorial o tensorial— y en cada caso esta adición representa algo razonable en el mundo real. ¿Qué sentido tiene la afirmación de que la velocidad es aditiva? La suma de las velocidades de dos coches que viajan uno cerca al otro tiene interés si se quiere calcular su valor promedio; las velocidades también se suman al hacer un cambio del sistema de referencia. ¿También es aditiva la presión? En algunos casos sí, las presiones parciales de los componentes de un gas se suman para obtener la presión total. Se adicionan fuerzas que actúan sobre un mismo cuerpo. Los valores del momentum, como los de todas las demás magnitudes extensivas, se suman cuando se forma un nuevo sistema a partir de dos o más sistemas parciales. ¿Es aditiva la temperatura? Si se calcula la suma de las temperaturas de un cuerpo en diez momentos equidistantes y se divide por 10, se obtiene el valor promedio temporal de dicha magnitud. Si se conectan dos bombas de calor en serie, la diferencia total de temperatura que resulta es la suma de las diferencias que se obtienen en cada una de las bombas.
- 3 Si el principio de superposición no es otra cosa que la afirmación de que la velocidad o la fuerza es aditiva en ciertas circunstancias, entonces no merece el calificativo de “principio” y no vale la pena insistir, como se hace en ciertos textos, en que está basado en la experiencia. En [1] y [2] se lo eleva al rango de *Lex Quarta*, es decir, la cuarta ley de NEWTON; como ya se ha visto se puede formular un principio similar para cualquier otra magnitud. La regla de adición vectorial de la fuerza o de la velocidad es una de las herramientas básicas de la física, no olvidemos que para NEWTON la regla no era una ley.
- 4 En algunos textos escolares se deduce la validez del principio de superposición de un experimento con

3.7 El principio de superposición

Tema

El principio de superposición o de independencia de movimientos.

El principio de superposición

proyectiles o experimento de tiro oblicuo (parabólico), en el cual dos cuerpos caen simultáneamente de la misma altura. Se deja caer simplemente el primero, mientras el segundo se lanza en sentido horizontal; se observa que las componentes verticales de la velocidad son iguales en cada instante, es decir, ambos cuerpos caen la misma distancia vertical en el mismo tiempo. Pero para observar este resultado deben cumplirse varias leyes y reglas, de modo que no es de extrañar que puedan obtenerse diversas conclusiones. Es fácil elegir las condiciones para que el resultado no sea el antes mencionado, si los dos cuerpos son grandes y ligeros, de modo que no se pueda despreciar la fricción aerodinámica, entonces las componentes verticales de la velocidad no serán iguales, tampoco lo serán cuando la aceleración de la gravedad dependa de la posición. En [6] se concluye que no existe un principio general de superposición.

- 5 Se presenta otra dificultad cuando se dice que un cuerpo realiza dos o más movimientos parciales independientes [3, 4, 5].

¿Cómo reconocer que un cuerpo realiza varios movimientos simultáneos?: ¿definiendo los campos de fuerza y los momentumis iniciales para los movimientos parciales? Entonces, un cuerpo que se mueve en línea recta a través de campos eléctricos y magnéticos perpendiculares entre sí debería realizar simultáneamente un movimiento circular y uno parabólico, lo cual, como sabemos, no ocurre.

¿O los movimientos parciales se obtienen descomponiendo la velocidad real según las reglas del cálculo vectorial? En este caso es trivial que recomponiéndolos se obtenga el movimiento original, para esto no se necesita de un nuevo principio.

Origen

Surge del primer corolario de los tres axiomas o leyes del movimiento publicado en los *Principios matemáticos de la filosofía natural*, de Isaac NEWTON [7]. Al parecer poco después se modificó el texto por otros autores, lo que originó el siguiente comentario de MACH —Ernst Waldfried MACH (1838–1916)— “Esta concepción [de NEWTON] es completamente natural y señala claramente el punto esencial. No tiene nada de lo artificial y afectado que más tarde se ha introducido en la teoría de la composición de las fuerzas” [8].

Eliminación

Es suficiente introducir la fuerza y el momentum como vectores de la manera común y tradicional, lógicamente discutiendo y analizando bajo qué circunstancias se

pueden adicionar vectorialmente dichas magnitudes, con lo cual el experimento del tiro parabólico se puede tratar de manera exhaustiva.

Referencias

[1] A. Sommerfeld, I, *Mechanik*, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1944, S. 6: “Consideramos como Lex Quarta la regla del paralelogramo de las fuerzas, que en la obra de NEWTON aparece solamente como suplemento. Nos dice que la resultante de dos fuerzas, que actúan sobre el mismo punto de masa, es la diagonal del paralelogramo formado por dichas fuerzas. Las fuerzas se adicionan como vectores”.

[2] *Lexikon Technik und exakte Naturwissenschaften*, Band 10, Fischer Taschenbuch Verlag, 1972, S. 2978: “El principio de independencia (principio de superposición), que se obtiene de la experiencia, fue formulado por NEWTON como Lex Quarta; los efectos de varias fuerzas que actúan sobre un cuerpo se superponen sin perturbación mutua”

[3] *Metzler Physik*, J. B. Metzlersche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1991, S. 21: “Principio de la superposición no perturbada de movimientos: si un cuerpo realiza dos o más movimientos, estos se superponen al movimiento total. Desplazamientos, velocidades y aceleraciones se suman vectorialmente”.

[4] *Grimsehl*, I, B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1957, S. 29: “Ley o principio de independencia de los movimientos: si un cuerpo realiza dos (o más) movimientos, entonces la posición final del cuerpo es independiente de que los movimientos se realicen simultánea o sucesivamente en cualquier orden. Por consiguiente, el desarrollo simultáneo de los movimientos parciales no influye en estos”.

[5] W. Kuhn, *Physik*, Band II, 1. Teil, Klasse 11, Westermann, Braunschweig, 1989, S. 16–17: “Ambos movimientos parciales son completamente independientes. El movimiento real se compone de dos movimientos parciales independientes (principio de independencia). La misma afirmación resulta de la aplicación del principio de la relatividad. [...]. Al no ser válido el principio de independencia [...], las leyes de la caída libre serían distintas en un tren en movimiento y en uno en reposo, con un experimento de caída libre, podría averiguarse si el tren se mueve de manera uniforme. Según nuestra experiencia esto es imposible, ya que violaría el principio de relatividad. Los principios de relatividad y de independencia están estrechamente vinculados”.

[6] Dorn-Bader, I, *Oberstufe Band MS*, Lehrerband, Schroedel Schulbuchverlag GmbH, Hannover, 1985, S. 20

El momentum como producto de la masa y la velocidad

- [7] I. Newton, *Principios matemáticos de la filosofía natural*. En: A hombros de gigantes (Edición comentada de Stephen Hawking). Barcelona: Crítica, 2003.
- p.660: “Un cuerpo recorre la diagonal de un paralelogramo bajo dos fuerzas conjuntas en el mismo tiempo en que los dos lados bajo las dos acciones por separado”.
- [8] E. Mach, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*, F. A. Brockhaus, Leipzig, 1897, p.20.

3.8 El momentum como producto de la masa y la velocidad

Tema

Generalmente el momentum se define como producto de la masa y la velocidad:

$$\vec{p} = m \vec{v} \quad (3.1)$$

Si se procede así, el momentum \vec{p} aparece como abreviación para el producto de m y \vec{v} , figura entonces como ejemplo típico de una magnitud derivada. Incluso hay libros en los cuales se califica el momentum como magnitud auxiliar [1].

Defectos

Hay varias razones para no introducir el momentum como magnitud derivada, sino como magnitud básica.

- 1 El momentum es una magnitud que se conserva, gracias a esta propiedad podemos medir el momentum de un cuerpo en movimiento sin recurrir a la relación (3.1) [2]. Ya que es posible medir la masa gravitacional y la velocidad independientemente una de la otra e independientemente del momentum, la ecuación (3.1) se puede verificar experimentalmente.
- 2 La ecuación (3.1) no es válida para todos los sistemas. Así, el momentum del campo electromagnético no se calcula por medio de dicha fórmula, la densidad del momentum $\bar{\rho}_p$ esta relacionada con las intensidades de los campos eléctrico y magnético según la siguiente ecuación:

$$\bar{\rho}_p = \frac{\vec{E} \times \vec{H}}{c^2}$$

- 3 En electricidad existe una ecuación análoga a la (3.1). A la magnitud extensiva momentum le corresponde la extensiva carga eléctrica, a la intensiva velocidad corresponde el llamado potencial eléctrico. Así como

para ciertos sistemas (los no-relativistas) el momentum es proporcional a la velocidad, para otros, los condensadores por ejemplo (pero también muchos más), la carga eléctrica Q es proporcional al potencial U . Al factor de proporcionalidad entre \vec{p} y \vec{v} , se le llama masa inercial y al factor entre Q y U capacidad (capacitancia) eléctrica:

$$Q = C \cdot U \quad (3.2)$$

Comparando las ecuaciones (3.1) y (3.2) se nota que es posible interpretar la masa como la capacidad de momentum (que podría llamarse capacidad mecánica). Cuanto mayor sea la masa de un cuerpo tanto más momentum contiene a una velocidad dada. Cuanto mayor es la capacidad de un condensador tanto más carga contiene a un potencial dado.

Esta comparación muestra que es inapropiado definir el momentum por la ecuación (3.1). Es como si se introdujera la carga eléctrica por medio de la ecuación (3.2), en lugar de como se hace habitualmente: como magnitud básica independiente de U y de C .

- 4 También resulta apropiado introducir el momentum como magnitud básica si se tiene en cuenta que los componentes cartesianos del momentum (o de su densidad) representan tres de los 16 componentes del tensor energía-momentum. Esto significa que el momentum desempeña, para el campo gravitacional, un rol análogo al de la carga y la corriente eléctrica para el campo electromagnético. Es parte, además de la energía, de la corriente de energía y de la corriente de momentum, de la divergencia del campo gravitacional. Las divergencias de los campos son importantes para las interacciones fundamentales de la naturaleza y no resulta apropiado considerarlas como derivadas.

Origen

El momentum, o cantidad de movimiento, surgió en un proceso bastante largo. En el siglo 17 una de las preocupaciones de la mecánica era formular leyes que explicaran el fenómeno del choque, se suponía correctamente que en los procesos de choque existe una invariante, la cual se trataba de expresar mediante la masa y la velocidad del cuerpo.

En el año 1644 René DESCARTES (1596–1650) publicó sus *Principia Philosophiae*, en los cuales mantiene la conservación del producto de la masa y la velocidad, o sea de la *quantitas motus* (cantidad de movimiento). Algunas décadas más tarde, Gottfried Wilhelm LEIBNIZ (1646–1716) estaba convencido de poder demostrar que el producto de la masa y el cuadrado de la ve-

Momentum y choques

locidad eran la invariante “correcta” en los procesos de choque. Se desató entonces, la hoy conocida disputa sobre cuál era “la verdadera medida de la fuerza”, que duró varias décadas y terminó solamente en 1726 con los trabajos de Daniel BERNOULLI (1700–1782). No hubo ganadores ni perdedores, surgieron dos conceptos nuevos: el uno se llama hoy momentum y el otro energía cinética, el momentum estaba *definido* por medio de la ecuación (3.1). Mucho más tarde se descubrió que es posible construir la magnitud conservativa “momentum” solamente si se prescinde de la relación (3.1) como definición. La teoría especial de la relatividad nos enseña que el momentum y la velocidad no son proporcionales para altas velocidades, se “salvó” la ecuación (3.1) introduciendo una masa que depende de la velocidad. Si se quiere aplicar el principio de la conservación del momentum a procesos en los cuales participa el campo electromagnético, es necesario generalizar el concepto de momentum, hay que definirlo independientemente de la relación (3.1).

Eliminación

Introducir el momentum como magnitud básica, con su propio método de medición, así como se procede con la carga eléctrica. Se puede emplear la ecuación [1] para definir la masa inercial como el factor por el cual debemos multiplicar la velocidad para obtener el momentum.

Referencias

- [1] R. W. Pohl, *Mechanik, Akustik und Wärmelehre*, Springer-Verlag, Berlin, 1969 , p.45
- [2] F. Herrmann a. M. Schubart, *Measuring momentum without the use of $p = m v$ in a demonstration experiment*, American Journal of Physics 57, 1989, p.858

3.9 Momentum y choques

Tema

Usualmente se introduce el momentum en el contexto de colisiones o choques, ya que esta es la magnitud cuya conservación se manifiesta en un choque.

Defectos

Cada cuerpo o partícula que se mueve tiene momentum. Este cambia al acelerar, desacelerar o cambiar de dirección al cuerpo, sin embargo, en la enseñanza se analizan solamente colisiones, es decir, casos particulares de procesos de aceleración, desaceleración o cambio de dirección. En un choque el traspaso de momentum

es tan rápido que no surge la pregunta sobre la característica temporal del proceso, se tiene la impresión de que el proceso es instantáneo. Así, el importante papel del momentum en la mecánica se reduce a un fenómeno marginal, aparece como ayuda para el balance en procesos cuyo desarrollo temporal no interesa.

Origen

Los principios de la mecánica de choques se remontan al siglo 17, ver al respecto la obra [1] de MACH —Ernst Waldfried MACH (1838–1916)— cuando era evidente que para su descripción básica bastaban leyes sencillas; varios científicos se dedicaron a su búsqueda. En 1668 la Royal Society propuso una investigación sobre el tema y tres científicos presentaron sus trabajos, entre ellos HUYGENS. Para formular las mencionadas leyes utilizaron la *quantitas motus*, término, probablemente debido a Cartesio —DESCARTES— (1596–1650), que refleja muy bien el significado de dicha magnitud, mucho mejor que los nombres “momentum” o “impulso” [2].

Eliminación

No debe limitarse el concepto de momentum y su aplicación a procesos de choque. Ya que la dinámica trata con cuerpos y partículas en movimiento, y el momentum es la medida de la cantidad de movimiento, es recomendable operar con el momentum desde el comienzo mismo de la mecánica y considerarlo como la magnitud más importante de esta.

Referencias

- [1] E. Mach, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*, F. A. Brockhaus, Leipzig 1897, S. 300. Existe una versión, en inglés *The Science of Mechanics*, La Salle, Illinois: Open Court Publishing, reimpreso en 1989, sobre la 9^a edición alemana.
- [2] Véase 3.24 *La aceleración*, p.84

3.10 La cantidad de movimiento: una magnitud relegada

Tema

Es común encontrar citas como las siguientes:

- 1 ... $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ “ que es la otra forma de formular la Segunda Ley de NEWTON y la expresión propiamente conocida como Ecuación Fundamental de la Dinámica de Traslación.” [1]
- 2 “Así, si consideramos una partícula de masa m en movimiento circular uniforme, estará sometida a una fuerza centrípeta dada por:

La cantidad de movimiento: una magnitud relegada

$$F = m \frac{v^2}{r} \hat{u}_r \dots" \quad [2]$$

Defectos

La ecuación reportada en la primera cita es correcta.

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (3.3)$$

El valor del término de la derecha es igual al valor de la magnitud de la izquierda (la fuerza \vec{F}), sin embargo se puede argumentar que la designación “ecuación fundamental” no es conveniente, ya que dicha ecuación “compendia” otras dos, que es necesario distinguir. La primera es la conocida ley de NEWTON:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} \quad (3.4)$$

Ella dice algo sobre la naturaleza de la magnitud \vec{p} “cantidad de movimiento” (o “momentum”), la cual es una magnitud conservativa. Al lado derecho se encuentra el cambio de la cantidad de movimiento de un cuerpo, o sistema, con respecto al tiempo; la ecuación muestra que \vec{p} puede cambiar solamente si una corriente de momentum entra o sale del sistema, es decir, si “una fuerza actúa sobre el sistema”. La ecuación también es válida para sistemas que en general no se llaman cuerpos, es decir, para partículas y campos.

Para obtener la ecuación (3.3) es necesaria además la siguiente relación:

$$\vec{p} = m \vec{v} \quad (3.5)$$

Específicamente su derivada respecto al tiempo

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = m \frac{d\vec{v}}{dt} .$$

donde m es la masa y \vec{v} la velocidad.

La ecuación (3.5) es de otra índole que la ecuación de conservación (3.4), ella es lo que en otro contexto se llamaría ecuación de estado. Esta clase de ecuaciones tienen validez para ciertos sistemas y bajo ciertas circunstancias, así por ejemplo la ecuación

$$\vec{p} = m \vec{v}$$

solo es válida mientras que la velocidad sea pequeña comparada con c (velocidad de la luz en el vacío); además no es aplicable al campo electromagnético, porque para este sistema las magnitudes m y \vec{v} no existen. Para comprender mejor la lógica de estos argumentos se puede establecer una comparación con las relaciones

eléctricas “análogas”, entre las magnitudes corriente I , carga eléctrica Q , capacidad C y potencial U , compiladas en la Tab. 3.1.

Mecánica	Electricidad
$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$	$I = \frac{dQ}{dt}$
$\vec{p} = m \vec{v}$	$Q = C \cdot U$
$\vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = m \vec{a}$	$I = C \frac{dU}{dt}$.

Tab. 3.1 Comparación entre relaciones mecánicas y eléctricas.

Seguramente en un curso de electricidad nadie sostendría que

$$I = C \frac{dU}{dt},$$

sea la “ley fundamental de la electricidad”. Al omitir el paso intermedio y al declarar que la ecuación (3.3) es una “ley fundamental”, se evita, infelizmente, hablar de la cantidad de movimiento.

En la mayoría de cursos básicos de mecánica se introduce la fuerza desde el comienzo, desarrollando ampliamente dicho concepto; la cantidad de movimiento, magnitud fundamental y extensiva, por el contrario, tiene que esperar hasta que se la menciona en el capítulo sobre los procesos de colisión.

Igualmente en otras ocasiones se evidencia que se evita el empleo del momentum, como en la segunda cita, en la cual también se omite el paso intermedio. El primer paso es calcular el cambio del momentum de un cuerpo que realiza un movimiento circular:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = m \frac{v^2}{r} \hat{r}.$$

donde a la derecha figuran únicamente magnitudes que caracterizan al cuerpo. Solamente con la ley de NEWTON se llega a la relación:

$$\vec{F} = -m \frac{v^2}{r} \hat{r}.$$

Origen

No valorar el concepto cantidad de movimiento, reducirlo a un invariante en los procesos de colisión, no es

La dirección de las corrientes de momentum

un remanente de los comienzos de la mecánica, por el contrario, antes de NEWTON la cantidad de movimiento (*quantitas motus*) era la magnitud para la cual se hacían los cálculos. De otra parte, en la llamada Física moderna, la cantidad de movimiento, junto con el momentum angular es la magnitud central de la mecánica, como se puede apreciar en la teoría de la relatividad donde la densidad del momentum figura como una componente del tensor energía-impulso, y en física de partículas donde el momentum es una de las magnitudes más importantes para caracterizar el estado de estas. Entonces, ¿de dónde surge el ostensible desdén por su introducción en la mecánica clásica?

Se supone que parte de la culpa es de Gottfried von LEIBNIZ (1646–1716), como consecuencia de la famosa disputa surgida entre este y los cartesianos, que duró largos años y en la que también tomó parte Immanuel KANT (1724–1804) con su primer escrito *Ideas sobre la verdadera evaluación de las fuerzas vivas*. La polémica versó sobre la “verdadera medida de la fuerza”, se analizó cuál de las siguientes expresiones: mv o mv^2 era la medida “correcta” de la “fuerza” o cantidad de movimiento, LEIBNIZ fue partidario de la segunda. Hoy se sabe que ambas expresiones tienen derecho a existir, se conoce la primera como cantidad de movimiento o momentum, y la segunda (agregando el factor $1/2$) como energía cinética; ambas pueden servir para representar lo que en aquel entonces se llamaba fuerza y que hoy, para evitar confusión con la magnitud \vec{F} podría llamarse ímpetu.

Sin embargo, para hacerse una idea del ímpetu hoy se prefiere pensar en la expresión $(m/2)\vec{v}^2$; la energía cinética ha “prevalecido” sobre el momentum, asociándose esta con la idea intuitiva de ímpetu.

La consecuencia es que para la cantidad de movimiento no queda sitio en nuestra intuición, al contrario, el momentum se ha tornado “complejo”, ya que se manifiesta con las mismas magnitudes que la energía cinética (masa y velocidad), pero no es la misma cosa, quedando como una magnitud abstracta sin “correspondencia” en el mundo cotidiano. Así su papel se reduce a una invariante matemática para la descripción de procesos de colisión.

La situación sufrida por la cantidad de movimiento es algo similar a la ocurrida con la entropía. Al comienzo, la entropía era una medida muy apropiada para lo que en términos comunes se llamaría “calor”, después de formulada la ley de conservación de la energía se transfirió la designación “calor” a la forma diferencial; como consecuencia desde entonces la entropía aparece como una magnitud abstracta y difícil a la cual no corresponde un concepto intuitivo.

Eliminación

Introducir la segunda ley de NEWTON tal como el mismo NEWTON lo hizo, es decir, por medio de la ecuación (3.4).

Ubicar a la cantidad de movimiento en el centro de la mecánica, estudiando la relación (3.5) solamente después de la introducción de aquella, así como se analiza la relación $Q = C \cdot U$ después de la introducción de la carga eléctrica.

Respecto a los movimientos de rotación se recomienda mostrar primero que el cambio de la cantidad de movimiento es $d\vec{p}/dt = -(mv^2/r)\hat{r}$, y no decir que “ mv^2/r ” es la magnitud de la fuerza centrípeta”.

Referencias

- [1] Principio Fundamental de la Dinámica de Traslación (Segunda ley de Newton). [en línea]. En: <http://fisica.laguia2000.com/dinamica-clasica/leyes-de-newton/principio-fundamental-de-la-dinamica-de-traslacion-segunda-ley-de-newton> [consultado el 13 de junio de 2022].
- [2] Fuerza centrípeta. [en línea]. En: http://es.wikipedia.org/wiki/Fuerza_centrípeta [consultado el 13 de junio de 2022]

3.11 La dirección de las corrientes de momentum

Tema

Se puede interpretar una fuerza como una corriente de momentum. Esta idea tiene su origen en Max PLANCK [1], y se encuentra mencionada o presentada en detalle en numerosos libros de texto de física teórica, principalmente en el contexto de la mecánica de los medios continuos. Como el momentum es una cantidad vectorial y, por tanto, sus componentes cartesianos pueden asumir dos signos diferentes, existe arbitrariedad en la elección de los signos de las componentes del momentum. La dirección de la corriente de los tres componentes del momentum también depende de esta elección.

Defectos

Dado que las corrientes de momentum solo se tratan en los libros de texto avanzados, la mayoría de los estudiantes de física no los conocen. Por ello, incluso los físicos experimentados no saben cómo tratarlos. Parece particularmente molesto que la dirección de la corriente dependa de la definición del signo de la cantidad que fluye.

En física, la dirección de corriente se entiende siempre como la dirección del vector de la densidad de co-

La dirección de las corrientes de momentum

rriente, cualquiera que sea la “cantidad fluyente” implicada.

Dado que el problema de la dirección de la corriente es el mismo para el momentum que para la carga eléctrica, recordemos primero cómo determinar la dirección de la corriente eléctrica.

A la carga eléctrica se le aplica una ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \rho_Q}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{j}_Q = 0 \quad (3.6)$$

Aquí ρ_Q es la densidad de la carga eléctrica y \vec{j}_Q la densidad de corriente eléctrica.

Si la densidad de carga disminuye en un punto, es decir, si

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} < 0,$$

entonces la divergencia de \vec{j}_Q es positiva en este punto, es decir, una corriente fluye desde el punto hacia el exterior.

Esta definición de la dirección de la corriente se deriva de la ecuación (3.6) y no representa una convención, como a veces se afirma. Sin embargo, existe en principio la posibilidad de llegar al sentido contrario de la corriente. Para ello, hay que definir el signo de la carga eléctrica al revés. Según la definición generalmente aceptada, los electrones portan carga negativa y los protones carga positiva. Si se definiera que la carga de los electrones es positiva y la de los protones es negativa, entonces según la ecuación (3.6) el sentido de la corriente también se invertiría. La dirección de la corriente eléctrica se basa, por tanto, en una convención, pero no de la manera que a veces se sostiene: no se puede mantener la convención sobre el signo de la carga eléctrica, y solo redefinir la dirección de la corriente.

Volvamos al momentum. Para cada componente cartesiana del momentum separadamente, se aplica una ley de conservación y por lo tanto una ecuación de continuidad de la forma de la ecuación (3.6). Al igual que en el caso de la carga eléctrica, aquí también se aplica lo siguiente, y para cada uno de los tres componentes del momentum individualmente: tenemos la libertad de definir lo que entendemos por momentum positivo y negativo. Una vez decidido esto, también queda fijada la dirección de la corriente. Y si se invierte la definición de la dirección del momentum positivo, el vector de densidad de corriente también invierte su dirección.

Otra vez, la carga eléctrica: no hay problema en definir qué se entiende por carga eléctrica positiva y negativa. Una vez tomada, la decisión es vinculante. Es diferente con el momentum: para cada experimento que se

describe, hay que definir de nuevo qué momentum se llama positivo. Es cierto que aquí también hay una convención: el movimiento hacia la derecha corresponde a un momentum positivo. Esta convención proviene de las matemáticas y también se sigue sistemáticamente en la física: la dirección positiva de los sistemas de coordenadas de todo tipo es hacia la derecha o hacia arriba. Pero basta con mirar un movimiento en la dirección positiva desde atrás, y ya una velocidad positiva se convierte en negativa y el momentum positivo en negativo. (Esta es la situación en la que uno se encuentra como profesor. Por lo tanto, es recomendable describir un experimento realizado en la mesa del profesor desde el punto de vista de los alumnos.)

Origen

Para el físico, una corriente es un concepto modélico que deriva su justificación únicamente de la validez de una ecuación de balance de la forma

$$\frac{\partial \rho_X}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{j}_X = \sigma_X \quad (3.7)$$

Aquí X es una magnitud extensiva cualquiera. Si es una magnitud conservada, el término de producción σ_X es cero.

A menudo se comete un error con respecto a la dirección de la corriente eléctrica: se distingue entre una dirección de corriente “técnica” y una “física”. Solo la llamada dirección técnica de la corriente es compatible con la teoría, es decir, con la ecuación (3.7). La llamada dirección física de la corriente es la dirección del movimiento de los electrones (y, por tanto, al mismo tiempo la dirección de la corriente de la cantidad de sustancia n). Así, la corriente no se entiende como un modelo correspondiente a la ecuación (3.7), sino en el sentido del lenguaje coloquial como un movimiento colectivo. También en el caso de la corriente de momentum, parece que se espera que algo se mueva.

El cambio en la dirección de la densidad de corriente cuando se redefine la dirección del momentum puede considerarse como algo no estético. Quienes no estén familiarizados con las corrientes de momentum pueden sentirse molestos por la aparente violación de la simetría en un proceso que es obviamente simétrico. La Fig. 3.8a muestra un simple circuito de momentum. El resorte está bajo tensión. El momentum fluye en sentido contrario a las agujas del reloj. (Aparte del circuito de corriente de momentum dibujado, otras corrientes de momentum cerradas fluyen dentro del yugo rígido). Si el momentum se cuenta positivo hacia la izquierda en lugar de hacia la derecha, la corriente de momentum también invierte su dirección, Fig. 3.8b.

Corrientes de momentum en conductores estacionarios

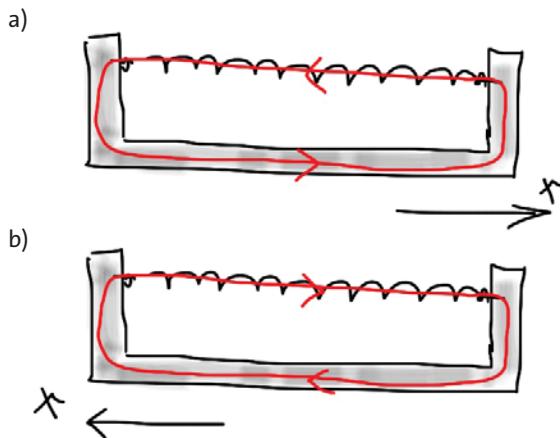


Fig. 3.8 (a) Dirección del momentum positivo hacia la derecha: la corriente de momentum fluye en sentido contrario a las agujas del reloj; (b) Dirección del momentum positivo hacia la izquierda: la corriente de momentum fluye en el sentido de las agujas del reloj.

Sin embargo, es sorprendente que un físico experimentado se siente molesto por ello. Este tipo de ruptura de la simetría es siempre el precio que pagamos por describir un problema matemáticamente. En cuanto definimos un sistema de coordenadas o un sistema de referencia, rompemos la simetría entre derecha e izquierda, abajo y arriba, etc. Cuando calculamos orbitales atómicos, en un problema de simetría esférica aparece de repente una dirección espacial distinguida, normalmente llamada dirección z . Todos los estudiantes tienen dificultades con esto, pero en algún momento han comprendido que la distinción se debe únicamente a la herramienta matemática.

También sabemos que las corrientes invierten su dirección cuando cambia el sistema de referencia en otros contextos. Consideremos, por ejemplo, el flujo de energía en una cadena de bicicleta. En el sistema de referencia de la bicicleta, la energía fluye en la parte tensada de la cadena desde el piñón delantero hasta el trasero. En un sistema de referencia en el que esta parte de la cadena está en reposo (es decir, moviéndose contra la tierra en el sentido de la marcha, más rápido que la propia bicicleta), el flujo de energía a través de la cadena resulta ser cero, y en un sistema de referencia que se mueve aún más rápido contra la tierra, el flujo de energía invierte su dirección: la energía fluye en la parte tensada de la cadena desde el piñón trasero hasta el delantero. (No es necesario decir que el mismo flujo de energía llega siempre a la parte trasera. La energía no solo fluye a través de la cadena, sino también a través del cuadro de la bicicleta).

Eliminación

Si en la escuela se introducen las corrientes eléctricas, no se orienta hacia el movimiento de los portadores de carga, sino que se utiliza el “modelo sustancia” desde el principio: imaginamos la carga eléctrica como una especie de fluido que fluye por los cables, y el sentido de la corriente que se desprende de la ecuación de balance se aplica a este fluido imaginado. Por supuesto, no es necesario formular la ecuación de continuidad en la escuela. Basta con decir que cuando la carga de un objeto disminuye, la corriente de carga fluye hacia el exterior del objeto.

Se procede de la misma manera con el momentum: solo que es necesario asegurarse de definir claramente al principio lo que se entiende por momentum positivo.

Referencias

- [1] M. Planck, *Bemerkungen zum Prinzip der Aktion und Reaktion in der allgemeinen Dynamik*, Phys. Z. 9, 1908, S. 828

3.12 Corrientes de momentum en conductores estacionarios

Tema

Se sabe que el momentum puede ser transmitido por medio de un cuerpo en movimiento o de un líquido o de un gas que fluye. Sin embargo, el hecho de que el momentum también fluya a través de medios estacionarios cuando estos están bajo tensión mecánica es menos conocido o directamente cuestionado [1].

Defectos

La Fig. 3.9 muestra un oscilador algo inusual. Dos cuerpos A y B, que pueden moverse horizontalmente, están acoplados entre sí mediante dos resortes y una varilla

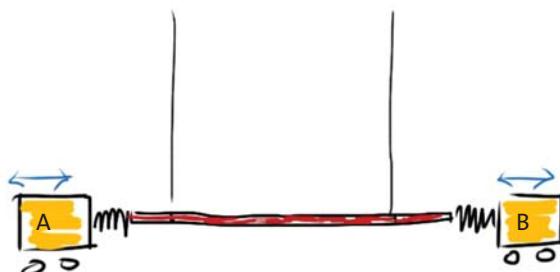


Fig. 3.9 A y B oscilan el uno contra el otro. La varilla permanece en reposo.

Corrientes de momentum en conductores estacionarios

entre ellos [2]. Se puede suponer (como se hace a menudo en mecánica) que la varilla es rígida y que los resortes y la varilla carecen de masa¹.

Los cuerpos se desplazan simétricamente hacia el exterior y luego se sueltan para que oscilen el uno contra el otro. Ahora, el momentum de A y el de B cambian periódicamente, de manera que la disminución del momentum de un cuerpo va acompañada del aumento del momentum del otro. Esto también puede expresarse de esta manera: el momentum fluye de ida y vuelta a través de la varilla situada entre los dos cuerpos.

Si no se acepta que una corriente de momentum fluye a través de la varilla, se renuncia a la posibilidad de esta simple descripción. En cambio, se dirá: A ejerce una fuerza sobre el resorte de la izquierda, y este ejerce una fuerza sobre A. Además, el resorte izquierdo también ejerce una fuerza sobre la varilla y esta a su vez ejerce una fuerza sobre el resorte. También habría que decir que la varilla ejerce una fuerza sobre el resorte derecho y este ejerce una fuerza sobre la varilla. Por último, el resorte de la derecha también ejerce una fuerza sobre el cuerpo B, que a su vez ejerce una fuerza sobre el resorte de la derecha. Todavía no se ha dicho cómo se relacionan las fuerzas entre sí.

Origen

Sospechamos que la razón para no aceptar las corrientes de momentum en varillas sin movimiento, cuerdas, resortes, etc. se encuentra en el hecho de que se toma como base un concepto algo ingenuo de la corriente. Según esto, solo se hablaría de corriente cuando una sustancia o un conjunto de partículas se mueven colectivamente. Entonces, por supuesto, la conclusión sería convincente de que no fluye ninguna corriente si no hay ninguna sustancia en movimiento o ninguna partícula en movimiento. Sin embargo, tal concepto de corriente no corresponde ni al de la física ni al del lenguaje cotidiano.

Así, en la vida cotidiana, también hablamos de flujos cuando no nos referimos al movimiento concreto de algo material, sino a algo que en un contexto físico se llamaría cantidad física extensiva: hablamos de flujos de dinero, por ejemplo, o de flujos de datos.

En física, el asunto es aún más sencillo, se habla de la corriente de una cantidad X si se puede formular para ella una ecuación de la siguiente forma:

$$\frac{\partial \rho_X}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{j}_X = \sigma_X \quad (3.8)$$

Esta ecuación puede interpretarse como una ecuación de balance. De ahí vienen los nombres de las distintas magnitudes de la ecuación: ρ_X se llama densidad de X , \vec{j}_X la densidad de corriente y σ_X la densidad de la tasa de producción (que es cero para las magnitudes de conservación).

Ahora bien, la ecuación no requiere que en un lugar en el que \vec{j}_X sea distinto de cero, ρ_X también deba ser distinto de cero; (ver, por ejemplo, el artículo de Gustav MIE [3]).

De hecho, esta posibilidad, es decir, que $\vec{j}_X \neq 0$ con $\rho_X = 0$, puede darse siempre que la cantidad que fluye pueda admitir dos signos. Se puede suponer entonces que hay dos contribuciones a la corriente, por lo que las densidades espaciales de las dos partes suman cero, mientras que las densidades de corriente no suman cero.

Un ejemplo es una corriente eléctrica en un conductor eléctrico normal. La carga eléctrica se compensa, la densidad de corriente no.

Esta posibilidad no existe para las magnitudes extensivas que solo pueden asumir valores positivos, como la energía, la masa, la entropía y la cantidad de sustancia.

La ecuación de continuidad, que es la única justificación del físico para hablar de una corriente, tampoco requiere que una corriente se base en el movimiento de algunas partículas.

Los que creen entender mejor un transporte cuando se realiza por medio de partículas en movimiento, pueden considerar primero el transporte de momentum a través de gases en reposo, Fig. 3.10. Los dos pistones (A y B) son acelerados hacia fuera por el gas que encierran:

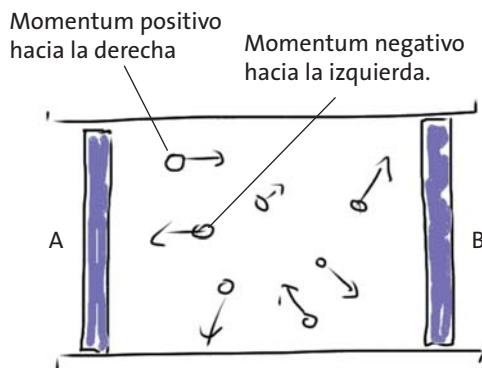


Fig. 3.10 El momentum va del pistón A al pistón B. La mitad de las moléculas transporta el momentum positivo hacia la derecha, la otra el negativo hacia la izquierda.

¹ Esta idea es aceptable para nuestros fines. De hecho, el resultado sería que el momentum viajaría a través de la varilla no a la velocidad del sonido, sino a una velocidad infinita.

Dirección de la corriente de momentum y cambio del sistema de referencia

pistón A hacia la izquierda y pistón B hacia la derecha. Obviamente, el momentum pasa de A a B, (si elegimos la dirección positiva del momentum hacia la derecha). El mecanismo microscópico aquí es tan simple que apenas hay dudas en interpretar el proceso como un flujo de momentum.

Las moléculas cuya velocidad tiene un componente x positivo llevan un momentum positivo y lo transportan hacia la derecha. Las moléculas con velocidad x negativa tienen momentum negativo y lo transportan hacia la izquierda, lo que también corresponde a una corriente de momentum (una corriente de momentum positivo) hacia la derecha. Así se puede ver: las contribuciones a la densidad de momentum se anulan entre sí, las contribuciones a la densidad de corriente se “amplifican” entre sí.

Un problema que parecen tener BARTELmann *et al.* es que la corriente de momentum cambia su dirección de flujo si la dirección del momentum positivo se define al revés. Sin embargo, nuestro ejemplo muestra que no hay nada misterioso en esto. Si no se acepta esto, la única opción es prescindir por completo de la descripción matemática del proceso.

Se pueden hacer consideraciones similares si el momentum atraviesa un cuerpo sólido o también el campo electromagnético. La cuestión es entonces algo más complicada². Sin embargo, no aporta una nueva visión en relación con el problema de BARTELmann *et al.* Las cosas son tan simples como cuando el momentum fluye a través de un gas, y eso significa que es comprensible incluso para los estudiantes de secundaria.

Eliminación

Las magnitudes físicas son variables en el sentido de la matemática, y en principio no pueden fluir ni no fluir (al igual que una masa no puede colgar de un resorte). Sin embargo, si hablamos de flujo de carga eléctrica, de masa o de momentum, significa que estamos utilizando un modelo. Si somos conscientes de este hecho, la cuestión de si existe una corriente de momentum en la naturaleza ni siquiera se plantea. Se la introduce o no se la introduce; se utiliza el modelo o no se utiliza. Sin embargo, una decisión en contra del modelo plantearía la cuestión del porqué se utiliza el modelo con la energía, la masa y la carga eléctrica y no con el momentum.

En resumen: con el enfoque adecuado del concepto de corriente, una corriente de momentum está tan justificada como una corriente eléctrica o una corriente de masa.

Referencias

[1] M. Bartelmann, F. Bühlert, S. Großmann, W. Herzog, J. Hüfner, R. Lehn, R. Löhken, K. Meier, D. Meschede, P. Reineker, M. Tolan, J. Wambach y W. Weber Informe de la Sociedad Alemana de Física sobre el Curso de Física de Karlsruhe:

<http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/download/dpg-gegen-kpk.pdf>

[2] Agradezco a Werner MAURER la idea de este experimento, véase también

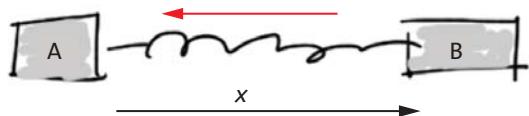
<http://www.youtube.com/watch?v=aBLPEOM7xbM>

[3] Gustav Mie: Entwurf einer allgemeinen Theorie der Energieübertragung, Sitzungsberichte der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Classe der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, CVII. Band, Abtheilung II.a, 1898, S. 1113–1181

3.13 Dirección de la corriente de momentum y cambio del sistema de referencia

Tema

a)



b)

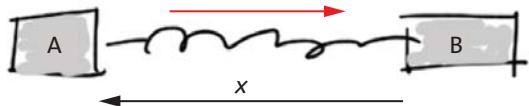


Fig. 3.11 El resorte está tensado; la flecha roja indica la dirección actual de momentum x . (a) El momentum de A aumenta, el de B disminuye. (b) El momentum de B aumenta, el de A disminuye.

Dos cuerpos A y B están conectados por medio de un resorte estirado, Fig. 3.11.

En la Fig. 3.11a, el eje x está orientado hacia la derecha. Por consiguiente, el momentum de A aumenta y el de B disminuye. Por lo tanto, el momentum debe fluir en la dirección x negativa, es decir, hacia la izquierda, como muestra la flecha roja. Si el eje x está orientado

² Como ejercicio para tratar las corrientes de momentum, recomendamos hacer las consideraciones correspondientes para una cadena lineal excitada térmicamente, que se encuentra una vez bajo tensión de tracción y otra de compresión.

Dirección de la corriente de momentum y cambio del sistema de referencia

hacia la izquierda, el momentum de A disminuye y el de B aumenta, lo cual significa que el momentum fluye de izquierda a derecha. Esto no puede ser, porque entonces se habría cambiado la dirección del flujo de momentum “arbitrariamente, es decir, independientemente de lo que ocurre en el sistema, simplemente por una nueva elección del sistema de coordenadas”. [1]

Defectos

El argumento anterior contiene un error. Antes de entrar en él, una observación general.

Una magnitud física describe una propiedad de un sistema. El valor de la magnitud depende de varias circunstancias. En primer lugar, depende del estado del sistema, ya que este debe ser descrito por la magnitud. También depende de la unidad de medida, que es trivial, y finalmente puede depender de la elección del sistema de referencia. El hecho de que los valores de las magnitudes físicas cambien cuando se cambia el sistema de referencia es un hecho conocido por todos los físicos.

En el caso concreto que nos concierne, la aparente contradicción, o más bien la incomodidad, puede eliminarse de dos maneras.

- 1 La dirección de la corriente es la dirección del vector densidad de corriente. Un vector representa una descripción independiente de las coordenadas. Por ejemplo, la velocidad es un vector. Si se representa este vector como una flecha, la dirección de la flecha es independiente de la elección del sistema de coordenadas; no se necesita un sistema de coordenadas para dibujar la flecha correctamente. Su dirección está determinada inequívocamente por la disposición de los elementos del sistema. Los componentes cartesianos, en cambio, no. Dos coches circulan a la misma velocidad por una carretera, concretamente a 60 km/h, pero en direcciones opuestas, uno hacia la derecha y otro hacia la izquierda. Para describir la situación físicamente, se asigna un vector a cada coche. La descripción es simétrica derecha-izquierda. Si se utilizan coordenadas cartesianas para la descripción, es necesario asignar una velocidad positiva de +60 km/h a un coche y una velocidad negativa de -60 km/h al otro. La simetría se rompe, pero ningún físico se sorprenderá por ello.

¿No debería ser lo mismo para la densidad de corriente del momentum? ¿No es la densidad de corriente de momentum un vector, de modo que su dirección debería ser independiente de la elección del sistema de coordenadas? No, la densidad de corriente del momentum no es un vector, es un tensor. Cuando hablamos de la dirección de la corriente de momentum, nos referimos a la corriente de una

componente del vector momentum. Esto ya no es independiente del sistema de coordenadas. Depende del sistema de coordenadas por la misma razón que la componente de la velocidad en el ejemplo anterior.

- 2 En lo que respecta a la escuela, no es necesario conocer el concepto de tensor. Se tratan las tres componentes del momentum independientemente unas de otras, como si fueran tres escalares. Para cada uno es válida una ley de conservación, independientemente de los otros dos componentes. Consideremos, por ejemplo, el componente x del momentum. Todavía se tiene la libertad de contar el momentum x positivamente en una dirección o en la dirección opuesta. Un cuerpo cuyo momentum es de 5 unidades en la primera opción tiene entonces -5 unidades en la otra. Así que la descripción del sistema no refleja la simetría que el sistema tiene por sí mismo. Es un sacrificio que siempre hay que hacer cuando se describe un sistema en coordenadas cartesianas (o en coordenadas cilíndricas o esféricas). La elección de un sistema de coordenadas destruye la simetría.

A propósito, también se puede formular el teorema de que el momentum en un resorte tensado fluye en una determinada dirección de forma invariante:

En el caso de una tensión de tracción, el momentum (positivo) fluye en la dirección negativa.

La afirmación sigue siendo correcta, aunque se invierta la dirección x . Sin embargo, no recomendamos esta formulación para la escuela. Los alumnos no tienen las mismas dificultades que los físicos experimentados.

Origen

Algunos físicos parecen sentirse incómodos por el hecho de que la descripción matemática de una situación simétrica sea asimétrica. El hecho de que se ofendan por ello puede deberse a que todavía no se han encontrado con esta situación concreta. Si uno mira a su alrededor, encuentra rápidamente muchos otros fenómenos en los que se presenta un problema análogo, pero en los que ya no se ve ninguna dificultad porque uno conoce y ve bien la situación, y hace tiempo que se ha acostumbrado a la asimetría.

He aquí algunos ejemplos:

En el tratamiento cuántico del átomo de hidrógeno, la dirección z juega supuestamente un papel especial. Al principio todos los estudiantes tienen dificultades con esto. Y algunos no han entendido al final de sus estudios que esta dirección z no es más que un artefacto de la descripción matemática.

La mayoría de los alumnos o estudiantes no se dan cuenta en qué consisten los dos experimentos de induc-

El impulso

ción: en uno la tensión de inducción se produce porque \vec{B} no es igual a cero, en el otro porque se produce una fuerza de LORENTZ —Hendrik Antoon LORENTZ (1853–1928)—. En una situación el campo eléctrico es un campo giratorio, en la otra no lo es. De hecho, en ambas situaciones se trata del mismo efecto, pero descrito en sistemas de referencia diferentes. También en este caso puede sorprender que se den dos explicaciones completamente diferentes “independientes de lo que ocurre en el sistema”.

Del mismo modo, puede ser “molesto” que el flujo de energía en una cadena de bicicleta, dependiendo del sistema de referencia, fluya una vez de la parte delantera a la parte trasera y otra de la parte trasera a la rueda de la cadena delantera, es decir, el vector de densidad de corriente de energía apunta una vez a la derecha y otra a la izquierda. También en este caso, un vector de densidad de corriente invierte su dirección “independientemente de lo que ocurra en el sistema”. Por tanto, ¿“no describe ninguna propiedad del sistema”?

O consideremos el campo magnético de un cable recto por el que circula una corriente eléctrica. La causa es el movimiento de los electrones, solemos decir. Pero en el marco de referencia en el que la velocidad de deriva de los electrones sea cero, uno se ve obligado a decir que el campo magnético ya no es causado por los electrones, sino por los cascós atómicos. (Por cierto, el cambio de marco de referencia es mínimo: la velocidad de deriva es solo de fracciones de milímetro por segundo). La causa del campo magnético en un caso es el movimiento de los electrones y en otro el de los troncos atómicos, “independientemente de lo que ocurra en el sistema”.

O el campo magnético de un haz de electrones: en el marco de referencia de los electrones, la intensidad del campo magnético es cero. Por lo tanto: a veces un campo magnético, a veces ninguno, “independientemente de lo que ocurra en el sistema”.

Todas estas situaciones son más o menos familiares para un físico, a las cuales ha tenido que acostumbrarse. La corriente de momentum en el resorte es una más de ellas.

Eliminación

- 1 En cuanto a la escuela: hacerlo como en el Curso de Física de Karlsruhe (CFK). Fijar de una vez por todas la dirección x positiva, hacia la derecha vista desde los alumnos. En nuestra experiencia, ningún alumno tuvo dificultades con el hecho de que la corriente de momentum en un resorte tensado fluye entonces hacia la izquierda.
- 2 En una fase muy posterior, el problema se discute en un contexto más amplio. Así, en el CFK, entre otras

cosas, se formula el teorema: “El mundo no cambia por un cambio de sistema de referencia. Solo cambia nuestra descripción del mundo”.

Eliminación

[1] M. Bartelmann, F. Bühler, S. Großmann, W. Herzog, J. Hüfner, R. Lehn, R. Löhken, K. Meier, D. Meschede, P. Reineker, M. Tolan, J. Wambach y W. Weber. *Informe de la Sociedad Alemana de Física sobre el Curso de Física de Karlsruhe*, https://www.dpg-physik.de/veroeffentlichungen/publikationen/stellungnahmen-der-dpg/bildung-wissenschaftlicher-nachwuchs/kpk/stellungnahme_kpk.pdf

“... la dirección del eje x puede definirse arbitrariamente en el espacio y también cambiarse, independientemente de los acontecimientos físicos dentro del sistema. Por lo tanto, la dirección de la corriente de momentum del CFK también puede cambiarse arbitrariamente, es decir, independientemente de los acontecimientos del sistema, simplemente mediante una nueva elección del sistema de coordenadas. Concluimos que la dirección de la corriente de momentum del CFK no es una propiedad del sistema.”

3.14 El impulso

Tema

Frecuentemente, junto con la cantidad de movimiento (momentum), se introduce el impulso: “En mecánica, se llama impulso a la magnitud física, denotada usualmente como I (sic), definida como la variación en la cantidad de movimiento que experimenta un objeto en un sistema cerrado. [...] A lo que llamamos impulso es ese valor de la integral de la fuerza en el tiempo:

$$I = \int \vec{F} dt. [1].$$

Defectos

Se parte de una sencilla ecuación: $\vec{F} = d\vec{p}/dt$, en la cual cada una de las tres magnitudes que la compone tiene un significado físico inequívoco. Dicha relación se “transforma” en $d\vec{p} = \vec{F} dt$, dando un nuevo nombre al lado derecho de la misma.

Ese tratamiento, que implica cerca de una página en un libro escolar y una hora de clase, sugiere que es necesario comprender algo que va más allá de la segunda ley de NEWTON; sugiere además que se está introduciendo una nueva magnitud física. Sin embargo, el impulso no

es una magnitud física, por lo menos no lo es en sentido estricto. Normalmente una magnitud física tiene un valor definido para un estado concreto del sistema [2], pero esto no ocurre en el caso del impulso.

El hecho de que el concepto impulso no sea indispensable se puede constatar al aplicar el mismo procedimiento a otras “magnitudes” similares, lo cual afortunadamente no se hace. Considerando que la fuerza es la corriente de momentum y el impulso la integral de dicha corriente en el tiempo, se observa que es posible obtener una integral parecida para cualquier otra corriente, por ejemplo una corriente eléctrica, de masa o de energía. Así, se podría llamar *impulso de potencia*, o algo similar, a la expresión

$$\int P dt.$$

No significa esto que no tenga sentido calcular tales integrales, simplemente que no es conveniente atribuir nombres propios a ellas. Al no hacerlo el estudio sobre el impulso pierde sentido e importancia. El hecho de que la integral en el tiempo de la fuerza que actúa sobre un cuerpo, es decir, de la corriente de momentum que entra en él, permita obtener la variación de la cantidad de movimiento es obvio para todo aquel que conozca el carácter extensivo del momentum, basta pues con enseñarlo y explicarlo. Por tanto el esfuerzo debería orientarse a la adecuada conceptualización de la cantidad de movimiento y de la fuerza como corriente de momentum.

Es claro que al multiplicar la intensidad de corriente de agua que llega a una tina por el tiempo, se obtiene la cantidad de agua acumulada en ella durante ese intervalo de tiempo, sin embargo para comprenderlo no es necesario definir un “impulso de agua”. Dar un nombre a la integral de la fuerza en el tiempo induce a creer que se está en presencia de una nueva magnitud física, y es tan engañoso como el nombre de trabajo y calor para las formas diferenciales $F ds$ y $T dS$, respectivamente. Estas expresiones tampoco representan magnitudes físicas en sentido estricto.

Origen

El concepto impulso fue introducido para describir procesos de transferencia de momentum; se quería poner de manifiesto que el comportamiento temporal de la corriente de momentum no importa. Este comprensible deseo se puede tener en cuenta sin necesidad de inventar un nombre nuevo, basta decir que ha sido transferida una cierta cantidad de momentum.

A menudo se considera la magnitud fuerza más fundamental que el momentum, siendo este último solo

una abreviación para el producto de masa y velocidad. En esas condiciones puede parecer más natural caracterizar el proceso por medio de una afirmación sobre la fuerza que sobre el momentum.

Eliminación

Si se toma en serio el momentum como magnitud física, no es necesario el concepto de impulso. La mecánica no pierde nada al omitirlo, y sí gana en claridad.

Referencias

- [1] Impulso. [en línea]. En: <http://es.wikipedia.org/wiki/Impulso> [consultado el 30 de junio de 2022].
- [2] G. Falk, *Theoretische Physik, II Thermodynamik*, Heidelberger Taschenbücher, Springer-Verlag, Berlin, 1968, p.4

3.15 La definición de la fuerza

Tema

- 1 “Se define [la fuerza] como la tasa de cambio del momentum, de modo que su magnitud es:

$$\vec{F} = d\vec{p}/dt.$$

- 2 “La ecuación $\vec{F} = \vec{a}$ es una definición de la fuerza que hace medible el efecto externo sobre un cuerpo con la ayuda de la aceleración del mismo.”
- 3 “El concepto de fuerza se remonta a Isaac NEWTON, que en el siglo 18 creó los fundamentos de la mecánica mediante las tres leyes de NEWTON y definió la fuerza como un cambio temporal del momentum.”

Defectos

Es necesario volver a molestar (o deleitar) a los lectores con las leyes de NEWTON —Isaac NEWTON (1643–1727)—.

- Si la fuerza se definiera como la tasa de cambio del momentum, la segunda ley de NEWTON no sería una ley sino una definición. Pero es una ley porque hace una afirmación que puede ser verificada por el experimento: se mide la tasa de cambio del momentum del cuerpo considerado e, independientemente de esto, la fuerza total que actúa sobre el cuerpo.
- Si la fuerza fuera definida por la ecuación $\vec{F} = d\vec{p}/dt$, las fuerzas en cualquier sistema estático serían cero. Los ingenieros tendrían un problema con esto.
- Si se piensa que la fuerza se define como $d\vec{p}/dt$, esto debería reflejarse en el lenguaje. Entonces sería legí-

Una idea intuitiva de fuerza

timo decir, por ejemplo, que el cuerpo A ejerce un cambio de momentum sobre el cuerpo B.

¿No se acerca la física a teorías como el llamado, por algunos, socialismo científico o el psicoanálisis por el rigor que presentan en los libros de texto pero cuyos resultados no son demostrables. Seguramente la Física no merece eso. ¿Es de extrañar que la física sea la asignatura escolar más impopular?

Origen

Se podría imaginar la realización de un nuevo libro de texto así: a la hora de escribir, el autor se orienta por las obras anteriores existentes; se da cuenta de algunas incoherencias, torpezas e incluso errores, y en consecuencia los corrige. En el proceso, los libros de física son cada vez mejores. Sí, así es como podría imaginarse, pero lamentablemente no ocurre así. Los libros a veces mejoran, pero también empeoran de vez en cuando. Una cosa que en realidad ha sido clara durante mucho tiempo vuelve a ser desfigurada o distorsionada. Esto puede verse con especial claridad en el caso de la mecánica.

Algunos autores creen que pueden hacerlo mejor que NEWTON, pero se equivocan. El lenguaje de NEWTON es un poco difícil de leer para nosotros hoy día, pero nadie ha superado su lógica (ni siquiera el gran MACH —Ernst Waldfried Josef Wenzel MACH (1838–1916)— o LANGE —Gustav Ludwig LANGE (1863–1936)—, el inventor del sistema inercial).

Recordemos la definición de la fuerza por NEWTON: “*Def. IV. Vis impressa est actio in corpus exercita, ad mutandum ejus statum vel quiescendi vel movendi uniformiter in directum.*” O en la traducción al español (de Antonio Escohotado 1987): “La fuerza impresa es una acción ejercida sobre un cuerpo para cambiar su estado, bien sea de reposo o de movimiento uniforme en línea recta.” No dice que la fuerza se define por el cambio del estado de movimiento de un cuerpo.

Eliminación

Podemos medir una fuerza \vec{F}_1 que actúa sobre un cuerpo a través de $d\vec{p}/dt$ si nos aseguramos de que ninguna otra fuerza \vec{F}_2 actúe sobre el cuerpo. Esto a veces es fácil, y a veces no tanto. Pero ello no significa que se pueda definir la fuerza por medio de $d\vec{p}/dt$.

En este tipo de experimentos se observa que siempre se aplica lo siguiente

$$d\vec{p}/dt = \vec{F},$$

donde \vec{F} es la suma de todas las fuerzas que actúan sobre el cuerpo. Se establece así que el momentum es una

magnitud conservada. También habría sido imaginable que se encontrara

$$d\vec{p}/dt > \vec{F}$$

o bien,

$$d\vec{p}/dt < \vec{F}.$$

Entonces se habría llegado a la conclusión, en el primer caso, que se puede crear momentum y, en el segundo, que se puede destruir.

El error en nuestras citas no se habría cometido si la magnitud \vec{F} se hubiera interpretado desde el principio como intensidad de corriente de momentum. Entonces nuestra intuición nos dice cuál es la relación entre \vec{F} y $d\vec{p}/dt$: como p es una magnitud conservada, el cambio en la cantidad del momentum es igual a la intensidad total de la corriente de momentum que fluye hacia el cuerpo.

La cantidad del momentum no cambia si una corriente atraviesa el cuerpo; en dicho caso, la entrada es igual a la salida. O en lenguaje newtoniano: dos fuerzas opuestas actúan sobre el cuerpo; hay equilibrio de fuerzas.

3.16 Una idea intuitiva de fuerza

Tema

En diversos libros universitarios y escolares se pueden encontrar citas como las siguientes:

- 1 “Así como los conceptos de longitud y de tiempo, también el concepto de fuerza tiene una interpretación directa e intuitiva, que no requiere más explicación. La fuerza física se ejerce por los músculos, y se la experimenta como sensación muscular por quien la ejerce.” [1]
- 2 “Opinamos que por nuestra sensación muscular tenemos una idea directa y cualitativa del concepto de fuerza.” [2]
- 3 “El concepto de fuerza está basado en nuestra sensación muscular.” [3]
- 4 “La palabra ‘fuerza’ nos hace pensar en primer lugar en una capacidad de nuestros músculos.” [4]

Defectos

El accionar de un músculo esquelético se percibe generalmente como esfuerzo, “sensación” que no involucra necesariamente a los órganos de los sentidos, sino más bien responde a un acto de voluntad. Pero, ¿para cuál

Fuerza central y fuerza centrípeta

magnitud física dicha percepción es una medida? Por una parte, mientras el músculo está contraído actúa una fuerza (fluye una corriente de momentum), y por otra el músculo consume (disipa y entrega) energía. En términos fisiológicos se transforma ATP en ADP, independientemente de si el músculo mueve algo (entrega energía mecánica) o no, es decir, si solamente produce calor. Entonces, la sensación muscular apunta tanto a una corriente de momentum (fuerza) como a una de energía (potencia), y debido a que a menudo se confunden estos dos conceptos (fuerza y potencia) no es recomendable apelar a la sensación muscular para generar una idea intuitiva de fuerza.

Origen

Possiblemente la idea intuitiva de fuerza se ha orientado hacia la sensación muscular porque se cree que los músculos son causa de la fuerza.

Pero, ¿quién o qué es la causa de la fuerza en la cuerda de la Fig. 3.12a? La intuición apuntaría al resorte. ¿Y en la Fig. 3.12b?

Al hombrecillo con sus músculos. Parece normal decir: "El resorte tira", o "el hombrecillo tira". No se dice: "La cuerda tira", o "la pared tira". También se dice que el hombrecillo ejerce una fuerza y la pared la experimenta, hablando así se afirma que existe una relación de causalidad. El hombrecillo o el resorte son la causa y la pared experimenta el efecto. Sin embargo, algo aquí no está bien. ¿Cuál resorte sería responsable de la fuerza en el

caso de la Fig. 3.12c, el de la derecha o la izquierda? Y ¿cuál hombrecillo sería la causa de la fuerza en la Fig. 3.12d?

Finalmente, es posible considerar la misma cuerda como un resorte en sí, resorte con una constante elástica muy grande. Se ve, que el argumento de causa-efecto no funciona. Pero, ¿será cierto que nuestra intuición nos ha engañado tanto? ¿No será que el resorte y el hombrecillo tienen algo de particular? En efecto, lo tienen. Ambos representan una fuente de energía mecánica, sin importar si en la situación considerada entregan energía o no. El hecho de que eventualmente podrían entregar energía los hace aparecer como "causantes", pero causantes de algo de lo cual en realidad no son responsables.

Eliminación

La sensación muscular no es la manera más adecuada para formarse una idea intuitiva de fuerza. Se puede muy bien sentir y apreciar cualitativamente una fuerza que actúa sobre nuestro cuerpo, porque la naturaleza nos ha equipado con los órganos sensoriales apropiados. En nuestra piel existen sensores para tensiones mecánicas de presión, tensión y cizallamiento, que para apreciar fuerzas (corrientes de momentum) son tan fiables como nuestros sensores de temperatura, luz o sonido. Gracias a ellos podemos "sentir" fuerzas, así estén relacionadas con la acción de los músculos o no. Se puede fácilmente tener una idea del NEWTON, la unidad de fuerza, con la leve presión de un dedo sobre la piel, o una masa de 100 g que se coloque sobre el brazo.

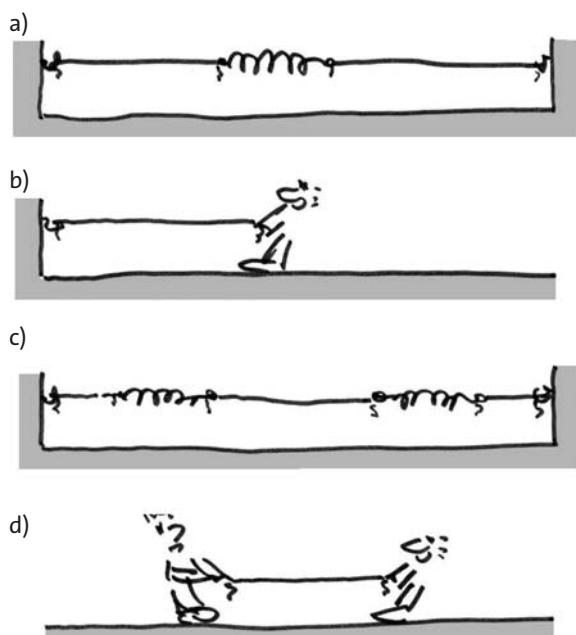


Fig. 3.12 Relación "causa-efecto".

Referencias

- [1] W. Macke, *Mechanik der Teilchen, Systeme und Kontinua*, Akad. Verlagsgesellschaft, Leipzig 1962, p.6
- [2] A. Sommerfeld, *Vorlesungen über Theoretische Physik, Mechanik*, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1944, S. 5
- [3] J. Grehn (Hrsg.), *Metzler Physik*, 2. Aufl., Stuttgart: Metzlersche Verlagsbuchhandlung, 1988. p.30.
- [4] W. Kuhn, *Physik*, Band 1. Braunschweig: Westermann Verlag, 1990, p.96.

3.17 Fuerza central y fuerza centrípeta

Tema

¿Qué se entiende por fuerza centrípeta? He aquí algunas respuestas:

- 1 "Fuerza centrípeta es aquella por la cual los cuerpos son arrastrados o impelidos, o tienden de cualquier

Fuerza central y fuerza centrípeta

modo hacia un punto como hacia un centro.” (NEWTON)

- 2 “Como ahora debemos deducir de la ocurrencia de toda aceleración que una fuerza está actuando, reconocemos que para mantener un movimiento curvilíneo se requiere una fuerza dirigida hacia el centro de curvatura, que medimos por... Esta fuerza se llama fuerza central, también conocida como fuerza centrípeta, y su magnitud C es:...” (HELMHOLTZ)
- 3 “Para que o cuando un cuerpo con masa m realice un movimiento circular uniforme, debe actuar sobre él una fuerza que tiene la magnitud

$$F = m \frac{v^2}{r} = m \omega^2 r$$

y que apunta siempre hacia un punto fijo, el centro (fuerza centrípeta).”

- 4 “... Esta fuerza se llama fuerza centrípeta. Nótese que la fuerza centrípeta no es un nuevo tipo de fuerza. No es más que un nombre para la fuerza que produce la aceleración centrípeta, permitiendo así el movimiento circular.” (TIPLER)
- 5 “La fuerza centrípeta dirigida hacia el centro de rotación, que mantiene un cuerpo de masa m con velocidad v en un círculo de radio orbital r, es:

$$F = m \omega^2 r.$$

- 6 “Para esta fuerza dirigida hacia el centro, también son comunes los términos fuerza central o fuerza centrípeta.”

Defectos

Existen demasiados nombres para las fuerzas, la mayoría de ellos son superfluos; además, a menudo son ambiguos.

- 1 En la mayoría de los casos, los términos fuerza centrípeta y fuerza central se utilizan de la siguiente manera:

Una fuerza central es una fuerza que, vista desde el cuerpo sobre el que actúa (cuerpo A), se dirige hacia otro cuerpo B. El cambio del momentum de A es opuesto al de B. En general, no es perpendicular a la dirección del movimiento de A.

Se llama fuerza centrípeta a una fuerza o componente de fuerza que es perpendicular a la dirección del movimiento. A medida que el cuerpo considerado recorre su trayectoria, el vector de fuerza no apunta necesariamente a un punto fijo. Por lo general, no es posible especificar un cuerpo que lo ejerza y cambie su momentum en consecuencia.

En el caso de un movimiento circular, la fuerza centrípeta puede ser una fuerza central. Por lo tanto,

a menudo ambos términos se identifican, ver las citas 2 y 6.

En el caso de un anillo que gira, se hablará de una fuerza centrípeta, pero no de una fuerza central.

- 2 Se puede hacer como en Gerthsen y algunos otros libros, en los cuales el término fuerza centrípeta solo se utiliza para los movimientos circulares uniformes. Pero entonces es difícil ver por qué la componente transversal de la fuerza no debería llamarse siempre fuerza centrípeta. Si un coche recorre una ruta curva, es decir, que no sigue una trayectoria circular, se habla sin duda de las fuerzas centrífugas (que se producen en el marco de referencia del coche). ¿Por qué la fuerza opuesta no debería mantener acá su nombre?
- 3 Tipler subraya que la fuerza centrípeta no es un “nuevo tipo de fuerza”. Pero ¿cómo se decide si dos fuerzas son de distinto tipo? Si se tiene en cuenta que la palabra fuerza representa la intensidad de la corriente de momentum, se podrá expresar con mayor claridad. Si los conductores de las corrientes de momentum son de distinta naturaleza, por ejemplo, un resorte elástico o un campo eléctrico o gravitacional, entonces se presentan dos tipos de fuerza...
- 4 Es inapropiado decir que

$$F = m \omega^2 r \quad (3.9)$$

es la fuerza centrípeta. Es mejor decir que la fórmula

$$\frac{dp}{dt} = m \omega^2 r \quad (3.10)$$

permite calcular el cambio de momentum del cuerpo considerado, porque las tres magnitudes del lado derecho de la ecuación (3.9) son magnitudes que describen el cuerpo y su estado. Solo la segunda ley de NEWTON dice que este cambio de momentum es causado por una fuerza (es decir, una afluencia de momentum).

- 5 En nuestro contexto, siempre se trata de un cambio de momentum y del correspondiente transporte de este, lo cual puede ocurrir tanto por convección como por conducción. La ecuación (3.10) no hace ninguna precisión al respecto, solo indica el cambio de momentum, pero nada dice sobre su corriente. Según ella, el transporte convectivo del momentum sería también una fuerza centrípeta si, por ejemplo, el cuerpo se mantiene en su trayectoria con la ayuda de un chorro de agua procedente del exterior.

Origen

El mismo NEWTON introdujo el término fuerza centrípeta y se puede comprender su forma de proceder. Él se

La fuerza centrífuga

ocupaba principalmente de la órbita de la Luna y los planetas, y probablemente le convenía introducir un término propio. También hay que tener en cuenta la forma tan embarazosa en que reparte lo que ahora llamamos mecánica clásica a lo largo de 500 páginas.

Eliminación

El término fuerza central es útil en la medida en que permite distinguir entre fuerzas eléctricas y magnéticas.

En cambio, el término fuerza centrípeta no aclara ni aporta nada. Para distinguir entre la componente longitudinal y la transversal de una fuerza, no es necesaria dicha denominación.

Sin embargo, puede tener una ventaja para algunas personas, cuando se habla con alguien que no tiene formación en física, es mucho más impresionante decir que la Tierra ejerce una fuerza centrípeta sobre la Luna en lugar de decir simplemente que la Tierra tira a la Luna.

magnitud de esta fuerza para los puntos individuales en el espacio. Descubre que se encuentra en un campo de fuerza,..."

Defectos

- 1 A toda fuerza le corresponde una tensión mecánica, ya sea en un medio material o en un campo. La tensión mecánica es una magnitud local, forma una distribución en el espacio. Sin embargo, no se puede especificar ninguna tensión mecánica para la fuerza centrífuga. Ahora, la fuerza centrífuga solo es una fuerza aparente, como se dice, por ello se podría pensar que basta con introducir tensiones aparentes. Si bien todavía es posible especificar un valor para la fuerza centrífuga y cualquier otra fuerza aparente, esto ya no es posible para una tensión mecánica aparente.
- 2 Si se dice de un cuerpo que se mueve en una trayectoria circular alrededor de un centro, que su momentum es cero y que hay un equilibrio de fuerzas, a saber, la fuerza centrípeta es igual a la fuerza centrífuga, entonces se debería llamar a dicho momentum, que aquí tiene el valor cero, momentum aparente. Al parecer, a nadie se le ha ocurrido esta idea. Probablemente sería demasiado obvio que aquí se está soslayando algo.
- 3 Lo que se hace aquí puede ilustrarse con la ayuda de una analogía.

Utilizando el hecho de que cualquier fuerza puede interpretarse como una corriente de momentum, la segunda ley de NEWTON se puede expresar así:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}.$$

Ella indica que el momentum de un cuerpo cambia como resultado de una corriente de momentum que fluye dentro o fuera de él.

Esta afirmación es muy parecida al enunciado de la siguiente ecuación:

$$\frac{dQ}{dt} = I.$$

La cual muestra que la carga eléctrica en una región del espacio solo cambia cuando una corriente eléctrica entra o sale de ella. Si ahora se procede de la misma manera que con la introducción de las fuerzas aparentes, se podría afirmar que la carga eléctrica no cambia, es decir, que $dQ/dt = 0$. Se constata el hecho de que la ecuación ya no es correcta introduciendo una corriente eléctrica ficticia, y se espera que nadie se moleste por el hecho de que es imposible decir de dónde viene esta corriente, cómo es su distribución

3.18 La fuerza centrífuga

Tema

¿Qué se entiende por fuerza centrífuga? Veamos inicialmente a Wikipedia: "En la mecánica clásica o mecánica newtoniana, la fuerza centrífuga es una fuerza ficticia que aparece cuando se describe el movimiento de un cuerpo en un sistema de referencia en rotación, o equivalentemente la fuerza aparente que percibe un observador no inercial que se encuentra en un sistema de referencia rotatorio."

O en Tipler: "Si queremos aplicar la segunda ley de NEWTON $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ en un sistema de referencia acelerado, tenemos que introducir fuerzas ficticias o fuerzas aparentes que dependen de la aceleración del sistema de referencia. Estas fuerzas ficticias no se transmiten realmente. Simplemente sirven para asegurar que la relación $F = m \cdot \vec{a}$ también se aplica a las aceleraciones \vec{a} medidas en sistemas no inerciales... En cambio, para un observador en el disco, el cuerpo está en reposo y no está acelerado. En lugar de $F = m \cdot \vec{a}$, este observador debe introducir una fuerza ficticia de magnitud $m \cdot v^2/r$, que actúa sobre el cuerpo radialmente hacia fuera y compensa la fuerza de tracción de la cuerda. Esta fuerza ficticia hacia el exterior, la llamada fuerza centrífuga, parece bastante real para el observador en el disco."

O en un libro más antiguo, el de Grimsehl: "Esta fuerza se llama fuerza centrífuga. Al estirar un resorte espiral o un hilo de goma, el observador puede medir la

Aceleración de la gravedad

de densidad de corriente y por qué no tiene campo magnético.

- 4 Que la fuerza centrífuga define un campo de fuerza (ver tercera cita), se dice más bien poco. No se sabe si el autor intentó alguna vez trazar líneas de campo para un campo de fuerza centrífuga. Tendría fuentes o sumideros por todas partes en el espacio vacío.
- 5 Es instructivo observar la derivación de la fuerza centrífuga o de CORIOLIS: se calcula la aceleración en el sistema de referencia giratorio, esta derivación es puramente cinemático-geométrica. Se obtiene lo que se llama la aceleración centrífuga (o la aceleración de CORIOLIS); dicha derivación es completamente correcta. Se puede describir la cinemática de un movimiento en cualquier sistema de referencia y obtener resultados para la velocidad y la aceleración que suelen ser muy complicados. Y se puede dar nombre a las aceleraciones, como es habitual en el caso del sistema de referencia giratorio. No hay nada anómalo en ello, salvo que no se obtiene ningún beneficio si se elige el sistema de referencia de forma inadecuada. Ahora bien, puede haber razones perfectamente válidas para elegir un sistema de referencia giratorio, por ejemplo, en meteorología, donde se estudia el movimiento del aire y del agua, siempre relativo a la tierra en rotación. Las cosas se complican cuando se afirma que el movimiento es causado por fuerzas, solo entonces se producen las discrepancias mencionadas anteriormente.

Origen

Ya antes de NEWTON se encuentra la fuerza centrífuga, por ejemplo, en DESCARTES y HUYGENS. NEWTON también se refiere a ella una y otra vez en sus *Principia*.

¿Cómo fue posible que surgiera un concepto tan extraño? ¿Estaban DESCARTES, HUYGENS, NEWTON, D'ALEMBERT y CORIOLIS científicamente equivocados? En absoluto. Pero el edificio de pensamiento que levantaron solo podía parecer sostenible en su momentum, dado que se vieron obligados a operar con acciones a distancia. Con MAXWELL, la época de las acciones a distancia debería haber llegado a su fin. Pero en la llamada mecánica clásica, tal y como se enseña hoy en día en la escuela y en la universidad, no se ha dado aún dicho paso, las acciones a distancia siguen siendo omnipresentes.

El lenguaje newtoniano ("el cuerpo A ejerce una fuerza sobre el cuerpo B") barre hábilmente bajo la alfombra la cuestión de quién transmite la fuerza o qué sistema transmite la corriente de momentum. En cualquier caso, acá solamente figuran dos participantes en el proceso, el cuerpo A y el cuerpo B. En este caso, lo inadecuado de la

fuerza centrífuga es solo que falta el cuerpo A. Desde un punto de vista más moderno, según el cual las fuerzas pueden interpretarse como corrientes de momentum, el problema de las fuerzas aparentes es aún mayor, ya que no solo falta la fuente de la corriente de momentum, sino también el tercer participante, es decir, el sistema a través del cual el momentum pasa de A a B. El momentum, de repente esta ahí, surgió de la nada.

Ahora bien, se ha encontrado una crítica prudente en el libro de texto de física teórica de Joos [3]. En él el autor discute una situación sencilla en dos sistemas de referencia, por un lado, en un sistema inercial y, por otro, en un sistema de referencia acelerado en el que se utilizan fuerzas aparentes para la explicación. Demuestra que ambas formas son matemáticamente posibles, pero finalmente emite un juicio:

"Aunque la segunda vía suele conducir formalmente más rápido a la meta, hay que tener en cuenta, sin embargo, que la primera forma de ver las cosas suele hacer mejor justicia a los hechos físicos".

Eliminación

Si es posible, no describir un proceso en un sistema de referencia giratorio. Es decir, se recomienda elegir siempre el sistema de referencia de forma que la descripción sea lo más sencilla posible.

En cuanto a la meteorología, no hay nada malo en emplear la aceleración centrífuga y de CORIOLIS.

Referencias

- [1] P. A. Tipler: *Physik*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2003, S.114u.116
- [2] R. Tomaschek, *Grimsehls Lehrbuch der Physik*, Verlag B. G. Teubner, Leipzig, 1936, S. 65
- [3] G. Joos, *Lehrbuch der Theoretischen Physik*, Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt am Main, 1959, S.110

3.19 Aceleración de la gravedad

Tema

Se denomina aceleración de la gravedad al factor \vec{g} en la ecuación:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{g}$$

Defectos

- 1 Escribamos primero la ecuación para las componentes verticales F y g de los vectores \vec{F} y \vec{g} e intercambiamos el orden de los factores en el producto:

$$F_S = g \cdot m \quad (3.11)$$

Así que la ecuación nos dice que la fuerza de gravedad es proporcional a la masa (gravitacional). Dada la masa, podemos calcular la fuerza de gravedad; g es el factor de proporcionalidad.

Para un cuerpo en caída libre, es decir, un cuerpo sobre el que solo actúa la fuerza de la gravedad F_S , se aplica lo siguiente:

$$F_S = m \cdot a$$

donde m es la masa inercial. Con la ecuación (3.11) se deduce que:

$$a = g$$

La aceleración del cuerpo durante el proceso de caída es, por tanto, igual al factor de proporcionalidad g de la ecuación (3.11). Por ello, g ha heredado de a el nombre de aceleración. Para distinguirla de otras aceleraciones, g se denomina aceleración gravitatoria o de gravedad. Sin embargo, la ecuación (3.11) también se aplica cuando no se acelera nada o cuando, como en el caso de la caída con rozamiento, la aceleración tiene un valor diferente de g . ¿Debemos llamar a g aceleración solo porque en un proceso particular, la caída libre, su valor corresponde a la aceleración? Probablemente no.

- 2 También se puede leer la ecuación (3.11) de otra manera, como *ecuación de definición* de la magnitud vectorial \vec{g} . Se determina \vec{g} a partir de las magnitudes fácilmente medibles \vec{F} y m . El cuerpo ahora solo sirve para medir una propiedad del entorno terrestre. Se miden m y \vec{F} , se divide \vec{F} por m y se obtiene \vec{g} . Si se hace lo mismo con otro cuerpo que tenga una masa diferente, se obtendrá el mismo valor. Así que \vec{g} describe algo que no tiene nada que ver con el cuerpo. ¿Pero con qué tiene que ver? Caracteriza una propiedad de una entidad (invisible) que se encuentra en las afueras de la tierra, a la que llamamos campo gravitacional. En consecuencia, sería adecuado dar a la magnitud un nombre que haga referencia a esta entidad, por ejemplo, intensidad del campo gravitacional.

¿No suena eso familiar? Por supuesto que sí. Es exactamente, así como se trata la ecuación:

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{E} \quad (3.12)$$

La cual se utiliza para medir la distribución de la magnitud \vec{E} en el espacio, una magnitud que describe algo que no tiene nada que ver con la “carga de la

prueba” Q . \vec{E} describe el campo eléctrico que esta presente también cuando no hay carga de prueba.

- 3 g puede hacerse desaparecer o devolverse al mundo cambiando el sistema de referencia. En un lugar cercano a la superficie terrestre en un sistema de referencia en reposo respecto a la tierra, $g = 9,8 \text{ N/kg}$. En un sistema de referencia de caída libre en el mismo lugar, $g = 0$.

Esta propiedad g la tiene en común con muchas otras magnitudes físicas: con la velocidad, el momentum y la energía cinética, pero también con la intensidad del campo eléctrico y magnético. Sin embargo, la comprensión de este hecho en el caso del campo gravitacional se ve dificultada por la introducción de toda una serie de términos adicionales. Multiplicado por m , surgen “fuerzas aparentes”, “fuerzas g ”, “fuerzas de aceleración”. El resultado es que se pierde de vista que se trata siempre de una misma magnitud física que, como muchas otras, asume un valor diferente según el sistema de referencia elegido.

- 4 Respecto a la unidad de medición. La unidad m/s^2 es, por supuesto, correcta, pero no demasiado adecuada, ya que sugiere interpretar g como aceleración. Una alternativa sería N/kg . Esto se deduce directamente de la ecuación (3.11). Pero esto no es mucho mejor, porque la intensidad de campo a veces tiene algo que ver con una fuerza, pero solo cuando se lleva un cuerpo al campo. Intentemos, pues, orientarnos por la electrodinámica. ¿Cuál es la unidad de medición de la intensidad del campo eléctrico? Como es sabido, se utiliza V/m , pero también podría haberse utilizado N/C . De nuevo, una unidad de medición no está más justificada ni es más apropiada que la otra. ¿Pero qué se querría? Si la magnitud describe una propiedad intrínseca del campo, ¿su unidad no debería tener su propio nombre? Ciertamente, pero no lo tiene. No obstante, echemos otro vistazo rápido al magnetismo. ¡Qué sorpresa! Aquí hay dos unidades distintas para describir el campo, el gauss y el tesla. De nuevo lo vemos: el desarrollo de la física fue y sigue siendo algo errático.

Origen

En época de NEWTON —Isaac NEWTON (1643–1727)— no existía el concepto de campo (aunque a él le hubiera venido bien). Así que en ese momento surgió o se inventó una forma de tratar la gravitación (como toda la mecánica) que opera con acciones a distancia y en la cual no se hace referencia a las propiedades de lo que está entre los cuerpos que gravitan. Entonces, por supuesto, la g no podría expresar una propiedad de algo que está entre los cuerpos. Solo podría interpretarse como un factor que se refiere a un cuerpo; sin un cuer-

Punto de aplicación y línea de acción

po, no habría g . Así que el término aceleración debida a la gravedad era naturalmente obvio.

Eliminación

Se sugiere introducir g a través de

$$\vec{F} = m \cdot \vec{g}$$

o también a través de

$$F = m \cdot g$$

así como se introduce \vec{E} mediante

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{E}$$

y llamarlo intensidad del campo gravitacional.

Resulta que la aceleración de un cuerpo que cae libremente es igual a esta intensidad de campo. Tenemos que agradecer la igualdad de la masa gravitacional y la inercial, que no aparece como una identidad en el marco de la mecánica clásica, sino como un resultado sorprendente, casi increíble, pero sin embargo aceptable de la observación. Esto debe ser abordado.

momentum. Entre las que hacen referencia a un área se encuentran las corrientes y los flujos, pertenecen a esta categoría la corriente eléctrica, la potencia (corriente de energía), la corriente de masa, la fuerza (corriente de momentum), el flujo magnético, etc. Esta clasificación es válida tanto para magnitudes escalares, como vectoriales y tensoriales. Así, la temperatura es una magnitud local y escalar, mientras la intensidad del campo eléctrico es local y vectorial; la carga eléctrica es una magnitud extensiva escalar y el momentum es extensivo y vectorial. La potencia, que se refiere a un área, es escalar, mientras la fuerza es vectorial.

Se puede ahora analizar lo que significa el punto de aplicación de una fuerza. Si se trata de indicar un “punto” relacionado con la fuerza, es necesario precisar que:

- 1 La fuerza no se refiere a un punto sino siempre a un área.
- 2 En física no es usual mencionar el “ente geométrico” en la definición de una magnitud. Es como si se dijera: la acción de la temperatura está determinada por su valor y por el sitio donde ella se mide o la acción de la carga depende del valor de esta y de la región del espacio considerada.

Origen

La razón para que se hable de un punto en lugar de un área se debe probablemente al tradicionalismo de los físicos. La mecánica puntual (de puntos materiales) de los siglos 18 y 19, en la cual existían puntos de masa y de carga, fue muy exitosa y aún sigue siéndolo en ciertas aplicaciones como por ejemplo la astronomía.

Eliminación

Se puede prescindir fácilmente de los conceptos de punto de aplicación y línea de acción; en todo caso no es apropiado ni necesario mencionar dichos conceptos en la definición de fuerza.

3.20 Punto de aplicación y línea de acción

Tema

Cuando se introduce la magnitud fuerza, se menciona que ella está determinada por su módulo, su dirección y el punto de aplicación. Más tarde, en el contexto del tratamiento del momentum de fuerza, se le atribuye además una línea de acción.

Defectos

Nuevamente parece que la fuerza requiere un tratamiento especial, como vector tiene módulo y dirección, pero ¿para qué atribuirle además un punto de aplicación? ¿Es esto una particularidad de las fuerzas?

Los valores de la mayoría de las magnitudes físicas se relacionan con uno de los tres entes geométricos siguientes: el punto, el área o una región del espacio; entre las pocas excepciones está el tiempo. Las magnitudes que se refieren a un punto se les llama intensivas o locales, a ellas pertenecen la velocidad, la presión, la temperatura, las densidades, los potenciales y todas las intensidades de campos. Las magnitudes relacionadas con una región del espacio son llamadas extensivas, entre ellas figuran la masa, la energía, la carga eléctrica y el

3.21 Presión y fuerza

Tema

“La presión en un punto al interior de un líquido es la misma hacia abajo, hacia arriba, o hacia los lados.”

Defectos

La frase anterior, que figura en un libro universitario un poco antiguo, pone en evidencia un problema que también se encuentra en textos más modernos, aunque posiblemente no tan sucinto: se presentan algunas dificultades para distinguir las magnitudes fuerza y presión.

Es costumbre introducir primero la fuerza y posteriormente la presión como fuerza por unidad de área F/A , lo cual genera un problema: ¿cómo obtener el escalar presión a partir del vector fuerza y del “vector” área?

Se hubiera podido introducir la presión como variación de energía por variación de volumen:

$$dE = p \cdot dV.$$

y así no existiría el problema anterior.

Si se quiere hacerlo correctamente empleando fuerza y área, entonces se debe escribir:

$$\vec{F} = \tilde{\sigma} \cdot \vec{A},$$

donde $\tilde{\sigma}$ es el tensor de tensión mecánica (tensor tensión). En líquidos y gases en reposo este tensor solo tiene tres componentes diagonales iguales entre sí, y por consiguiente puede ser caracterizado por un solo número, la llamada presión hidrostática.

El hecho de que en general $\tilde{\sigma}$ no pueda ser presentado de esta sencilla manera, está relacionado con una situación conocida también por cualquier persona en su cotidiano vivir: es posible someter un cuerpo sólido a tensiones mecánicas independientes las unas de las otras, a lo largo de tres rectas mutuamente ortogonales, diferente a lo que ocurre en los fluidos en reposo. Si no se menciona claramente este hecho, entonces surgirán dificultades para explicar la omnidireccionalidad (isotropía) de la presión en líquidos y gases, recordando que esta se presenta como algo sorprendente y digno de mención. Inicialmente se sugiere que la presión puede depender de la orientación, posteriormente se muestra que no es así, dejando la impresión de una expectativa no justificada e incluso absurda. Sin embargo, hubiera sido tan sencillo decir desde el comienzo que en general la presión sí depende de la línea de orientación.

Al parecer, autores de citas similares a la referenciada se han perdido en la “jungla” de los conceptos escalar, vector y tensor. Efectivamente, la afirmación que la presión es la misma hacia abajo y hacia arriba es una afirmación sin sentido, ya que un tensor distingue entre las diversas líneas de orientación, pero no entre dos direcciones opuestas. No existe una presión hacia arriba, ni una hacia abajo, sino una normal a la superficie horizontal, la cual puede ser distinta de la presión o tensión en la normal a una de las superficies verticales, pero en los líquidos o gases en reposo ellas son iguales. Aparentemente se ha confundido “presión hacia abajo” y “presión hacia arriba” con “fuerza hacia abajo” y “fuerza hacia arriba”.

Origen

Proviene de la antigua idea newtoniana, según la cual una fuerza actúa sobre un cuerpo. Si se define la presión a través de la fuerza, entonces es natural buscar un cuerpo sobre el cual actúe, y es normal esperar que la presión tenga dirección.

Eliminación

Se sugiere introducir la fuerza como magnitud cuyo valor se refiere a un área y no a un punto o a un cuerpo. Antes de introducir la presión en gases y líquidos, introducir la tensión mecánica en materiales sólidos y mostrar que depende de la orientación, siendo posible determinar los valores correspondientes a las tensiones a lo largo de tres rectas mutuamente ortogonales, independientes unas de otras. Los líquidos y gases son casos particulares, en los cuales las tres tensiones son positivas e iguales entre sí.

Es de notar que existe otro caso particular: los campos eléctricos y magnéticos, donde las tres “tensiones principales” tienen el mismo módulo. A lo largo de la recta del vector intensidad del campo la tensión es negativa, mientras en las orientaciones ortogonales a esta última, es positiva.

Se debe evitar formulaciones del tipo “la presión sobre...”, pero puede hablarse de la presión en las orientaciones horizontal o vertical.

3.22 La polea y el sentido de la fuerza

Tema

- “Al estirar desde un extremo de la cuerda, la polea simple se encarga solamente de invertir el sentido de la fuerza aplicada.”
- “La polea fija consiste en una rueda que está sujetada por un eje. Esta polea solo cambia la dirección de la fuerza, pero no modifica el esfuerzo que se hace.” [1]
- “Una polea simple no nos proporciona ganancia, ni en fuerza, ni en rapidez; simplemente cambia la dirección de la fuerza aplicada.” [2]

Defectos

Una persona P hala una cuerda que pasa por la rendija de la polea R; en el otro extremo de la cuerda se halla suspendido un cuerpo K, Fig. 3.13.

- Las citas anteriores se refieren a las fuerzas en los segmentos a y b de la misma cuerda. Cuando se habla de una fuerza sin indicar el cuerpo que la ejerce y el cuerpo sobre el cual es ejercida, no es posible definir

La polea y el sentido de la fuerza

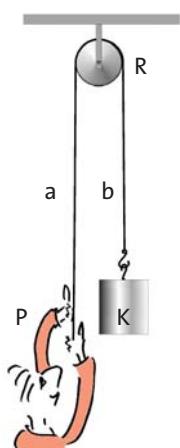


Fig. 3.13 ¿Qué se está desviando la polea de desviación?

su dirección. Sin embargo, se puede afirmar que eso (si la fuerza cambia o no) depende de nuestra elección. Efectivamente, \vec{F}_{PR} tiene dirección opuesta a \vec{F}_{RK} , parece entonces que se presenta un cambio de dirección, sin embargo las direcciones de \vec{F}_{PR} y \vec{F}_{RK} son iguales. Visto de este modo, nada ha cambiado de dirección.

- 2 Normalmente por “desviar” se entiende que algo que se mueve cambia la dirección del movimiento. Al emplear la metáfora de la fuerza desviada, se presupone que esta viene de alguna parte y que es posible guiarla hacia otra, por ejemplo cambiar su dirección mediante una polea. Si se acoge tal descripción se debe estar preparado para preguntas como: ¿Qué ocurre con la fuerza que el soporte ejerce sobre la polea? Si una fuerza es algo cuyo “recorrido” se puede seguir, y que además se puede

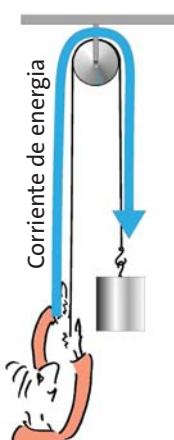


Fig. 3.14 No es la fuerza la que se desvía, sino la cuerda y el flujo de energía.

desviar, entonces ¿a dónde va esta última fuerza?, ¿también se desvía?

En realidad la polea desvía algo, incluso dos cosas: obviamente la cuerda, y —en caso que el cuerpo se desplace— la corriente de energía, Fig. 3.14. Si se tira de la cuerda S1 hacia abajo, existe una corriente de energía en S1 hacia arriba, luego en torno a la polea, posteriormente a través de S2 hacia abajo, para llegar finalmente al cuerpo K.

- 3 Es posible manejar la magnitud \vec{F} tal como lo sugieren las citas, dado que \vec{F} es la corriente de momentum (momentum) es fácil indicar su recorrido; sin embargo la corriente de momentum no sigue la cuerda en torno a la polea. Si se define, como es costumbre, la dirección positiva del momentum hacia arriba, la corriente de momentum fluye desde el soporte hacia la polea, donde se bifurca en dos corrientes iguales, Fig. 3.15.

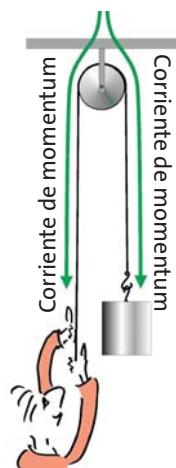


Fig. 3.15 La corriente de momentum no se desvía.

Origen

El sistema propicia una descripción con algo que tiene el carácter de corriente, y parece evidente que aparte de la cuerda algo más sea desviado por la polea. Pero al parecer se proyecta el comportamiento de la corriente de energía sobre la fuerza [3].

Eliminación

La idea de una fuerza que es desviada por la polea no tiene mucho sentido. Se gana claridad cuando se describe y/o explica la polea (fija o móvil) por medio de corrientes de energía y de momentum. Cuidando obviamente no confundir las dos, así como se debe distinguir cuidadosamente entre la corriente de energía y de carga eléctrica en un circuito eléctrico.

Referencias

- [1] A. Barahona, *Ciencias naturales y desarrollo humano*, México: Secretaría de Educación Pública, 2002. p.176.
- [2] V. González, *Física fundamental*, México: Editorial Progreso, 1971. p.71.
- [3] Altlasen der Physik, Kraft und Energie

3.23 Velocidad instantánea y velocidad media

Tema

En algunos libros escolares se encuentran frases como las siguientes:

- 1 “Entendemos por velocidad v de un movimiento uniforme el cociente constante de un cambio de posición cualquiera Δs y del tiempo Δt necesario para ello: $v = \Delta s/\Delta t$. ”
- 2 “Para un movimiento uniforme con los valores iniciales $t = 0$ y $s = 0$, además de $v = \Delta s/\Delta t$, es válido también que $v = s/t$. ”
- 3 “En la práctica se encuentra la velocidad instantánea de manera aproximada como velocidad media de un intervalo de tiempo pequeño.”

En otros textos se lee:

- 4 “Definición: Si en el movimiento rectilíneo de un cuerpo su desplazamiento s es proporcional al tiempo t , al cociente $s/t = v$ se le llama velocidad del cuerpo.”
- 5 “Definición: si en una sección de un movimiento rectilíneo todos los cocientes tienen el mismo valor, entonces $\Delta s/\Delta t = v$ es la velocidad del movimiento en dicha sección.”
- 6 “Si Δs y Δt son intervalos correspondientes del desplazamiento y del tiempo de un movimiento cualquiera, entonces

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

es la velocidad media de dicho movimiento en el desplazamiento Δs o durante el intervalo de tiempo Δt respectivamente.”

- 7 “La velocidad instantánea en el instante t_0 se obtiene aproximadamente como ‘velocidad de intervalo’ del intervalo más pequeño posible que contiene al instante t_0 ”

Estas afirmaciones no son particularidades de los libros escogidos, existen formulaciones análogas en la mayoría de los textos escolares, independientemente de que sean modernos o tengan 100 años de antigüedad. Se encuentran teoremas similares para la aceleración.

Defectos

Se introduce la velocidad y la relación $v = \Delta s/\Delta t$ con una inusitada meticulosidad, lo cual genera varias consideraciones:

- No es posible mantener en el resto del texto el rigor que aquí se aplica. Baste recordar la imprecisión con la cual se introduce más tarde la fuerza, el calor o la corriente eléctrica.
- La extrema formalización tiene un efecto intimidador, en particular al comienzo del curso escolar.
- No es grande la distancia entre el rigor conceptual y la pedantería y cabría preguntarse si aquí ya se ha rebasado el límite entre los dos.
- Se dice que por velocidad se *entiende* el cociente $\Delta s/\Delta t$ y se *define* la velocidad por dicha relación ($v = \Delta s/\Delta t$); no se dice simplemente que esa ecuación representa la relación entre v , s y t . ¿Debe concluir el alumno que aquello que él pensaba era la velocidad, no lo es en el sentido de la física? Dicho sea de paso, existen otras posibilidades para *definir* la velocidad [1].
- La vía propuesta para entender el concepto de velocidad no es muy práctica, se propone un rodeo por dos o tres velocidades particulares: la velocidad instantánea, la velocidad de intervalo y la velocidad media. Si se procediera de manera análoga al introducir otras magnitudes físicas no se avanzaría mucho en un curso, ya que sería consecuente establecer el siguiente tipo de formulaciones: “En la práctica el valor instantáneo de la corriente eléctrica se encuentra de manera aproximada como la corriente media en un intervalo de tiempo pequeño.”, o “En la práctica la densidad local se halla de manera aproximada como la densidad media de un elemento espacial pequeño.”, o “En la práctica la presión local se calcula de manera aproximada como la presión media en un elemento de superficie pequeño.”

Origen

Probablemente es una tradición de la época en que comenzó la mecánica moderna. En los libros de Física del siglo 18 se encuentra a menudo tal meticulosidad en lugares donde hoy día apenas vemos un problema.

Eliminación

La solución puede presentarse de varias maneras: en la etapa introductoria del curso escolar no es necesario explicar lo que se *entiende* por velocidad y por velocidad constante. La ecuación $v = s/t$ describe la relación entre la velocidad, el desplazamiento y el tiempo necesario para ello, cuando la velocidad es constante; si no lo es, se procederá como con las demás magnitudes que cam-

La aceleración

bian con el tiempo. La velocidad se puede medir con el tacómetro.

Referencias

[1] Se presentan a continuación dos alternativas para la definición o introducción del concepto de velocidad, aunque no se recomiendan en cursos escolares de iniciación.

- Se define la velocidad por medio de $dE = \vec{v} \cdot d\vec{p}$, es decir, de la variación de la energía y del momentum. Esta forma es análoga a la definición usual del potencial eléctrico (variación de energía por variación de carga) o de la temperatura absoluta (variación de energía por variación de entropía).
- Se introduce la velocidad por “medición directa”. Por medio de un tacómetro no calibrado es posible establecer si una velocidad es constante en el tiempo, así se puede definir una unidad para ella. Se obtendrán múltiplos de la unidad desplazando un cuerpo B, con velocidad relativa v_0 respecto al cuerpo A, que a su vez se mueve con velocidad v_0 respecto a la tierra; B tendrá una velocidad $2v_0$ respecto a la tierra.

3.24 La aceleración

Tema

En cinemática se introduce el concepto de aceleración, distinguiendo varios “tipos”: aceleración instantánea, media, orbital, radial y angular, centrífuga, centrípeta y de CORIOLIS; se enseña que el movimiento circular uniforme es un movimiento acelerado.

Defectos

- Por medio de ciertos términos técnicos es posible expresarse más sucintamente, una sola palabra puede expresar lo que normalmente requeriría un predicado compuesto, una oración subordinada o una frase completa; así una oración puede volverse más comprensible. Sin embargo, entre varios términos técnicos empleados existirá uno óptimo, si se utilizan demasiados la comprensibilidad disminuye. La frase podrá ser más breve, pero habrá que definir cada uno de los términos técnicos empleados y se perderá en comprensión, ya que el lector (estudiante y maestro) tendrá que saber y entender todas las definiciones. La proliferación de distintos nombres para una misma magnitud física, la aceleración, es un ejemplo de esto.
- El movimiento de un punto se puede describir por medio de distintas funciones del tiempo, las más usuales son la posición $s(t)$, la velocidad $\vec{v}(t) = d\vec{s}/dt$

y la aceleración $\vec{a}(t) = d^2\vec{s}/dt^2$. Pero también se podrían introducir derivadas temporales mayores de $\vec{s}(t)$, la tercera derivada temporal de $\vec{s}(t)$ se llama ocasionalmente tirón o jalón, nombre que expresa claramente el significado de la magnitud. Sin embargo, si la intención no es explayarse en un parque de atracciones mecánicas, cabe preguntarse cuáles de estas funciones son verdaderamente necesarias.

- Consideremos como ejemplo una clase importante de movimiento, el llamado movimiento uniformemente acelerado: su descripción por medio de la posición s es, al menos para el colegio, bastante complicada, ya que $\vec{s}(t)$ es una función cuadrática; si se toma $\vec{v}(t)$, que en este caso es una función lineal, se simplifican las cosas. La descripción se hace aún más sencilla, por lo menos desde un punto de vista matemático, si se emplea la función $\vec{a}(t)$, la cual es constante. Pero lo más sencillo, matemáticamente, sería la tercera derivada temporal que es cero para cualquier t . Es obvio que se puede aprender mucho sobre el movimiento si se consideran todas estas funciones y si se las compara; sin embargo, si queremos una descripción escueta del movimiento es recomendable limitarse a lo más necesario, a las funciones que tienen la interpretación intuitiva más directa. En nuestra opinión estas funciones son $\vec{s}(t)$ y $\vec{v}(t)$. En el ejemplo mencionado la función $\vec{v}(t)$ muestra que la velocidad aumenta uniformemente, lo cual es más claro e intuitivo que decir que la aceleración es constante. Esto se manifiesta en la manera como, incluso personas con formación técnica, describen la aceleración de un coche: no dicen que la aceleración es de tantos metros por segundo al cuadrado, sino que el coche acelera de 0 a 100 km/h en tantos segundos, es decir, se argumenta con la velocidad \vec{v} y no con la aceleración \vec{a} .

Se puede pensar que como maestros de Física no es posible prescindir de la aceleración, ya que dicha magnitud aparece en la ecuación más importante de la mecánica, la segunda ley de NEWTON. Sin embargo, en la obra de NEWTON no existe la magnitud aceleración, NEWTON formula su segunda ley por medio de la derivada temporal de la cantidad de movimiento.

- El nombre “aceleración” para la magnitud a presenta más de una incongruencia lógica. En un artículo reciente se encuentra la siguiente afirmación: “... partículas cargadas emiten radiación, siempre que estén aceleradas o desaceleradas o cambien la dirección de su movimiento.” No hay nada que objetar a esta formulación, sin embargo, en la frase siguiente se dice: “... partículas que se mueven en una trayectoria cir-

Movimiento con velocidad constante

cular —incluso cuando su velocidad es constante— estan aceleradas y por consiguiente emiten.” Mientras en la primera frase todavía se distingue entre acelerar, desacelerar y cambiar de dirección, en la segunda cada partícula con a diferente de cero realiza un movimiento acelerado.

A menudo el lenguaje común dispone de dos palabras distintas para los valores “positivos” y “negativos” de una magnitud física, o también para los valores grandes y pequeños: aceleración – desaceleración, presión – tensión, calor – frío. En física basta un solo nombre para cada variable y no dos diferentes según su valor. Es inevitable que surjan problemas e incongruencias entre los dos lenguajes, sin embargo, deberíamos abstenernos de formar adjetivos a partir del nombre inapropiado de una magnitud, porque así se genera una inadecuada “jerga” científica. Es precisamente esto lo que ha ocurrido con la aceleración, se dice que el movimiento circular uniforme es un movimiento acelerado, a pesar de que nada se acelera o se vuelve más rápido. Es cierto que la velocidad cambia, pero puede cambiar sin que el cuerpo se vuelva más rápido o lento. Debido al nombre de la magnitud nos dejamos llevar a una afirmación inapropiada y después se vende el despropósito (“el movimiento circular uniforme es un movimiento acelerado”) como un aspecto importante de la Física.

Origen

Contrario a la opinión corriente, NEWTON (1643–1727) nunca utilizó la magnitud “aceleración”, según su segunda ley el cambio temporal de la cantidad de movimiento es proporcional a la fuerza. En ocasiones empleaba la palabra “movimiento” (*motus*) como abreviación para “cantidad de movimiento” (*quantitas motus*), es decir, para la magnitud que hoy llamamos momentum. Tampoco figura la magnitud “aceleración” en la obra de HUYGENS (1629–1695) [1]. En una publicación del año 1754 Leonhard Paul EULER (1707–1783) utiliza el cociente diferencial $d^2\vec{s}/dt^2$, pero no lo llama aceleración y no le atribuye un símbolo particular [2]. El primer lugar donde se encuentra la aceleración como variable es en *Opera Omnia* de Johann BERNOULLI (1667–1748) publicada en 1742 [3]. Aparentemente, se la introdujo en el marco de la “matematización” creciente de la mecánica que empezó después de NEWTON.

Eliminación

Se sugiere prescindir por completo de la magnitud aceleración. La cinemática se limita a la discusión y análisis de las funciones $\vec{s}(t)$ y $\vec{v}(t)$, en dinámica se formula la segunda ley de NEWTON así: $\vec{F} = d\vec{p}/dt$. Pero en caso que

se considere necesario introducir la magnitud a , no debe afirmarse que un cuerpo realiza un movimiento acelerado mientras que el módulo de su velocidad no aumente.

Referencias

- [1] E. J. Dijsterhuis, *Die Mechanisierung des Weltbildes*, Springer-Verlag, Berlin, 1956, p.528
- [2] L. Euler, *Vollständige Theorie der Maschinen, die durch Reaktion des Wassers in Bewegung versetzt werden*, Ostwald's Klassiker der Exakten Naturwissenschaften, Nr. 182, Verlag von Wilhelm Engelmann, Leipzig, 1911
- [3] S. Sambursky, *Der Weg der Physik*, Artemis Verlag, Zürich, 1975, p.428.

3.25 Movimiento con velocidad constante

Tema

Uno de los movimientos más sencillos, y a la vez más llamativos, que nos rodea es el de un vehículo que avanza con regularidad: un coche en una carretera o autopista, o un tren en una vía abierta.

Defectos

¿Cómo se abordan estos procesos en las clases de física? Se mencionan y discuten en la cinemática, como ejemplo de un movimiento con velocidad constante, es decir, el movimiento más sencillo de todos.

Pero ¿qué dice la dinámica del recorrido normal en coche o en tren?

Por ejemplo, lo siguiente: “Para que un vehículo se mueva de manera uniforme, es necesario suministrar energía continuamente a su motor. Porque debido a la fricción, se desprende constantemente calor al entorno durante el movimiento.”

En el movimiento uniforme, la fuerza motriz es igual a la fuerza total de fricción F_f . La energía necesaria para desplazar el vehículo uniformemente por la distancia s es entonces $E = F_f \cdot s$. La energía cinética del vehículo se mantiene constante durante este proceso.”

Puede que estas frases sean correctas. Sin embargo, estaría bien saber qué se entiende por fuerza motriz. Una fuerza es siempre ejercida por un cuerpo A sobre un cuerpo B. ¿Qué cuerpo es A y cuál es B en el caso de la fuerza motriz? Es seguro que el coche está impulsado por la fuerza motriz, así que el coche sería el cuerpo B. Ahora bien, según el discurso y la expectativa común, el empuje proviene de alguna manera del motor. Pero el motor forma parte del cuerpo B sobre el que se supone

Movimiento con velocidad constante

que actúa la fuerza motriz. El alumno no tiene más remedio que aprender las frases de memoria y, si es necesario, repetirlas.

Las frases tampoco responden a una pregunta que el lector ingenuo podría tener: ¿Por qué la velocidad del vehículo se mantiene constante? ¿Es la respuesta demasiado difícil? ¿O es trivial? ¿Por qué las dos fuerzas son iguales? ¿Acaso el conductor tiene que utilizar el pedal del acelerador para alcanzar exactamente la posición en la que el coche no acelera ni desacelera?

Preguntemos a otro libro qué nos dice sobre esto. En él se aborda el tema después de haber tratado la fricción en todos sus detalles, con la fricción por deslizamiento, la fricción estática y la fricción por rodamiento (o rodadura), con las correspondientes leyes de fuerza y la interpretación molecular. Todo esto parece ser necesario para la comprensión del coche en movimiento continuo.

Aunque no se entienda todo, se aprende aquí en cualquier caso que el asunto es extraordinariamente complicado. Para entender el movimiento del coche, hay que distinguir entre 10 fuerzas diferentes, a saber: la fuerza motriz, la fuerza de resistencia, la fuerza de interacción, la fuerza de adhesión, la fuerza de fricción de deslizamiento, la fuerza normal, la fuerza de fricción de rodadura, la fuerza de resistencia al aire, la fuerza de descenso y la fuerza de resistencia a la aceleración. Sin embargo, el lector bienintencionado se pregunta también aquí qué se entiende por fuerza motriz. El texto dice:

“La fuerza motriz F_A , que se transmite del motor a las ruedas a través de la caja de cambios, puede ser como máximo igual a la fuerza de adherencia máxima.”

Así que acá se dice claramente que la fuerza motriz proviene del motor. Intentemos entenderlo. Supongamos que los pistones del motor se mueven en dirección vertical, es decir, hacia arriba y hacia abajo. El gas caliente presiona los pistones. Por supuesto, también empuja hacia abajo y hacia los lados, pero eso probablemente no importa, porque el empuje se produce a través del pistón en movimiento. Así que tenemos una fuerza del gas hacia arriba. Pero el coche no debe moverse hacia arriba, sino hacia delante. ¿Y ahora qué? Es realmente un problema, porque incluso el motor en su conjunto no consigue producir una fuerza de avance. Aparte del problema que teníamos antes, es decir, que el motor es parte del coche. Así que no debería ejercer ninguna fuerza hacia delante, porque entonces tendría que moverse hacia atrás en el proceso.

¿Comentarios ingenuos o tontos? Tal vez. Pero ¿podría ser también que el autor se viera envuelto en su

propia maraña de fuerzas y confundiera accidentalmente fuerza y energía? Porque con la energía, la frase se vuelve correcta: va del motor a través de la caja de cambios a las ruedas, o “se transfiere”, si se quiere decirlo más eruditamente.

Origen

Con el descubrimiento de la ley de la inercia por GALILEO —GALILEO di Vincenzo Bonaiuti de' Galilei (1564–1642)—, toda la obra de NEWTON —Isaac NEWTON (1643–1727)—, y los escritos de DESCARTES —René DESCARTES (1596–1650)— y HUYGENS —Christiaan HUYGENS (1629–1695)—, se inició un nuevo comienzo de la ciencia natural, una continuación de algo que había comenzado en Grecia hace unos 2000 años, pero que luego cayó en un “sueño crepuscular” que duró muchos siglos.

Desde GALILEO y NEWTON, sabemos que las fuerzas causan aceleración. Esta idea fue genial. Sin embargo, también tuvo un efecto secundario negativo: la fricción, que en retrospectiva había conducido a la interpretación bastante desafortunada de ARISTÓTELES —ARISTÓTELES (384 a.e.c.–322 a.e.c.)— sobre el movimiento de los cuerpos, ahora solo aparecía como una perturbación de la belleza del nuevo edificio doctrinal. La física real, tal y como se veía, tenía lugar en el espacio sin fricción. El coche de caballos de entonces o el automóvil y el tren de alta velocidad de hoy en día solo luchan contra esta perturbación mientras están en movimiento. En el mejor de los casos, se puede observar una física “pulcra” al arrancar.

Así, la 2^a ley de NEWTON se convirtió en el santuario de la física, aunque a la luz de los descubrimientos y conocimientos posteriores, no es más que una expresión de la conservación de una magnitud física, el momentum. Ahora bien, la ley del momentum es, efectivamente, una ley física importante, pero no necesariamente más importante que las leyes de conservación o no conservación de otras magnitudes extensivas, como la energía, la carga eléctrica, la entropía o el momentum angular, que fueron descubiertas posteriormente.

Y un comentario más sobre las muchas y variadas fuerzas: el innovador NEWTON existió hace más de 300 años, y han pasado muchas cosas desde entonces. La metáfora de la fuerza, tan ingeniosa como en la época de NEWTON, afortunadamente ya no es necesaria. Si utilizamos el hecho de que las fuerzas pueden interpretarse como corrientes de momentum, descubrimos que varias fuerzas de nuestra lista son simplemente una misma corriente de momentum medida en diferentes puntos o sobre superficies de diferente orientación.

Eliminación

El movimiento con velocidad constante en presencia de fricción es un buen tema para la escuela: importante, no trivial, pero tampoco demasiado difícil. Es un ejemplo sencillo de lo que se llama estado estacionario en física: la corriente de salida se ajusta a sí misma para que sea igual a la corriente de entrada.

Esto es válido para el agua que fluye en un recipiente con un orificio, Fig. 3.16. Al comienzo, teniendo el recipiente vacío, se abre el grifo y se deja correr el agua. El nivel del agua sube; como resultado, la corriente del agua que sale aumenta. Continúa aumentando hasta que la corriente de entrada es igual a la corriente de salida.

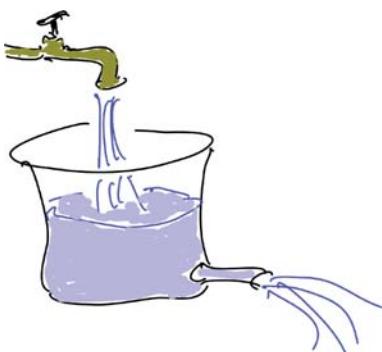


Fig. 3.16 El nivel de agua se ajusta para que salga la misma cantidad de agua que entra.

Lo mismo sucede con el automóvil. El motor asegura que una corriente de momentum fluye desde la tierra hacia el coche. La velocidad del coche aumenta, por lo que la corriente del momentum que sale (debido a la fricción) aumenta. Aumenta hasta que la salida del momentum es igual a la entrada de este.

Se puede decir lo mismo de una habitación que se calienta. En primer lugar, la temperatura aumenta. Entonces... etc.

La temperatura media de la superficie terrestre también es el resultado del proceso de ajuste de un estado estacionario.

Se podría argumentar que los pasajes citados anteriormente querían decir mucho más que cómo ajustar el equilibrio de la velocidad. Supongamos que los textos no contienen errores, incluso en ese caso son inapropiados. El problema en la enseñanza de la física hoy en día no es tanto qué temas nuevos debemos introducir. Antes de incluir nuevos temas, es necesario decidir qué se debe eliminar. Las diez fuerzas del coche serían buenas candidatas para ello.

3.26 Constantes de movimiento

Tema

En mecánica analítica las constantes o integrales de movimiento desempeñan un papel importante, son magnitudes cuyos valores permanecen constantes mientras se desarrolla el movimiento. Un sistema con n grados de libertad tiene $2n-1$ de dichas constantes, las cuales a menudo se llaman magnitudes conservadas (o conservativas).

Para su definición se presentan frases como la siguiente: “En mecánica lagrangiana «si el lagrangiano no depende explícitamente de alguna de las coordenadas generalizadas entonces existe un momentum generalizado que se mantiene constante a lo largo del tiempo», resultando por tanto esa cantidad una integral del movimiento, es decir, existe una ley de conservación para dicha magnitud” [1]

Defectos

En mecánica analítica la expresión “magnitud conservada” se emplea de un modo un poco distinto que en otros campos de la Física.

En general, abstrandose de la mecánica analítica, se emplea el término para caracterizar la conservación, o también la no-conservación de una magnitud física. De cada magnitud de “tipo sustancia” (extensiva) se puede afirmar si es conservada o no; una magnitud es extensiva si se le puede atribuir una densidad y una corriente. Algunas magnitudes extensivas son conservadas, como la energía, el momentum y la carga eléctrica, otras no lo son, como la entropía. La conservación o la no-conservación son una propiedad universal de una magnitud extensiva, no es una propiedad de ciertas funciones, de ciertos sistemas o de ciertos procesos. Además no tiene sentido hablar de conservación o no-conservación de una magnitud que no sea extensiva, así de la temperatura no se puede afirmar ni que sea conservada ni no-conservada.

En mecánica analítica, por el contrario, la expresión “magnitud conservada” se usa como sinónimo de “constante de movimiento”. Una constante de movimiento es a veces una magnitud no extensiva y difícil de imaginar o tener una idea intuitiva de ella. Un ejemplo es el vector de RUNGE-LENZ —llamado así en honor a Carl RUNGE (1856–1927) y Wilhelm LENZ (1888–1957)— que, en el “problema de dos-cuerpos”, es independiente del tiempo; de acuerdo al lenguaje de la mecánica analítica es una magnitud conservada dentro del mencionado problema. El vector de RUNGE-LENZ no es una magnitud extensiva, ya que no existe una densidad ni una corriente, además su “conservación” no es universal.

Ecuaciones de movimiento

A lo anterior se suma que las magnitudes energía, momentum y momentum angular son, según la interpretación de la mecánica analítica, a veces conservadas y a veces no.

Origen

La mecánica analítica es una de las teorías más “elegantes” de la Física. También es importante su papel como base de otras teorías, se requieren pocas modificaciones para llegar a la mecánica cuántica. Dicha “perfección” pudo originar que se hubiera desarrollado de modo bastante independiente del resto de la Física y es natural que haya creado su propia terminología, entre otras cosas, empleando el término *magnitud conservada* de manera diferente, discrepancia que no es siempre evidente, ya que en ocasiones los dos significados coinciden. El uso del término en mecánica analítica también da origen a algunas formulaciones infortunadas de la conservación en otros campos de la Física. En lugar de caracterizar una magnitud conservada diciendo que no se la puede generar ni destruir, se dice en apego a la mecánica analítica, que su valor en un sistema aislado es constante.

Eliminación

Distinguir entre los conceptos “integral del movimiento” y “magnitud conservada”, tal como se hace por ejemplo en el curso de LANDAU y LIFSHITZ: “Sin embargo, no todas las integrales del movimiento tienen la misma importancia en Mecánica, pues hay algunas cuya constancia tiene un profundo significado, derivado de las propiedades fundamentales: homogeneidad e isotropía del espacio y del tiempo. Las magnitudes representadas por tales integrales del movimiento se dice que son conservativas y tienen una importante propiedad común: son aditivas...” [2].

Referencias

- [1] Cantidad de movimiento. [en línea]. En: https://es.wikipedia.org/wiki/Cantidad_de_movimiento [consultado el 3 mayo de 2022]
- [2] L. D. Landau u. E. M. Lifschitz, *Theoretische Physik kurzgefaßt I*, Akademie-Verlag, Berlin, 1973, p.17, Existe versión en castellano.

3.27 Ecuaciones de movimiento

Tema

¿Qué se entiende por ecuación de movimiento? He aquí algunas respuestas extraídas de varios libros de texto escolares y universitarios.

- $\frac{d\vec{p}}{dt} = \sum_i \vec{F}_i$
- $\vec{F} = m\ddot{\vec{r}}$
- $\frac{d\mathbf{P}}{dt} = \mathbf{F}$ und $\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{v}$
- $\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0$
- $\dot{q}_i = +\frac{\partial H}{\partial p_i}$ und $\dot{p}_i = -\frac{\partial H}{\partial q_i}$
- $\frac{d\vec{v}}{dt} + \text{grad}(\vec{v}) \cdot \vec{v} + \frac{1}{\rho} \text{grad}(p) = \vec{k}$
- $\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = \rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right)$
 $= -\nabla p + \mu \Delta \vec{v} + (\lambda + \mu) \nabla(\nabla \cdot \vec{v}) + \vec{f}$
- $\dot{\mathfrak{P}} = \frac{d}{dt} \{ \mathfrak{u} M + M \mathfrak{w} \times \mathfrak{r} \} = \mathfrak{K}$
- $\dot{\mathfrak{L}} = \frac{d}{dt} (I * \mathfrak{w}) = \mathfrak{D}$
- $H|\psi\rangle = i\hbar \frac{d}{dt} |\psi\rangle$
- $s = \frac{1}{2} a \cdot t^2 + v_0 \cdot t + s_0$
- $s = v_0 \cdot t + s_0$
- $s = s_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$
- $s = s_0 \cdot e^{-kt} \sin(\omega \cdot t + \varphi)$

Defectos

Parece que la ecuación de movimiento es un término importante, a veces inclusive se resalta en negrita. Pero ¿qué significa? ¿La relación posición-tiempo de un cuerpo en movimiento? ¿El balance del momentum? ¿La evolución temporal de una función de onda?

Varios docentes tratan de no emplear dicho término, tanto en la universidad como en la escuela, posiblemente por miedo a decir algo incorrecto. Hasta que se dan cuenta que no se puede decir nada incorrecto, ya que el término casi siempre encaja.

Ni siquiera el autor de la entrada en la Enciclopedia Británica pudo resolver el problema cuando formuló lo siguiente: *Equation of motion, mathematical formula that describes the position, velocity, or acceleration of a body relative to a given frame of reference. Newton's second law, which states that the force F acting on a body is equal to the mass m of the body multiplied by the acceleration a of its centre of mass, F = ma, is the basic equation of motion in classical mechanics.*

Origen

Probablemente aquí también prima la tendencia a considerar el aspecto cinematográfico de los procesos mecánicos como lo más importante, de modo que incluso con ecuaciones que presentan claramente una constatación sobre el momentum o la energía, se quiere recordar sus parientes cinematográficos.

Eliminación

Difícilmente se podrá llegar a un acuerdo sobre cuál de las ecuaciones merece ese nombre. Por lo tanto, se recomienda deshacerse de él. Es fácil superar la “pérdida”.

3.28 El punto en la mecánica

Tema

En la mecánica del punto o dinámica del punto material, se utilizan los términos masa puntual, posición, trayectoria, campo de fuerza... La mecánica del punto es la mecánica favorita de los físicos. Los estudiantes de física la aprenden con mucho detalle, e incluso en la física escolar se habla de puntos de masa.

Defectos

1 La mecánica del punto es tan dominante en la física que uno encuentra muy natural hablar de un punto de masa o de una masa puntual en lugar de un cuerpo. Esto encaja con la idea de que hay campos de fuerza y, por tanto, fuerzas que cambian de un punto a otro.

Con este tipo de descripción de la naturaleza, importantes conceptos de la mecánica pierden su significado o se vuelven problemáticos, como la presión o las densidades de masa, carga eléctrica, momentum y energía. Normalmente —y especialmente en la física escolar— no es necesario utilizar esta descripción teórica un tanto singular.

2 Además, los términos “masa” y “punto” se utilizan con bastante descuido. Aclaremos brevemente estos términos. La masa es una magnitud física que mide una determinada propiedad de un cuerpo o de una partícula: su inercia y gravedad. ¿Y el punto? Entre las numerosas acepciones, la única que se ajusta a nuestro contexto sería: “un lugar precisamente definido”.

Ahora bien, las dos denominaciones “punto de masa” y “masa puntual” no son del todo coherentes en diferentes aspectos.

Según el uso común, un punto de masa sería un punto que tiene una masa, mientras que la masa pun-

tual sería una masa que es puntual. Sin embargo, ambas afirmaciones en realidad carecen de sentido.

Empecemos por el punto de masa: un objeto, un cuerpo o una partícula tiene una masa. Un punto, es decir, un objeto geométrico, puede en principio no tener masa. Esto no significa que su masa sea de 0 kg. Más bien, no tiene en absoluto la propiedad medida por la masa.

¿Y la masa puntual? Un cuerpo puede ser puntual, es decir, suficientemente pequeño. La masa, en cambio, es una variable en el sentido de las matemáticas. Como tal, no puede ser ni puntual ni no puntual.

¿Cómo explican los libros de texto los términos y cómo justifican la elección de estos? He aquí un ejemplo de un libro de texto universitario.

“Los objetos en movimiento deben ser idealizados,... A los objetos así etiquetados los llamaremos masas puntuales”. No es muy apropiado llamar a un objeto “masa”, pero al menos se explica que aquí se le dé un significado diferente a la palabra. Por tanto, aquí la masa no es el nombre de una magnitud física.

Tal vez esta imprecisión conceptual no tenga consecuencias perjudiciales en la investigación física y la ingeniería. En la escuela, y en la enseñanza en general, sin embargo, la precisión conceptual no es una pedantería, sino un requisito para crear claridad en las mentes de los alumnos. Además, todos los profesores lo saben: el uso de términos claros no hace que la física sea más difícil, sino, al contrario, más fácil.

3 También es necesario recordar que nunca se habla de momentum puntual, de entropía o energía puntuales. ¿Acaso se cree que la masa es algo más que una variable que describe una propiedad de un cuerpo o partícula? Por otro lado, la carga eléctrica se trata de forma similar a la masa. Entre los físicos, no solo hay masas puntuales, sino también cargas puntuales, con las mismas consecuencias perjudiciales: en la mente de los estudiantes, el electrón se convierte en una carga puntual. También aquí se produce la desafortunada confusión de sistema físico (electrón) y magnitud física (carga eléctrica), o brevemente: de cosa y medida.

Origen

- Acerca del papel dominante de la mecánica puntual en la física: sus logros en astronomía y su importante papel en la física de partículas.
- Acerca de la designación poco clara: la palabra masa se entiende erróneamente como sinónimo de la palabra materia.
- Acerca de la masa puntual en la física escolar: formación del profesorado: generalmente un semestre de mecánica de puntos en física básica, un semestre de

La fricción estatica

mecánica de puntos en física teórica, pero ningún semestre de mecánica del continuo.

Eliminación

- Evitar, sobre todo en la escuela, los términos punto de masa, masa y carga puntuales. Si se quiere hablar absolutamente de un punto, se puede hablar de cuerpos puntuales. Sin embargo, sería más coherente hablar de cuerpos pequeños.
- Apenas hay razones para introducir la mecánica de puntos en la escuela. La mecánica continua se adapta mejor a los fenómenos de nuestro entorno cotidiano. Entonces desaparecerán algunos de los problemas que se tienen con el concepto de fuerza en la mecánica puntual.

3.29 La fricción estatica

Tema

Al introducir la fricción mecánica, se distingue entre la fricción estatica, cinética (o dinámica) y por rodadura. En una enciclopedia bajo la entrada “fuerza de fricción” figura lo siguiente:

“En los movimientos, la fricción aparece como resistencia consumidora de energía. [...]”

Se distingue los siguientes tipos de fricción:

- **Fricción cinética:** Actúa cuando el cuerpo se mueve. [...]
- **Fricción estatica:** Actúa cuando el cuerpo esta en reposo. [...]
- **Fricción por rodadura:** Aparece cuando el cuerpo rueda en su soporte. [...]

Aún cuando la clasificación no se resalte tan nítidamente como aquí, en muchos libros se mencionan estos tres tipos de fricción. A veces se introducen las fuerzas correspondientes con nombres propios, como “fuerza de fricción estatica”, etc.

Defectos

Probablemente se sienta cierta “incomodidad” al leer esta clase de definiciones, y es difícil pensar que el autor de la cita no haya notado que la fricción estatica no corresponde a lo que anteriormente define como fricción, es decir, un proceso que consume energía, un proceso con producción de entropía, o en otros términos, un proceso disipativo o irreversible. Aparentemente algo no encaja en las definiciones.

Se podría intentar solucionar el problema no mencionando en la definición el consumo de energía, pero

es sabido que existe un amplio consenso en la Física acerca de que la disipación es el aspecto más característico de la fricción.

Además, se ve que los tres tipos de fricción mencionados no representan lo que generalmente se entiende por clasificación. Se sugiere que un caso cualquiera de fricción es estatica, cinética o por rodadura. Pero, ¿qué es lo que aquí se clasifica? ¿Tres sistemas distintos en los cuales aparecen estos tipos de fricción? ¿O tres dominios de estados de un solo sistema? La respuesta es: ni lo uno ni lo otro, a veces esto y a veces aquello. La fricción estatica y la cinética corresponden al mismo sistema, por ejemplo un cuerpo en su soporte. La fricción dinámica y por rodadura corresponden en general a sistemas distintos: al cuerpo que se desliza y a la rueda que rueda.

Origen

La clasificación es un medio muy útil para poner orden en la variedad de los fenómenos. Son ampliamente conocidos los tres efectos de la corriente eléctrica (térmico, magnético y químico), los tres tipos del transporte de calor (conducción, convección y radiación), las cuatro interacciones entre partículas (electromagnética, débil, fuerte y gravitatoria). Pero en ocasiones la tentación de “poner orden” en el mundo de este modo es tan grande que se lo hace a costa de la claridad en las ideas.

Eliminación

Al parecer la situación es conocida por muchos, se encuentran libros en los cuales la palabra fricción —en el contexto de la fricción estatica— figura entre comillas, es decir, “fricción” estatica. Se recomienda no utilizar la palabra fricción para lo que tradicionalmente se llama fricción estatica. Si se quiere clasificar los fenómenos de fricción, se propone otro procedimiento. En cada proceso de fricción en que participan dos cuerpos, el uno se mueve respecto al otro, y los cuerpos ejercen fuerzas el uno al otro.

Si F es el módulo de dichas fuerzas y Δv la diferencia de las velocidades, entonces la energía disipada por unidad de tiempo es:

$$P = \Delta v \cdot F.$$

Esta ecuación es el análogo mecánico de la consabida relación

$$P = U \cdot I,$$

la cual si se aplica a un resistor eléctrico, por ejemplo, permite obtener la energía disipada en la resistencia por

Transmisión de la fuerza, de un par de fuerzas y de la potencia

unidad de tiempo. Así como se acostumbra representar este proceso de “fricción eléctrica” por una curva característica $U-I$, se puede caracterizar un proceso de fricción mecánica o un “resistor mecánico” por cierta curva, que permite analizar los diversos procesos de fricción por el aspecto de la misma.

- 1 El caso más sencillo es el de una relación lineal entre F y Δv , Fig. 3.17, que correspondería —en electricidad— a la ley de OHM. Se realiza cuando entre los dos cuerpos existe un medio viscoso, un lubricante por ejemplo, un caso es el amortiguador de un automóvil o de una puerta.

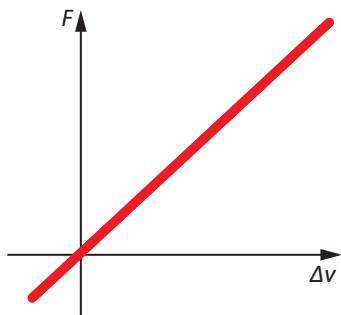


Fig. 3.17 Fricción estatica

- 2 Si el medio realiza un movimiento turbulento F crece con el cuadrado de Δv , Fig. 3.18. Un ejemplo es la resistencia del aire a un vehículo en movimiento.

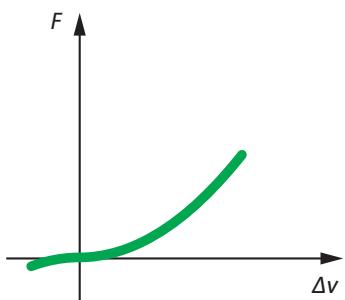
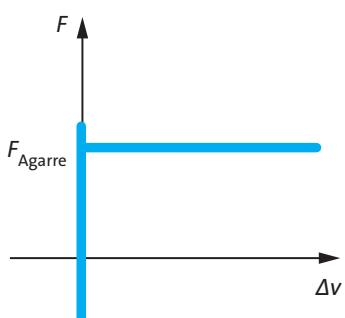


Fig. 3.18 Fricción del aire



- 3 La fricción estatica y cinética corresponden a la misma característica, Fig. 3.19. Sin embargo, esta contiene una singularidad: al valor $\Delta v = 0$ no le corresponde un valor único de la fuerza, esta puede admitir todos los valores entre $-F_H$ y $+F_H$. Como ejemplos figuran no solamente el adherirse y deslizarse de un automóvil, sino lo relacionado con su frenada y embrague.

En los tres casos mencionados se trata de auténtica fricción, ya que en cada caso se produce entropía.

3.30 Transmisión de la fuerza, de un par de fuerzas y de la potencia

Tema

Se encuentran citas como las siguientes:

- “Estos son dos factores que hacen que los líquidos sean un medio eficiente y flexible para transmitir la fuerza y el movimiento.” [1]
- “En ingeniería mecánica se conoce como eje de transmisión o árbol de trasmisión a todo objeto axi-simétrico especialmente diseñado para transmitir potencia...” “Un árbol de transmisión es un eje que transmite un esfuerzo motriz y esta sometido a solicitudes de torsión debido a la transmisión de un par de fuerzas...” “En la actualidad, la mayoría de los automóviles usan ejes de transmisión rígidos para transmitir la fuerza del tubo de transmisión a las ruedas.” [2]
- “Los engranajes son sistemas mecánicos utilizados para transmitir potencia entre ejes en diferentes configuraciones espaciales.” [3]
- “El par de fuerzas M_M del motor que por medio del engranaje (transmisión) se ha convertido en la fuerza motriz F_A con la cual las ruedas actúan sobre la carretera, es decisiva para la potencia propulsora P_A del automóvil.” [4]

Defectos

Todas las tres magnitudes “fuerza”, “par de fuerzas” y “potencia” son corrientes; la fuerza es una corriente de momentum, el par de fuerzas es una corriente de momentum angular y la potencia una corriente de energía. Al igual que ocurre con otras corrientes, estas (o sus valores) se refieren al área por la cual pasa la corriente, expresan la cantidad de momentum, de momentum angular o de energía que pasa de un lugar a otro a tra-

Energía potencial

vés de dicha área. Es decir, expresan cuánto momentum, momentum angular o energía fluye, cuánto se transfiere, transporta o traslada de un cuerpo o sistema a otro; en este caso las formas de expresión empleadas son equivalentes.

Como se refleja en las tres citas iniciales, los términos: “transmitir fuerza”, “transmisión de un par de fuerzas” y “transmitir potencia”, se encuentran tanto en libros como en la red, es posible encontrarlos por medio de distintos buscadores y con diversas entradas en sitios serios del dominio de la tecnología; de manera similar es posible encontrar las expresiones “flujo de fuerza”, “flujo de potencia” y, aunque con menos frecuencia, “flujo de par de momentum”. Podría decirse que dichas expresiones corresponden a un lenguaje técnico establecido, y que son claras, pero sin embargo no son correctas. Lo que se transmite no es la fuerza, sino el momentum, no es el par de fuerzas sino el momentum angular, y tampoco es la potencia sino la energía; así como por una tubería se transmite el agua y no la corriente de agua.

Se podría simplemente hacer notar este lapsus lingüístico a los ingenieros y técnicos, sin embargo, hay que admitir que al menos ellos manifiestan que algo fluye o se transporta.

La cuarta cita, es típica para el trato de las tres magnitudes fuerza, par de fuerzas y potencia en algunos libros de Física. Aquí los tres conceptos no se atribuyen a un transporte sino a un cuerpo u objeto: la potencia al automóvil, el par de fuerzas al motor y la fuerza motriz a la rueda y a la carretera. Se ve cuán inapropiado es este lenguaje cuando se aplica a una corriente de las más aceptadas y “comunes” en Física: la corriente eléctrica. Entonces no se habla de la corriente “del dinamo” o “del motor”, sino se dice que la corriente atraviesa el dinamo o el motor, o se habla de la corriente en un conductor.

Pero, ¿es realmente tan grave hablar de la fuerza de la rueda, etc.? ¿No se entiende bien lo que se quiere decir? El problema es que una manera de expresarse inapropiada genera representaciones mentales incorrectas. En todos los casos mencionados se trata de un proceso de transporte, y este hecho no queda claro cuando se atribuye la fuerza a la rueda, el par de fuerzas al motor, o la potencia al automóvil.

Origen

Una vez más, un tema antiguo ya mencionado y debatido, la idea de una acción a distancia [5]. Se atribuye la fuerza a un cuerpo que la ejerce sobre otro, así como lo hizo NEWTON, pero es de notar que en su época no había otra elección. De manera análoga se trata el par de

fuerzas, pero es particularmente lamentable que la idea de acciones a distancia se encuentre también en el trato lingüístico de la energía en Física, cosa que no ocurre en general en otros campos de la ciencia y la tecnología; los ingenieros no podrían ejercer su profesión con tal opinión. Para ellos es normal que exista una corriente aunque no identifiquen correctamente lo que fluye. Al parecer solamente los físicos continúan desempeñándose empleando un lenguaje del siglo 17.

Eliminación

Se recomienda aclarar en forma explícita que: existe una corriente de momentum de la tierra a la rueda motriz; una corriente de momentum angular a través del árbol cardán, el eje de un motor, o de una turbina; una corriente de energía del motor a las ruedas, o a través de una fibra óptica.

Referencias

- [1] Delmar, *Tecnología mecánica 4*, México: Reverté, 1970. p.116.
- [2] Eje de transmisión. [en línea]. En: https://es.wikipedia.org/wiki/Eje_de_transmisión [consultado el 20 de junio de 2022].
- [3] F. Sánchez et ál., *Mantenimiento mecánico de máquinas*, Castelló de la Plana, Publicacions de la Universitat Jaume I, 2006, p.51.
- [4] J. Grehn u. J. Krause (Hrsg.), *Metzler Physik*, Braunschweig: Schroedel-Verlag, 2007. p.74.
- [5] Véase 1.26 *Acciones a distancia*, p.37

3.31 Energía potencial

Tema

Se encuentran citas como las siguientes:

“En un sistema físico, la energía potencial es energía que mide la capacidad que tiene dicho sistema para realizar un trabajo en función exclusivamente de su posición o configuración. Puede pensarse como la energía almacenada en el sistema, o como una medida del trabajo que un sistema puede entregar. Suele abreviarse con la letra U o E_p . La energía potencial puede presentarse como energía potencial gravitatoria, energía potencial electrostática, y energía potencial elástica.” [1]

“Todo cuerpo que está ubicado a cierta altura del suelo posee energía potencial. Esta afirmación se comprueba cuando un objeto cae al suelo, siendo capaz de mover o deformar objetos que se encuentren a su paso. El movimiento o deformación será tanto mayor cuanto

mayor sea la altura desde la cual cae el objeto. [...] Energía potencial gravitatoria es aquella energía que poseen los cuerpos que se encuentran en altura. Esta energía depende de la masa del cuerpo y de la atracción que la Tierra ejerce sobre él (gravedad).” [2]

“El aumento de energía potencial del satélite es la diferencia entre la Energía potencial en la órbita y la Energía potencial en la superficie terrestre: [...] Para que el satélite se escape desde esa posición necesita una energía que es la energía potencial en esa órbita...” [3]

“Recordemos que hay dos tipos de energía mecánica: la potencial y la cinética. En nuestro caso, la energía potencial del sistema Tierra-satélite (energía debida a la posición) es:...” [4]

Defectos

Las citas anteriores muestran que se suele atribuir la energía potencial a un cuerpo. Si se tiene la concepción de que es posible localizar la energía —y esta es la convicción de la Física desde finales del siglo 19— entonces las citas se interpretarán del modo siguiente: el cuerpo contiene la energía potencial. Esto también significaría que la energía potencial está distribuida dentro del cuerpo de manera inequívoca; sin embargo, esta interpretación no es correcta. La energía potencial no está contenida en un cuerpo, sino en el campo que se encuentra entre los cuerpos.

Lo relacionado con el satélite muestra bien que algo no es correcto; si se atribuye toda la energía al satélite, entonces en el sistema Tierra-Luna se debería atribuir toda la energía potencial a la Luna, y si se consideran dos cuerpos celestes de masas iguales, como un sistema de estrella binaria, entonces toda la energía potencial se atribuiría a una sola de las dos estrellas, lo cual no puede ser correcto por razones de simetría.

A veces también se habla de energía potencial en el caso de un sistema elástico, por ejemplo al analizar dos cuerpos A y B unidos por un resorte C. En este caso se suele atribuir la energía potencial al resorte y no a uno de los cuerpos A o B, lo cual es correcto, pero se presenta un inconveniente con los significados cotidianos de “potencial”: “Que puede suceder o existir, en contraposición de lo que ya existe.” ... “Fuerza o poder disponibles de determinado orden...” [5]. Estas definiciones no concuerdan con el hecho de que la energía está localizada en el resorte; la energía “potencial” está contenida en el resorte del mismo modo que la energía cinética se encuentra contenida en un cuerpo en movimiento. En ambos casos se puede indicar una densidad de energía, es decir, se la puede localizar, y en ambos casos se la puede medir (al menos en principio) por el incremento relativístico de la masa.

Origen

Al parecer este modo de expresarse tiene varias causas:

- El concepto y el nombre provienen de una época (antes del año 1890) cuando aún no era posible localizar la energía.
- El concepto de energía potencial se introduce generalmente por medio del ejemplo de un cuerpo pequeño encima de la superficie de la tierra y se calcula con la ecuación $E = m \cdot g \cdot h$, donde h es la altura del cuerpo encima de la superficie de la tierra, la cual se ha fijado como “punto” de referencia. Por consiguiente h no aparece como una distancia entre dos cuerpos, es decir, el cuerpo pequeño y la tierra, h es la altura del cuerpo pequeño sobre la superficie de la tierra, pero no la altura de la tierra sobre el cuerpo. De este modo se introduce una asimetría entre el cuerpo pequeño y la tierra.
- El concepto se emplea en la discusión de trayectorias de cuerpos en un campo gravitacional, donde por lo general un cuerpo tiene una masa mucho mayor que el otro. Por ejemplo, al considerar la famosa manzana en caída libre se empieza con el balance del momentum y para ello se tienen en cuenta solo dos cuerpos tierra y manzana, el momentum que gana la manzana lo pierde la tierra, y como el campo no tiene casi ningún momentum no contribuye al balance. La situación es muy diferente respecto a la energía, la energía de la tierra (en el sistema de centro de masa) casi no cambia (porque la masa de la tierra es mucho mayor que la masa de la manzana), la energía que recibe la manzana no proviene de la tierra, sino casi completamente del campo gravitacional.
- La situación es igual a la que se presenta cuando se conectan dos cuerpos de masas muy diferentes por medio de un resorte en lugar de un campo. También en este caso el momentum se intercambia entre los dos cuerpos, mientras la energía se intercambia casi solamente entre el cuerpo ligero y el resorte.

Eliminación

Solución inicial: se recomienda evitar formulaciones que atribuyen la energía potencial a un cuerpo, como por ejemplo: “La energía potencial del sistema tierra-cuerpo de masa m respecto a un sistema de referencia arbitrario es...”. Aunque la frase anterior es mejor que las citas iniciales, sin embargo, sigue inculcando la idea de acciones a distancia, ya que menciona solamente la tierra y el otro cuerpo como componentes del “sistema”; no se menciona el campo como parte fundamental del sistema total.

Solución total: introducir desde el comienzo el campo como tercer participante e indicar dónde se en-

Una vez más, la energía potencial

cuenta localizada la energía, es decir, precisamente en dicho campo. Además no llamar a la energía almacenada en un resorte energía potencial.

Referencias

- [1] Energía potencial. [en línea]. En: https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_potencial [consultado el 15 de enero de 2022].
- [2] Energía potencial. [en línea]. En: <https://www.profesorenlinea.cl/fisica/EnergiaPotencial.htm> [consultado el 15 de enero de 2022].
- [3] Tema: Campo gravitatorio. [en línea]. En: <https://www.youtube.com/watch?v=aueELBk9tnI> [consultado el 15 de enero de 2022].
- [4] La elipse y la parábola en la Física. [en línea]. En: <http://rincondelaciencia.educa.madrid.org/Curiosid/rc-79/rc-79.html> [consultado el 15 de enero de 2022].
- [5] Potencial. [en línea]. En: <https://www.wordreference.com/definicion/potencial> [consultado el 14.09.2022].

3.32 Una vez más, la energía potencial

Tema

Se encuentran las siguientes afirmaciones o definiciones sobre la energía potencial:

- 1 (Texto universitario) “Si se alza un cuerpo de masa m a una altura z cerca del suelo, se realiza un trabajo contra la fuerza de la gravedad $m \cdot g$

$$W = E = m \cdot g \cdot z$$

Se encuentra en forma de energía en el cuerpo; se la puede convertir, en cualquier momento, en energía cinética si se deja caer el cuerpo.”

- 2 (Texto para secundaria) “Para alzar un cuerpo de masa m en la tierra a la distancia Δr , hay que suministrarle energía. En el proceso, su energía potencial aumenta en...”
- 3 (Wikipedia, versión alemana, palabra clave: energía potencial) “Para conseguir un movimiento contra la fuerza gravitacional, hay que realizar trabajo en el cuerpo, que ahora se almacena en él como energía potencial.”
- 4 (Texto universitario) “... se llama V a la energía potencial del punto de masa $m...$ ”
- 5 (Texto universitario) “Este trabajo se almacena como energía potencial $m \cdot g \cdot z$ en el sistema tierra–esquiator.”

- 6 (Texto para secundaria) “La energía de posición o energía potencial del sistema Tierra–cuerpo de masa m con respecto a un nivel de referencia libremente seleccionable es $E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot z$.

... La energía de tensión o energía potencial del resorte con la constante del resorte D , que se tensa desde el estado relajado por la distancia s , es...”

- 7 (Texto universitario) “En muchos casos, el trabajo realizado en un sistema no produce un cambio de la energía cinética como lo haría con un punto de masa, sino que se “almacena” como energía potencial.”
- 8 (Texto universitario, física teórica) “Además de la energía cinética, definimos la energía potencial V por... $V = E_{\text{pot}} = -\int F \cdot dx$ ”
- 9 (Una Enciclopedia, 1926) “La energía mecánica inherente a un cuerpo es la consecuencia, o bien de su posición con respecto a su entorno (por ejemplo, tratándose de una carga alzada, o de agua embalsada), o bien (por ejemplo, en el caso de los cuerpos elásticos) de la posición de sus partes más pequeñas entre sí (energía de posición, energía potencial, también ‘fuerza de tensión’)...”

- 10 (Texto universitario, 1936) “La capacidad de un cuerpo de realizar un trabajo como resultado de su posición o de la disposición de sus partes, etc., se denomina energía potencial. La energía potencial... se mide por el producto de la fuerza actuante...”

- 11 (Una Enciclopedia, 1910, palabra clave energía) “La energía puede ser real, es decir, en proceso de realizar trabajo, la energía cinética, o puede estar presente sin realizar efectivamente trabajo, como energía en reposo, potencial o estatica.”

Defectos

Para la energía (como para otras magnitudes extensivas), se puede especificar una densidad y una densidad de corriente, es decir, se puede decir dónde se encuentra la energía y qué camino sigue cuando fluye.

¿Qué pasa con la energía potencial en este contexto? ¿Dónde se encuentra la energía potencial en las diferentes situaciones que se están discutiendo?

Es una pregunta a la que los estudiantes y alumnos no obtienen respuesta alguna, o una de varias respuestas que no encajan adecuadamente.

- 1 Consideraremos primero el caso de un cuerpo alzado en la tierra.

Entre las citas referidas, la primera es la más clara: la energía potencial está en el cuerpo. El “esta en” es un lenguaje claro y comprensible, expresa perfectamente dónde se encuentra la energía.

Las citas 2 y 3 también lo dicen: la energía potencial del cuerpo aumenta o se almacena en él, y un libro de

texto de física teórica, la cita 4, también lo menciona: *V* es la energía potencial de un punto de masa. (Por cierto: ¿diría también el autor que *m* es la masa de un punto de energía?)

Ahora bien, hay un problema con esto. Si la energía está contenida en el cuerpo u objeto, ¿la energía potencial de la Luna también está contenida en ella? O si se considera un sistema estelar binario con dos estrellas de igual masa. ¿Cuál de las dos tiene ahora la energía potencial? O, volviendo al ejemplo inicial, un cuerpo pequeño, digamos una piedra, “en el campo gravitacional de la Tierra” (como suele decirse), también se puede invertir la situación, haciendo mover la Tierra en el campo gravitatorio de la piedra. Se obtiene el mismo valor para la “energía potencial”. ¿La energía potencial de quién? ¿La de la Tierra esta vez?

Por ello, algunos autores son más prudentes. Así, en las citas 5 (texto universitario) y 6 (texto para secundaria), la energía se almacena en el sistema formado por la Tierra y el otro objeto (esquiador o cuerpo). Esto significaría que en el caso de la Luna se almacena en el sistema Tierra-Luna, y en el caso del sistema estelar doble en dicho sistema. Pero cómo se debe entender esto, ¿se distribuye entre los dos cuerpos? Si es así, ¿en qué proporción? No se dice que los autores posiblemente tengan en mente que el sistema Tierra-cuerpo también incluye un campo. ¿Se cree que el lector aún no está preparado para esto?

Otros autores son aún más prudentes, la energía simplemente se almacena, cita 7, pero no se revela dónde se almacena. Es una expectativa razonable del lector saber esto, ya que cuando se habla de “almacenar” se está aludiendo claramente a una concepción cuantitativa de la energía, y si se almacena cualquier cantidad, debe haber un lugar donde se haga.

- 2 Del modo en que se introduce la energía potencial en los libros de texto universitarios, a saber, como una integral de línea de la fuerza en un “campo de fuerza conservativo” (cita 8), se deduce que el concepto no debe limitarse a los campos gravitacionales. Por tanto, también se pueden formular los teoremas correspondientes cuando se desplaza una “carga de prueba” en el campo eléctrico de otro cuerpo cargado, o simplemente cuando se hala de un resorte elástico. Aquí es obvio que no se puede decir que la energía está en la carga de prueba o en el gancho del extremo móvil del resorte. Aquí no hay duda de que la energía está localizada en el campo eléctrico o en el resorte, así figura en la cita 6. Sin embargo, podría haberse expresado con mayor claridad. Casi es divertida la formulación de la Enciclopedia de 1926 (cita 9). Se puede ver cómo el

autor se resiste a incluir un campo en la explicación de lo que ocurre.

- 3 Independientemente de dónde se sitúe la energía, se genera en cualquier caso la impresión de que la energía es esencialmente una magnitud mecánica, lo cual genera innecesarias complicaciones para posteriores temas de enseñanza.
- 4 Por último, el nombre. ¿Por qué debe llamarse energía potencial solo porque se almacena en un sistema en reposo? No se dice de un condensador cargado que tenga carga potencial en sus placas.

Origen

La verdad es que son variadas las posibles causas del origen. Aunque cuando JOULE y MAYER introdujeron la energía, estaba claro que se trataba de una magnitud que describe tanto procesos mecánicos como térmicos, la creencia generalizada en el siglo XIX de que el mundo puede explicarse esencialmente de forma mecánica ha dejado probablemente su huella. La mecánica puntual hamiltoniana contribuyó sin duda a esta visión. Los trabajos de PLANCK [1], POYNTING [2] y HEAVISIDE [3], y el excelente artículo de revisión de MIE de 1898 [4] no pudieron cambiar nada, tampoco el desarrollo de la termodinámica por GIBBS y HELMHOLTZ. ¿Por qué seguimos aprendiendo y enseñando un teorema de conservación de la energía mecánica, pero no uno de la energía eléctrica o química? “La energía es una integral del movimiento” es el credo de la física teórica. Los procesos de fricción son un mal en este mundo que se procuran evitar.

Y una vez más el término “potencial”. Un cuerpo que está a gran altura sobre la superficie de la Tierra tiene más energía que uno que está más abajo. ¿Pero cómo puede ser eso? Habría que esperar que la energía del objeto sea perceptible de alguna manera, que se mueva, que esté caliente, que esté bajo presión, etc. Pero los dos cuerpos no difieren en nada, salvo en su “posición”. Sin embargo, ¿se supone que uno tiene más energía que el otro? El término “potencial” parece ser apropiado. Ciertamente, mientras no se conocieron los campos, lo que distinguía el cuerpo con mayor altitud era solo su posición, una promesa, por así decirlo, si se da la oportunidad, realizaré el trabajo.

Pero incluso mucho después de que se descubriera la identidad de la masa y la energía, se seguía utilizando el antiguo lenguaje, (citas 10 y 11). En un respetado libro universitario (cita 10), reimpresso aún en 1957, la energía es una “capacidad”.

Eliminación

Se recomienda indicar claramente dónde está la energía, en cuánto cambia, qué recorrido hace cuando fluye.

La ley de conservación del momentum angular

(Hacer lo propio para las otras magnitudes extensivas, especialmente para el momentum y la entropía).

Al halar de un resorte, la energía se almacena en él y, en el caso de un resorte normal, se distribuye uniformemente a lo largo de su longitud.

Cuando un cuerpo cargado se mueve en presencia de otro, la energía se almacena en el campo eléctrico (o se saca del campo). Es el campo que está realmente presente, es decir, no solo el campo de uno de los dos cuerpos. Todos los estudiantes (incluyendo los de secundaria) deberían conocer la fórmula de la densidad de energía. Al cargar una batería, es... etc.

Se puede presentar un problema cuando se trata del campo gravitacional, aquí la densidad de energía es negativa. Esto es inevitable mientras la descripción no se haga con la relatividad general.

Cuando un cuerpo cae, su energía aumenta. Proviene del campo gravitacional, cuya configuración está determinada por la Tierra y el cuerpo considerado. La del campo disminuye en el proceso, es decir, la cantidad de "energía negativa" del campo aumenta.

Para describir el flujo de energía, se necesita una segunda intensidad de campo, la intensidad de campo "gravitomagnético", al igual que en electrodinámica se necesita la intensidad de campo magnético además de la intensidad de campo eléctrico para calcular el vector de POYNTING.

Las fuerzas gravitomagnéticas (que corresponden a las fuerzas magnéticas de la electrodinámica) son sumamente pequeñas para la mayoría de las aplicaciones terrestres debido a la pequeñez de la constante de acoplamiento de la gravitación. En cambio, el campo gravitomagnético se manifiesta muy claramente a través del flujo de energía. Aunque no se quiera calcular su campo de flujo, es importante saber que podría hacerse, porque solo así se puede utilizar un lenguaje coherente para describir la gravitación, la energía que obtiene el cuerpo que cae proviene del campo gravitacional. No hace falta decir que solo está potencialmente presente.

Referencias

- [1] M. Planck, *Das Prinzip der Erhaltung der Energie*, Verlag von G. B. Teubner, Leipzig und Berlin, 1908 (erste Auflage 1887), S. 117–118
- [2] J. H. Poynting, *On the transfer of energy in the electromagnetic field*, Phil. Trans. A, 1884, S. 343–361.
- [3] O. Heaviside, *The Electrician* 27, 3. Juli 1891
- [4] G. Mie, *Entwurf einer allgemeinen Theorie der Energieübertragung*, Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften. CVII. Band VIII. Heft (1898), S. 1113

3.33 La ley de conservación del momentum angular

Tema

A menudo la ley de conservación del momentum angular se introduce de la siguiente manera: considerando una masa puntual, el vector \vec{r} —que define la posición del cuerpo respecto a un origen arbitrariamente escogido— se multiplica vectorialmente por cada uno de los términos de la segunda ley de NEWTON

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

esto es

$$\vec{r} \times \vec{F} = \vec{r} \times \frac{d\vec{p}}{dt},$$

para obtener la relación entre el momentum de fuerza \vec{M} (por algunos autores llamado torque $\vec{\tau}$) el cambio temporal del momentum angular:

$$\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt}.$$

Luego se aplica la expresión a dos (o más) cuerpos —con masas puntuales m_1 y m_2 —, teniendo en cuenta que para las fuerzas internas es válida la siguiente relación:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21},$$

y que las fuerzas forman un ángulo cero con el vector ($\vec{r}_1 - \vec{r}_2$). Se encuentra que el cambio temporal del momentum angular del sistema de puntos de masa es igual a la resultante de los momentum de fuerza externos, de lo cual se colige la ley de la conservación del momentum angular: "El momentum angular es constante en el tiempo mientras no existan momentum de fuerza externos."

Defectos

Se han esbozado de modo sucinto solamente los argumentos principales que se presentan en la introducción de esta ley de conservación, ya que se supone que el lector conoce la derivación detallada, la cual en un libro de texto puede extenderse a varios renglones. Para el estudiante la "deducción" no es difícil de comprender si la sigue paso a paso, y probablemente al final esté convencido de la validez de la ley de conservación del momentum angular; pero tendrá problemas si se le pregunta qué ha sido demostrado con el mencionado procedimiento. Se comienza con la segunda ley de NEWTON, es decir, con la ley de conservación del momentum lineal y se llega a la ley de conservación del momentum angular.

Es inevitable que le quede la impresión de que la conservación del momentum angular puede ser deducida matemáticamente de la conservación del momentum lineal, lo cual no es correcto. Es poco probable que algún estudiante comprenda cuál fue el “truco” mágico empleado, posiblemente ni siquiera sospeche que hay un truco. En realidad aquí no se ha derivado la ley de la conservación del momentum angular de la ley de conservación del momentum lineal, más bien se ha insertado —sin decirlo— la ley de conservación del momentum angular en el procedimiento; efectivamente, la afirmación de que la fuerza \vec{F}_{12} tiene la misma orientación que el vector $\vec{r}_1 - \vec{r}_2$ es equivalente a la ley de conservación del momentum angular.

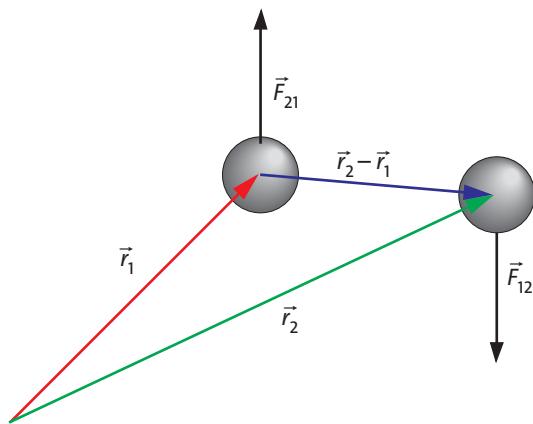


Fig. 3.20 Las fuerzas ejercidas sobre los dos cuerpos no son paralelas a la línea que une los cuerpos. Si ello ocurriera la ley de conservación del momentum angular no se cumpliría.

La Fig. 3.20 muestra algo que en realidad no existe. Los cuerpos ejercen fuerzas el uno sobre el otro que son del mismo módulo y de dirección opuesta

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21},$$

pero estas fuerzas no tienen la misma orientación que $\vec{r}_1 - \vec{r}_2$.

Se ve que las fuerzas obedecen a la tercera ley de NEWTON, con lo cual es válida la ley de conservación del momentum lineal, sin embargo se tiene un momentum de fuerza y por consiguiente el momentum angular del sistema debería aumentar sin que exista un momentum de fuerza exterior.

Tales fuerzas, que no son paralelas a la línea que conecta los dos centros de masa no existen, están prohibidas por la ley de conservación del momentum angular.

En conclusión, la afirmación de que las fuerzas \vec{F}_{12} y \vec{F}_{21} son paralelas al vector $\vec{r}_1 - \vec{r}_2$ es equivalente a la ley de la conservación del momentum angular.

Regresando al tema se puede resumir diciendo que se presenta un procedimiento algo extenso y en cierto momentum se introduce disimuladamente (sin hacerlo explícito) la ley de conservación del momentum angular, y al final se celebra que se ha obtenido dicha ley; pero si es así, ¿para qué todo el procedimiento de cálculo?

Origen

Las leyes de NEWTON son ni más ni menos que la representación de la conservación del momentum lineal. Debido a su enorme éxito se ha extendido la opinión de que estas leyes no son solamente un sencillo teorema de conservación sino el “Non plus ultra” de la Física llamada clásica, la base desde la cual todo el resto se deduce. A veces incluso se pretende deducir el teorema de la conservación de la energía, —otra vez por medio de un “truco”—, pero esto será tema para otro COF.

Eliminación

Introducir el momentum angular como magnitud propia, para la cual es válido el principio de conservación. Esto no excluye que se pueda mostrar cómo el momentum angular de un sistema de puntos de masa esta relacionado con los momentum lineales de los componentes del sistema.

3.34 La presión dinámica

Tema

Para el flujo estacionario y exento de rozamiento de un fluido incompresible es válida la ecuación de BERNOULLI:

$$p + \rho \cdot g \cdot h + \frac{\rho}{2} v^2 = \text{constante.}$$

Donde p es la presión, ρ la densidad, g la constante gravitatoria, h la altura y v la velocidad. Por constante se entiende que la suma de la izquierda de la ecuación no cambia su valor al moverse a lo largo de una línea de corriente.

Defectos

En general la ecuación se interpreta diciendo que existen varios tipos de presión: la presión p , la presión hidrostática $\rho \cdot g \cdot h$ y la llamada presión dinámica $\rho/2 \cdot v^2$. La ecuación de BERNOULLI nos dice que la suma de estas tres presiones, bajo las condiciones mencionadas, es constante.

El vuelo del avión

- Allí donde el líquido fluye rápidamente, la presión es menor que donde fluye más despacio.
- La presión es mayor abajo que arriba.

En estas afirmaciones no existe más que una sola presión y es la magnitud p en la ecuación de BERNOULLI, los términos

$$\rho \cdot g \cdot h \text{ y } \rho/2 \cdot v^2$$

tienen dimensión de presión, pero no son lo que normalmente se entiende por ella; en general los sumandos de una ecuación no representan necesariamente la misma magnitud física.

Origen

No se conoce ninguna situación histórica que justifique la interpretación mencionada, probablemente fue resultado del intento de representar la presión como magnitud que obedece a una especie de ley de conservación. La formulación “la presión total es constante” recuerda en cierto modo un principio de conservación: “En un sistema aislado la carga eléctrica (o energía, o momentum,...) permanece invariable con el tiempo.” Afirmaciones de esta clase son muy apreciadas ya que son fáciles de formular y tienen una validez muy amplia; quizás se pensó que la presión también podía ser miembro de la egregia compañía de magnitudes conservativas. Esta interpretación la refuerza el hecho de que el principio de BERNOULLI podría deducirse a partir de la conservación de la energía.

Sin embargo, pensamos que aquí se abusa del concepto de presión, no se puede convertir la presión en magnitud conservativa ya que no cumple con un criterio importante para tales magnitudes: el de ser extensiva, la presión no lo es.

Se podría objetar que llamar “presión dinámica” a la expresión $(\rho/2) \cdot v^2$ no es incorrecto, ya que el solo hecho de atribuir un nombre a algo no es ni correcto ni falso, sin embargo, el “dar nombre” a una magnitud puede ser más o menos apropiado, particularmente en los procesos de enseñanza.

La presión es una magnitud muy intuitiva, llamar presión a la expresión $(\rho/2) \cdot v^2$ llevaría al estudiante a pensar que la presión es en el fondo una magnitud difícil de entender, el adjetivo “dinámico” complica más la situación.

Eliminación

Interpretar la ecuación de BERNOULLI así: la presión disminuye cuando aumenta la altura y/o cuando aumenta la velocidad. Ambas afirmaciones son intuitivas.

3.35 El vuelo del avión

Tema

La explicación de cómo y porqué vuela un avión se expone no solamente en libros especializados sino también en libros escolares, libros de universidad y libros de divulgación, una breve revisión basta para notar que se presentan varias explicaciones distintas. En un libro una, en otro una diferente y en algunos incluso varias simultáneamente, las más corrientes son:

- La velocidad del flujo en el lado superior del ala es mayor que en el lado inferior. Según la ecuación de BERNOULLI resulta que la presión es más alta debajo del ala que encima de ella.
- Las partículas del aire se reflejan o rebotan en la superficie del ala. En el lado inferior la transferencia de momentum es mayor que en el lado superior.
- Alrededor del ala se forma una corriente de circulación, de la cual resulta un componente de la fuerza dirigido hacia arriba.

Estas explicaciones no se refieren a mecanismos de sustentación distintos, son solamente diferentes modos de ver un mismo fenómeno.

Defectos

- 1 En muchos casos las explicaciones son incomprendibles, se satura al lector con detalles y términos técnicos: desprendimiento de la capa límite, número de REYNOLDS, ángulo de ataque, coeficiente de sustentación, resistencia por forma, circulación, vórtice, viscosidad, ley de STOKES, fricción de NEWTON y de STOKES, ecuación de BERNOULLI, flujo turbulento, etc.
- 2 Se encuentran textos en los cuales se sugiere que los procesos arriba mencionados obedecen a mecanismos diferentes, en uno de ellos se dice que en la parte inferior las moléculas transfieren momentum y que además en la superficie superior se presenta una depresión.
- 3 En el contexto del proceso de enseñanza-aprendizaje es muy importante analizar qué clase de respuesta será satisfactoria para un alumno que pregunte: ¿por qué vuela un avión? Creemos que ninguna de las explicaciones arriba mencionadas. Para mostrarlo se puede considerar una situación diferente, que sin embargo tiene algo en común con el avión. Qué respuestas se obtendrán si en lugar de preguntar “¿por qué vuela un avión?”, se pregunta “¿por qué el jarrón que se encuentra en la mesa cercana, no cae al suelo?”

Un maestro hipotético, que para explicar la sustentación del avión recomienda la ecuación de BERNOULLI, debe-

ría en consecuencia contestar: "La superficie sobre la cual se encuentra el jarrón es elástica, se comporta como un resorte comprimido, y por ello ejerce una fuerza sobre la superficie inferior del jarrón." Esta afirmación no es falsa, sin embargo, es probable que al alumno que formula la pregunta no le interese mucho saber porque la superficie ejerce una fuerza sobre el jarrón. El asunto del ala es similar, si se explica cómo el aire empuja el ala hacia arriba, no se tendrá la impresión de haber captado lo esencial del vuelo.

Otro maestro hipotético, que utilice las moléculas para su explicación, podría contestar a la pregunta: "El jarrón no cae a la tierra porque entre las moléculas de la superficie de la mesa y las del jarrón existe una interacción repulsiva que se describe en la mecánica cuántica." Esta respuesta no hará feliz al interrogador, como tampoco al alumno que quiere saber porqué vuela el avión. ¿Es imprescindible acudir a la física atómica para comprender la sustentación aerodinámica?

Al parecer, nuestros maestros hipotéticos no han escuchado bien la pregunta, han transformado la pregunta original en otra que les permite mostrar su erudición. La han transformado en un ejemplo de aplicación del principio de adición de fuerzas, o de la física atómica y se les puede reprochar que en sus respuestas no haya ninguna referencia a la tabla de la mesa y sus patas. Como se hace a menudo en las clases de física, se reformula la pregunta del alumno de tal manera que esta tenga una respuesta rápida o que permita mostrar la "superioridad" del maestro.

Antes de volver al avión, ¿por qué no cae al suelo un helicóptero? La respuesta que da la física a esta pregunta es muy distinta a la referente al avión, la física dice lo mismo que diría un profano: el helicóptero vuela porque la hélice empuja el aire hacia abajo. La física añade: se debe empujar el aire hacia abajo porque el helicóptero recibe continuamente momentum de la tierra (el vector momentum va dirigido hacia ella) y dicho momentum no debe acumularse en el helicóptero (si no se quiere que caiga), él tiene que desprendérse del momentum y el único modo de hacerlo es transmitirlo al aire.

Ahora bien, es lo mismo para el avión, este tiene que deshacerse del momentum que recibe de la tierra y la única posibilidad de conseguirlo es pasarlo al aire, acelerándolo hacia abajo. Eso lo hacen las alas al moverse el avión hacia adelante.

La razón de que vuele un avión no solamente es la misma por la cual lo hace un helicóptero, sino también la que explica el porqué un paracaídas desciende a velocidad constante y por qué un ventilador pone el aire en movimiento. Todos estos fenómenos se pueden explicar con la ecuación de BERNOULLI, con los choques de las

moléculas o con la corriente de circulación, pero en todos ellos se sopla el aire hacia abajo o adelante, es decir, se transfiere momentum al aire. Esta es, en nuestra opinión, una explicación satisfactoria para una persona que no aspira ser especialista en aerotecnia.

Origen

Lo que se encuentra al respecto en muchos libros y textos generales (para el no especialista) no es otra cosa que literatura especializada para físicos o ingenieros que no ha sido procesada al nivel elemental requerido. Claro que para calcular el perfil de un ala hay que conocer el campo de flujo del aire y es necesario analizar en dicho campo sus componentes con y sin rotación, para poder aplicar la teoría potencial al cálculo de un perfil. Pero no es adecuado proponer y menos "obligar" a que estos temas sean parte de nuestra cultura general, es decir, parte de la educación media no especializada.

Eliminación

Es suficiente la siguiente explicación: el avión debe empujar el aire hacia abajo, al igual que un pájaro, un insecto, un helicóptero, un disco volador (frisbee) o un bumerang e incluso un paracaídas, ya que todos estos objetos tienen que desprendérse del momentum que les suministra la tierra. El aire que se mueve hacia abajo devuelve este momentum a la tierra.

3.36 La caída del gato

Tema

Es conocida la historia del gato. Se lanza el gato hacia arriba en cualquier orientación o simplemente se deja caer: siempre ocurrirá un aterrizaje suave sobre sus cuatro patas estiradas de par en par. Si se tiene un poco de educación científica, se podría pensar que la ley del momentum angular se haya temporalmente suspendido. Pero si se consulta la Wikipedia (versión inglés), bajo la palabra clave "Falling cat problem", se sabrá que todo esta en orden:

"La solución del problema, originalmente debida a Kane & Scher, modela el gato como un par de cilindros (las mitades delantera y trasera del gato) capaces de cambiar sus orientaciones relativas. Montgomery describió posteriormente el modelo de Kane-Scher en términos de una conexión en el espacio de configuración que encapsula los movimientos relativos de las dos partes del gato permitidos por la física. Enmarcada de este modo, la dinámica del problema de la caída del gato es un ejemplo prototípico de sistema no holonómico, cuyo

La caída del gato

estudio es una de las preocupaciones centrales de la teoría de control. Una solución del problema del gato que cae es una curva en el espacio de configuración que es horizontal con respecto a la conexión (es decir, es admisible por la física) con configuraciones iniciales y finales prescritas. Encontrar una solución óptima es un ejemplo de planificación óptima del movimiento.

En el lenguaje de la física, la conexión de Montgomery es un cierto campo de Yang-Mills en el espacio de configuración, y es un caso especial de una aproximación más general a la dinámica de los cuerpos deformables representada por campos de gauge, siguiendo el trabajo de Shapere & Wilczek.¹

Defectos

No se ha podido averiguar que la nota de Wikipedia fue una sátira, normalmente se habría eliminado después de algún tiempo.

En primer lugar, veamos brevemente cuál es el problema. Se percibe como sorprendente, si no contradictorio, que el gato consiga la rotación. Se tiene la impresión de que hay un problema con la ley de conservación del momentum angular. Esta preocupación aparentemente se confirma cuando se leen explicaciones como la citada anteriormente. Pues el truco que utiliza el gato no parece ser sencillo.

Y ahora los defectos

- 1 Girar no es una habilidad especial de los gatos. Los humanos y otros animales suficientemente ágiles también pueden hacerlo. Hagan la prueba por sí mismos...
- Párese en una sola pierna en un suelo liso (preferiblemente con suelas de zapatos lisas, o incluso mejor en calcetines).
- Hagan un cuarto de vuelta alrededor del eje vertical.

No se explica cómo deben hacerlo, pues se quiere demostrar que puede hacerse sin mayores instrucciones.

- 2 Lo que el gato consigue hacer (o lo que usted acaba de hacer) no es más notable que muchas otras hazañas que realizamos todo el tiempo y sobre las que no reflexionamos (tal vez erróneamente) en las clases de física: caminar erguido, correr, montar en bicicleta, montar en bicicleta a mano alzada, patinar sobre hielo, caminar por la cuerda floja...
- 3 Se hace un esfuerzo innecesario para resolver la aparente contradicción.

Origen

- 1 La discusión del problema tiene una larga tradición. MAXWELL y STOKES —James Clerk MAXWELL (1831

—1879) y George Gabriel STOKES (1819–1903)—, pero también muchos otros, se han ocupado de ello.

- 2 Revela el niño que hay en el hombre (o la mujer).
- 3 Nosotros, los físicos, podemos mostrar así al resto de la humanidad, es decir, al 90 % de la población que no se preocupa por su analfabetismo físico, que la física no solo se ocupa de las partículas de HIGGS —Peter Ware HIGGS (1929)—, los fotones entrelazados y la energía oscura, que no les interesan. Incluso para entender a su querida mascota, uno necesita la física.
- 4 Quizás también una relación algo tensa con el momentum angular.

Eliminación

Un divertido efecto para mostrar en clase. Como se ha dicho, no se necesita un gato. Para excluir visiblemente la fricción durante la rotación, se pide a un alumno que se siente en una silla giratoria y rote horizontalmente sin apoyarse en el suelo; todos pueden hacer eso.

¿Qué tiene de interesante el experimento? En primer lugar, el hecho de que el experimento análogo de la mecánica de traslación no funciona.

Se vería así: dos vagones A y B; Willy (el protagonista del Curso de Física de Karlsruhe) se sienta en el vagón A y, halando o empujando al vagón B, o agitándolo de un lado a otro, intenta desplazar el centro de masas de todo el sistema, Fig. 3.21.

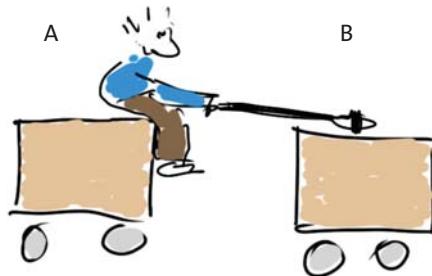


Fig. 3.21 El centro de masas no puede desplazarse.

Como sabemos, esto no funciona. También se puede demostrar fácilmente de forma teórica:

Con

$$p = m \cdot v$$

y

$$\Delta s = \int v dt$$

obtenemos

$$\Delta s = \frac{1}{m} \int pdt$$

y con esto

$$m\Delta s = \int pdt$$

Esto se aplica tanto al vagón A (con Willy) como al vagón B. Debido a la conservación del momentum, se deduce que:

$$m_A \Delta s_A = -m_B \Delta s_B$$

Cualquier desplazamiento Δs_A del vagón A esta asociado a un desplazamiento

$$\Delta s_B = -\frac{m_A}{m_B} \Delta s_A \quad (3.13)$$

del vagón B. Esto significa que el centro de masas del sistema de los vagones no se desplaza, independientemente de los movimientos que realice Willy. Y si al final la distancia entre los vagones es la misma que al principio, las posiciones de ambos vagones también vuelven a ser las mismas. Sin embargo, un requisito previo para esta conclusión era que las masas m_A y m_B no se modificaran.

Pero también se quiere investigar qué ocurre cuando se permiten cambios de las masas.

El vagón A esta inicialmente vacío y es ligero, el vagón B esta cargado de arena y es pesado. Willy se sienta de nuevo en el vagón A y hala del pesado vagón B con la ayuda de una barra. B se mueve poco, A mucho. Luego, B se descarga y A se carga, es decir, ahora A es pesado y B es ligero. Willy se empuja de B con la ayuda de la barra. Ahora A se mueve un poco y B mucho. Al final, la distancia entre A y B es la misma que al principio, pero todo el sistema se ha desplazado hacia la derecha. Esto fue posible porque las masas se modificaron: la relación m_A/m_B no era la misma cuando se acercaba que cuando se alejaba. No es de extrañar que el centro de masas de los dos vagones ya no esté donde estaba al principio. En cierta medida, se hizo "trampa". La historia solo es interesante porque el análogo de rotación se hace de manera muy similar. Sin embargo, no hay trampas en este caso.

Consideremos dos mancuernas que pueden girar alrededor de un eje común, Fig. 3.22. En lugar de un desplazamiento neto, queremos conseguir una rotación neta.

Se aplica una ecuación análoga a (3.13):

$$\Delta\alpha_B = -\frac{J_A}{J_B} \Delta\alpha_A \quad (3.14)$$

(donde: α es el ángulo de rotación y J el momentum de inercia. La derivación es igual a la anterior).

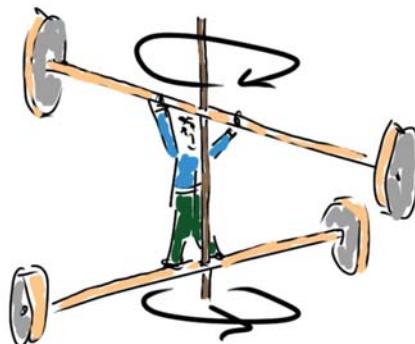


Fig. 3.22 Girando las mancuernas en un sentido y en otro, se puede cambiar la orientación si se modifica el momentum de inercia de una mancuerna durante el proceso moviendo las pesas en los extremos.

Si nos colocamos sobre la mancuerna inferior y tratamos de girar la superior, la inferior también girará y los ángulos de rotación estarán en la relación dada por la ecuación (3.14).

Si dejamos los momentum de inercia inalterados, a cada $\Delta\alpha_A$ le corresponde un $\Delta\alpha_B$ específico dado por la ecuación (3.14). Si giramos en un sentido y al revés, cada una de las mancuernas acabará apuntando de nuevo en la dirección original.

Pero esta vez se pueden cambiar los momentum de inercia sin cambiar la masa, sin cargar ni descargar arena. Si se realiza un giro primero en un sentido y después en otro y se asegura que el momentum de inercia J_A es mayor durante el primer giro que durante el giro hacia atrás, queda un ángulo neto de giro. Esto es exactamente lo que hace un gato o un ser humano cuando gira.

4 FÍSICA RELATIVISTA

4.1 El nombre teoría de la relatividad

Tema

Las dos grandes teorías de EINSTEIN —Albert EINSTEIN (1879–1955)— se llaman teorías de la relatividad, la Especial (TRE) y la General (TRG). Se basan en el principio de relatividad: las leyes de la Física tienen la misma forma para todos los observadores. En la TRE, el principio se aplica inicialmente solo a los sistemas de referencia que se mueven uniformemente entre sí. En la TRG, se generaliza a los sistemas de referencia acelerados.

Defectos

El nombre teoría de la relatividad indica que los cambios del sistema de referencia desempeñan un papel especial en las teorías de EINSTEIN. Sin embargo, eso también da la impresión de que los cambios del sistema de referencia son el tema principal de las teorías, lo cual se refleja en la enseñanza, especialmente en el caso de la TRE. Antes de llegar a los enunciados interesantes de la teoría, es necesario abrirse paso a través de las intrincadas consideraciones en relación con los sistemas de referencia que se mueven unos respecto a otros, con el resultado de que los alumnos (en la escuela y la universidad) pierden rápidamente el interés por el tema.

Si pensamos en lo que se contaría sobre la TRE a alguien que no está dispuesto a escuchar más de dos minutos, no sería sensato decirle que el principio de relatividad debe aplicarse. Aquí algunas sugerencias mejores:

- El espacio y el tiempo se funden en uno. (Se sugiere que esta formulación de dejé en tercer lugar. Su explicación requiere tiempo.)
- Los trivectores se convierten en cuadrivectores.
- La energía y la masa son la misma magnitud física.
- Existe una velocidad límite.

Se podría objetar que el nombre no es importante a la hora de entender una teoría. Algunos tienen otra opinión. En nuestra experiencia, el éxito de la enseñanza depende en gran medida de la forma en que se hable y, sobre todo, de los nombres que se utilicen. *Nomen est omen*: si, basándose en el nombre, uno ha llegado a la opinión de que el interés principal de la TRE está en los cambios del sistema de referencia, entonces concebirá y realizará las lecciones en consecuencia.

Los que conocen bien las teorías pueden sentir poca simpatía por estas preocupaciones. Pero no son los expertos los que nos preocupan. Se trata más bien de aquellos para los que la física “relativista” no es más que uno de los muchos temas de clase. Lo que queda es el recuerdo de un comportamiento de alguna manera complicado de las longitudes e intervalos de tiempo cuando se cambia el sistema de referencia. De todos modos, la ecuación $E = mc^2$ se conocía desde antes, porque se encuentra en grafitis, títulos de libros o sellos postales, etc. Se pierde lo que realmente constituye la teoría.

Origen

El nombre se originó al poco tiempo de surgida la teoría. En 1906, PLANCK —Max Karl Ernst Ludwig PLANCK (1858–1947)— cambió por primera vez el nombre de “Teoría de LORENTZ-EINSTEIN” por el de “Teoría de la Relatividad”, que también fue utilizado por EINSTEIN a partir de 1907.

Imaginemos, por un momento, que el curso de la historia hubiera sido algo diferente, que la TRE hubiera surgido de otra manera, por ejemplo, a partir de la observación experimental de que la energía tiene inercia y gravedad, es decir, que la energía y la masa son la misma magnitud física. ¿Cómo se habría llamado entonces la teoría? ¿Quizás la teoría de equivalencia? Sin duda, se habría desarrollado una tradición de enseñanza completamente diferente.

Eliminación

En lugar de Teoría de la Relatividad o física relativista, dar al capítulo correspondiente un título diferente, por ejemplo, como lo hace WHEELER: *Física del espaciotiempo*. O bien, si se puede optar por comenzar el tema con la dinámica en lugar de la cinemática, el título podría ser algo así como: *La velocidad límite*, o *La identidad de la masa y la energía*.

Los postulados de la teoría de la relatividad

4.2 Los postulados de la teoría de la relatividad

Tema

En un libro de texto se lee: “**Esto es importante: la teoría de la relatividad se basa en dos postulados...**, a saber, el principio de relatividad y la invariancia de la velocidad de la luz.” Y un poco más adelante: “**Conclusiones de los postulados: ... La dilatación del tiempo, ... la contracción de la longitud, ... la simultaneidad, ... la energía y la masa de un cuerpo son equivalentes...**”

Defectos

1 Primero, un detalle.

Algunos términos producen de inmediato cierto rechazo (“alergia”), uno de ellos es “Postulado”. ¿Dónde se presentan postulados en la física? ¿Los postulados de NEWTON? ¡No, los axiomas de NEWTON! (Por cierto, aquí la palabra axioma no se utiliza en el sentido que tiene en matemáticas). ¿Los postulados de la termodinámica? No, los principios. ¿Dónde entonces? Ah, sí, BOHR; ¡los postulados de BOHR! ¿Y qué significa eso? ¿Qué se entiende por postulado? Una suposición, una presunción, una premisa que se confirma por sus consecuencias. Hay varias palabras que todo el mundo conoce y que aciertan en lo que se quiere decir. Entonces, ¿por qué tanta grandilocuencia, por qué esos términos obstinados?

Educamos a los alumnos, y también a los estudiantes de la universidad, para que empleen la palabra adecuada en el momentum adecuado (incluyendo el examen), con lo que demuestran que pertenecen a la clase de los iniciados en la ciencia.

Quien no esté de acuerdo, puede leer a KANT —Immanuel KANT (1724–1804)—: un postulado es una “proposición o principio práctico, inmediatamente cierto, que determina una acción posible, para la cual se presupone que el modo de realizarla es inmediatamente cierto”. ¿Se entiende? ¿Era esto realmente lo que querían decir los postulados de BOHR y de la relatividad?

2 Sobre el contenido de la mencionada afirmación.

Si se dice que la teoría de la relatividad se basa en estos o aquellos postulados (suposiciones, leyes), se sugiere que no hay otra forma de llegar a la teoría de la relatividad. Pero esto no es así. Es cierto que se pueden derivar otras proposiciones de la relatividad a partir de estos presupuestos; pero también se podría empezar de muchas otras maneras, y derivar de ellas las proposiciones que aquí se denominan postulados. Así, también se puede partir de la equivalencia energía-masa, o de la invariancia del cuadrivector distancia, o de las transformaciones de

LORENTZ —Hendrik Antoon LORENTZ (1853–1928)— de los intervalos de longitud y tiempo, o de las ecuaciones de transformación de la energía y el momentum, por ejemplo.

Origen

- 1 No se piensa lo suficiente en el uso de las palabras. Descargamos conceptos obsoletos, formados históricamente, que se encuentran en nuestra propia cabeza frente a los estudiantes. Quizá pensamos que este galimatías forma parte del patrimonio cultural del mundo.
- 2 Tal fue el curso histórico, fue el camino de entrada a la teoría de la relatividad elegido o encontrado por casualidad.

Eliminación

En física, evitar el uso de palabras como postulado, axioma, principio, teorema principal, etc. véase [1].

¿Por qué no la suposición o conjectura de BOHR, o la ley de BOHR? Se trata de palabras adecuadas del lenguaje común que todos los alumnos entienden. También se podría ir un paso más allá, no utilizando ningún sustantivo para lo que se quiere decir, sino simplemente diciendo: BOHR o EINSTEIN ha encontrado o asumido lo siguiente...

Referencias

- [1] Véase 5.31 *Tres formas de transferencia de calor*, p.160

4.3 Sistema de referencia inercial y ley de inercia

Tema

El término “sistema de referencia inercial” juega un papel importante en la física del colegio y la universidad, se lo emplea para formular la ley de inercia: “**Todo cuerpo persevera en su estado de reposo o movimiento uniforme y rectilíneo a no ser que sea obligado a cambiar su estado por fuerzas impresas sobre él.**”

Esta formulación se aplica solo cuando se describe el movimiento correspondiente en un sistema de referencia adecuado, a saber, en un sistema inercial. Pero ¿qué es un sistema inercial? “**En física, un sistema inercial (del latín “Iners” ocioso, vago)**” es un sistema de coordenadas en el que un cuerpo, sobre el cual no actúan fuerzas, se mueve en línea recta con velocidad constante.”

Un sistema inercial se puede realizar de manera aproximada: “**Una aproximación casi perfecta de un sis-**

Sistema de referencia inercial y ley de inercia

tema inercial sería el realizado por medio de un misil sin propulsión que no gire en el espacio interestelar, lejos de todas las masas.”

Defectos

Iniciemos con la ley de inercia: “Un cuerpo libre de fuerzas se mueve uniformemente en línea recta.”

Ahora bien, cualquier cuerpo se mueve uniformemente en línea recta, si se elige un sistema de referencia apropiado. Por consiguiente, la ley de inercia no puede ser válida de manera general. Se aprende (en general solo después de conocer dicha ley) que es válida únicamente en determinados sistemas de referencia, los sistemas inerciales. Así, es posible formular la ley de inercia de un modo más completo: “En un sistema inercial un cuerpo libre de fuerzas se mueve uniformemente en línea recta.” Pero ¿cómo saber si un sistema es inercial o no? Se toma como referencia un cuerpo del cual se sabe que está “libre de fuerzas”, es decir, un cuerpo sobre el cual no actúa ninguna fuerza. Dicho cuerpo define un sistema de referencia inercial (en sentido estricto hacen falta tres cuerpos de referencia: uno para cada una de las tres dimensiones del espacio). Entonces se puede afirmar de cualquier otro cuerpo, si se mueve uniformemente en línea recta o no. Hasta ahora, todo parece correcto.

Pero existe un problema: ¿cómo saber que el cuerpo de referencia está libre de fuerzas? No se puede decir: “Se lo puede reconocer por su movimiento uniforme y rectilíneo”, ya que es precisamente él el que define lo que se entiende por uniforme y rectilíneo. Por esta razón se debe emplear otro criterio para decidir si el cuerpo está libre de fuerzas. A primera vista eso no parece ser un gran problema, se conocen las fuerzas de la naturaleza, sus fuentes y se sabe cómo dependen de la distancia —por lo menos eso se cree— y por esta razón se podría asegurar que un cuerpo está libre de fuerzas, si se disponen las cosas de tal manera que no existan fuerzas eléctricas, magnéticas o de contacto. Además, tenemos que hacerlo asegúrese de que no actúe ninguna fuerza gravitacional. Y es aquí donde se presenta el problema, ya que no es posible excluir dichas fuerzas. Mientras se creía que era posible distinguir las fuerzas gravitostáticas (es decir, las fuerzas descritas por la ley de la gravitación de NEWTON) de las fuerzas inerciales, el problema no existía, como se mencionó arriba, bastaba con ir al espacio interestelar. Pero al reconocer que por principio no es posible hacer distinción entre estos dos tipos de fuerzas, se desvanece el argumento mencionado. Nunca se podrá afirmar de un cuerpo que está libre de fuerzas. En un sistema de referencia podría ser, pero en otro no.

Imaginemos que estamos en el espacio interestelar y pongamos los motores de nuestra nave espacial en marcha. ¿Es que la ley de inercia ahora no es válida? Por supuesto que sí. Un cuerpo que se suelte en la nave, o al que se le dé un impulso inicial, no se mueve de modo uniforme y rectilíneo, pero eso es porque no está libre de fuerzas. En el sistema de referencia definido por la nave la intensidad del campo gravitacional ya no es cero. Por eso se tiene una fuerza gravitacional que actúa sobre el cuerpo, y que lo acelera conforme a la segunda ley de NEWTON. Entonces, las leyes de NEWTON también son válidas en este “sistema no inercial”. Pero entonces, ¿para qué introducir el concepto de sistema inercial?

Origen

La razón por la cual, en general, no se menciona explícitamente el sistema de referencia para el que supuestamente es válida la ley de inercia, probablemente es que esté no aparece en la formulación newtoniana. Para NEWTON no fue necesario mencionarlo cuando formuló su primera ley, porque para él estaba claro respecto a qué se movía el cuerpo, se movía respecto al espacio absoluto, que había introducido pocas páginas antes. Para él también estaba claro qué entender por “libre de fuerzas”. Un cuerpo está libre de fuerzas si sobre él no actúan fuerzas, salvo las que él bautizó como fuerzas ficticias. Se reconocía que una fuerza es real, es decir, no ficticia, por el hecho de que se puede designar un cuerpo que ejerce la fuerza. Ese no era el caso para las fuerzas ficticias.

Sin embargo, ya en vida de NEWTON, veinte años después de la publicación de sus *Principia*, esta opinión fue puesta en duda. El filósofo irlandés George BERKELEY (1685–1753) sugirió que los cuerpos que causan las fuerzas ficticias son las estrellas; idea que fue posteriormente adoptada por MACH —Ernst Waldfried Josef Wenzel MACH (1838–1916)—. Por lo tanto, el criterio de fuerza ficticia, ya no se cumplía. Las fuerzas ficticias se convirtieron en fuerzas reales.

Por mucho tiempo persistió una situación extraña en cuanto a la gravitación: se sabía que la masa inercial y la masa gravitacional eran iguales, pero no había ninguna explicación de este fenómeno. EINSTEIN en 1916 lo formuló de la siguiente manera: “...siendo entonces válido el teorema siguiente: la masa gravitatoria y la masa inercial de un cuerpo son iguales. La antigua mecánica registró este importante principio, pero no lo interpretó.” [1]

La Teoría de Relatividad General (TRG) enseña que un fenómeno que se explica en un sistema de referencia por la inercia de un cuerpo, obtiene su explicación en otro por su gravedad. Así, la distinción entre masa inercial y masa gravitacional se desvanece, del mismo modo

Sistema de referencia inercial y ley de inercia

que la distinción entre un sistema inercial y uno no inercial.

En 1922 EINSTEIN escribe: “El logro real de la teoría (general) de relatividad es que ha liberado a la Física de la necesidad de la introducción de un sistema inercial (o de sistemas inerciales). Lo insatisfactorio de este concepto es lo siguiente: entre todos sistemas de coordenadas escoge ciertos sistemas sin justificación. Se supone entonces que las leyes de la Física se cumplen únicamente en estos sistemas (por ejemplo, la ley de la inercia y la ley de la constancia de la velocidad de la luz). De este modo se atribuye al espacio como tal un papel en la Física, que le destaca de los demás elementos de la descripción física: actúa de modo determinante en todos los procesos, sin que ellos actúan sobre el espacio; tal teoría es lógicamente posible, pero no es satisfactoria. NEWTON había sentido este defecto claramente, pero ha también sabido que para la Física de esta época no había otra elección. Entre los descendientes era Ernst MACH en particular quien había traído este problema a la luz.” [2]

Eliminación

Se podría pensar que es posible prescindir del concepto sistema inercial solo si se trata la gravitación en el marco de la TGR, y por consiguiente que se conoce el cálculo tensorial y las ecuaciones del campo de EINSTEIN. Pero eso sería una exageración.

En efecto, la identidad de las masas inercial y gravitacional es uno de los teoremas de la TRG. Sin embargo, esta identidad también se puede comprender sin conocer los detalles de dicha teoría. Todo lo que hay que saber, además de la física clásica básica, es que no es casualidad que las masas inercial y gravitacional sean iguales.

A continuación, se describe brevemente, por medio de la Fig. 4.1, cómo se podría abordar el tema en una clase a nivel de educación media. En la figura participan dos estudiantes: Juan y Juana.

En la Fig. 4.2 se trata de explicar el porqué el resorte esta elongado. Juan opina que la intensidad del campo gravitacional es cero en todas partes. El resorte se ha elongado porque el cuerpo que está atado al mismo se acelera; debido a su inercia se resiste a la aceleración. Juana por el contrario opina que la elongación del resorte no tiene nada que ver con la inercia, sino que es resultado del peso del cuerpo, es decir, de una fuerza gravitacional.

Se observa que la masa se manifiesta como “peso” (gravitación), o como inercia según el sistema de referencia.

Se puede concluir que la distinción entre las masas inercial y gravitacional, así como entre fuerzas reales y



Fig. 4.1 Juan: “La esfera no cae, la intensidad del campo debe ser cero”; Juana: “La esfera está acelerada, la intensidad del campo no es cero.”



Fig. 4.2 Juan: “La intensidad del campo es cero. El resorte esta tendido porque se acelera el cuerpo que tiene inercia.” Juana: “El resorte esta tendido porque un cuerpo pesado cuelga en él.”

El modo de escribir la ecuación $E = mc^2$

ficticias, o entre sistemas iniciales y no iniciales, son situaciones propias de la física prerrelativista.

Para terminar, es posible analizar los puntos de vista de Juan y Juana con el modelo de las corrientes de momentum en la Fig. 4.1, Juan observa que el momentum no cambia. No se asombra, ya que la intensidad del campo gravitacional es cero, y por consiguiente no existe una corriente de momentum a través del campo hacia el cuerpo.

Juana por el contrario observa que el momentum del cuerpo cambia, lo encuentra natural ya que existe una corriente de momentum a través del campo que entra en el cuerpo.

Referencias

- [1] A. Einstein, *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*, Akademie-Verlag, Berlin, 1973, S.54
Existe versión en español: Einstein A. *Sobre la Teoría de la Relatividad Especial y General*. Madrid: Ediciones Altaya, S.A., 1998, p. 33. [en línea]. En:
<http://bz.otsoa.net/Libros%20de%20Divulgacion%20Cientifica/Albert%20Einstein%20-%20Sobre%20la%20Teoria%20de%20la%20Relatividad.pdf>
[consultado el 31 de octubre de 2021].
- [2] A. Einstein, *Grundzüge der Relativitätstheorie*, Akademie-Verlag, Berlin, 1970, S. 138

4.4 El modo de escribir la ecuación $E = mc^2$

Tema

La manera de formular la equivalencia masa-energía por medio de la ecuación $E = mc^2$.

Defectos

Según una antigua costumbre en matemáticas la relación lineal entre la variable independiente x y la dependiente y , se escribe de la siguiente manera:

$$y = ax + b,$$

y no

$$y = b + xa.$$

Si la relación es cuadrática, se acostumbra escribir

$$y = ax^2 + bx + c,$$

no

$$y = xb + c + x^2a.$$

Esta convención facilita determinar rápidamente las características de la función, es decir, cuál es la variable independiente y cuál o cuáles las constantes. La costumbre de anteponer la constante a la variable independiente se emplea también en Física.

La ecuación

$$E_c = \frac{m}{2} v^2,$$

resalta la relación cuadrática entre la velocidad y la energía cinética para un cuerpo, y no tanto la relación lineal entre la masa y la energía cinética, ya que en general se considera la masa constante; por tanto no se escribe

$$E_c = \frac{v^2}{2} m.$$

De igual forma se procede con muchas otras ecuaciones, por ejemplo se escribe

- | | | |
|-------------------------|------|------------------|
| $U = R \cdot I,$ | y no | $U = I \cdot R,$ |
| $o \quad Q = C \cdot U$ | y no | $Q = U \cdot C,$ |
| $o \quad E = h \cdot f$ | y no | $E = f \cdot h,$ |
| $o \quad Q = I \cdot t$ | y no | $Q = t \cdot I.$ |

Siempre se ubica la magnitud considerada variable a la derecha de la considerada constante. De acuerdo con esta costumbre la ecuación

$$E = mc^2$$

se debería interpretar así: la energía es proporcional al cuadrado de la velocidad de la luz, siendo el factor de proporcionalidad la masa. En realidad el significado de la ecuación es otro, cuanto mayor sea la masa de un cuerpo, tanto mayor será su energía, siendo c^2 el factor de proporcionalidad. Desde este punto de vista sería consecuente escribir la ecuación de la siguiente forma:

$$E = c^2 m.$$

Sin embargo, aun de esta forma surge un interrogante, ¿porqué escribir un simple factor de proporcionalidad de manera complicada?

Origen

En una obra publicada por primera vez en 1921 [1], EINSTEIN —Albert EINSTEIN (1879–1955)— escribió la ecuación de esa forma, y nadie ha tenido la osadía de escribirla de otro modo; desde entonces ha existido la

costumbre de hacerlo así, sin considerar otra posibilidad. Se puede especular sobre la razón de esto, la energía cinética se escribe de la siguiente forma:

$$E_c = \frac{m}{2} v^2,$$

es decir, primero la masa y después el cuadrado de la velocidad; claro que en este caso existe una razón justificada.

Eliminación

Se sugiere escribir la ecuación como se suele hacer con una simple proporcionalidad:

$$E = k \cdot m,$$

donde k es una constante universal.

Referencias

[1] A. Einstein, *The Meaning of Relativity*, Princeton: Princeton University Press. Fifth edition. 1956, p. 26. Existe versión en castellano: A. Einstein, *El significado de la relatividad*, 2 ed. Buenos Aires: Espasa-Calpe, 1952. p.61.

4.5 La equivalencia masa-energía

Tema

La relación de EINSTEIN entre masa y energía $E = mc^2$.

Defectos

En ciertos libros de texto y revistas científicas se afirma que la mencionada relación de EINSTEIN —Albert EINSTEIN (1879–1955)— significa que energía y masa son formas diferentes de una misma magnitud física y que es posible transformar la energía en masa. De ser cierta esta afirmación se podría distinguir una de la otra, una disminución de la masa estaría acompañada de un aumento de energía y viceversa. Dicha proposición no es correcta y no es lo que EINSTEIN afirmó, según EINSTEIN las magnitudes que llevan los nombres de “masa” y “energía” son en realidad una misma magnitud medida con distintas unidades.

Origen

Aparentemente se presenta cierta resistencia a aceptar la afirmación de EINSTEIN, ya que si se puede transformar A en B, entonces A y B no pueden ser idénticas. Véase 2.1 *Formas de energía*, p.48

Eliminación

En los procesos de enseñanza debe quedar claro que, desde la publicación de la teoría de la relatividad, la magnitud que anteriormente se conocía con el nombre de “energía” tiene las mismas propiedades que se conocían de la masa y que esta a su vez tiene las propiedades conocidas de la energía. Las propiedades conocidas de la masa eran la inercia y la gravedad, de la energía no se conocía antes de 1905 ninguna propiedad que permitiera identificarla independientemente del sistema considerado. Solo a partir de 1905 se supo que la energía tiene propiedades características, que son las mismas de la masa, es decir la inercia y la gravedad.

4.6 Masa, masa en reposo, masa invariante, masa relativista, energía, energía en reposo y energía interna

Tema

La magnitud invariante del vector cuadrimomentum en un cambio del sistema de referencia se llama masa invariante o simplemente masa, especialmente en la física de partículas. En otros ámbitos se denomina masa en reposo o, si se da en otras unidades, energía en reposo. En ocasiones, se denomina energía interna. Por lo demás, en física, la masa no solo se entiende como esta parte invariante, sino también como la masa que cambia con la velocidad, a veces también llamada masa relativista. Cuando se mide en otras unidades, se llama simplemente energía.

Defectos

Hay magnitudes físicas que causan problemas: cambian de significado con el tiempo, o son utilizadas por diferentes personas con significados distintos. Con algunas magnitudes, el problema existe desde hace mucho tiempo, si no desde siempre, por ejemplo, con la fuerza o el calor. Con la masa, el problema es nuevo. Durante mucho tiempo, unos 200 años, perteneció más bien a las magnitudes fáciles de entender. La confusión fue provocada por la teoría de la relatividad. Los hechos son simples, pero el caos es grande.

Estos son los hechos. Existen las siguientes relaciones:

$$E^2 = E_0^2 + c^2 p^2$$

y

Masa longitudinal y transversal

$$E = mc^2$$

y se trata de los nombres de las tres magnitudes m , E y E_0 . Lo cierto es que el descubrimiento de la identidad de la energía y la masa hizo superflua una de las denominaciones: masa y energía. Sin embargo, se crearon varios nombres nuevos, con el resultado descrito más arriba.

Origen

El problema surgió con la teoría de la relatividad.

Por un lado, tenemos el descubrimiento de que la energía y la masa son la misma magnitud: la energía tiene las mismas propiedades que la masa, es decir, gravedad e inercia.

Por otro, es un hecho que la relatividad describe el mundo físico con cuadrivectores y sus invariantes de LORENTZ —Hendrik Antoon LORENTZ (1853–1928)—. Los invariantes de LORENTZ son prácticos, contienen la esencia de una partícula, un campo o un proceso, lo que nos libera de la arbitrariedad de la elección del sistema de referencia. Dado que la masa ha representado durante siglos algo característico de una partícula, algo que constituye una parte esencial de su identidad, que no depende del sistema de referencia, se quisiera mantener la palabra en dicho contexto en el futuro. Así que el nombre se utiliza, especialmente en la física de partículas, para la magnitud invariante de LORENTZ del vector de cuadrimomentum, es decir, lo que inicialmente se llamaba masa en reposo.

- Entonces, había dos objetivos que competían entre sí:
- el término masa como medida de inercia (que para un mismo cuerpo puede ser grande en un sistema de referencia y pequeño en otro);
 - el término masa para una magnitud que caracteriza a una partícula y cuyo valor es independiente del sistema de referencia.

Así que el caos era ineludible.

Cualquiera que utilice la masa como medida universal de inercia necesita un nuevo nombre para el valor de la masa en el sistema del centro de masas. Los términos masa en reposo y energía en reposo se presentaron como tales. El reposo significa simplemente que el centro de masas del sistema en cuestión está en reposo. Aparte de eso, puede haber cualquier movimiento.

Quien utilizó el nombre de masa para la invariante lorentziana tuvo que emplear un nuevo nombre para la medida de la inercia. Se llamó masa relativista. Y por si había que temer que alguien no supiera que la magnitud m_0 se llamaba simplemente masa, se añadía el adjetivo invariante para estar seguros, se convertía en la masa invariante.

Eliminación

No nos atrevemos a hacer sugerencias a la poderosa comunidad de los físicos de partículas. Pero en lo que respecta a la escuela, nos gustaría hacer una recomendación.

Introducir la masa como la magnitud que caracteriza la inercia y la gravedad de los cuerpos. El concepto de esta magnitud es claro. Más tarde se estudiará que con la teoría de la relatividad llegó la constatación de que la energía caracteriza exactamente las mismas propiedades, es decir, que la energía y la masa son una misma magnitud; que la inercia y la gravedad aumentan cuando se calienta un cuerpo, se estira un resorte, se carga un condensador. Por supuesto, seguiremos utilizando el término masa para la magnitud que mide esta propiedad. No necesitamos entonces corregir nuestro concepto de masa.

Las magnitudes E_0 y m_0 pueden denominarse energía en reposo y masa en reposo, aunque no haya nada en reposo en un sistema cuya energía total es igual a la energía en reposo, excepto su centro de masa. El término energía interna sería quizás más apropiado en este caso.

4.7 Masa longitudinal y transversal

Tema

En el contexto del tratamiento de la relatividad especial, a veces se introduce una masa longitudinal y otra transversal. Con ello se quiere expresar que la inercia de un cuerpo es diferente (mayor) en la dirección del movimiento que transversalmente.

Defectos

La necesidad de introducir dos nuevos conceptos de masa surge cuando se insiste en que la masa debe ser una medida de la inercia. De hecho, la inercia de un cuerpo que se mueve a velocidad relativista es mayor en la dirección del movimiento que en la transversal.

Dos comentarios al respecto:

- 1 Independientemente de que la masa permita medir la inercia, pregúntemonos qué se debe entender por inercia en el contexto de un movimiento. Es razonable definir la inercia T como sigue:

$$T = \frac{F}{a} \tag{4.1}$$

y esto siempre es válido, es decir, no solo en el caso de los movimientos clásicos, donde la fuerza es proporcional a la aceleración, donde:

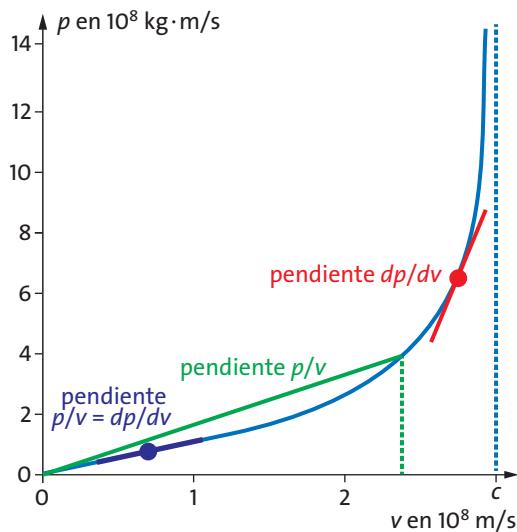


Fig. 4.3 La inercia de un cuerpo viene dada por la pendiente de la función $p(v)$. Depende de la velocidad.

$$T = m$$

Veamos la ecuación (4.1) en otra forma, con $a = dv/dt$ y $F = dp/dt$ resulta que:

$$T = \frac{dp}{dv}$$

La inercia definida de este modo indica cuánto momentum dp debe suministrarse a un cuerpo para que su velocidad cambie en dv .

Conociendo la relación relativista entre p y v , se puede calcular fácilmente la inercia. Para un cambio de momentum en la dirección hacia delante se obtiene:

$$T_l(v) = \frac{m_0}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{3}{2}}}$$

y para uno en la dirección transversal:

$$T_t(v) = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Analicemos primero la inercia en la dirección de avance. No es idéntica a la masa en reposo ni a la masa relativista

$$m(v) = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Esto se ve fácilmente si se considera la relación $p(v)$, Fig. 4.3. T viene dada por la pendiente de la curva, es decir, el cociente diferencial dp/dv , véase la tangente roja a la curva. La masa relativista, en cambio, es igual a la pendiente de la recta verde. Solo al comienzo, en la “aproximación clásica”, el gradiente dp/dv es igual a p/v , y por tanto igual a la masa en reposo, véase la tangente azul.

Pasemos a la inercia transversal: es la de un cuerpo que no se mueve en la dirección transversal. Sin embargo, esto no significa que se describa por la masa en reposo, porque la masa del cuerpo ha aumentado debido a la alta velocidad longitudinal.

En resumen, la inercia es una magnitud que tiene un valor mayor en una determinada dirección que en la dirección ortogonal a ella, o lo que es lo mismo, es un tensor.

- 2 ¿Se debe concluir que existe una masa tensorial además de la masa en reposo y la masa relativista? La pregunta está mal planteada. Una magnitud física existe si se la introduce y define adecuadamente. Intentemos formular mejor la pregunta: ¿Se debe introducir una masa tensorial inercial además de la masa en reposo y la masa relativista? Una respuesta prudente es: se debe, si es conveniente, si vale la pena. ¿Y vale la pena? La respuesta a esta pregunta probablemente es, mejor no.

Pero ¿no es una pérdida la hermosa interpretación de la masa como medida universal de la inercia?

Quizás sea una pérdida pero, ¿por qué tendría que salir “mejor librada” la masa que otras magnitudes físicas? Veamos:

- Cuando se construye o inventa una nueva teoría, es satisfactorio si las variables que contiene miden propiedades simples que resultan familiares por la experiencia cotidiana. Sin embargo, la mayoría de las veces esto realmente no ocurre así. Por ejemplo, veamos la fuerza, el calor, o la temperatura, donde a veces se trata de remediar introduciendo la “sensación térmica”.
- Este caso, es decir, el caso de la inercia es similar al de algunas magnitudes eléctricas. Si alguien dice que un resistor tiene una resistencia de $10 \text{ k}\Omega$, se sabe lo que se necesita conocer. Ahora bien, esto solo es posible si la intensidad de la corriente es proporcional a la tensión. Pero ¿y si no lo es? ¿Cómo se caracteriza un diodo semiconductor, por ejemplo? No basta con dar un valor numérico, es necesario proporcionar la curva característica $U-I$. Lo mismo ocurre con la capacidad. También se presenta esta situación con la medida de la inercia. La inercia no puede ser descrita por un solo número, se necesita una curva característica, Fig. 4.3.

Velocidad de la luz o velocidad límite

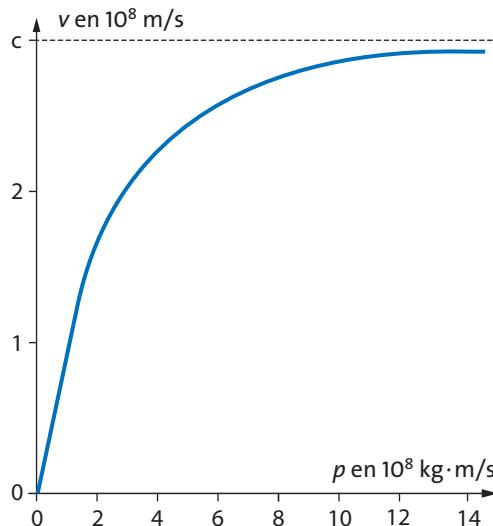


Fig. 4.4 La función $v(p)$ dice todo sobre el comportamiento inercial de un cuerpo.

Origen

Los conceptos de masa longitudinal y transversal fueron introducidos por LORENTZ —Hendrik Antoon LORENTZ (1853–1928)— en 1899 y luego fueron calculados por EINSTEIN —Albert EINSTEIN (1879–1955)— en 1905 a partir de su teoría de la relatividad. Desde entonces, han circulado por la física, aunque no tienen ninguna utilidad discernible.

Eliminación

Con la masa en reposo y la masa relativista, se tienen suficientes masas. No se pierde nada si se ignoran la masa longitudinal y la transversal. El hecho de que un cuerpo tenga una inercia diferente en el sentido de avance y en el transversal se puede tener en cuenta en un ejercicio, pero introducir dos términos nuevos parece algo excesivo.

Todo aquello que es necesario entender en este contexto esta contenido en la curva de la Fig. 4.3. Se ve aún más claro si no se traza, como es habitual, el momentum sobre la velocidad, sino la velocidad sobre el momentum, Fig. 4.4, porque como variable independiente se debe elegir preferentemente la variable sobre cuyos valores se tiene la influencia más directa, y esta no es la velocidad, sino el momentum. Se pisa el acelerador para que el motor bombee el momentum desde la tierra al coche, y se ve en el velocímetro cuál es la consecuencia, es decir, qué velocidad resulta.

Pero ¿qué ocurre entonces con la hermosa regla de que la masa es una medida de la inercia? Es necesario plantearlo en perspectiva: la masa solo mide la inercia

mientras la velocidad no sea demasiado grande. Solo para $v \ll c$ la inercia es una propiedad intrínseca de un cuerpo y no depende de su estado.

4.8 Velocidad de la luz o velocidad límite

Tema

La constante c en la ecuación $E = mc^2$ generalmente se llama “velocidad de la luz”.

Defectos

Utilizando la equivalencia entre masa y energía se puede derivar la Teoría de la Relatividad Especial a partir de la mecánica clásica, dicha equivalencia puede entonces desempeñar el papel de un axioma suplementario a los axiomas de dicha mecánica. Al proceder de esta manera se encuentra —entre otras cosas— la existencia de una velocidad límite universal. Al suministrar a un cuerpo o una partícula cada vez más momentum su velocidad se aproxima a esa velocidad límite c , y esto ocurre tanto más rápidamente cuanto menor sea la masa en reposo de la partícula. Si la masa al reposo es cero, como en el caso de los fotones y gravitones, entonces la partícula puede moverse solamente con esa velocidad límite. El valor de c se determina mediante el experimento.

Ya que la constante c se ha denominado “velocidad de la luz” se induce a pensar que en la Teoría de la Relatividad la luz desempeña un papel particular y especial, y que todos los demás sistemas tienen que “ajustarse” a la luz. Esta no es una visión afortunada del asunto, ya que todos los cuerpos y partículas, independientemente unos de otros obedecen a las mismas leyes universales.

Origen

Para llegar a la física relativista, partiendo de la clásica, normalmente no se utiliza como axioma la equivalencia masa-energía, sino el hecho que la velocidad de la luz es independiente del sistema de referencia. Al proceder así se atribuye desde el comienzo a la luz un rol especial. Considerando la teoría que resulta, se puede constatar que no existe una diferencia de principio entre los fotones y el resto de partículas, los fotones están sujetos a las mismas leyes que las demás partículas. Todas las partículas se distinguen entre sí solamente por los valores de las magnitudes físicas que las caracterizan. En lo que a la mecánica se refiere estas son la masa en reposo y el momentum angular propio (espín).

A esto se agrega el hecho que generalmente al introducir la Relatividad se inicia con la cinemática —dándole-

¿La paradoja de los gemelos en la escuela?

le así cierto relieve—, y generando el empleo de términos como: relojes de luz, destellos de luz que se envían en un tren en movimiento, y otras afirmaciones que se refieren a la luz. Lo cual también fomenta la idea de que la luz es un sistema aparte, especial y particular. A comienzos del siglo 20 este era un punto de vista natural y comprensible, ya que todavía no se conocían los gravitones, que se mueven con la velocidad c , tampoco los neutrinos que se mueven con una velocidad muy cercana a c , o los aceleradores que aceleran toda clase de partículas a velocidades prácticamente iguales a c .

Eliminación

Se recomienda decir que para todos los cuerpos y todas las partículas existe una misma velocidad límite, que ningún cuerpo o partícula puede moverse más rápido. Los fotones y los gravitonos se mueven, según se sabe, exactamente con esa velocidad; lo mismo se creía hace un tiempo para los neutrinos.

4.9 ¿La paradoja de los gemelos en la escuela?

Tema

La paradoja de los gemelos se discute en libros de texto, manuales universitarios y libros de divulgación científica. Se han publicado cientos de artículos sobre ella en revistas científicas. Incluso se han escrito “meta-artículos”, es decir, artículos que intentan clasificar los trabajos científicos aparecidos hasta el momento y trazar su aspecto en un histograma. Es un tema pequeño, pero obviamente se considera importante.

Un breve recordatorio: dos gemelos —en nuestro caso se llaman Willy y Lilly— están juntos y sincronizan sus relojes. A continuación, Lilly emprende un largo viaje en una nave espacial a velocidad constante hasta una estrella lejana; da la vuelta y viaja de regreso, de nuevo a velocidad constante. Cuando se reúne de nuevo con Willy, ambos notan que ha pasado más tiempo según el reloj de Willy que el de Lilly. Willy ha envejecido más que Lilly. La Fig. 4.5 muestra los diagramas camino-tiempo de Willy y Lilly, las llamadas líneas de universo.

Si tanto Willy como Lilly asumen que pasa menos tiempo para el otro debido a la “dilatación del tiempo”, parece haber una contradicción.

Defectos

Imaginamos que usted, querido lector, es conocedor de la paradoja. No es nuestra intención resolverla, eso se ha hecho con bastante frecuencia. Más bien nos interesa el

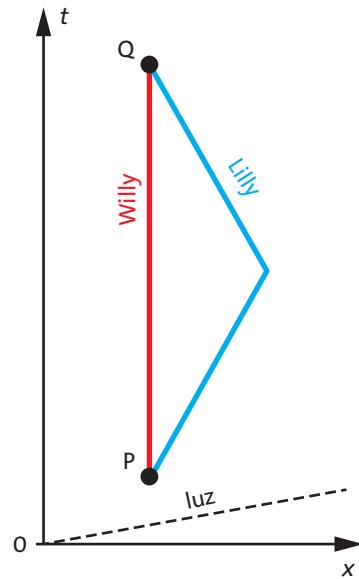


Fig. 4.5 Líneas de universo de Willy y Lilly. Willy siempre está “flotando libremente” entre los puntos espaciotemporales P y Q, Lilly no.

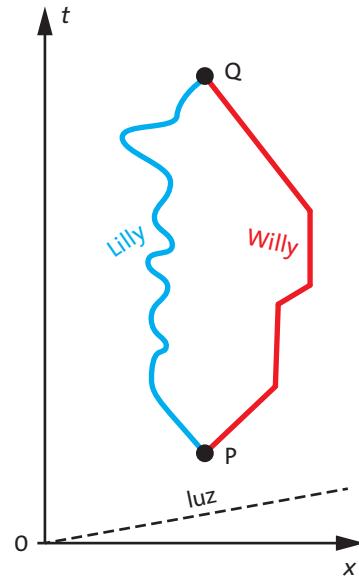


Fig. 4.6 Lilly va al campo de deportes, Willy va de compras. Entre los dos puntos del espacio-tiempo transcurren diferentes tiempos para ellos.

papel que el tema desempeña y debería desempeñar en la enseñanza de las escuelas y universidades. Para ello, nos gustaría empezar contando la historia de una manera algo diferente.

Willy y Lilly comparan sus relojes, indican lo mismo. Luego Lilly va al campo de deportes y Willy va de com-

¿La paradoja de los gemelos en la escuela?

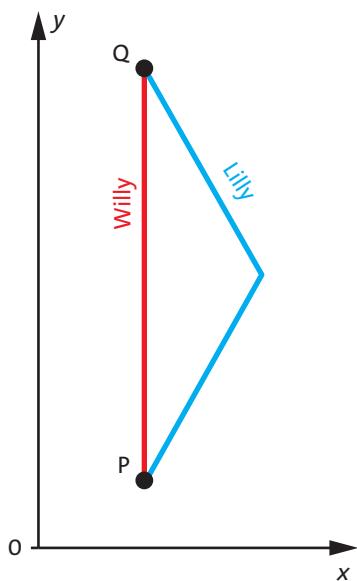


Fig. 4.7 Willy y Lilly viajan de P a Q por diferentes rutas. Sus cuentakilómetros muestran que las distancias recorridas no son las mismas.

pras. Al anochecer se vuelven a encontrar y se dan cuenta de que sus relojes ya no coinciden, Fig. 4.6.

Por supuesto, la anécdota es poco realista, los relojes no son lo suficientemente precisos. Pero como experimento mental no es menos adecuado que la historia habitual, que tampoco es muy realista. Tiene la ventaja

sobre la tradicional de que no plantea la expectativa de que se pueda entender mejor la observación con la ayuda de un cálculo. Más bien expresa un hecho que debemos aceptar como natural: el espacio y el tiempo forman una unidad.

No ayuda mucho a la comprensión que se calcule la diferencia temporal con la ayuda de varias fórmulas que describen algo que no es menos inverosímil que el resultado de la lectura del reloj. De poco sirve intentar justificar el valor correcto de la diferencia de edad de los dos gemelos mediante la dilatación del tiempo para Willy, y una combinación de dilatación del tiempo y efecto de aceleración para Lilly. Solo se puede calcular que todo es correcto en el marco de la teoría de la relatividad (en adelante TR), que por supuesto hay que conocer para ello.

Lo inapropiado que resulta tal patrón de justificación y explicación, especialmente para los principiantes, puede verse si se considera una situación análoga para la cual todos tienen una buena intuición, pero que nadie presentaría como una paradoja.

En lugar de fijarnos en las dos dimensiones del espacio-tiempo (nos limitamos en la TR, como es habitual, a una sola dimensión espacial), nos fijamos en otras dos dimensiones cuya interacción nos resulta más familiar, las dos componentes horizontales del espacio normal. Es el espacio en el que nosotros, como seres ligados a la superficie terrestre, navegamos constantemente.

Esta es la historia: Willy y Lilly están conduciendo, cada uno en un coche, por rutas diferentes desde un

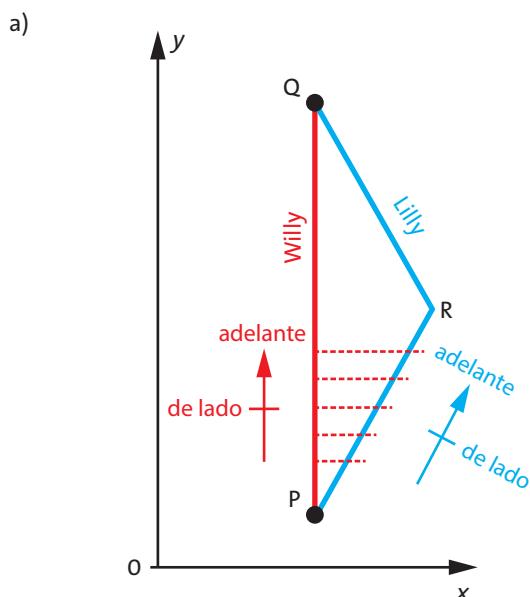
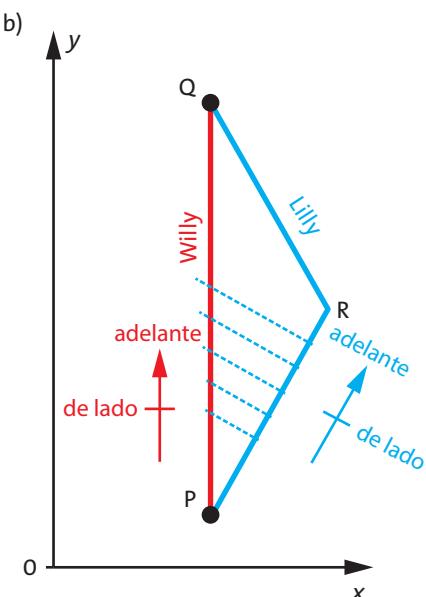


Fig. 4.8 (a) Willy se da cuenta de que Lilly tiene que realizar un recorrido más largo para salir adelante. (b) Lilly se da cuenta de que Willy tiene que recorrer una mayor distancia para salir adelante.



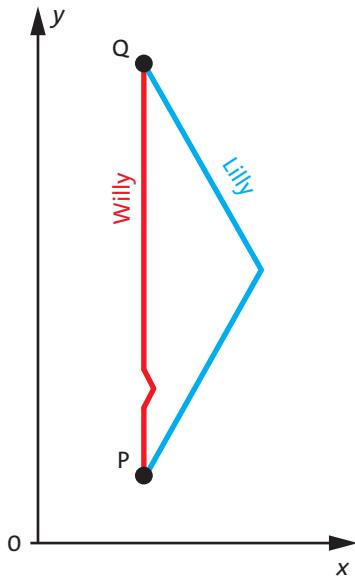


Fig. 4.9 Los cambios de dirección algo que ver con el hecho de que las trayectorias tengan diferente longitud. Pero no existe una relación sencilla entre el ángulo de cambio de dirección y el alargamiento de la trayectoria causado por esta.

punto P a un punto Q, Fig. 4.7. Willy está avanzando de P a Q en línea recta. Lilly casi siempre avanza en línea recta, excepto cuando su camino tiene una curva. Ambos leen sus respectivos cuentakilómetros al principio y al final del viaje. Se dan cuenta de que Lilly ha recorrido una distancia mayor.

Ahora bien, supongamos que no somos conscientes de que las dos dimensiones “hacia delante” y “hacia los lados” son dos dimensiones de un mismo espacio, entonces (por analogía con la paradoja de los gemelos de la TR) surgiría la siguiente paradoja: Willy se da cuenta de que Lilly tiene que recorrer una distancia mayor para avanzar tanto como él, Fig. 4.8a.

Aparentemente, su trayectoria está sujeta a la dilatación de la longitud. Pero Lilly llega a la misma conclusión, Fig. 4.8b. Desde su punto de vista, Willy tiene que recorrer una distancia mayor para llegar tan lejos como ella. Entonces, para cada uno, la distancia del otro es más larga. Esa sería la paradoja. No pueden cumplirse las dos cosas, por supuesto. Y cuando miran sus cuentakilómetros, también se dan cuenta que, para Willy, la conclusión era correcta, Lilly recorre una distancia mayor. La conclusión de Lilly era errónea.

Si ahora se discutiera el problema como es habitual en la paradoja de los gemelos reales, se examinaría la cuestión de qué papel juega el cambio de dirección de Lilly en el punto R, y qué cambia si el cambio de direc-

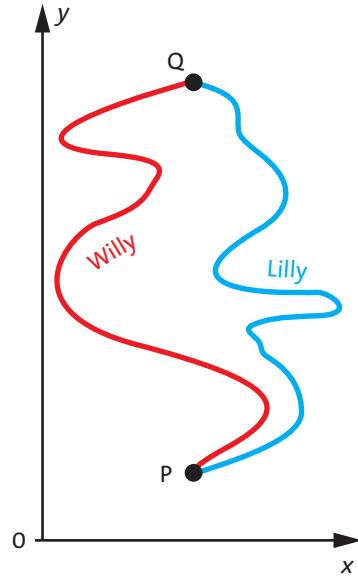


Fig. 4.10 Se quiere hacer entender que los recorridos de Willy y Lilly no tienen la misma longitud. ¿Se calcularían las longitudes de las trayectorias utilizando la geometría diferencial?

ción no se produce a través de un giro brusco sino en un arco algo más suave, y otras cosas más. Se podría comprobar que, aunque el cambio de dirección de la trayectoria de Lilly sea necesario para interpretar la observación, en general esta no provoca necesariamente una gran diferencia de trayectoria. En la Fig. 4.9, la trayectoria de Willy tiene tres de estos cambios de dirección pero la de Lilly sigue siendo la más larga.

Justamente de este tipo son las discusiones que se tienen en relación con la real paradoja de los gemelos: ¿Influye la aceleración que se produce al dar la vuelta? Sí y no. Sin aceleración, no hay resolución de la paradoja de los gemelos, pero la aceleración justo al principio, a su vez, no tiene efecto.

Volviendo a la Fig. 4.7: Aunque se haya calculado la diferencia de trayectorias, solo se conoce para un recorrido particular de las mismas. Pero ¿qué pasa con las dos trayectorias de la Fig. 4.10, por ejemplo?

¿Se calcularía también aquí la distancia recorrida por Willy sumando los avances percibidos por Lilly, pero teniendo en cuenta qué efecto tiene en el resultado el cambio de dirección de Willy en cada momentum? Probablemente no. Pero entonces, ¿cómo se consigue? La respuesta es sencilla: midiéndolo localmente, es decir, con el cuentakilómetros del coche correspondiente. Y, por supuesto, uno no se sorprende de que los valores mostrados no coincidan.

Teoría de la relatividad y cambio de sistema de referencia

Por lo tanto, queremos describir la situación de la Fig. 4.6 exactamente de la misma manera: midiendo el “aumento” del tiempo localmente, con el reloj que se lleva.

Origen

EINSTEIN ya mencionó este efecto en su famoso artículo de 1905, pero no lo presentó como una paradoja.

Para la época, la paradoja de los gemelos era una afirmación inaudita. La teoría de EINSTEIN puso en duda las concepciones básicas sobre el espacio y el tiempo que habían sido válidas hasta entonces.

El hecho de que el espacio y el tiempo formen una unidad, el espacio-tiempo, solo se convirtió gradualmente en normalidad. Un paso importante en este proceso fue el trabajo de MINKOWSKI —Hermann MINKOWSKI (1864–1909)—. He aquí su famosa afirmación de 1908:

A partir de ahora, el espacio para sí mismo y el tiempo para sí mismo van a hundirse completamente en las sombras y solo una especie de unión de ambos va a preservar la independencia.

La gente se fue acostumbrando poco a poco al espacio-tiempo y al hecho, básicamente simple, de que las magnitudes que antes eran trivectores pasaban a ser cuadrivectores.

Aunque en este contexto es evidente la diferencia en la indicación de los relojes que se llevan, el efecto se disfrazó en la historia con los dos gemelos y se elevó a paradoja y pronto fue discutido por muchos otros físicos eminentes.

Y entonces pasó lo que casi siempre pasa, aunque se pudo introducir la nueva física de forma mucho más directa, se siguió el tortuoso camino histórico en la enseñanza de la TR, con todos los detalles que EINSTEIN aborda en su primer trabajo sobre el tema: sincronización de relojes, relatividad de la simultaneidad, contracción de la longitud, dilatación del tiempo.

Todo alumno y estudiante tiene que pasar por esto, e inevitablemente se encuentra con la paradoja.

Y, por último, puede influir algo más, que se crea que se puede obtener una real comprensión solo “calculando”.

Eliminación

Todo el problema se disuelve en nada si se deja claro desde el principio que el espacio y el tiempo forman una unidad, el espacio-tiempo. Veamos, por ejemplo, a WHEELER, que explica la realidad del espacio-tiempo de forma muy acertada y muestra cómo se pueden definir inequívocamente los puntos del espacio-tiempo sin ningún sistema de coordenadas o de referencia [1]. Sobre todo, hay que tener en cuenta la regla que formula WHEE-

LER y que nos recuerda una y otra vez: la física solo es simple si se describe un fenómeno localmente [2]: *Don't try to describe motion relative to faraway objects. Physics is simple only when analyzed locally.*

Así que se deben evitar preguntas como: ¿qué hora muestra el reloj de Lilly para Willy? Porque, por supuesto, debe formularse correctamente: ¿qué hora marca ahora el reloj de Lilly para Willy? Y con eso aparece el problema, de un “ahora” para Willy no se puede concluir un “ahora” para Lilly.

Deberíamos abstenernos de intentar definir un “ahora” para lugares distantes con la ayuda de relojes que se deben sincronizar. “Ahora” solo debe usarse para “aqui”.

En una clase avanzada, se introduce naturalmente la métrica del espacio-tiempo. También aquí se hace evidente que la historia de los gemelos no es una paradoja.

Pero incluso para los principiantes no hay problema, se cuenta la historia que pertenece a la Fig. 4.6 y se compara la situación con la de la Fig. 4.10. Se acepta como experiencia que el tiempo más largo corresponde al movimiento de flotación libre, el tiempo cero al movimiento con la velocidad límite.

En ningún caso se recomienda hacer los cálculos en el marco de referencia de Lilly. Esto viola una regla que se respeta en todas partes en la física: elige tu sistema de coordenadas o de referencia de forma que el tratamiento del problema sea lo más sencillo posible, y sobre todo, no lo cambies en mitad del cálculo. Pero eso es exactamente lo que se hace cuando se formula la paradoja de los gemelos, y esa es exactamente la causa de las caóticas discusiones que la acompañan.

Referencias

- [1] J. A. Wheeler, *Journey into Gravity and Spacetime*, Scientific American Library 1999
- [2] C. W. Misner, K. S. Thorne, J. A. Wheeler, *Gravitation*, W. H. Freeman and Company, New York, 1973, p. 4.

4.10 Teoría de la relatividad y cambio de sistema de referencia

Tema

La teoría de la relatividad especial (TRE) se considera difícil. Requiere que veamos el espacio y el tiempo no como dos entidades independientes, como sugiere nuestra experiencia cotidiana, sino como una única entidad. Cuando el sistema de referencia cambia, tanto las distancias temporales como las espaciales cambian.

Defectos

No cabe duda de que la relatividad especial es difícil. Esto no se debe a las matemáticas, ya que no se exige al alumno más que la raíz cuadrada; las matemáticas de la escuela media son suficientes. Que la TRE sea difícil debe tener otra razón, y parece evidente: la fusión del espacio y el tiempo. Una pequeña digresión. En algunos países que tienen estaciones marcadas, se producen cambios de horario y se tiene horario de invierno y de verano. Supongamos que es el último sábado de octubre, a las 6 de la tarde. El horario de verano termina la noche siguiente. Alguien dice: "Mañana a esta hora habrá oscurecido." Otra persona dice: "Mañana a esta hora solo serán las 5." ¿Quién tiene la razón?

Nadie puede juzgar qué afirmación es correcta sin pensar un rato. Pero ¿cuál es el problema? No se le puede achacar ninguna de las dificultades de la física y las matemáticas: ni análisis vectorial, ni ecuaciones diferenciales, ni curvatura del espacio, ni relación de incertidumbre. La razón por la que tropezamos no es más que el cambio del sistema de referencia temporal. En la TRE, hay que enfrentarse a dificultades del mismo tipo, pero en mayor medida.

Para tratar un problema matemáticamente, especialmente en mecánica y electrodinámica, hay que elegir un sistema de referencia. El riesgo de perder la visión de conjunto siempre surge cuando se cambia el sistema de referencia en el curso del tratamiento matemático.

La famosa paradoja de los gemelos es un ejemplo. En principio, se explica fácilmente. Y, sin embargo, se han escrito innumerables artículos, se han dictado variedad conferencias, etc. sobre su análisis. En un libro sobre la relatividad [1], por cierto, que está escrito de forma hermosa y clara y cuyos autores se propusieron explícitamente proporcionar un relato que pudiera arreglárselas con las matemáticas de la escuela media y que siguiera siendo exhaustivo y riguroso, la paradoja de los gemelos ocupa 11 páginas.

Las dificultades surgen del hecho de que se insiste en transferir el problema, que ya se ha resuelto en un sistema de referencia adecuadamente elegido, a saber, el del gemelo que no viaja, y cuya solución era sencilla, al sistema de referencia del segundo gemelo, lo cual es una elección decididamente torpe, ya que este sistema de referencia no es inercial, sino que corresponde a un campo gravitacional que cambia con el tiempo. También en la física clásica, no relativista, a casi nadie, aparte de PTOLOMEO, se le ocurriría elegir semejante sistema de referencia.

Origen

La teoría de la relatividad surgió de la exigencia de que las leyes de la física, y en particular la velocidad de la luz,

fueran independientes del sistema de referencia. Sin embargo, ha aportado resultados que van mucho más allá de las afirmaciones sobre lo que ocurre cuando se cambia el sistema de referencia, es decir, que no tienen nada que ver con los cambios del sistema de referencia.

El hecho de que aún hoy la constancia (mejor: invariancia) de la velocidad de la luz se sitúe en el centro es un efecto típico del conservativismo en la enseñanza.

Por desgracia, el nombre de la teoría también lleva implícito el cambio de sistema de referencia. El hecho de que este nombre sea desafortunado ya se notó hace tiempo.

Eliminación

Las ecuaciones más importantes de la dinámica relativista pueden derivarse en pocas líneas del hecho de exigir la identidad de la masa y la energía. No aparecen cambios del sistema de referencia.

Aprovechamos la ocasión para recordar una regla que todo físico tiene en cuenta a la hora de describir un problema matemáticamente:

- Al principio, elige el sistema de referencia en el que la descripción sea más sencilla;
- No cambia el sistema de referencia en el transcurso del proceso que se va a describir.

También puede ser útil no titular el capítulo correspondiente "Teoría de la relatividad", sino, como lo hacen TAYLOR y WHEELER, "Física del espacio-tiempo" [2].

Referencias

- [1] G. Beyvers u. E. Krusch, *Kleines 1x1 der Relativitätstheorie*, Books on Demand GmbH, Norderstedt, 2007, S. 67–77
- [2] E. F. Taylor a. J. A. Wheeler, *Physik der Raumzeit*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1994

4.11 Dilatación, contracción, expansión

Tema

Los conceptos de contracción de la longitud y dilatación del tiempo.

Defectos

En el lenguaje coloquial y también en el tecnológico, la contracción y la dilatación se refieren a procesos, es decir, a algo que ocurre en el tiempo. Algo es primero más largo, luego más corto, se ha contraído; algo es inicialmente más corto y luego más largo, se ha dilatado. Pero esto no es lo que se quiere decir cuando se habla de con-

Dilatación, contracción, expansión

tracción de la longitud, o contracción de LORENTZ —Hendrik Antoon LORENTZ (1853–1928)— y dilatación del tiempo. El valor de la longitud o la duración solo cambia porque se cambia el sistema de referencia, es decir, porque se elige una descripción matemática diferente para el mismo proceso.

En física es normal que los valores de las magnitudes físicas cambien cuando se modifica el sistema de referencia. Por ejemplo, si se cambia el sistema de referencia, el valor de la energía cinética cambia. Pero no se dirá que la energía ha aumentado. Esta afirmación llevaría a preguntarse cuál es la tasa de cambio dE/dt de la energía. Si se cambia el sistema de referencia, el valor del momentum cambia. Pero no se dirá que el momentum ha aumentado, porque entonces habría que responder a la pregunta sobre la tasa de cambio del momentum dp/dt y qué fuerza causa dicho cambio.

Se podría pensar que se trata de una cuestión trivial: todo el mundo sabe lo que se quiere decir. Tal vez sería así si no fuera por la teoría de la relatividad.

El principiante aprende con dificultad en qué consiste la contracción de la longitud y la dilatación del tiempo. No ha cambiado nada de la vara acortada ni del reloj, que va más lento desde el punto de vista de otros relojes; porque al cambiar el sistema de referencia, no solo se acortó la vara, sino el mundo entero, y por eso no se nota cuando se vive en ese mundo.

Pero entonces él (el principiante) llega a tratar otros temas de la teoría de la relatividad en los que algo también se alarga o acorta, y pensará que es un efecto del

mismo tipo que con el cambio de sistema de referencia. Por ejemplo, el interferómetro de MICHELSON —Albert Abraham MICHELSON (1852–1931)—, que se utiliza para detectar las ondas gravitacionales. La distancia entre los espejos cambia, aprende, por lo que la distancia que debe recorrer la luz cambia y con ella el patrón de interferencia. Pero ¿no cambian con ello todas las demás longitudes: la longitud de onda de la luz utilizada; todos los dispositivos de medición de longitudes y también la altura de los investigadores? Entonces el cambio de longitud no debería ser detectable.

Eso no es cierto, por supuesto. Se trata de un proceso real que no vuelve a desaparecer cuando se cambia el sistema de referencia. Esta interpretación se hace más difícil si no se distingue claramente entre los conceptos “proceso físico” y “cambio de sistema de referencia”.

El problema se agrava con la repetida afirmación de que no existe un éter y que el espacio está vacío; entonces, por supuesto, la afirmación de que se está expandiendo no tendría sentido.

Origen

El término contracción de la longitud era apropiado en el contexto de las ideas de LORENTZ [1]. Según la teoría de LORENTZ, el fenómeno llamado contracción de la longitud sería un auténtico acortamiento de las distancias en los objetos materiales. Ya en la concepción de un predecesor de LORENTZ, FITZ GERALD [2], Fig. 4.11, es un cambio real de longitud.

Eliminación

Se debe tener cuidado de no dar la impresión de que la fórmula de LORENTZ describe un proceso. En particular, se evitarán los términos contracción de la longitud y dilatación del tiempo. En el caso del interferómetro gravitacional, en cambio, es necesario indicar claramente que la distancia entre los espejos aumenta, así como la expansión del universo. Aquí se puede hablar de dilatación y contracción o de expansión, y así se hace. Por lo que se debe esperar la pregunta acerca de quién se expande. Y si no se quiere usar la palabra éter, hay que pensar en otro nombre para la entidad en expansión. Si se limita a llamarlo espacio, no se le hará ningún favor al alumno. Pues la precomprensión de este concepto es simplemente: “espacio para algo”.

Referencias

[1] H. A. Lorentz, *Die relative Bewegung der Erde und des Äthers*, Zittingsverlag, Amsterdam, Akad. v. Wet., 1, 1892, p.74

[2] G. F. Fitz Gerald, *The Ether and the Earth's Atmosphere*, Science, Vol. XIII, No. 328, Letters to the editor, p.390

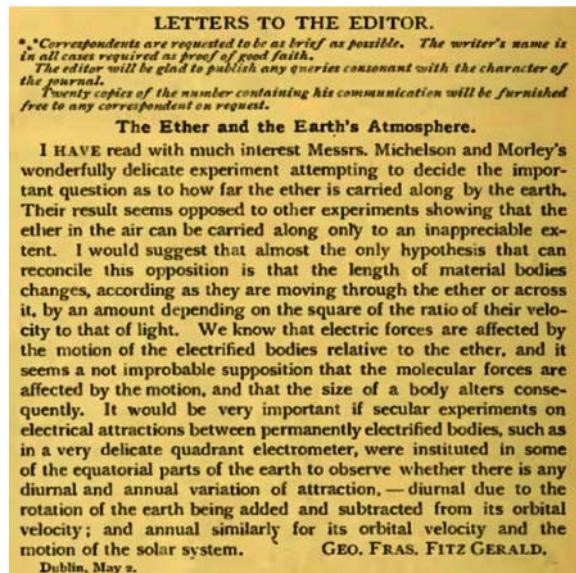


Fig. 4.11 Concepción prerrelativista de la contracción de la longitud

4.12 Movimientos en el espacio-tiempo

Tema

- 1 “Hipótesis geodésica: Un objeto puntual se mueve a través del espacio-tiempo en una geodésica. Los objetos masivos se mueven en geodésicas tipo temporal, los objetos sin masa en geodésicas tipo luz.”
- 2 “... as Krikalev hurtled along at 17 000 miles an hour onboard the Mir space station, time did not flow at the same rate for him as it did on Earth.”
- 3 “When mass —be it a star, a planet or a human being— is present, spacetime bends around it so that an object traveling nearby must follow a rounded trajectory that takes it closer to the mass. Just as it is impossible to move in a straight line on the surface of a sphere, it is likewise impossible to move in a straight line through curved spacetime...”

Defectos

El hecho de que el mundo ya no se describa en el espacio tridimensional, donde el tiempo es solo un parámetro que permite ordenar los distintos estados, sino en el espacio-tiempo, donde espacio y tiempo se funden en una sola entidad, tiene consecuencias para el lenguaje que no siempre se tienen en cuenta. En el lenguaje coloquial, que siempre es la base también para la descripción de los fenómenos físicos, esta firmemente anclada la separación del espacio y el tiempo. Se habla de cosas que *suceden*, que *se mueven*, de eventos que son *la causa de eventos posteriores*.

Todo esto ya no tiene sentido si se toma en serio el espacio-tiempo. Utilizando el lenguaje antiguo al describir los procesos en el espacio-tiempo, se tiene que contar con que se produzca una confusión.

Las tres citas lo demuestran de tres maneras diferentes, veámoslas una a una por separado.

- En la física clásica y en el mundo cotidiano, un cuerpo se mueve a lo largo de una trayectoria. La trayectoria es una curva en el espacio; se expresa la 4^a dimensión, el tiempo, diciendo que el cuerpo se mueve en la trayectoria. No puede moverse en una línea de universo. Si decimos que se mueve en una línea de universo, ya estamos pensando en la trayectoria en el espacio tridimensional. En el espacio-tiempo, el concepto de movimiento ya no tiene sentido. Lo mismo ocurre con el concepto de corriente o flujo, que, como sabemos, imaginamos como un movimiento colectivo de una sustancia, o como en el caso de las magnitudes físicas, de una sustancia imaginaria.
- En física, una tasa es un cambio relativo a un intervalo de tiempo. La tasa de cambio de la carga eléctrica

es $\Delta Q/\Delta t$. La cita habla de una tasa del flujo del tiempo. Pero ¿cuál es la tasa en la nave espacial y cuál es la tasa en la Tierra? Todo lo que se puede hacer en este contexto es dividir un intervalo de tiempo propio por un intervalo de tiempo de coordenadas. ¿Justifica esto la afirmación de que para Krikalev el tiempo pasa a mayor velocidad que en la Tierra?

En el lenguaje cotidiano es bastante común decir que uno se mueve en el tiempo, o que el tiempo vue-
la, o que el tiempo pasa a veces más rápido y a veces más lento. Pero eso no es física, es psicología.

- Aquí se tiene de nuevo el movimiento a través del espacio-tiempo, véase el punto 1. Además, el autor probablemente quiere decir simplemente que los rayos de luz en el espacio tridimensional están curvados. Sin embargo, si eso es lo que se quiere decir, sería una exageración afirmar que un movimiento recto es imposible: la luz de una sola estrella sí se mueve en línea recta alejándose de la estrella. Y, por último, si dos líneas que parten en paralelo se acercan o se alejan, esto pue-
de tener dos causas: o las líneas son curvas, o el espacio es curvo. En el caso de la superficie esférica, pro-
bablemente sería más sensato decir que los “grandes círculos” son líneas rectas en un espacio curvo. (Por supuesto, tanto las líneas como el espacio pueden es-
tar curvados, y el efecto de las dos curvaturas sobre el par de líneas puede incluso anularse mutuamente;
véase dos círculos de latitud vecinos en la Tierra: su
distancia no cambia cuando se avanza sobre las líneas,
aunque estén curvadas como líneas, lo que todo pilo-
to de avión o capitán de barco seguramente sabe).

Origen

Estamos tratando con una teoría que hace inutilizables las categorías básicas de nuestra descripción del mundo. No se puede culpar a los científicos que desarrollaron la teoría, porque preparar su teoría para la enseñanza no es necesariamente su trabajo.

Parece más bien que los profesores y publicistas que llevan la teoría a la gente no son suficientemente cons-
cientes del problema.

Eliminación

Nuestro lenguaje habitual falla. El lenguaje de las mate-
máticas, en cambio, funciona.

Lo único que se puede recomendar aquí es probable-
mente expresarse con cuidado.

- Por lo tanto, no: “El cuerpo C se mueve en la línea de universo AB”, sino “AB es la línea de universo del cuer-
po C”.
- Entre dos comparaciones de relojes, ha pasado más
tiempo para Krikalev (y su reloj de pulsera) que para

Relatividad de la simultaneidad

su colega (y su reloj de pulsera) en la Tierra. Posiblemente también: un reloj que indica la hora de coordenadas indica más que el reloj que indica la hora propia. O bien: las agujas del reloj de tiempo propio se mueven más rápido que las de un reloj de tiempo de coordenadas en el mismo lugar.

- Una geodésica (en un espacio bidimensional o tridimensional) se llamaría recta porque no es curva en este espacio.

4.13 Relatividad de la simultaneidad

Tema

Creemos que el tema ocupa demasiado espacio en comparación con otras proposiciones de la Teoría de la Relatividad Especial (TRE). Es intrincado, pero tiene poca consecuencia en lo que importa.

La cuestión de si dos eventos que ocurren en lugares distintos son simultáneos surge de la convicción de que existe un tiempo que es independiente del lugar y de la velocidad, un parámetro, por así decirlo, con el que se pueden ordenar los estados del mundo en su conjunto. Para poder dar una respuesta a la pregunta, hay que especificar un procedimiento que permita decir de dos acontecimientos espacialmente distantes si son simultáneos o no. Para ello, se explica cómo “sincronizar” relojes que están en lugares diferentes.

Para tomar algo de distancia, hagamos otra pregunta, que es un poco similar: ¿La igualdad de ubicación (la “monolocalidad”) es también relativa? En un lenguaje más fluido: ¿dos eventos que ocurren en el mismo lugar para una persona también ocurren en el mismo lugar para cualquier otra persona? Con los términos “para una persona” y “para cualquier otra” se quiere decir: “en un sistema de referencia” y “en cualquier otro sistema de referencia” respectivamente. Por supuesto, la respuesta es “no”. Es tan evidente que a nadie se le ocurriría hacer dicha pregunta.

Que la afirmación sobre la simultaneidad es bastante insignificante se ve mejor cuando se analiza desde la perspectiva de la relatividad general (TRG). Porque ahí, la cuestión se esfuma de alguna manera; el concepto de simultaneidad pierde su sentido, porque generalmente ya no se pueden “sincronizar” dos relojes idénticos. A no ser, claro está, que uno decida entender la sincronización de otra manera. Por ejemplo, la sincronización de los relojes en el sistema GPS: se monta un reloj en el satélite que funcionaría más lento si estuviera en reposo junto al reloj terrestre. En el satélite, funciona entonces de forma

“sincrónica” con los relojes de la Tierra: cada vez que se compara el reloj del satélite con uno de los relojes de la Tierra, ambos indican la misma hora. Pero cuidado: no se habla de esta sincronización cuando se habla de la sincronización del reloj en el contexto de la TRE.

Al igual que la contracción de la longitud y la dilatación del tiempo, la relatividad de la simultaneidad tiene que ver con el cambio de sistema de referencia. Los cambios de sistema de referencia suelen dar lugar a confusión, incluso en la física clásica; confusión no solo entre los alumnos, sino también entre los físicos experimentados [1]. Al cambiar el sistema de referencia, siempre hay que tener en cuenta que nada cambia en el mundo real; lo que cambia es solo la descripción matemática. Algo exagerado, se podría decir: los cambios en los valores de las magnitudes físicas y los consiguientes cambios en la interpretación de un fenómeno al cambiar el sistema de referencia son expresión de una descripción no adecuada. Pero, por desgracia, no se tiene otra opción.

Pero ¿por qué la relatividad de la simultaneidad no tiene consecuencias importantes? Porque la relación entre eventos que son simultáneos en un marco de referencia y no en todos los demás es espacial. Uno de los acontecimientos no está relacionado causalmente con el otro. Por lo tanto, la inversión del orden temporal no tiene consecuencias.

Origen

EINSTEIN trata el tema de la sincronización y la relatividad de la simultaneidad al principio y de manera detallada en su famosa publicación “Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento” [2]. Cualquiera que se interese en la teoría de EINSTEIN se enfrenta a ella en primer lugar. EINSTEIN no podía sospechar en aquel tiempo el extraño final que tendría el concepto de simultaneidad a causa de la teoría que él mismo desarrolló durante los diez años siguientes.

Mientras que en 1905 todavía parecía una importante preocupación tratar con una expectativa humana, a saber, que uno puede decidir sin ambigüedad para dos eventos en diferentes lugares y en diferentes sistemas de referencia si son simultáneos o no, desde el punto de vista del TRG este esfuerzo se revela como un intento desesperado de rescatar un concepto erróneo de nuestra intuición.

Eliminación

La eliminación está asociada a una ganancia de tiempo: abstenerse, al menos en la escuela, de tratar el tema. Hay temas más importantes en relación con el espacio-tiempo que normalmente no se tienen en cuenta.

Suma o adición de velocidades

Referencias

- [1] Véase 4.9 *¿La paradoja de los gemelos en la escuela?*, p.111
 [2] A. Einstein: Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento [en línea]. En: <https://www.jstor.org/stable/43046574> [consultado el 31 de octubre de 2022].

4.14 Suma o adición de velocidades

Tema

Se encuentran citas como las siguientes:

- 1 “Esta dificultad se resuelve mediante el uso de la suma de velocidades correcta, la cual fue indicada primero por EINSTEIN. Esta es:

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{u'v}{c^2}} \dots [1]$$

- 2 “La ecuación 12

$$[v = \frac{v_0 + u}{1 + \frac{v_0 u}{c^2}}]$$

nos da una forma de la ley de la suma de velocidades consistente con los postulados de EINSTEIN...” [2]

- 3 “... y por lo tanto

$$W = \frac{v + w}{1 + \frac{vw}{c^2}}$$

que es el teorema de adición de velocidades.” [3]

Defectos

Las ecuaciones anteriores, que se encuentran en varios textos y publicaciones, indican cómo se transforma la magnitud velocidad al cambiar el sistema de referencia. Existen relaciones análogas para la transformación de distancias e intervalos de tiempo, de la energía y del momentum, de las intensidades de los campos eléctrico y magnético, y de otras magnitudes, y en ellas no se habla de suma o adición, lo cual resulta apropiado. Emplear el término adición o suma únicamente en el caso de la transformación de la velocidad probablemente no contribuye a la claridad del concepto, como tampoco darle más importancia a esta particular transformación que a las otras referidas, considerándola en ocasiones como teorema.

En particular no se debe olvidar que la palabra “adición” está reservada para la consabida operación mate-

mática, que no corresponde a esta “adición de velocidades”.

Además puede darse la impresión de que siempre es incorrecto sumar velocidades con el método normal, es decir, en el sentido tradicional de la matemática, ya que podría resultar una velocidad superior a la velocidad de la luz, lo cual no es posible. Este argumento en general no es correcto; esta permitido y puede ser necesario sumar velocidades no importa cuán grande sea el resultado, si se quiere, por ejemplo, calcular el valor promedio de la velocidad a partir de velocidades individuales.

Origen

Probablemente se ha adoptado este modo de hablar porque para pequeñas velocidades la transformación se reduce a una simple adición. El mismo EINSTEIN utilizó dicha expresión [4].

Eliminación

Al referirse a la mencionada ecuación se recomienda hablar de transformación de la velocidad en lugar de suma o adición de velocidades, de la misma forma que se refiere a la transformación de otras cantidades físicas.

Referencias

- [1] E. Jones y R. Childers, *Física contemporánea*. 3 ed. México: McGraw-Hill, 2001. p.787.
 [2] R. Resnick, D. Halliday y K. Krane, *Física*. Vol.1. México: Compañía Editorial Continental, 2001. p.525.
 [3] Teorema de adición de velocidades. [en línea]. En: <http://www.relatividad.org/bhole/adicion.html> [consultado el 3 de mayo de 2022].
 [4] A. Einstein, *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*. Braunschweig: Vieweg & Sohn, 1920. S. 16. Existe versión en línea en castellano: Einstein, A. Sobre la teoría de la relatividad especial y general. (Preparado por Patricio Barros) En: <http://www.librosmaravillosos.com/teoriarelatividad/capitulo01.html> [consultado el 3 de mayo de 2022].

4.15 Corrección GPS y la teoría de la relatividad general

Tema

Las desviaciones relativistas que es necesario corregir en los relojes de los satélites GPS son de dos tipos: una proviene de la “dilatación del tiempo”, que tiene que ver con la velocidad del satélite. La otra se presenta porque el satélite se encuentra a un potencial gravitacional más alto que los relojes terrestres. El primero de estos efectos es un

El éter y el vacío

efecto relativista especial (en adelante, efecto TRE), el segundo, se suele decir, es un efecto de la relatividad general (efecto TRG). A veces se afirma que la indicación del reloj del satélite es mayor porque el satélite se encuentra en un campo más débil.

Defectos:

Se presentan dos problemas con el efecto atribuido a la TRG.

- No tiene nada que ver con la intensidad del campo, sino que depende únicamente del potencial gravitacional. El efecto también se produce con la aproximación de que el campo es homogéneo, es decir, que la intensidad del campo es independiente de la altura.
- La afirmación de que es un efecto TRG no es apropiada. Por supuesto, se puede discutir sobre qué efectos se atribuyen a la TRG. ¿Es el mero hecho de tomar en serio la equivalencia de la masa inercial y la gravitacional una afirmación de la TRG? ¿El hecho de cambiar a un sistema de referencia acelerado significa que se está haciendo TRG? Probablemente no. Es más apropiado definir la distinción entre un efecto TRG y uno no TRG de esta manera: todo lo que se puede describir con un espacio plano de MINKOWSKI —Hermann MINKOWSKI (1864–1909)— no pertenece a la categoría de efectos TRG.
- Si nos atenemos a este criterio, la diferencia de tiempo propio entre relojes a distintas alturas no es un efecto TRG. También se da en el campo gravitatorio homogéneo, y para este el tensor de RIEMANN —Georg Friedrich Bernhard RIEMANN (1826–1866)— es nulo, o lo que es lo mismo, se puede deshacer del campo pasando a un sistema de referencia en caída libre.

Consideremos el famoso ejemplo de los gemelos (A y B), uno de los cuales vive en un rascacielos arriba y el otro abajo. Primero se encuentran a mitad de camino y sincronizan sus relojes. Cuando, después de pasar un tiempo arriba y abajo respectivamente, vuelven a comparar sus relojes, el reloj del gemelo de arriba marca más que el del de abajo. Esta diferencia de tiempo propio puede explicarse convenientemente con la TRE describiendo el rascacielos junto con A y B en un sistema de referencia de caída libre. Se supone que una tercera persona C salta desde el punto del espacio-tiempo de la primera comparación de relojes de tal manera que llega de nuevo a los gemelos A y B durante la segunda comparación de relojes. La persona C flota libremente o cae entre los dos puntos del espacio-tiempo, mientras que los gemelos y el rascacielos se alejan y regresan aceleradamente. C puede determinar la diferencia entre los tiempos propios de los dos gemelos en su sistema de referencia flotante o inercial

utilizando los medios de la TRE. El efecto es del mismo tipo que en la clásica paradoja de los gemelos, en la que viajan de un punto del espacio a otro por diferentes líneas de universo.

Origen

Al afirmar que el efecto está relacionado con una diferencia de intensidad de campo, el argumento puede ser el siguiente: el hecho de que un reloj funcione más rápido que el otro debe tener una causa local; algo en la ubicación de los relojes debe ser diferente. Así que no se ha entendido la naturaleza del espacio-tiempo.

Se podría intentar justificar que se trata de un efecto TRG de esta manera: cuando hay un campo gravitacional de por medio, la TRE ya no se aplica. Solo se puede transformar el campo moviéndose de forma acelerada. Parece que se cree que la aceleración no pertenece a la TRE.

Eliminación

Tratar ambos efectos en el marco de la TRE.

4.16 El éter y el vacío

Tema

Se analizan citas como las siguientes:

- “La introducción de un ‘éter lumínico’ se mostrará superflua, puesto que la idea que se va a desarrollar aquí no requerirá un ‘espacio en reposo absoluto’ dotado de propiedades especiales, ni asigna un vector velocidad a un punto del espacio vacío donde estan teniendo lugar procesos electromagnéticos.” [1]
- “... no podrían encontrarse pruebas experimentales que indicaran la existencia de un sistema inercial único, es decir, el ‘éter.’” [2].
- “... no hay bases experimentales aceptables para adoptar el concepto de ‘éter’, es decir, un sistema preferido de referencia. Esto es cierto ya sea que se considere al éter como estacionario o arrastrado por los cuerpos.” [3].

Defectos

Las experiencias de MICHELSON y MORLEY mostraron que la velocidad de la luz es independiente del sistema de referencia, lo cual tuvo diversas consecuencias para la Física. Una de ellas, de máxima trascendencia, fue el surgimiento de la Teoría de la Relatividad; otra, relacionada indirectamente con dicha teoría, fue la conclusión de la no existencia del llamado éter lumínico. A menudo se formulan las dos consecuencias juntas como si la no-existencia del éter fuera una de las proposiciones de

la Teoría de la Relatividad. A veces se menciona la no-existencia del éter solo de paso, como por ejemplo en el artículo de EINSTEIN de 1905 [1]; en otras ocasiones se presupone que la no-existencia de un sistema de referencia preferencial es idéntica a la proposición que no existe un éter, como en las citas [2] y [3].

Con el siguiente experimento mental se puede demostrar que aquí se trata de dos afirmaciones distintas y que la una no es consecuencia de la otra.

Un automóvil se desplaza por una cinta transportadora —que inicialmente no se mueve—, con una velocidad respecto a esta casi igual a la de la luz. Al poner la cinta en movimiento —primero en la misma dirección que el vehículo—, se observaría que este continúa moviéndose con (casi) la velocidad de la luz; lo mismo ocurriría en el caso que la cinta se mueva en dirección opuesta; es decir, la velocidad del automóvil prácticamente no cambia.

Si dicho experimento se hubiera realizado en lugar del de MICHELSON y MORLEY, ¿qué se hubiera deducido de él? Obviamente que existe una velocidad límite y que al cambiar el sistema de referencia no es correcto sumar sencillamente las velocidades respectivas. Probablemente dichas conclusiones hubieran conducido a la Teoría Especial de la Relatividad, pero es seguro que no se hubiera concluido que el “portador” del automóvil, es decir, la cinta transportadora, no existe. Sin embargo, precisamente esa conclusión fue la extraída del verdadero experimento de MICHELSON y MORLEY. Del hecho que la velocidad de la luz no cambia al cambiar el sistema de referencia se ha deducido (incorrectamente) que no existe un portador de la onda luminosa.

Origen

Hasta la aparición de la Teoría de la Relatividad, la conclusión que no existe un éter, parecía ser la única posibilidad de interpretación del experimento de MICHELSON y MORLEY, pero la teoría de EINSTEIN ha resuelto el problema de un modo completamente distinto.

Podría considerarse un desliz el hecho que al inicio el mismo EINSTEIN opinaba que el éter era superfluo, como se refleja en la cita [1]. En efecto, después de la aparición de su artículo sobre la Relatividad Especial escribe: “... el espacio vacío, es decir, un espacio sin campo [gravitacional] no existe” [4], y luego lo dice aún más claramente: “Esta variabilidad espacio-temporal [...] ha descartado definitivamente la idea de que el espacio sea físicamente vacío.” [5], y: “Según la teoría general de la relatividad es impensable la existencia de un espacio sin éter...” [6].

Es de anotar que una vez surgieron las nuevas teorías que mostraron que el llamado espacio vacío no estaba

para nada vacío, el éter resucitó bajo otro nombre. Se le llamó “vacío”, nombre desafortunado dado que la palabra “vacío” en el lenguaje común expresa la ausencia de cosas, la falta de contenido físico y no la presencia de algo.

Eliminación

Dejar el éter “fuera de juego” mientras no sea absolutamente necesario, de lo contrario es fácil “perderse” en la jungla de los conceptos éter, espacio, campo gravitacional y vacío.

Referencias

- [1] A. Einstein, *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, Annalen der Physik, 17, 1905, p. 892. Existe versión en castellano: Sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento. En: Einstein 1905: un año milagroso. (Ed. Stachel, J.) Barcelona: Editorial Crítica, S.L., 2001, p.112.
- [2] R. Resnick, *Introducción a la Teoría Especial de la Relatividad*, México: Editorial Limusa, 1981. p. 24.
- [3] Ibid., p.30.
- [4] A. Einstein, *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*, Berlin: Akademieverlag, WTB, 1973, p.125. Existe versión del libro en castellano: *Sobre la Teoría de la Relatividad Especial y General*. En: <http://www.librosmaravillosos.com/teoriarelatividad/index.html>, para la cita concreta ver el apéndice, p.26.
- [5] A. Einstein, *Äther und Relativitäts-Theorie*, Berlin: Verlag von Julius Springer, 1920, p.12. Existe versión en castellano: *El éter y la teoría de la Relatividad*. En: Einstein. (Ed. Sánchez Ron, J. M.) Barcelona: Crítica, 2005, p.142.
- [6] Ibid., p.15. En castellano, p.145.

4.17 El espacio absoluto

Tema

- 1 “El espacio absoluto, por su naturaleza y sin relación a cualquier cosa externa, siempre permanece igual e inmóvil...” [1]
- 2 “No hace falta mencionar que en las ideas que acabamos de presentar NEWTON actúa en contra de su intención de estudiar solamente la realidad. Nadie puede afirmar algo sobre el espacio absoluto y el movimiento absoluto; estos conceptos son solamente objetos de la mente que no corresponden a algo de nuestra experiencia.” [2]
- 3 “Era necesario desenmascarar los conceptos ‘tiempo absoluto’ y ‘espacio absoluto’ como prejuicios prerelativísticos mágicos sin demostrar.” [3]

El espacio-tiempo absoluto

Defectos

Los fenómenos de gravitación se pueden clasificar en dos categorías; en la primera, aquellos que tienen que ver con la interacción gravitacional de cuerpos que se encuentran en reposo uno respecto al otro. En mecánica clásica se los describe por medio de la ley de gravitación, descripción que es muy similar a la de los fenómenos de la electrostática, por lo cual se podrían llamar gravitoestáticos. Los cuerpos “sienten” esa parte del campo gravitacional que se describe con el conocido campo vectorial de la intensidad del campo gravitacional.

En la segunda categoría figuran los fenómenos relacionados con un cuerpo acelerado; hoy día de acuerdo con la Teoría General de Relatividad (TGR) estos efectos no se describen por medio de un campo, sino (junto con los efectos estáticos) por medio del tensor métrico, un cuerpo “lo siente” cuando está acelerado respecto a otros cuerpos. Sin embargo, la dependencia de estas fuerzas de la distancia entre los cuerpos no es la misma que en el caso de las fuerzas gravitoestáticas, los cuerpos que se encuentran a distancias grandes tienen mayor influencia [4]. Por esta razón las fuerzas iniciales se notan solamente cuando se hace referencia a gigantescas masas repartidas en el cosmos, mientras la influencia de cuerpos cercanos no se ha podido demostrar plenamente hasta el día de hoy. Dichas fuerzas se manifestarían en el efecto LENSE–THIRRING —en honor a Joseph LENSE (1890–1985) y Hans THIRRING (1888–1976)— [5], efecto que también se llama gravitomagnético.

¿Cómo abordó NEWTON estos dos efectos? Como es conocido, describió el primero, el gravitoestático, con su ley de gravitación, considerando como un defecto el hecho de que la acción gravitacional se transmitiera a distancia; así lo expresó claramente. Sin embargo, esa situación de “inconformidad” no le llevó a introducir un medio que pudiera transmitir la cantidad de movimiento; es conocida su “*Hypotheses non fingo*”, que en español moderno podría interpretarse como: “No voy a especular”. Respecto al segundo efecto hubiera sido consecuente introducir como causa de las fuerzas iniciales a las estrellas, como lo proponía George BERKELEY (1685–1753), su contemporáneo algo más joven. NEWTON prefirió una interpretación, que en principio es más “sana” ya que no requiere de acciones a distancia, para él las fuerzas iniciales no son causadas por otros cuerpos, sino por el “espacio absoluto”, es decir, algo que se encuentra en el mismo lugar que el cuerpo sobre el cual actúa la fuerza inercial, es una descripción local. Desde un punto de vista moderno se podría decir que con su espacio absoluto NEWTON introdujo algo que más tarde se llamaría campo.

Se observa que la crítica de MACH —Ernst Waldfried Josef Wenzel MACH (1838–1916)—, expresada en la cita [2], fue un poco precipitada, y el desvirtuar al espacio absoluto —y de paso a su creador— no ayuda a hacer una evaluación histórica de las ideas de NEWTON.

Origen

Ya se ha expresado en los Defectos. Es posible que una razón para que los efectos estáticos y los dinámicos se traten de un modo tan distinto sea que una teoría del tipo “acciones a distancia” para las fuerzas iniciales no fue elaborada a su debido tiempo, a pesar de que existían los elementos para ello, dados por BERKELEY. Hoy día se tiene una teoría local fácil de comprender aplicable solamente a los fenómenos estáticos; la teoría que engloba ambos efectos, la TGR, desafortunadamente es bastante difícil desde el punto de vista matemático.

Eliminación

Se sugiere un poco más de consideración hacia el espacio absoluto de NEWTON, la idea en general no es tan mala como a veces se presenta.

Referencias

- [1] I. Newton, *Principios matemáticos de la Filosofía natural*. En: A hombros de gigantes. 3ra ed. Barcelona: Crítica, 2003. p.655.
- [2] E. Mach, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*, Brockhaus, Leipzig, 1897, p.223
- [3] Dorn-Bader, *Physik*, Gymnasium Gesamtband, Schroedel, Hannover: Schroedel, 2000. S. 405.
- [4] D. W. Sciama, *The Physical Foundations of General Relativity*, Doubleday & Company, New York, 1969, p.22-3
- [5] El efecto Lense-Thirring. [en línea]. En: <https://www.cienciahoy.org.ar/ch/hoy49/relativ01.htm> [consultado el 22 de junio de 2022].

4.18 El espacio-tiempo absoluto

Tema

El espacio absoluto no existe, se afirma y asegura repetidamente. Hablar de la posición y movimiento de un cuerpo solo tiene sentido en relación con otros cuerpos.

Defectos

Como es bien sabido, NEWTON —Isaac NEWTON (1643–1727)— introdujo el espacio absoluto. Se manifiesta, por ejemplo, en el hecho de que se puede decidir si un cuerpo gira sin tener que referirse a otro cuerpo. El

El espacio-tiempo absoluto

cuando gira en el espacio, o contra el espacio. Un problema con esto era que no había forma de saber si el cuerpo estaba realizando un movimiento de traslación relativo al espacio. Para ello habría sido necesario que hubiera "hitos" en el espacio, y los únicos hitos conocidos eran los otros cuerpos; por eso se insistió en que las posiciones y las velocidades son relativas, que solo tiene sentido hablar de lugar y velocidad en relación con otros cuerpos. MACH —Ernst MACH (1838–1916)— lo expresa con particular claridad: la posición "absoluta" y el movimiento absoluto, es decir, el movimiento respecto al espacio absoluto, son solo "cosas del pensamiento" [1].

Desde el punto de vista de la época, la única salida al dilema parecía ser una gigantesca acción a distancia: un cuerpo se mueve con respecto a la esfera celeste (en la época de NEWTON) o con respecto a las estrellas fijas (en la época de MACH). Sin embargo, tal idea era inaceptable para NEWTON.

Pero la situación empeoró, y MACH aún no podía saberlo, el universo en su época consistía solo en nuestra propia Vía Láctea; MACH no sabía nada acerca de las otras galaxias y cúmulos de galaxias, ni sobre la expansión del universo. Desde que se obtuvo este conocimiento, la idea de movimiento relativo a las estrellas fijas se ha vuelto aún más absurda. Respecto a qué se supone que debe moverse un cuerpo aquí donde estamos ahora: ¿respecto a la posición actual (de ahora) de las estrellas, o a su posición cuando emitieron la luz que ahora estamos recibiendo? ¿Y qué significa el "ahora" para una estrella distante?

Finalmente, el año 1915 trajo la solución: el espacio, que para NEWTON, y también para MACH, seguía pareciendo completamente homogéneo y sin estructura, no es homogéneo y sin estructura en absoluto. Tiene propiedades locales, y estas propiedades difieren de un lugar a otro. Se expresan en el tensor métrico y en el tensor de RIEMANN —Georg Friedrich Bernhard RIEMANN (1826–1866)—, cuyos componentes son funciones de la posición y del tiempo. El espacio absoluto de NEWTON está, pues, de vuelta, solo que no tiene la propiedad que NEWTON supuso, la de ser completamente homogéneo e invariable, y por tanto no contiene ningún hito.

Origen

Ya se ha abordado. Se puede complementar diciendo que no se debería haber tomado la deficiencia del espacio newtoniano de forma tan trágica. No se trata de una contradicción, sino simplemente de una carencia. Los "hitos" ya estaban allí en ese momento, pero aún no se podían ver; sin embargo, la idea de NEWTON era correcta. Una actitud positivista, como la defendida por

MACH, es en efecto una actitud básica y útil para el trabajo científico, pero a menudo obstaculiza la imaginación. También conviene recordar el rechazo de MACH a la teoría atómica, que surgió de la misma actitud.

Así que, después de GOETHE —Johann Wolfgang von GOETHE (1749–1832)—, alguien volvió a equivocarse al intentar criticar a NEWTON.

Eliminación

Ya en la mecánica newtoniana se debe introducir el espacio como algo real respecto al cual se producen los movimientos. Se abordan sus propiedades, inicialmente sin profundizar en la idea de su curvatura. En esta etapa inicial solo es importante que surja la idea del espacio como una entidad concreta y real existente. La cuestión de si el espacio es absoluto o no, ni siquiera se plantea.

Más adelante, por supuesto, se explica que el espacio y el tiempo forman juntos la entidad llamada espacio-tiempo.

Podría, entonces, pensarse que existe un espacio-tiempo absoluto, pero esto también es superfluo si se ha aclarado que el espacio-tiempo tiene propiedades locales, es decir, en un mundo de cuatro dimensiones.

Sin embargo, todavía no se ha eliminado un obstáculo menor, el nombre. Coloquialmente, el término espacio significa algo así como el "sitio" para algo que podría estar allí. Por lo tanto, no se refiere a algo concreto que realmente existe. Como alternativa, se podría pensar en reactivar la hermosa y antigua denominación éter. Pero, aparte del pasado poco glorioso del concepto, el nombre de éter tiene el inconveniente de que vuelve a referirse claramente al contenido del espacio. El éter era como un gas, pero dicho gas necesitaba el espacio en que se encontraba.

El espacio que nos ocupa, el espacio de la relatividad general, es a la vez contenedor y contenido. El contenedor no existe sin el espacio, y el espacio no existe sin el contenedor. A la fecha no se conoce ningún ejemplo, ningún análogo, ningún modelo en nuestro mundo experimental para designar dicho concepto.

Esta idea debería enseñarse en clase. ¿Pero cómo podría llamarse? Hasta ahora no se ha encontrado nada adecuado. Así que mientras surge algo más apropiado se debe seguir con el término espacio, o espacio-tiempo. Pero los alumnos tienen que aprender que en física el espacio no es un contenedor vacío.

Referencias

- [1] E. Mach, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*, Leipzig: Brockhaus, 1897, S. 223
- [1] M. Plack, *Physikalische Zeitschrift*, 9. Jahrgang, Nr. 23 (1908), S. 828

Entropía

5 TERMODINÁMICA

5.1 Entropía

Tema

Se llama entropía S a una magnitud que se introduce en la termodinámica clásica como función abstracta, definida por una integral, lo cual le confiere un carácter tan vago que incluso a los especialistas en la materia les cuesta tratar con ella. Su interpretación como una medida del desorden es un enfoque que posibilita una idea aproximada de su significación.

Defectos

Comprender la entropía cualitativamente es laudable pero no satisface las exigencias y expectativas de los físicos, para quienes una magnitud está definida solamente cuando se dispone de un procedimiento directo o indirecto para obtener sus valores. Es molesto también el hecho de que a una magnitud definida macroscópicamente no se pueda atribuir ninguna propiedad macroscópica.

Origen

En la primera mitad del siglo 19 se hizo cada vez más evidente que la idea de que el calor fuera una magnitud conservativa era insostenible. Esto llevó a CLAUSIUS en 1850 a intentar reorganizar la termodinámica, basado en la suposición de que el trabajo y el calor se pueden transformar mutuamente [1]; en el marco de dicha reestructuración CLAUSIUS ideó la magnitud S , para poder describir los límites de la transformación mencionada.

Eliminación

En una conferencia solemne en el año 1911, el entonces Presidente de la Physical Society of London, Hugh Longbourne CALLENDAR (1863–1930) [2], apuntó que S no es otra cosa que una reconstrucción complicada y abstracta de la magnitud que CARNOT había llamado “calor”. La única diferencia era que dicha magnitud podía producirse, pero seguía siendo indestructible. Esta idea surgió medio siglo tarde para que hubiera podido corregir el curso de la historia. Sin embargo, se puede concluir que

la magnitud S , no solamente tiene una interpretación tan intuitiva como el antiguo calor, sino que es posible cuantificarla de manera sencilla. Por consiguiente, el fantasma S de la termodinámica clásica se puede reducir a un concepto comprensible para un alumno de la escuela media y eliminar al mismo tiempo el superfluo arsenal matemático. Esta expectativa ya está confirmada por una extensa experiencia en la escuela [3]. En su rol de calor S se convierte, incluso bajo el nombre anodino de entropía, en una magnitud que es apenas más exigente que los conceptos de longitud, duración o masa. El hecho de que la magnitud aparezca con un ropaje muy distinto en la informática, en la Física estadística y en las ideas atomísticas de los químicos no se opone de ninguna manera a su rol como calor en la macrofísica.

Referencias

- [1] Ver 5.14 *Equivalencia entre calor y trabajo*, p.139
- [2] H. L. Callendar, *The Caloric Theory of Heat and Carnot's Principle*, Proc. Phys. Soc. London, 23, 1911. p.153. Aquí también se encuentra la propuesta de llamar “Carnot” a la hoy unidad J/K de la entropía.
- [3] Entre las experiencias de muchos profesores particulares de colegios, existe una a gran escala con el Curso de Física de Karlsruhe, el cual puede encontrarse parcialmente en castellano en:
<http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/>

5.2 El segundo principio

Tema

Los estudiantes se encuentran con el segundo principio de la termodinámica en varias formulaciones.

- 1 “El calor fluye por sí mismo del cuerpo más caliente al más frío, nunca al revés.”
- 2 “No existe una máquina que funcione periódicamente y que no haga otra cosa que convertir el calor en trabajo.”
- 3 “Hay procesos irreversibles.”

Defectos

El segundo principio hace una sencilla afirmación sobre la entropía: la entropía puede ser creada pero no destruida. Lo llamaremos teorema de la entropía en esta forma. Pertenece, pues, a la serie de afirmaciones similares sobre la conservación o no conservación de las magnitudes extensivas. Sin embargo, rara vez se expresa de esta manera. En cambio, suele formularse sin utilizar el término entropía. Pero ¿cómo es posible? Describiendo las consecuencias del comportamiento “asimétrico” de esta.

Esta forma de tratar el enunciado central del segundo principio tiene desventajas.

Vamos a discutir algunas formulaciones tomadas de libros de texto conocidos, pero que se originan en parte en los trabajos de los grandes científicos que desarrollaron la termodinámica a finales del siglo 19 y principios del 20.

- CLAUSIUS —Rudolf Julius Emmanuel CLAUSIUS (1822 –1888)—, a quien se atribuye la invención o introducción de la entropía, formuló el segundo principio de varias maneras, entre ellas la siguiente: “**El calor no puede pasar por sí mismo de un cuerpo más frío a uno más caliente.**” [1].
- De forma muy similar, esta afirmación también se puede encontrar en los libros de texto modernos, por ejemplo: “**Es imposible un proceso en el que no ocurra nada más que tomar el calor de un depósito más frío y añadir la misma cantidad de calor a un depósito más caliente.**”
- O bien: “**El calor solo fluye por sí mismo del cuerpo más caliente al más frío, nunca al revés.**”

Si no nos negamos al uso de la palabra entropía, también podemos describir así el proceso prohibido al que se refieren las afirmaciones anteriores: El calor Q no pasa por sí mismo de un cuerpo más frío a uno más caliente. Debido a la validez de:

$$dQ = T \cdot dS \quad (5.1)$$

un flujo de entropía está asociado a un flujo de calor. Por lo tanto, también es cierto que la entropía solo fluye por sí misma del cuerpo más caliente al más frío. Ahora, cuando la entropía se transfiere del cuerpo más caliente al más frío, se genera entropía adicional. En el proceso inverso, habría que destruir la entropía. Pero esto está prohibido por el segundo principio.

Se ve que la frase hace esencialmente la misma afirmación que, por ejemplo, la siguiente: “**El agua solo desciende por la montaña, nunca al revés.**”

Este hecho también se desprende del segundo principio y podría servir como afirmación sustitutiva

del teorema de la entropía. El hecho de que nos parezca trivial indica que las consecuencias del segundo principio forman parte de nuestra experiencia cotidiana. La afirmación de que el calor fluye de lo caliente a lo frío y no al revés tampoco es una novedad para los que empiezan a aprender termodinámica.

Si se discuten estas afirmaciones u observaciones en relación con el segundo principio, también sería ciertamente apropiado mencionar los otros fenómenos en los que fluye una corriente disipativa: la carga eléctrica fluye por sí misma de los puntos de potencial eléctrico más alto a los puntos de potencial eléctrico más bajo, una reacción química transcurre de tal manera que el potencial químico de los productos es menor que el de los reactivos, el momentum va del cuerpo de mayor velocidad al cuerpo de menor velocidad en un proceso de fricción, etc.

- PLANCK —Max Karl Ernst Ludwig PLANCK (1858–1947)— también da varias formulaciones para el segundo principio, incluyendo: “**Es imposible construir una máquina que funcione periódicamente y que no haga más que levantar una carga y enfriar un depósito de calor.**” [2]
- Y también en esta forma se encuentra el segundo principio en varios libros de texto más modernos, por ejemplo: “**No existe una máquina que funcione periódicamente y que no haga más que producir trabajo mecánico y enfriar un contenedor de calor.**”
- O bien: “**Es imposible construir una máquina térmica de funcionamiento cíclico que no produzca ningún otro efecto que el de extraer calor de un único depósito y realizar una cantidad de trabajo equivalente.**”

Debido a la ecuación (5.1), estas afirmaciones son equivalentes a la afirmación de que la entropía no puede ser destruida. Sin embargo, aquí no se dice que la entropía se pueda generar. Por tanto, las proposiciones solo son equivalentes a la mitad del segundo principio: la entropía no puede ser aniquilada. Por lo tanto, se emite una declaración similar a la siguiente frase: “**No existe una máquina que funcione periódicamente y que no haga más que producir trabajo mecánico y descargar un cuerpo eléctricamente cargado.**”

Esta máquina hipotética no puede funcionar porque la carga no puede ser destruida.

- El intento de formular el segundo principio sin mencionar la entropía lleva a veces a afirmaciones aún más extrañas.

En Meschede/Gerthsen [3] se desglosa en el enunciado breve: “**Existen procesos irreversibles.**”

La afirmación está resaltada como un gran teorema. Describe una experiencia trivial que también

El segundo principio

conoce cualquiera que no tenga formación en física. No permite llegar a ninguna conclusión sobre una causa física de la irreversibilidad. Como físico, uno puede concluir, en el mejor de los casos, que una de las magnitudes extensivas es producible y no destructible (como la entropía), o también destructible pero no producible.

Si uno esta satisfecho con tal afirmación, podría añadir inmediatamente otro teorema de carácter similar: “**Existen procesos reversibles.**”

De ello se concluiría que existen una o varias magnitudes conservadas, aunque tampoco en este caso se sabría de cuáles se trata.

- También resulta destacable que el segundo principio a menudo se formula de varias maneras, es decir, que se introducen varias consecuencias del teorema de la entropía como formulaciones alternativas del segundo principio, lo que indica que los propios autores no están realmente satisfechos con ninguna de ellas. Así, MACKE [4] presenta una lista de cinco formulaciones diferentes. A nadie se le ocurriría tratar la conservación de la carga eléctrica de la misma manera, lo que sería posible.

Origen

Cuando CLAUSIUS introdujo la entropía, el segundo principio aún no podía formularse en su forma simple y moderna, porque aún no estaba claro que esta magnitud perteneciera a una clase de magnitudes con ciertas propiedades particularmente simples: las magnitudes balanceables o “de tipo sustancia”. Para cada una de ellas se puede definir una densidad, una intensidad de corriente y una tasa de producción, si es necesario. Se incluyen, entre otras, la carga eléctrica, el momentum y la masa. El hecho de que la entropía también pertenezca a esta clase de magnitudes solo se hizo evidente posteriormente.

En estas circunstancias, era difícil formular el teorema de forma fácilmente comprensible. El propio CLAUSIUS da varias versiones, por ejemplo [5]: “**La suma algebraica de todas las transformaciones que se producen en un proceso circular solo puede ser positiva.**”

O bien [6]: “**Si llamamos equivalentes a dos transformaciones que pueden sustituirse mutuamente sin requerir ningún otro cambio permanente, entonces la formación de la cantidad de calor Q a la temperatura T a partir de trabajo tiene el valor de equivalencia**

$$\frac{Q}{T},$$

y la transición de la cantidad de calor Q de la temperatura T_1 a la temperatura T_2 el valor equivalente

$$Q \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

donde T es una función de temperatura independiente del tipo de proceso por el que se produce la transformación.”

O bien [7]: “**Si a continuación se divide el elemento de calor por la temperatura absoluta correspondiente y se integra la expresión diferencial resultante para todo el proceso cíclico, para la integral así formada se aplica la relación:**

$$\int \frac{dQ}{T} \leq 0,$$

en la que el signo de igualdad debe aplicarse en aquellos casos en los que todos los cambios que conforman el proceso cíclico ocurren de forma reversible, mientras que en aquellos casos en los que los cambios se producen de forma no reversible, se aplica el signo <.”

Pero también como ya se ha citado anteriormente: “**El calor no puede pasar por sí mismo de un cuerpo más frío a uno más caliente.**” [1]

Las tres primeras afirmaciones apenas pueden entenderse hoy en día sin más explicaciones. Hacen que se comprenda por qué el segundo principio se consideraba un tema difícil.

El hecho de que la entropía sea una magnitud balanceable aún no aparece en los trabajos de CLAUSIUS. La literatura de esta época se ocupa principalmente de discutir los efectos de la nueva “convicción” de que el calor es una forma de energía, sobre las ideas de CARNOT — Nicolas Léonard Sadi CARNOT (1796–1832)—. El concepto de calor de CARNOT es tal que en un motor térmico entra tanto “calor” (*chaleur*) a alta temperatura como sale a baja temperatura. Sin embargo, si el calor se interpreta como energía, sale de la máquina menos “calor” del que entra. De ello se concluyó que CARNOT estaba equivocado, pues se daba por sentado que se había descubierto la verdadera naturaleza del calor, es decir, ser una forma de energía. Sin embargo, bajo este supuesto, CARNOT estaría equivocado. Solo poco a poco se vio que las afirmaciones de CARNOT no eran erróneas. Simplemente se trata de dos conceptos diferentes. El calor de CARNOT era simplemente una magnitud física diferente del calor-energía. El concepto de calor de CARNOT coincidió con la recién introducida magnitud entropía, lo que también significó que la magnitud introducida por CLAUSIUS no era nada tan nueva.

Friedrich Wilhelm OSTWALD (1853–1932) lo dice claramente en 1908 [8]: “**Sin embargo, la magnitud de la termodinámica, que se podría comparar con la cantidad de agua, sigue siendo bastante desconocida para la con-**

ciencia general. Se le ha dado el nombre científico de entropía y desempeña un papel en la teoría de los fenómenos térmicos acorde con su importancia. Pero el uso de esta magnitud aún no ha llegado a la escuela y, por tanto, al conocimiento de la persona educada media, por lo que debe bastar aquí la noticia de que es realmente comparable a la cantidad de agua, en la medida en que su cantidad no cambia al pasar por la máquina.”

Aquí OSTWALD se refiere a la comparación de CARNOT de la máquina térmica con una rueda de agua.

La identificación del calorico de CARNOT no con la energía, sino con la entropía, y la introducción de la entropía por parte de CLAUSIUS, innecesariamente complicada, fue finalmente demostrada tres años más tarde por CALLENDAR [9, 10].

En el mismo año 1911, JAUMANN [11] publicó un trabajo en el que formulaba una ecuación de balance para la entropía. Se presenta allí una corriente de entropía, una densidad de entropía, una densidad de corriente y una tasa de producción.

Por lo tanto, a más tardar en ese tiempo, fue posible formular la segunda ley de forma análoga a las leyes de conservación de la energía, del momentum o de la carga eléctrica: La energía no se puede crear ni destruir, el momentum no se puede crear ni destruir, la carga eléctrica no se puede crear ni destruir.

Solo unos pocos libros de texto han asumido esta idea. Por ejemplo, se encuentra en GRIMSEHL [12]: “En un sistema cerrado, los procesos siempre tienen lugar de tal manera que la entropía nunca disminuye.”

O en Joos [13]: “Todos los cambios de estado que se producen en un sistema cerrado transcurren de forma que la entropía aumenta.”

Ambos libros son algo antiguos. Se ve que una vez que se ha establecido un hábito de enseñanza, incluso mediante una mejor percepción por parte de algunos, ya no se puede erradicar. Más de cien años después de OSTWALD, la entropía aún “no ha llegado... al conocimiento de la persona con educación media”.

Eliminación

La eliminación es sumamente sencilla: introducir la entropía en el sentido de CARNOT como medida de la cantidad de calor. Luego, el segundo principio dice que el calor puede producirse, pero no destruirse, lo que cualquier lego en física puede confirmar también basándose en su experiencia cotidiana.

Referencias

- [1] R. Clausius, *Zur Geschichte der mechanischen Wärmetheorie*, Annalen der Physik, Band 221, Heft 1, 1872, p.132

- [2] M. Planck, *Thermodynamik*, Verlag von Veit & Comp., Leipzig, 1897, p.80
- [3] D. Meschede, *Gerthsen Physik*, 21. Auflage, Springer, Berlin, 2002, p.248
- [4] W. Macke, *Thermodynamik und Statistik*, Akademische Verlagsgesellschaft, Geest & Portig K.-G., Leipzig, 1962, p.120
- [5] R. Clausius, *Über eine veränderte Form des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie*, Annalen der Physik und Chemie, Band XCIII, 1854, p.504
- [6] R. Clausius, *Abhandlungen über die mechanische Wärmetheorie*, Erste Abtheilung, Druck und Verlag von Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig, 1864, p.143
- [7] R. Clausius, *Abhandlungen über die mechanische Wärmetheorie*, Zweite Abtheilung, Druck und Verlag von Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig, 1867, p.3
- [8] W. Ostwald, *Die Energie*, Verlag von Johann Ambrosius Barth, Leipzig, 1908, p.77
- [9] H. L. Callendar, *The caloric theory of heat and Carnot's principle*, Proc. Phys. Soc. London 23, 1911, p.153
- [10] H. L. Callendar, *Science*, Vol. XXXVI, No. 924, 1912, p.321
- [11] F. Jaumann, *Geschlossenes System physikalischer und chemischer Differentialgesetze*, Wiener Berichte CXX, Abt. IIa, 1911, p.385–530
- [12] W. Schallreuter, Grimsehl, *Lehrbuch der Physik*, B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1957, p.467
- [13] G. Joos, *Lehrbuch der Theoretischen Physik*, Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt am Main, 1959, p.488

5.3 Medición de la entropía

Tema

La manera general de introducir la entropía da la impresión de que sus valores solo se pueden conseguir mediante cálculos muy complejos.

Defectos

Junto con la temperatura, la entropía es la magnitud más importante de la termodinámica; es la magnitud extensiva “conjugada” de la magnitud intensiva temperatura. Estas dos magnitudes forman una pareja igual al potencial eléctrico y la carga, o a la velocidad y el momentum. Las corrientes de entropía deberían jugar en la termodinámica un papel similar a las corrientes eléctricas en la electrodinámica o las fuerzas (corrientes de

Nuevamente: la medición de la entropía

momentum) en la mecánica. La introducción tradicional de la entropía no corresponde a esta expectativa.

La primera vez que el estudiante tropieza con la entropía se la presenta como “función de estado” [1]. Pero, ¿por qué se afirma que precisamente la entropía es una función? En primer lugar, la entropía es una magnitud. Se vuelve función cuando se describe su dependencia de otras magnitudes, según cuáles sean estas, la función será distinta. ¿Por qué se insiste en que la entropía es una magnitud o función de *estado*? Todas las magnitudes extensivas, y muchas otras, son magnitudes de estado, y este hecho es tan evidente que no vale la pena mencionarlo. Ya que la introducción usual de la entropía es tan poco intuitiva se acude a dicha propiedad, a pesar de que por ella no se distingue de casi todas las demás magnitudes.

El mayor defecto en la manera tradicional de introducir la entropía es el hecho de no presentar un método de medición, lo cual hace pensar que su medición es complicada, si no imposible. En realidad, la entropía es de las magnitudes que se pueden medir con más facilidad. Se la puede medir con bastante precisión con utensilios de uso común en el hogar.

Origen

Véase 5.1 *Entropía*, p.124

Eliminación

No se trata de eliminar la entropía o su medición, sino de eliminar el prejuicio de la dificultad para medirla.

¿Cómo se mide la entropía? Se puede precisar la tarea, por ejemplo, al medir la diferencia de entropías entre 5 litros de agua a 60°C y la misma cantidad de agua a 20°C.

Se empieza con el agua a 20°C calentándola, por medio de una resistencia de inmersión, hasta llegar a 60°C. Se agita permanentemente de modo que la temperatura sea siempre uniforme y se mide la temperatura en función del tiempo. Conociendo la corriente energética (o potencia) P que entra en el agua desde la resistencia, y sabiendo que $dE = T \cdot dS$, obtenemos que:

$$dS = \frac{dE}{T} = \frac{Pdt}{T}$$

El pequeño aumento dS de la entropía se calcula sencillamente como el cociente entre la energía suministrada dE y la temperatura T . Ya que la temperatura del agua cambia al suministrar energía y entropía, la entropía total suministrada se obtiene calculando la suma o integral de las contribuciones dS . Si la variación de la temperatura al calentar es pequeña comparada con el valor promedio de la temperatura absoluta \bar{T} , se puede

utilizar dicha temperatura promedio y no es necesario integrar:

$$\Delta S = \frac{P\Delta t}{\bar{T}}$$

Es decir, el incremento de la entropía es igual a la corriente energética por el tiempo de calentamiento, dividido por la temperatura promedio.

Referencias

[1] C. Gerthsen, O. Kneser u. H. Vogel, *Physik*, Springer-Verlag, Berlin, 1986, p.183

5.4 Nuevamente: la medición de la entropía

Tema

La entropía está considerada una magnitud difícil, en parte porque se piensa que es difícil su medición.

Defectos

El conocimiento de un método de medición es importante para comprender una magnitud física. Cuanto más sencillo sea el procedimiento de medición, mejor; también se puede decir: cuanto más “directa” sea la medición, más directa será la interpretación [1].

Sin embargo, a menudo el método de medición más fácil de entender no es al mismo tiempo el más preciso y conveniente. Por tanto, para comprender, para tener una “idea” de una magnitud, puede ser útil presentar un método de medición que, aunque no sea exacto y quizás también técnicamente difícil de realizar, sea transparente y conceptualmente sencillo.

En este sentido, ¿cómo se presenta la entropía? Se suele introducir a la manera de CLAUSIUS: “Atribuimos... a cada estado del sistema una función S , que llamamos la entropía del estado y cuya diferencial total dS en el caso de un proceso reversible es:

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

donde dQ es la cantidad de calor absorbido, T la temperatura a la que se produce la absorción.” [2]

Sin embargo, el método de medición que se debe utilizar para determinar los valores de la entropía es difícil de deducir a partir de esta definición. ¿Cómo hacerlo concretamente?

La entropía puede medirse muy convenientemente empleando precisamente la producibilidad, es decir, la irreversibilidad [3]. Ese sería un procedimiento técnica-

mente sencillo (además de barato y preciso). Pero ¿cómo puede ser un procedimiento conceptualmente sencillo?

Para contestar a esta pregunta, recordemos cómo se miden otras magnitudes que tienen una importante propiedad en común con la entropía: las magnitudes extensivas.

Para esta clase de magnitudes, la medición puede realizarse, en principio, siempre de la siguiente manera: se transfiere al dispositivo de medición la cantidad a medir. El dispositivo de medición reacciona con una desviación o una indicación.

Esta es la situación que se da con la carga eléctrica. La carga que se va a medir se transfiere a un electrómetro. El electrómetro muestra una desviación correspondiente al valor de la carga. Aunque la medición es inexacta, muestra claramente una propiedad de la carga eléctrica, a saber, que los cuerpos cargados ejercen fuerzas entre sí, y sobre todo queda claro que la cantidad tiene un carácter extensivo.

Se puede proceder de la misma manera con el momentum: se transfiere al “dispositivo de medición” y este reacciona visiblemente con una desviación. El péndulo balístico es un dispositivo de medición de este tipo. Un método similar de medición de momentum se describe en [4].

¿Es posible medir la entropía de forma análoga? El dispositivo correspondiente se muestra en la Fig. 5.1: un recipiente con una mezcla de hielo y agua. Una variante algo más complicada y técnicamente perfecta es el calorímetro de hielo de BUNSEN —Robert Wilhelm BUNSEN (1811–1899)—. La cantidad de entropía a medir se transfiere a la mezcla de hielo y agua. En el proceso parte del hielo se funde. La cantidad de hielo fundido es una medida de la entropía añadida.

Como 1 g de agua líquida tiene 1,40 J/K más de entropía que 1 g de hielo, se puede inferir directamente la entropía suministrada a partir de la cantidad de hielo fundido. Como el agua líquida tiene una densidad mayor que el hielo, también se puede determinar la entropía directamente en el densímetro.

Dicho aparato no es conveniente como dispositivo de medición técnica. El problema es: hay que llevar la entropía a medir al aparato de medición sin generar nueva entropía en el proceso, es decir, en un proceso reversible. Esto es posible en principio, pero no es fácil de realizar en el laboratorio. Los detalles se describen en [5].

Origen

La razón por la que no se suele introducir un método de medición tan sencillo y obvio probablemente tenga que ver con el hecho de que la entropía no se entiende como



Fig. 5.1 La cantidad de entropía a medir se transfiere a la mezcla de hielo y agua. La cantidad de hielo que se funde en el proceso es una medida de la entropía añadida.

una magnitud que permite establecer un balance. De hecho, esta propiedad es apenas reconocible cuando la entropía se introduce a la manera de CLAUSIUS —Rudolf Julius Emmanuel CLAUSIUS (1822–1888)—.

Así, solo en 1911, más de 50 años después de los trabajos de CLAUSIUS, JAUMANN —Gustav Andreas Johannes JAUMANN (1863–1924)— formuló la ecuación de balance local, para la entropía [6], casualmente en el mismo año en que CALLendar —Hugh Longbourne CALLendar (1863–1930)— demostró que la entropía de CLAUSIUS coincide con el *caloricum* de CARNOT —Nicolás Léonard Sadi CARNOT (1796–1832)— [7].

Eliminación

Prescindamos de la afirmación de que la entropía es una magnitud difícil de medir. Su medición es conceptualmente del mismo tipo que la de la carga eléctrica. La medición práctica, por ejemplo en las clases de física de la escuela, es incluso especialmente sencilla.

Referencias

- [1] Véase 1.18 *Medición directa e indirecta*, p.28
- [2] Gerthsen, Kneser, Vogel, *Physik*, 13. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, p.183
- [3] Véase 5.3 *Medición de la entropía*, p.127
- [4] F. Herrmann a. M. Schubart, *Measuring momentum without the use of $p = mv$ in a demonstration experiment*, Am. J. Phys. 57, 1989, p.858
- [5] G. Job u. R. Rüffler, *Physikalische Chemie: Eine Einführung nach neuem Konzept mit zahlreichen Experimenten*, Vieweg und Teubner, 2010, p.59

El tercer principio de la Termodinámica

[6] G. Jaumann, *Geschlossenes System physikalischer und chemischer Differentialgesetze*, Wiener Berichte CXX, Abt. IIa, p.385–530

[7] H. L. Callendar, *The caloric theory of heat and Carnot's principle*, Proc. Phys. Soc. London 23, 1911, p.153

5.5 El tercer principio de la Termodinámica

Tema

“Es imposible alcanzar una temperatura igual al cero absoluto mediante un número finito de procesos físicos.” Esta es una de las muchas posibilidades de formular el llamado tercer principio de la Termodinámica.

Defectos

¿Por qué este hecho parece digno de especial mención? Hay muchas otras afirmaciones de esta índole, es decir, afirmaciones que hablan de una evidente imposibilidad. Es imposible vaciar completamente un recipiente con aire por medio de una bomba de vacío. Es imposible vaciar completamente una tina empleando un cubo. Esta clase de afirmaciones son consideradas triviales y en ningún caso principios científicos. Pero todo es distinto con la entropía; generalmente nos la presentan de manera tan esotérica que un trato sencillo y simple no es posible. Diversas afirmaciones sobre la entropía alcanzan una importancia que no corresponde del todo con sus sencillas propiedades físicas. Se trata a la entropía con tanto acatamiento y preventión, y hay tanto de metafísica en el concepto que casi resulta irrespetuoso relacionar el tercer principio con el hecho de vaciar una tina. Sin embargo es cierto que las dos afirmaciones son de la misma índole. La simple analogía describe la situación de manera más certera que todas las formulaciones corrientes del “tercer principio”. No se puede sacar toda la entropía de un cuerpo, así como no se puede sacar toda el agua de una tina.

Origen

El teorema proviene de Walther NERNST (1864–1941). Franz SIMON (1893–1956), uno de sus alumnos, lo formuló así: “**Es imposible despojar a una sustancia de toda su entropía.**” La afirmación llena un vacío que deja el segundo principio, ya que permite determinar la constante de integración que aparece al calcular la entropía.

Eliminación

El respeto ante los creadores de las leyes de la Termodinámica no debería impedir ver las cosas de manera más sobria y sencilla. No elevemos el “tercer principio” al nivel de “proposición o verdad fundamental”, hagamos de él una herramienta usual, como muchas otras en Termodinámica.

5.6 La ley cero de la Termodinámica

Tema

“Dos sistemas en equilibrio térmico con un tercero, están en equilibrio térmico entre sí”.

A esta formulación se le ha llamado principio o ley cero de la Termodinámica.

Defectos

Si dos sistemas están en equilibrio térmico, sus temperaturas son iguales, y si estas son iguales los sistemas están en equilibrio térmico, de lo cual se deduce la ley cero. No hay duda de que dicha afirmación es correcta, sin embargo, es una conclusión tan simple y elemental que es difícil entender cómo se puede considerar una “ley” termodinámica.

Quien piense que existe un profundo significado oculto detrás de esas palabras, debe recordar que podrían formularse aseveraciones similares acerca de otros equilibrios, sin que nadie las llame “ley”, ya que su contenido es obvio.

Dado que la ley cero se cita frecuentemente en el contexto de la termodinámica estadística, es apropiado —por comparación— considerar el equilibrio químico.

En termodinámica estadística, el potencial químico juega un papel bastante similar al de la temperatura, junto con esta es uno de los dos parámetros en la distribución de probabilidad de energía. Por lo tanto, además de la ley cero se podría formular una ley análoga para el equilibrio químico: “**Si dos sistemas están en equilibrio químico con un tercero, están en equilibrio químico entre sí.**”

La termodinámica fenomenológica muestra que es posible formular otras tantas “leyes cero” para cada uno de los términos de la ecuación fundamental de GIBBS —Josiah Willard GIBBS (1839–1903)—:

$$dE = T dS - p dV + \mu dn + \vec{v} d\vec{p} + \vec{F} d\vec{s} + \omega dL + \gamma dm + \varphi dQ + I d\Phi \dots$$

Donde T es la temperatura absoluta, S la entropía, p la presión, V el volumen, μ el potencial químico, n la can-

La entropía como medida de la irreversibilidad

tidad de sustancia, \vec{v} la velocidad, \vec{p} el momentum, \vec{F} el flujo de momentum, \vec{s} el desplazamiento, ω la velocidad angular, L el momentum angular, ψ el potencial gravitacional, m la masa, φ el potencial eléctrico, Q la carga, I la corriente eléctrica, y Φ el flujo magnético.

También se podría formular para tres cuerpos que por medio de colisiones inelásticas alcancen las mismas velocidades lo siguiente: “Si dos sistemas están en equilibrio de velocidad con un tercero, están en equilibrio de velocidad entre sí”.

Origen

La necesidad de la formulación de la ley cero parece surgir cuando la temperatura y el potencial químico se introducen en la mecánica estadística. Entonces hubo que demostrar que uno de los parámetros de la distribución de probabilidad tiene las propiedades de una magnitud que era familiar, llamada temperatura.

Pero incluso en ese contexto, la ley cero no es más que la expresión de la transitividad de una cantidad física.

Eliminación

Generalmente la ley cero no se menciona en la educación media. ¿Entonces cuál es su importancia a ese nivel? Ayuda a entender por qué la termodinámica es tan impopular, especialmente en la universidad.

No existe magnitud intensiva con la que se hagan tantos “aspavientos” como con la temperatura; así como tampoco magnitud extensiva con la que se cree tal confusión como ocurre con la entropía. [1].

A veces la termodinámica parece recordar la fábula del traje nuevo del emperador.

Se recomienda a los docentes universitarios dimensionar adecuadamente la “ley cero”, y a los estudiantes no permitir que los persuadan de que existe un problema donde no lo hay.

Referencias

- [1] G. Job, *Nueva representación de la termodinámica. La entropía como calor*. [en línea]. En: http://job-stiftung.de/pdf/buch/neudarstellung_spanisch.pdf [consultado el 20 de mayo de 2022].

5.7 La entropía como medida de la irreversibilidad

Tema

A veces se introduce la entropía como medida de la irreversibilidad de un proceso. De este modo se pretende

presentar una idea intuitiva de dicha magnitud, la cual en general se considera difícil de entender y bastante compleja.

Defectos

1 Al introducir la entropía como medida de la irreversibilidad la pregunta de qué ocurre con ella después de ser producida, pasa a un segundo plano. Algo similar ocurre con la pregunta sobre cuál es el significado de esa gran cantidad de entropía existente en el Universo, de cuya procedencia no se conoce nada. La entropía del universo es constante en muy buena aproximación, la producción de entropía que se observa en nuestra cercanía es completamente despreciable en una escala cósmica. Pero también en una escala terrestre la entropía producida juega un papel mínimo en el balance total. La entropía total contenida en el globo terrestre es alrededor de un millón de veces más grande que la entropía producida en su superficie (esencialmente por la absorción de la luz) durante un año. Al estudiante que se le ha enseñado que la entropía es una medida de la irreversibilidad, esta gran cantidad de entropía le dice poca cosa.

2 Se puede encontrar la entropía en la siguiente relación:

$$P = T \cdot I_S. \quad (5.2)$$

Esta ecuación indica que una corriente de entropía I_S siempre está vinculada con una corriente de energía P , donde T es la temperatura. Es una relación del mismo tipo que la consabida ecuación $P = U \cdot I$, donde la corriente eléctrica I siempre está vinculada con una corriente de energía P , U es la diferencia de potencial.

$$P = U \cdot I,$$

donde la corriente eléctrica I siempre está vinculada con una corriente de energía P , U es la diferencia de potencial.

La ecuación (5.2) es esencial para la descripción de las máquinas térmicas, en las cuales una corriente de entropía entra a temperatura alta (foco caliente) y la misma corriente sale a temperatura baja (foco frío), realizando de este modo un trabajo, es decir, se entrega energía por medio del árbol de transmisión (así como en un molino de agua esta entra a una altura mayor y sale a una menor, entregando energía por medio del árbol de la rueda). Para esta sencilla explicación se requiere de la entropía. Sin embargo, ya que el proceso correspondiente es reversible, la interpretación de la

El aumento de la entropía al mezclar pimienta y sal

entropía como medida de la irreversibilidad sería algo innecesario y además desconcertante.

- 3 Si se desea introducir una medida de la irreversibilidad la entropía no es la magnitud más indicada. Para corroborarlo se puede realizar la comparación de dos procesos en los sistemas A y B respecto a su irreversibilidad, haciendo énfasis en que no se comparan dos estados sino dos procesos. Por esta razón una afirmación concerniente a la entropía de A y B no es útil, mejor sería comparar la tasa de producción de entropía. Sin embargo, aun cuando esta sea mayor en el sistema A esto no significa necesariamente que el proceso en A sea el proceso “más irreversible”. Si el tamaño de A es mucho mayor que el de B, es posible que sea más conveniente considerar al proceso en A como el más reversible, entonces sería apropiado dividir por el flujo total de energía o de sustancias. Así, la tasa molar de producción de entropía sería una medida más adecuada para la irreversibilidad.

Origen

La falta de una idea intuitiva de la entropía contenida o almacenada en un sistema y el intento de introducir una idea alternativa a la de la termodinámica estadística.

Eliminación

Es posible introducir la entropía de un modo intuitivo: las propiedades de la magnitud física entropía coinciden bien con lo que en términos cotidianos se llama calor (no confundir con el concepto calor de la Física actual). Al proceder de esta manera, su papel como medida de la irreversibilidad se obtiene automáticamente como producto secundario.

5.8 El aumento de la entropía al mezclar pimienta y sal

Tema

“La entropía puede cambiar sin que se cree o desaparezca el calor (pimienta y sal).” [1]

Defectos

- 1 En primer lugar, un problema lingüístico: si algo se crea, no estaba antes y está después; si algo desaparece, estaba antes y ya no está después. Por lo tanto, el calor Q de la física no puede crearse ni desaparecer. Al menos, así es, si se usan los términos “crear” y “desaparecer” de la manera habitual. No parece ser un simple desliz del autor [1], sino un descuido bastante común en la física. No hay que sorprenderse si

los estudiantes, y más aún los escolares, tienen problemas para tratar correctamente la llamada variable de proceso Q en el sentido de la física.

- 2 En física estadística, la entropía se define mediante la ecuación

$$S = -k \sum_i p_i \ln p_i \quad (5.3)$$

Se puede aplicar a cualquier variable aleatoria discreta X . p_i es la probabilidad de que se dé el valor X_i .

Por un lado, la falta de especificidad de esta definición la hace elegante; por otro, también da lugar a malentendidos. Para calcular la entropía, solo se necesita una distribución de probabilidad. Solo es necesario saber que son dos estados diferentes, pero no es necesario saber en qué se diferencian, ni siquiera en qué medida. Así, se puede situar la entropía en la serie de otras magnitudes utilizadas para describir las distribuciones estadísticas: la media, la dispersión y los momentos superiores de una distribución. Esto significa que se puede aplicar la anterior ecuación a situaciones o sistemas que ya no tienen mucho que ver con lo que llamamos termodinámica.

Así, la entropía también puede calcularse para sistemas que no están en equilibrio termodinámico, es decir, en los que no están definidas ni la temperatura ni el potencial químico. Si además el sistema es tal que dicho equilibrio no puede producirse en absoluto, la entropía definida por (5.3) pierde su significado termodinámico.

Pese a ello, los ejemplos correspondientes se discuten a menudo en relación con la termodinámica. Por ejemplo, se calcula el aumento de entropía al mezclar cartas [2] o se considera, como en nuestra cita, el aumento de entropía al mezclar pimienta y sal. En ambos casos, no se puede definir una temperatura ni un potencial químico, e incluso al esperar o activar térmicamente de forma interminable, no se establece ningún estado para el que se definan estas magnitudes. La entropía que se calcula no tiene mayor importancia que la que se calcularía según la ecuación (5.3) a partir de, por ejemplo, la distribución de las notas de un trabajo de clase, al menos mientras uno esté interesado en la termodinámica de los sistemas correspondientes. La consideración de la entropía en estos sistemas es un bonito artificio, pero nada más.

- 3 Suponemos que el ejemplo de la pimienta y la sal pretendía demostrar que al mezclarse no aumenta la temperatura a pesar del aumento de la entropía. Normalmente, esto se demuestra con el experimento de GAY-LUSSAC —Joseph-Louis GAY-LUSSAC (1778–1850)—. Un gas a alta presión se expande en el vacío.

En el proceso, la entropía aumenta en ΔS . Si esta entropía ΔS se añadiera al gas sin aumentar su volumen, su temperatura aumentaría de forma significativa y medible. En la expansión de Gay-Lussac, este aumento de temperatura no se produce.

Sin embargo, con el experimento de la pimienta y la sal no se puede decidir en absoluto si se produce o no ese aumento de temperatura. El aumento de entropía ΔS en este caso es de unas 10^{-23} veces la entropía inicial [3]. El aumento de la temperatura sería correspondientemente pequeño si nuestro argumento del punto 2 no se interpusiera en su camino. Por lo tanto, el experimento no puede afirmar si la temperatura aumenta o no.

Origen

No se asocia ninguna idea intuitiva con la entropía como magnitud macroscópica. Así que uno se aferra a la interpretación estadística. Y parece apropiado explicar el cálculo utilizando sistemas cuyos estados son conocidos o fáciles de determinar, como los juegos de dados y cartas o, como en nuestro caso, la pimienta y la sal.

Eliminación

Al igual que con otras magnitudes físicas, introducir la entropía como medida de una determinada propiedad de un cuerpo o sistema físico. Al igual que la masa mide lo que se llama inercia, la entropía mide lo que se percibe como contenido de calor. De este modo, se llega rápidamente a una comprensión físicamente sólida de los procesos de nuestra experiencia cotidiana y de importantes aplicaciones técnicas. Es más importante aprender que la entropía no cambia al pasar por una turbina de vapor que el hecho de que la entropía aumente en 10^{-23} al mezclar pimienta y sal.

La interpretación microscópica de la entropía siempre puede tratarse más adelante, al igual que la de la temperatura, la resistencia eléctrica, el coeficiente de fricción o incluso la masa.

Referencias

- [1] La frase esta tomada de una presentación (diapositiva 9) publicada en la página web de la Sociedad Alemana de Física, que aparentemente refleja la opinión de los expertos en el CFK.
http://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/stellungnahmen_gutachter/vortrag-meier.pdf
- [2] D. Meschede, *Gerthsen Physik*, 21. Auflage, Springer Berlin, p.244
- [3] F. Herrmann u. G. Bruno Schmid, *An analogy between information and energy*, Eur. J. Phys. 7, 1986, p.174–176

5.9 Entropía y vida

Tema

Los sistemas biológicos son sistemas altamente ordenados, que han evolucionado y se han desarrollado espontáneamente (naturalmente); a menudo se ve un problema en este hecho. Se podría pensar —y así se dice— que la aparición de organismos vivos contradice el segundo principio de la Termodinámica, según el cual la entropía no puede disminuir en un sistema cerrado. En realidad, se aclara después, que el segundo principio no ha sido violado, ya que los sistemas biológicos son sistemas abiertos. Su entropía puede disminuir, siempre y cuando la entropía del ambiente aumente.

Defectos

Inicialmente el hecho de que el orden en un sistema biológico aumente se presenta como problema o incluso como paradoja, para después resolver el “enigma” mostrando que no existe contravención a las leyes de la ciencia. Sin embargo, esto no es necesario, es posible zanjar el tema en una fase anterior, antes de que se convierta en problema o paradoja. En realidad el contenido entrópico de los sistemas biológicos no es muy significativo. Un humano, por ejemplo, se compone en un 60 % de agua, que a 25 °C tiene un contenido de entropía igual a 3,9 J/(K·g); a la temperatura del cuerpo humano su valor es ligeramente mayor. No es difícil construir o imaginar un “sistema de comparación” no-biológico, que coincide con el humano no solamente en la masa, la temperatura y el volumen, sino también en la entropía. En ese caso no es posible percibir ninguna particularidad del sistema biológico cuando se analiza la entropía.

Si se compara al humano con cierta cantidad de arena (silice) de la misma masa y temperatura, el humano incluso se encuentra en situación “desfavorable” en cuanto a la entropía. Ya que la arena es cristalina, su entropía es solamente 1/4 de la entropía del humano.

Por otra parte, cuando un sistema biológico crece, su entropía no disminuye sino que aumenta, por la sencilla razón de que su masa también lo hace. Si un humano aumenta su masa en 2 kg, su entropía crecerá aproximadamente 4 kJ/K. Se puede concluir que la entropía no es una magnitud cuyos valores en sistemas vivos permitan identificarlos como tales, es decir, se comporten de manera particular o diferente que la masa o el volumen.

Origen

Probablemente existan varias causas. Primero: la connotación “no-científica” de la entropía, al parecer se cree que puede “comportarse” de un modo característico en el contexto de un proceso tan complejo como es la vida. Se-

Entropía negativa y neguentropía

gundo: la falta de conocimiento sobre los valores de dicha magnitud (valores que se encuentran en tablas o en la Internet). Tercero: el intento de representar a la entropía como medida del desorden, lo que en principio es correcto, pero que no resulta ser un método práctico ni sencillo para estimar el orden de magnitud de sus valores.

Eliminación

Introducir la entropía como medida de la cantidad de calor, de modo que el estudiante obtenga una idea clara de los valores de dicha magnitud [1][2][3]. Entonces, la expectativa de que la entropía presente alguna particularidad en los sistemas vivos nunca surgirá.

Referencias

- [1] Véase 5.14 Equivalencia entre calor y trabajo, p.139
- [2] Véase 5.1 Entropía, p.124
- [3] Véase 5.3 Medición de la entropía, p.127

5.10 Entropía negativa y neguentropía

Tema

En algunos libros de biología figuran afirmaciones, según las cuales la entropía puede admitir valores negativos; a manera de ejemplo se encuentra: “Los sistemas vivos siempre producen entropía positiva. Para evitar la descomposición y la transición al equilibrio termodinámico, hace falta un continuo suministro de entropía negativa. La única fuente abundante de entropía negativa, que está a disposición de los sistemas vivos, es la excitación de los pigmentos [...]. Esta excitación se realiza con los cuantos de luz. La única fuente natural de los cuantos de luz es el sol.” [1].

A veces se llama neguentropía a la entropía negativa, y se dice que esta es idéntica a la cantidad de información de SHANNON —Claude Elwood SHANNON (1916–2001)—.

Defectos

Tales afirmaciones son, por una parte, contrarias a los procedimientos acostumbrados en Física, y por otra, son incorrectas.

- 1 Cuando el valor de una magnitud extensiva X aumenta en un sistema A, disminuyendo en un sistema B, debido a una corriente de X de B a A, se tiene la posibilidad de describir la situación de dos formas: o bien se dice que existe una corriente positiva de X de B a A, o una negativa de A a B. La teoría (es decir, la ecuación de continuidad) no permite distinguir en-

tre estos dos modos de descripción. Solo en caso que sea posible atribuir una velocidad a la corriente, es decir, que se pueda escribir la densidad de corriente \vec{j}_X como producto de la densidad ρ_X y la velocidad \vec{v}

$$\vec{j}_X = \rho_X \cdot \vec{v},$$

se puede justificar dicha distinción. Si la densidad ρ_X es negativa en todas partes, es normal afirmar que se tiene una corriente de X negativo de A a B; si es positiva se dirá que hay una corriente de X positivo de B a A. Sin embargo, no es necesaria tal distinción [2].

Si por el contrario, la magnitud X admite únicamente valores positivos, como en el caso de la masa o la entropía, entonces afirmar que X negativo fluye de A a B es inconveniente, puesto que sugiere la existencia de una densidad de masa o de entropía negativas.

Al hablar de entropía negativa, en el contexto de la frase en referencia, seguramente se tiene la intención de explicar que la entropía no aumenta por acción del sol. Y aquí está el error. Aún cuando se ignore el hecho de que no existe entropía negativa, la corriente hipotética de dicha entropía que entra en el sistema debería recorrer el mismo camino que la corriente de entropía positiva, que sale del sistema, solo que en dirección opuesta. Ya que en realidad del sistema vivo sale entropía al ambiente, se debería decir que fluye entropía negativa del ambiente al sistema. Por consiguiente, afirmar que la entropía negativa se origina en el sol no es correcto. Posiblemente debido a la complejidad del tema el error ha pasado desapercibido.

Para hacer más clara la situación, se puede considerar la afirmación en referencia aplicada a un sistema más “familiar” como el filamento incandescente de una calefacción eléctrica. Una descripción normal, y correcta, del balance de entropía podría ser así: en el filamento se produce entropía, la cual sale de este y va al entorno (medio ambiente). La afirmación análoga a la referenciada sería: con la energía eléctrica se suministra entropía negativa, la cual será compensada gracias a la producción de entropía en el filamento. Es evidente que tal interpretación no es correcta.

- 2 Al identificar la entropía negativa o neguentropía con la cantidad de información se incurre en un error de otra índole. El cálculo de la entropía S y la cantidad de información H se hace con la misma ecuación:

$$S = -k \sum_i p_i \ln p_i \quad H = -f \sum_i p_i \ln p_i$$

Donde, p_i es la probabilidad de encontrar el sistema en el micro-estado i , k la constante de BOLTZMANN —Ludwig BOLTZMANN (1844–1906)—, y f un factor constante que se elige de tal forma que H se exprese en bit. Como se observa, exceptuando el factor constante, siempre del mismo valor, ambas magnitudes (S y H) se pueden calcular por medio de la misma fórmula, de lo cual se concluye que son la misma magnitud física. La entropía de un sistema y la cantidad de información almacenada en su micro-estado son —excepto por un factor constante— idénticas.

A menudo se incurre en el siguiente error: en lugar de decir que la información está almacenada o contenida en el sistema considerado, se dice que H es la cantidad de información que le falta al observador; a veces incluso se afirma que el observador tiene la neguentropía

$$N = -H.$$

En lugar de atribuir la magnitud al sistema, para el cual ha sido calculada, se toma su “negativo” y se lo atribuye al “complemento” del mismo, en este caso al ambiente, o al observador que se considera parte del ambiente del sistema. Es algo así como describir la masa m de un objeto diciendo que el ambiente tiene la “negamasa” ($n = -m$). Esta manera de proceder es factible, pero obviamente es bastante incómoda y poco adecuada.

Origen

La entropía negativa tiene una larga historia y tradición. Ya TAIT —Peter TAIT (1831–1901)—, amigo de LORD KELVIN —William THOMSON (1824–1907)—, con quien publicó el primer volumen del *Tratado de filosofía natural*, había pensado introducir la entropía negativa, desistiendo finalmente de ello: “Sería deseable, tener una palabra para expresar la disponibilidad para el trabajo del calor en un depósito dado; [...]. Desafortunadamente la muy conveniente palabra entropía, que CLAUSIUS ha introducido en este contexto, fue utilizada por él para lo negativo de lo que nosotros queremos expresar de modo natural.” [3].

La entropía negativa entró en la Física debido a SCHRÖDINGER —Erwin SCHRÖDINGER (1887–1961)—, quien en su pequeño libro *¿Qué es la vida?*, publicado en 1944 casi sin ninguna matemática, escribe: “¿Qué es ese precioso “algo” contenido en nuestros alimentos, que nos defiende de la muerte? Esto es fácil de contestar. Todo proceso, suceso o acontecimiento —llámeselo como se quiera—, en una palabra, todo lo que pasa en la Naturaleza, significa un aumento de la entropía de

aquella parte del mundo donde ocurre. Por lo tanto, un organismo vivo aumentará continuamente su entropía o, como también puede decirse, producirá entropía positiva, y por ello tenderá a aproximarse al peligroso estado de entropía máxima que es la muerte. Solo puede mantenerse lejos de ella, es decir, vivo, extrayendo continuamente entropía negativa de su medio ambiente, lo cual es algo muy positivo, como enseguida veremos. De lo que un organismo se alimenta es de entropía negativa. O, para expresarlo menos paradójicamente, el punto esencial del metabolismo es aquél en el que el organismo consigue liberarse de toda la entropía que no puede dejar de producir mientras está vivo.” [4].

Estas declaraciones encontraron resistencia inmediata por parte de varios de sus colegas; SCHRÖDINGER se defendió, pero sin mucho entusiasmo.

El término neguentropía fue introducido en 1956 por BRILLOUIN —Léon BRILLOUIN (1889–1969)— [5]. En esa época se presentaban frecuentes discusiones sobre la relación entre la magnitud termodinámica entropía y la cantidad de información recién introducida por Shannon. Brillouin consideró su idea tan importante que la presentó como “principio neguentrópico de la información”, sin embargo, su error fue atribuir la información al observador en lugar de al sistema para el cual se había calculado.

Parte de la “confusión” se puede imputar al nombre de la magnitud: información. Si para la memoria de un computador (o para los microestados de un gas perfecto) se ha encontrado $H = x$ MByte, y se llama información a la magnitud H , es normal decir: “Me hace falta información sobre el sistema (memoria, o gas perfecto).” Si por el contrario H representa cantidad de datos, parece más natural decir: “La cantidad de datos en la memoria o en el gas es de x MByte.” Se atribuye así automáticamente la magnitud y su valor al sistema correcto.

Eliminación

- 1 El concepto de entropía negativa no es necesario, todo es más claro limitándose a una entropía positiva.
- 2 Atribuir la información a la memoria (o a los microestados termodinámicos), en ningún caso al observador.

Referencias

- [1] G. Czihak, H. Langer u. H. Ziegler (Eds.), *Biologie*, Berlin: Springer-Verlag, 1976. p.522. Existe versión en castellano: G. Czihak, H. Langer u. H. Ziegler. (coordinadores), *Biología*, Madrid: Alhambra, 1982.
- [2] Véase 6.4 *El sentido convencional de la corriente eléctrica*, p.190

La entropía de mezcla

[3] P. G. Tait, *Sketch of Thermodynamics*, Edmonston & Douglas, Edinburgh, 1868, p.100: „It is very desirable to have a word to express the Availability for work of the heat in a given magazine; a term for that possession, the wast of which is called Dissipation. Unfortunately the excellent word Entropy, which CLAUSIUS has introduced in this connection, is applied by him to the negative of the idea we most naturally wish to express.“

[4] E. Schrödinger, *¿Qué es la vida?* Barcelona, Tusquets Editores, 1983. p.111–112.

[5] L. Brillouin, *Science and Information Theory*, New York: Academic Press, 1962. p.152f.

Al conectar los dos recipientes se tendrá una mezcla en un volumen único $V = V_A + V_B$, Fig. 5.2b, los gases se han mezclado y la entropía aumenta en:

$$\Delta S = n_A \cdot R \cdot \ln \frac{V}{V_A} + n_B \cdot R \cdot \ln \frac{V}{V_B}. \quad (5.4)$$

Es a este aumento al que se suele llamar entropía de mezcla; sin embargo, esta entropía no tiene nada que ver con el proceso de mezcla de los gases. Dicho proceso no es otra cosa que la expansión de cada uno de los gases de su volumen inicial V_A y V_B respectivamente al volumen final V , a temperatura constante. El aumento de entropía en dicha expansión para el gas A es igual a:

$$\Delta S_A = n_A \cdot R \cdot \ln \frac{V}{V_A}$$

y para el B:

$$\Delta S_B = n_B \cdot R \cdot \ln \frac{V}{V_B}.$$

Se observa que el aumento total de la entropía debido a la expansión es igual al ΔS de la ecuación (5.4).

2 En otra interpretación del término “mezclar” se parte de dos recipientes de volúmenes iguales V , Fig. 5.3a, en uno se encuentra el gas A, y en el otro el B. Luego de la mezcla, representada en la Fig. 5.3b, los dos gases se encuentran juntos en un recipiente de volumen V , las entropías son iguales en ambos casos, por lo cual no existe algo que se pudiera denominar entropía de mezcla.

5.11 La entropía de mezcla

Tema

Dos sustancias gaseosas se encuentran en dos recipientes, al ser conectados estos, los gases se mezclan, y en el proceso la entropía del sistema total aumenta. La entropía adicional se llama entropía de mezcla.

Defectos

Esta denominación no es apropiada y es superflua, al utilizarla se sugiere que una mezcla de gases contiene más entropía que los gases individuales. Para analizar esta situación es conveniente comparar los dos sistemas: la mezcla y los gases antes de la mezcla; según la interpretación que se da a la palabra “mezclar”, la mezcla se puede realizar de tres maneras diferentes. En todos los casos se considerará que los gases son ideales.

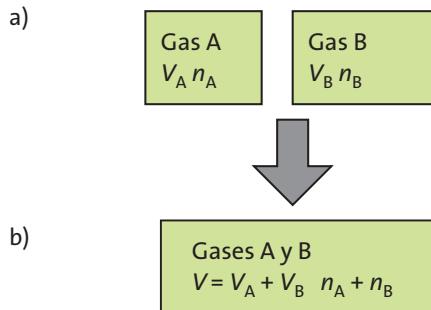


Fig. 5.2 El gas A se expande del volumen V_A al V , y el B del volumen V_B al V .

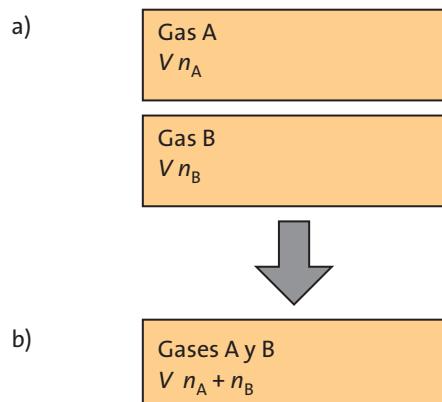


Fig. 5.3 Los gases A y B se introducen sin cambio de volumen en el mismo recipiente.

1 Se tienen dos recipientes diferentes con los gases A y B a la misma temperatura, Fig. 5.2a; en el recipiente de volumen V_A se encuentra una cantidad n_A del gas A, y en el de volumen V_B , una cantidad n_B del gas B.

3 Finalmente una tercera interpretación de “mezclar”, Fig. 5.4; en ella se comparan las entropías de la mez-

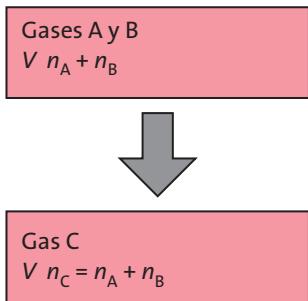


Fig. 5.4 . Los gases A y B se reemplazan por la misma cantidad de un gas C.

cla de dos gases distintos A y B (cantidades n_A y n_B), en un recipiente de volumen V , con la entropía de un gas único y diferente C, cuya cantidad es $n_C = n_A + n_B$, en un recipiente del mismo volumen V , a temperaturas iguales. ¿Cómo se manifiesta en la entropía el hecho de que se suprime el rasgo diferencial entre los gases A y B? También este podría ser un candidato para una “entropía de mezcla”.

Debido a los diversos grados de libertad de A, B y C la diferencia de entropías depende de la naturaleza de los gases y no corresponde al valor dado por la ecuación (5.4).

Origen

Probablemente al dar un nombre a la entropía de la ecuación (5.4) se basaron en la idea de que la entropía es una medida para el desorden molecular, interpretación que no es falsa, pero su trato no siempre es fácil.

Eliminación

Si se conoce que la entropía de un gas aumenta a temperatura constante con el volumen (y a volumen constante con la temperatura), no es necesario el término “entropía de mezcla”.

5.12 ¿Nada de temperatura, nada de entropía?

Tema

Hace poco apareció, en un contexto que no es relevante acá, la siguiente frase: “*El sistema tiene entropía, por lo que también tiene una temperatura.*”

Lo que se quería decir no era que la temperatura del sistema tuviera un valor mayor que cero, sino que la variable temperatura adquiere cualquier valor.

¿Nada de temperatura, nada de entropía?

Defectos

En primer lugar, una observación general sobre el “tiene” en relación con una magnitud física. Cuando se dice que la partícula no tiene carga eléctrica, que el fotón no tiene masa en reposo o que el coche no tiene momentum, siempre se quiere decir que el valor de la magnitud física correspondiente es cero, es decir, $Q = 0 \text{ C}$, $m_0 = 0 \text{ kg}$ o $p = 0 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$. Cuando se dice que un sistema no tiene temperatura, nos referimos a otra cosa, no significa que $T = 0 \text{ K}$. (Lo mismo ocurre con el potencial químico.) Más bien significa que su estado no puede describirse mediante una temperatura. En otras palabras, el sistema no está en equilibrio termodinámico o la distribución de ocupación de los microestados no corresponde a una de las funciones estadísticas conocidas.

Si esto es lo que quiere decir la frase citada anteriormente, la afirmación no es necesariamente correcta. No se puede concluir a partir de $S > 0$ que el sistema considerado tenga una temperatura. Solo tiene temperatura si está en equilibrio termodinámico: si todos los “microestados accesibles” están ocupados con igual probabilidad. La entropía se calcula simplemente como

$$S = k \cdot \ln W. \quad (5.5)$$

Sin embargo, por lo general

$$S = -k \sum_i p_i \ln p_i \quad (5.6)$$

donde p_i es la probabilidad de encontrar el sistema considerado en el microestado i . La ecuación (5.3) se deduce de la ecuación (5.4) si todos los p_i son iguales entre sí, es decir, si

$$p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = \dots = p_n = 1/\Omega$$

Pero ¿no está todo lo que nos rodea en buena aproximación en equilibrio termodinámico? ¿No se establece el equilibrio termodinámico tan rápidamente con cada cambio de los parámetros externos que los estados de no-equilibrio ni siquiera importan?

En absoluto. Hay dos razones por las que no se alcanza el equilibrio:

En primer lugar, la densidad de las partículas que interactúan es demasiado baja. Un ejemplo es la atmósfera de la Tierra a gran altura.

En segundo lugar, aunque la densidad sea alta, las partículas no interactúan entre sí. Este fenómeno es omnipresente: la luz que no se ha generado ya a una determinada temperatura no tiene ninguna posibilidad de alcanzar el equilibrio termodinámico por sí misma más adelante, a menos que reciba ayuda, como el famoso

La entropía del universo

polvo de carbono de PLANCK —Max Karl Ernst Ludwig PLANCK (1858–1947)—.

Un ejemplo de luz que no está en equilibrio es la luz que recibimos del Sol. Las condiciones son favorables, se produce por un radiador prácticamente negro. Y la distribución de frecuencias de la luz solar que nos llega se corresponde bastante bien con la de la luz en equilibrio termodinámico. Pero lo que no se ajusta en absoluto al equilibrio es la distribución angular. Para que la luz esté en equilibrio termodinámico, tendría que estar distribuida isotrópicamente, y no lo está en absoluto. Por ello, la relación entre el flujo de energía y entropía para la luz del Sol no es

$$P = T \cdot I_S$$

como cabría esperar para un transporte con luz en equilibrio termodinámico, en este caso es válido:

$$P = (3/4) T \cdot I_S,$$

donde la T en esta ecuación es la temperatura de la superficie del Sol, y también la de la luz en el Sol, pero ya no la de la luz que nos interesa, es decir, la que llega a la Tierra.

Origen

Probablemente, el hecho de que la fórmula $S = k \ln W$ ($S = k \ln \Omega$) se haya convertido en algo emblemático de la entropía, Fig. 5.5 (a la ecuación de EINSTEIN $E = m c^2$ le ocurrió algo similar).

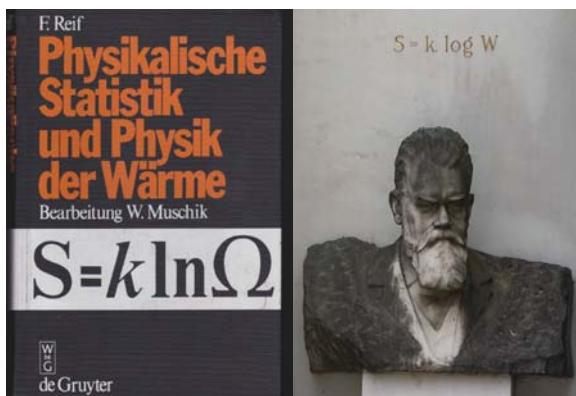


Fig. 5.5 Portada de un libro de texto sobre termodinámica estadística. La tumba de Boltzmann en el Cementerio Central de Viena.

La ecuación (5.4), en cambio, se percibe como una curiosidad, o una medida de la cantidad de información.

Eliminación

- 1 Se recomienda emplear cuidadosamente el lenguaje al referirse a los valores de las magnitudes físicas. Se puede y se debe hablar de magnitudes extensivas como de una “sustancia”: un sistema tiene mucha, poca o ninguna entropía (o carga eléctrica, masa, o momentum). El entorno lingüístico de las magnitudes intensivas es muy diferente: una temperatura (un potencial eléctrico, una velocidad) es alta o baja, y en el caso de la temperatura y el potencial químico, un sistema puede no poseer estas magnitudes en absoluto.
- 2 Introducir la fórmula (5.4) de la entropía antes de tratar el caso especial (aunque a menudo realizado) del equilibrio termodinámico. Así se ve que la entropía tiene un significado mucho más general que la temperatura (y el potencial químico, que no se ha tratado aquí).
- 3 Se presentarán incoherencias si se asigna simplemente la temperatura de la fuente luminosa a la luz que no corresponde a la distribución de equilibrio termodinámico.

5.13 La entropía del universo

Tema

Uno se las ha arreglado sin el concepto de universo durante la mayor parte de sus estudios. Pero finalmente aparece en la termodinámica, esta parece necesitarlo.

- 1 Así es como se encuentra la 2^a ley en un libro de texto universitario: “En un proceso reversible, el cambio de entropía del universo es cero. Por “universo” entendemos la totalidad del sistema y su entorno.”
- 2 “En un proceso irreversible, la entropía del universo aumenta.”
- 3 “No existe ningún proceso por el que la entropía del universo disminuya.”
- 4 O en un libro de texto para secundaria: “La entropía del universo aumenta constantemente o deja de cambiar.”

Defectos

- La cuestión de la entropía del universo es difícil, y en un contexto tan sencillo como el de la segunda ley, quizás sea mejor no entrar en el complicado territorio de la termodinámica del cosmos. Para hablar de la entropía del universo, habría que sumar las contribuciones de todas las partes de este. ¿Pero cómo hacer eso? ¿La entropía que tienen ahora todas sus partes? Entonces la cuestión sería cómo decidir sobre la simultaneidad de puntos espaciales distantes.

- Supongamos que el tamaño del universo es infinito. (Esta idea es algo metafísica, pero aparentemente casi nadie tiene problemas con ella). Entonces surge el problema de que la entropía también es infinita, y en consecuencia siempre debe haber sido infinita. ¿Puede entonces seguir aumentando? Desde luego que sí. Solo es necesario formularlo localmente, lo que significa sin el universo. Ya en 1897, PLANCK —Max Karl Ernst Ludwig PLANCK (1858–1947)— [1] señaló en su *Termodinámica* que la entropía del universo “no puede definirse”.
- ¿Por qué es necesario utilizar el universo en la formulación de la segunda ley, pero no en la formulación de la conservación de la carga eléctrica, o del momentum, o del número de bariones? Porqué no se formula algo así como: “**No existe ningún proceso en el que la carga eléctrica del universo cambie.**”

La respuesta es clara, porque se puede hacer de forma más sencilla.

- También aquí se promueve la idea de que la entropía es una magnitud especialmente trascendente y complicada. La entropía, una vez más, necesita un tratamiento especial.

Origen

Desde sus inicios, se llegó a plantear la cuestión de la importancia de la entropía para el desarrollo del “universo”. Probablemente fue planteada por THOMSON (LORD KELVIN) —William THOMSON (1824–1907)— [2]. CLAUSIUS —Rudolf Julius Emmanuel CLAUSIUS (1822–1888)— [3] comentó esto en 1865: “... La aplicación de esta proposición [de la segunda ley] a todo el universo lleva a una conclusión sobre la que W. THOMSON llamó la atención por primera vez, y de la que ya he hablado en un tratado recientemente publicado. Pues sí, en todos los cambios de estado que se producen en el universo, las transformaciones de un determinado sentido superan en magnitud a las del sentido opuesto, entonces el estado total del universo debe cambiar cada vez más en el primer sentido, y el universo debe así acercarse incesantemente a un estado límite.”

(CLAUSIUS utiliza el término “transformación” para la magnitud, que posteriormente bautizó como entropía.)

Desde el punto de vista de la época, estas observaciones todavía parecían poco problemáticas, porque nadie podía prever el difícil contexto en el que dichas afirmaciones serían colocadas por la relatividad general y la cosmología moderna. La posibilidad de expresar la segunda ley de forma local, es decir, mediante una ecuación de continuidad, también estaba lejos en el futuro. El balance de entropía local fue formulado por primera

vez por JAUMANN —Gustav Andreas Johannes JAUMANN (1863–1924)— [4] en 1911.

Eliminación

También en este contexto, se recomienda hacer caso al consejo de WHEELER —John Archibald WHEELER (1911–2008)—: “**Physics is simple only when analyzed locally**”.

A la hora de caracterizar la magnitud entropía, basta con decir: la entropía puede ser generada pero no destruida. Cualquiera entiende esta frase.

Si se quiere ser más matemático, se puede escribir la ecuación de balance local (ecuación de continuidad), señalando que el término de producción de entropía en el lado derecho de la ecuación nunca será negativo. [4]:

$$\frac{\partial \rho_S}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{j}_S = \sigma_S$$

Donde: ρ_S = densidad de entropía, j_S = densidad de corriente de entropía, σ_S = densidad de la tasa de producción de entropía.

Referencias

- [1] M. Planck, *Vorlesungen über Thermodynamik*, Verlag von Veit & Comp. Leipzig, 1897, S. 94
- [2] W. Thomson, *On a universal tendency in nature to the dissipation of mechanical energy*, The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, Series 4, 1852, S. 306. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14786445208647126> „Within a finite period of time past the earth must have been, and within a finite period of time to come the earth must again be, unfit for the habitation of man as at present constituted, unless operations have been, or are to be performed, which are impossible under the laws to which the known operations going on at present in the material world are subject.“
- [3] R. Clausius, *Ueber verschiedene für die Anwendung bequeme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie*, Annalen der Physik und Chemie, Band CXXV, No. 7, S. 397–400
- [4] G. Jaumann, *Geschlossenes System physikalischer und chemischer Differentialgesetze*, Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien, Mat.-Naturw. Klasse, Abt. IIA 120, 1911, S. 385–530.

5.14 Equivalencia entre calor y trabajo

Tema

El calor, para algunos [1], es energía desordenada, para otros [2] es la energía cinética del movimiento caótico

El principio de mínima energía

de las moléculas, un tercer grupo [3] piensa que es la energía cinética y potencial del movimiento térmico de las moléculas. Hay quienes creen que es la energía que se suministra a un cuerpo por contacto térmico [4], o que es una abreviación para la expresión $\Delta U - W$ [5], también se encuentra que es la energía latente $T \cdot S$ [6], o la integral $\int T \cdot dS$ [7], o que es un concepto cuestionable y superfluo [8]. ¿Qué es el calor en realidad?

Defectos

La pregunta es tan antigua como la Física misma. La respuesta que dio Rudolf CLAUSIUS (1822–1888) en 1850 con su primer principio, plantea la equivalencia entre calor y trabajo, es esencialmente válida hasta el día de hoy pero un tanto ambigua.

Origen

CLAUSIUS utilizaba dos conceptos para el calor: el “calor contenido” en un objeto ΔH , que él imaginaba como energía del movimiento molecular, y el “calor suministrado” al objeto Q , donde la relación $Q = \Delta H$ era válida solamente en casos especiales. Entre las definiciones arriba mencionadas es fácil reconocer “descendientes” de estos dos “calores”. La variedad de opiniones es resultado de la carencia de una magnitud energética que reúna todos los aspectos que se pueden atribuir razonablemente al concepto “calor”, por lo cual se debe renunciar a una u otra propiedad según el aspecto que se quiera analizar o enfatizar. El hecho de que, a pesar de esta ambigüedad, se obtengan siempre los mismos resultados permite concluir que la equivalencia, exigida por CLAUSIUS, no es relevante. ¿Para qué sirve entonces?

Eliminación

Renunciando a esta aserción (la equivalencia entre calor y trabajo), es posible replantear algunos conceptos ganando en claridad y brevedad. Dicha equivalencia no es necesaria para formular la ley de la conservación de la energía, ni tampoco para definir el calor. Es fácil realizar una “metrización fundamental”, como dicen algunos epistemólogos, del concepto de calor. Normalmente, este procedimiento se utiliza en Física solo para la definición de algunas magnitudes básicas, como la longitud, la duración o la masa. Se establece un proceso para definir la igualdad y los múltiplos de los valores, y se define la unidad. Pero también es posible aplicar este método para definir muchas otras magnitudes como la energía, el momentum, el momentum angular, la cantidad de sustancia y la entropía, o para la metrización de conceptos como cantidad de calor, cantidad de datos o cantidad del desorden o de casualidad. Es sorprendente que al proceder de esta manera, el concepto común de calor

—no el de la ciencia— no sea una magnitud energética, sino que coincida directamente con la entropía S de CLAUSIUS [9]. Este proceso casi lúdico permite una extensa simplificación de la termodinámica, es posible deshacerse simultáneamente de conceptos como entalpía, energía libre, degradación de la energía, magnitud del proceso y función de estado. El hecho de que una equivocación, no en los procesos de cálculo de una ciencia sino en su semántica, pueda tener tantas repercusiones, debería advertir a los teóricos, cuya atención se centra normalmente solo en los cálculos, y debería alertar a los pedagogos, quienes deben enfrentarse a sus consecuencias.

Referencias

- [1] F. J. Dyson, *What is heat?*, Scientific American 1954, p.58.
- [2] R. W. Pohl, *Mechanik, Akustik, Wärmelehre*, Springer, Berlin, 1962, p.248
- [3] C. Gerthsen, O. H. Kneser und H. Vogel, *Physik*, Springer, Berlin, 1986, p.193
- [4] C. Kittel, *Physik der Wärme*, Wiley & Sons, Frankfurt, 1973, p.133
- [5] M. Born, *Physikal. Zeitschr.* 22 (1921), p.218
- [6] H. H. Steinour, *Heat and Entropy*, *J. Chem. Educ.* 25 (1948), p.15
- [7] G. Falk u. W. Ruppel, *Energie und Entropie*, Springer, Berlin, 1976, p.92
- [8] G. M. Barrow, *Thermodynamics should be built on energy – not on heat and work*, *J. Chem. Educ.* 65 (1988), p.122
- [9] Las siguientes suposiciones, junto con la elección de una unidad, son suficientes para una metrización inequívoca del calor:

- Cada objeto contiene calor, cuya cantidad no puede disminuir si está aislado térmicamente.
- Dos objetos idénticos en su composición y estado contienen cantidades idénticas de calor.
- El contenido de calor de un objeto compuesto es igual a la suma de los contenidos de calor de sus partes.

5.15 El principio de mínima energía

Tema

A la pregunta de cuál es la causa de muchos procesos hay una respuesta corriente. El proceso ocurre porque así se llega a un estado de menor energía:

- Un péndulo llega al reposo en su posición más baja,
- una burbuja (pompa de jabón) se vuelve esférica,

- una esponja se llena de agua,
- una concentración de carga se esparce en un conductor,
- átomos excitados de un gas emiten fotones,
- núcleos pesados tienden al decaimiento,
- iones positivos y negativos se ordenan de cierta manera al formar una red cristalina.

Defectos

Sin decirlo explícitamente, todas estas afirmaciones se explican con la suposición de que cada sistema tiende a un estado de mínima energía y llegará a dicho estado a condición de que no sea obstaculizado por circunstancias particulares. Sin embargo, formulada de esta manera, la afirmación no tiene sentido, porque si un sistema alcanza un estado de mínima energía, entonces, debido a la conservación de la energía el sistema complementario, es decir, el ambiente, debe adquirir un valor máximo de energía. Entonces, aplicando el mismo argumento al ambiente resultaría la afirmación opuesta. Por consiguiente, la afirmación no puede ser válida de manera general. Pero, ¿para cuáles sistemas esta es válida? La respuesta viene de la termodinámica. El sistema debe, como lo expresó Josiah Willard GIBBS (1839–1903) en 1873, ser cerrado, con una excepción: la energía necesaria para mantener constante la entropía debe poder salir del sistema. Entonces, la entropía producida S_{prod} al interior del sistema aparece solamente en su exterior, y con ella sale la energía $T \cdot S_{\text{prod}}$, donde T es la temperatura del ambiente. Ya que S_{prod} y T son siempre positivos, el sistema pierde energía. Recordemos que cualquier otro intercambio de energía está prohibido. Visto así, el principio de mínima energía es sencillamente una consecuencia del segundo principio de la termodinámica, aplicado a una clase particular de sistemas.

Origen

En mecánica se suele prescindir de las propiedades térmicas de la materia. Palancas, rodillos, resortes, cuerdas, etc. se tratan como objetos que no se calientan, es decir, objetos cuya temperatura y entropía son invariantes. La entropía generada por fricción se atribuye tácitamente al ambiente o se imagina que se transporta al ambiente. Si se consideran todas las otras partes que intercambian energía como partes del mismo sistema, la condición formulada por GIBBS se cumple, y se tiene razón diciendo que la energía tiende a un valor mínimo. Lo análogo es válido para sistemas correspondientes a otros campos de la Física: la hidrodinámica, la electrodinámica, etc. Ya que no se menciona el rol de la entropía, da la impresión de ser un principio independiente.

Eliminación

Al igual que en otras situaciones, la relación “difícil” e inadecuada que se ha establecido con la entropía induce a construcciones sustitutivas cuestionables. El problema básico que está causando un sinfín de dificultades ([1], [2], [3], [4], [5], [6], [7]) y se opone a cualquier solución, es el dogma de que el calor es una forma particular de energía; dogma cuidado con dedicación durante siglo y medio y anclado en el primer principio de la termodinámica. Solamente estando dispuestos a una revisión en este punto se puede esperar una reformulación adecuada.

Referencias

- [1] Véase 2.1 *Formas de energía*, p.48
- [2] Véase 5.30 *Magnitudes de estado*, p.159
- [3] Véase 5.1 *Entropía*, p.124
- [4] Véase 5.3 *Medición de la entropía*, p.127
- [5] Véase 5.15 *El principio de mínima energía*, p.140
- [6] Véase 5.19 *Rendimiento y factor de Carnot*, p.144
- [7] Véase 5.36 *Radiación térmica*, p.167

5.16 Energía útil

Tema

Últimamente en publicaciones de la industria energética, de diversos entes administrativos e inclusive de universidades, se encuentran los llamados diagramas de flujo energético, a veces denominados diagramas de SANKEY [1, 2, 3, 4, 5]. Con ellos se pretende representar el balance energético de una industria, economía o ente similar. Los diagramas muestran con cuáles portadores de energía primaria entra la energía al sistema, es decir, a la industria, economía o ente, qué porcentajes son transformados en otras “formas”, cuáles son las pérdidas correspondientes, y en qué formas la energía sale del sistema. A veces en la salida se hace la diferencia entre energía útil y energía perdida.

Defectos

Esos diagramas y su interpretación dan la impresión de que para los usos del consumidor hace falta energía en una forma determinada, por lo cual la “energía primaria” debe ser transformada, perdiendo cierto porcentaje en ese proceso; y aunque se procura que las pérdidas en la mencionada transformación sean mínimas, una parte sustancial de ellas es inevitable, ya que tiene causas explicadas por las leyes de la Física. Llega al usuario la llamada “energía útil”.

Esta interpretación no es del todo acertada, lo cual se comprende más claramente si se considera que cada

La degradación de la energía

“pérdida de energía” se debe a la producción de entropía, esta entropía generada debe ser entregada o transferida al ambiente —se puede decir que debe ser “desechada”— y para ello se necesita energía:

$$P_P = T_0 \cdot I_S.$$

donde P_P es la corriente de energía perdida, T_0 la temperatura del ambiente y I_S la corriente de entropía que se debe “desechar”. De lo anterior se puede decir que:

- 1 Desde el punto de vista de la Física las pérdidas de transformación no son inevitables, ya que cada transformación se puede realizar reversiblemente; por razones técnicas y/o económicas podría resultar muy difícil o prácticamente imposible hacerlo, pero no es la Física la que lo prohíbe. Incluso la transformación de la energía química del carbón (+oxígeno) en energía eléctrica —de cuya baja eficiencia en general se responsabiliza al factor de CARNOT—, puede en principio ser realizada reversiblemente, por ejemplo en la celda de combustible. De lo cual se deduce que se podría llamar “energía útil” a la energía entrante en el diagrama de flujo respectivo.
2. La llamada energía útil que llega al usuario también se pierde al “desechar” la entropía, y esto ocurre al 100%. ¡Toda la energía que se vende al consumidor termina como “energía perdida”! Además, en principio, cada proceso de interés para el consumidor puede ser realizado reversiblemente, es decir, sin producción de entropía.

Con lo anterior no se quiere decir que los diagramas mencionados sean falsos, tampoco inútiles, únicamente se afirma que en general transmiten un mensaje equivocado. No es cierto que de la energía primaria se utilice “verdaderamente” solo una parte (que se puede calcular); luego de un proceso de varios pasos toda la energía primaria termina en la producción de entropía, los diagramas muestran únicamente la primera parte de este proceso.

Origen

¿Por qué los diagramas de flujo terminan en un cierto punto?, ¿por qué no muestran que toda la “energía útil” termina finalmente en el “vertedero térmico”? Porque fueron realizados por instituciones con ciertos intereses; para la industria energética, por ejemplo, el diagrama termina en la elaboración de la factura, es decir, allí donde el productor pide el dinero. Se interesan solo en las pérdidas antes de ese límite, lo que el consumidor haga a continuación con su energía no les genera ni interés ni preocupación.

Eliminación

Explicar que toda la energía primaria “sirve” para producir entropía, y que no existe un límite físico para disminuir dicha producción. Como en principio todas las actividades para las cuales se emplea energía se pueden realizar sin producción de entropía, se debe analizar cuáles son los problemas técnicos para acercarse a dicha meta. En todo este proceso se presentan muchos conceptos y desarrollos físicos (también químicos) que pueden aprender los estudiantes.

Referencias

- [1] Anexo No.1. Diagrama de carga y esquema de diagrama Sankey. [en línea]. En: http://old.acee.cl/576/articles-59069_doc_pdf.pdf [consultado el 16 de enero de 2022].
- [2] Ahorro y eficiencia energética a través de la cogeneración. [en línea]. En: https://www.camaravalencia.com/es-ES/proyectos/Documents/Valencia_Chamber-focus_on_energy.pdf [consultado el 16 de enero de 2022].
- [3] A Sankey for Energy Generation in U.S. [en línea]. En: <http://www.sankey-diagrams.com/25/> [consultado el 16 de enero de 2022].
- [4] Energieflussbild 2010 für die Bundesrepublik Deutschland in Mio. t SKE. [en línea]. En: <https://ag-energiebilanzen.de/> [consultado el 16 de enero de 2022].
- [5] Spaghetti diagrams, part 1. [en línea]. En: <http://www.energyliteracy.com> [consultado el 16 de enero de 2022].

5.17 La degradación de la energía

Tema

Es popular la opinión según la cual el calor es una forma de energía de “baja calidad”. Como razón se aduce que según el segundo principio de la termodinámica, el calor puede ser transformado en trabajo solo parcialmente. De acuerdo a dicha opinión, las energías cinética, potencial y eléctrica, por el contrario, son de “alta calidad”, ya que para esas formas de energía no se aplica la mencionada restricción. Se dice que transformar en calor otra forma de energía, ocasiona una pérdida del poder de realizar trabajo y por consiguiente una degradación de la misma.

Defectos

A pesar de que existe energía de sobra, se tienen serias dificultades para “permear” estas reservas gigantescas y

aprovecharlas. A manera de ejemplo se puede considerar 1 kg de agua, de los 320 trillones que tiene el océano Atlántico, el cual “contiene”:

- 100 kJ de energía cinética en el ecuador, gracias a la rotación de la tierra;
- 700 kJ de energía térmica, respecto al cero absoluto ($T = 0 \text{ K}$);
- 20 000 kJ de energía potencial, respecto al centro de la tierra,
- $800 \cdot 10^8 \text{ kJ}$ de energía de fusión (por la posible conversión de hidrógeno en oxígeno),
- $90 \cdot 10^{12} \text{ kJ}$ de energía en reposo $m c^2$.

Por diversas razones todas estas cantidades en la práctica son inaccesibles, y por consiguiente no tienen “valor”. Para aprovechar la energía cinética del mencionado kilogramo, sería necesario ponerlo en reposo respecto a la tierra que está en rotación; habría que “sacar” su momentum y su momentum angular (ambos indestructibles) y transferirlos a un cuerpo que no gire junto con la tierra. Ya que no existe tal cuerpo el “acceso” a la energía correspondiente no es posible.

Por razones análogas no es posible aprovechar los 700 kJ de energía térmica, ni los $200 \cdot 10^2 \text{ kJ}$ de energía potencial. Para hacerlo se tendría que transferir respectivamente la (indestructible) entropía S a un lugar “absolutamente frío”, es decir, un lugar sin entropía alguna; o la (indestructible) masa m del agua al “cero absoluto” de altitud, es decir, al centro de la tierra. Los dos procesos, factibles en principio, no son posibles ya que los lugares necesarios no están disponibles o accesibles.

No es posible obtener los $800 \cdot 10^8 \text{ kJ}$ de energía de fusión porque no se logra iniciar la fusión de los núcleos, y no se puede liberar los $900 \cdot 10^{11} \text{ kJ}$ de energía en reposo porque la conservación del número bariónico lo impide.

Las energías cinética, potencial y térmica no se distinguen en cuanto a sus posibilidades de aprovechamiento. Las dos primeras parecen más valiosas solamente porque al realizar los cálculos se deja de lado, sin decirlo, las partes “no utilizables”; mientras al considerar la energía térmica se procede de manera diferente, y en cierta forma contraria, al incluir el “lastre energético”—esa “parte no utilizable”—en los diferentes cálculos y análisis.

Un ejemplo: en una central hidráulica se considera como energía entregada a las turbinas únicamente la diferencia entre las energías potenciales del agua cuando “entra” y cuando “sale”: $E = mgh_2 - mgh_1$. De este modo los $200 \cdot 10^2 \text{ kJ}$ de energía “no aprovechable” no entran en el cálculo.

De manera distinta se procede al realizar los balances para una central térmica, en lugar de considerar la diferencia entre las energías entrante y saliente:

$$E = ST_2 - ST_1,$$

se considera como energía invertida únicamente el primer término, es decir, $E = ST_2$, a pesar de que se sabe de antemano que el segundo término ST_1 no es utilizable (siendo T_1 la temperatura ambiente). Estas diferentes formas de analizar la fenomenología genera una diferencia donde en realidad no existe.

En general, la idea de que la transformación de una forma de energía cualquiera en calor sea la causa de la pérdida de capacidad de trabajo no es correcta. Por ejemplo: el trabajo W que se emplea en un ciclo inverso de CARNOT para “bombar” calor Q_1 del llamado foco frío al caliente aparece como calor Q_2 —junto con Q_1 — en el foco caliente:

$$Q_2 = W + Q_1$$

El trabajo ha sido convertido completamente en calor, pero a pesar de esto puede ser recuperado totalmente cuando se invierte el proceso.

Pero entonces ¿cuál es la razón para que se deba tener a disposición cada vez “energía nueva”? ¿Qué es lo que hace disminuir el valor de la energía cuya cantidad queda constante?

La “responsable” de esta pérdida aparente de valor de la energía es únicamente la entropía: el hecho de que se la pueda producir pero no destruir. No es necesario atribuir a la energía ningún valor diferente a su valor en joule. En todos los procesos que se desarrollan por sí mismos (espontáneamente) se produce entropía S como “residuo”, cuya “ubicación” en un depósito (“basurero térmico”) con temperatura T implica el gasto de energía TS , energía que ya no es posible aprovechar y por lo tanto representa una pérdida. Transferir la entropía S a un depósito con temperatura cero, permitiría tener disponible toda la energía TS . No es correcto hablar de ningún modo de un cambio cualitativo de la energía que la haga menos valiosa.

Origen

Antes de la formulación del teorema de la conservación de la energía en 1850, se creía que no era posible crear trabajo, pero si “destruirlo” (por ejemplo por rozamiento); entonces, las pérdidas de trabajo parecían un fenómeno normal, que luego fue difícil de comprender. Después de 1850, el problema fue resuelto mal que bien por William THOMSON —LORD KELVIN (1824–1907)—, apli-

Rendimiento de Carnot

cando al modelo atomístico el concepto de disipación de la energía.

Eliminación

La difícil relación establecida tradicionalmente con la entropía induce a evitar dicha magnitud, lo que conlleva a describir y explicar los fenómenos que son de su competencia por medio de construcciones sucedáneas. Se podrá esperar una mejora solamente cuando se logre concebir y manejar la entropía como cantidad física normal.

5.18 Rendimiento de CARNOT

Tema

El rendimiento relativamente bajo de las máquinas térmicas se debe al hecho de que solo una parte del calor se deja transformar en trabajo. La proporción del calor que se puede convertir en trabajo se llama habitualmente rendimiento de CARNOT. Su valor es

$$\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_2},$$

donde T_2 y T_1 son las temperaturas de los llamados foco caliente y frío respectivamente.

Defectos

Lo que aparece como particularidad de las máquinas térmicas, no es otra cosa que la expresión de una disparidad de criterios. Consideremos, para comparar, un ejemplo mecánico que ya fue utilizado por CARNOT:

Un molino de agua que se encuentra en Bogotá a $h_2 = 2600$ m sobre el nivel del mar, tiene una rueda hidráulica con diámetro $h_2 - h_1 = 5$ m, recibe con cada kilogramo de agua una energía potencial aproximadamente igual a: $m \cdot g \cdot h_2 \approx 26$ kJ, de la cual solo puede utilizar $m \cdot g \cdot (h_2 - h_1) \approx 50$ J. Por consiguiente, su "rendimiento de CARNOT" es

$$\eta = \frac{h_2 - h_1}{h_2} = 0,002.$$

El mismo molino, situado en el valle del río Magdalena, es decir, a una altitud de 20 m sobre el nivel del mar, tendría un rendimiento de 0,25. Se ha considerado solamente la energía potencial respecto al nivel del mar, si se hace referencia al centro de la Tierra, el agua en el molino de Bogotá tendría una energía potencial de 31 MJ aproximadamente, y su rendimiento sería bastante insignificante $\eta \approx 1,6 \cdot 10^{-6}$.

Se ve que algo no está bien aquí. Aparentemente el rendimiento de CARNOT no tiene nada que ver con el

molino, y tampoco con la máquina térmica, sino con la posición de los dos niveles relevantes h_2 y h_1 o T_2 y T_1 —según sea el caso— respecto a un nivel arbitrario de referencia. Se atribuye este rendimiento al objeto equivocado. Sin embargo, estamos tan acostumbrados a medir procesos térmicos y no térmicos con dos patrones tan distintos, que ya no nos perturban esta clase de incongruencias.

Origen

Nicolas Léonard Sadi CARNOT (1796–1832), quien elaboró su teoría antes de la formulación del teorema de la energía, no conocía la magnitud η ; él comparó la máquina de vapor con un molino de agua. Para él, el trabajo resultó en cierto modo de la diferencia de las "energías potenciales" del calor en los depósitos de calor entrante y saliente. Solo la equivalencia limitada entre calor y trabajo, postulada por CLAUSIUS, generó la necesidad de tal magnitud.

Eliminación

En termodinámica, el concepto de rendimiento de CARNOT es tan superfluo como en mecánica. Descripto como un molino de entropía, la máquina térmica es tan trivial como el molino de agua.

5.19 Rendimiento y factor de CARNOT

Tema

Generalmente se define el rendimiento de una máquina como el cociente entre la energía útil obtenida y la energía suministrada a la máquina:

$$\eta = \frac{\text{energía útil obtenida}}{\text{energía suministrada}} \quad (5.7)$$

Con esta definición se obtiene para la calefacción por medio de una resistencia eléctrica un rendimiento de

$$\eta = 1.$$

Al aplicar la ecuación a una máquina térmica ideal, es decir, en la cual no hay producción de entropía, se obtiene para el rendimiento, el llamado factor de CARNOT, donde T_2 es la temperatura del denominado foco caliente y T_1 la del foco frío.

$$\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_2}. \quad (5.8)$$

Al tratarse de una bomba de calor, se obtiene que

$$\eta = \frac{T_2}{T_2 - T_1}.$$

Defectos

La definición del rendimiento expresada en la ecuación (5.7) no es acertada; se esperaría de un rendimiento adecuadamente definido que:

- Sus valores se encuentren en el intervalo de 0 a 1.
- Para una máquina ideal sea igual a 1.
- Para una máquina no ideal sea < 1 .

Una máquina se considera ideal cuando opera de manera reversible, es decir, cuando no hay producción de entropía.

Ninguna de las tres condiciones citadas se cumple en la definición arriba mencionada. El rendimiento de la bomba de calor resulta superior a la unidad, es decir, no se cumple la primera condición. Para la máquina de CARNOT, que funciona reversiblemente se obtiene un rendimiento inferior a 1, violando así la segunda condición. Para la calefacción por resistencia, un dispositivo altamente irreversible y notorio derrochador de energía, el rendimiento es igual a la unidad, es decir, se viola la tercera condición.

Origen

La definición del concepto rendimiento estuvo acompañada del intrincado proceso de diferenciación entre la energía y la entropía, el cual tardó casi un siglo. En la obra de CARNOT no existe el concepto rendimiento, este se encuentra en la obra de Hermann von HELMHOLTZ (1821–1894), aunque no se puede afirmar que él fuera el primero en emplearlo. Y aunque en aquellos tiempos la definición empleada no era propiamente acertada, al menos era comprensible. Hay que tener en cuenta que en esa época todavía no existía la bomba de calor, es decir, un artefacto con rendimiento superior a la unidad.

Tampoco se conocía la pila de combustible y se pensaba que la combustión era la única manera de obtener energía de la reacción entre el carbón y el oxígeno. Así que no era evidente a qué atribuir el rendimiento de una máquina térmica: a la caldera o la máquina propiamente dicha.

Eliminación

Se propone utilizar la siguiente definición para el rendimiento:

$$\eta = \frac{P_{\text{ideal}}}{P_{\text{real}}} \quad (5.9)$$

Donde P_{real} es el consumo energético de la máquina real que se quiere evaluar, y P_{ideal} es el consumo energético de una máquina que presta el mismo servicio, pero que funciona reversiblemente, es decir, sin producción de entropía.

Para la máquina de CARNOT se obtiene con esta definición $\eta = 1$, ya que esta máquina es ideal.

Para la bomba de calor, se obtiene siempre un valor η igual 0 inferior a 1.

$$0 < \eta < 1$$

Si en la bomba no hay fricción, resistencia eléctrica o pérdidas de calor, entonces es ideal y el rendimiento será igual a la unidad. En caso contrario, es decir, si hay pérdidas, el rendimiento será menor que 1 ($\eta < 1$).

Una máquina ideal que preste el mismo servicio que la calefacción por resistencia, es decir, que entregue una corriente de entropía (corriente de "calor") I_S , a la temperatura alta T_2 , es una bomba de calor que absorbe entropía a temperatura ambiente T_1 .

El consumo energético para la calefacción eléctrica es:

$$P_{\text{real}} = T_2 \cdot I_S,$$

y el consumo de una bomba de calor ideal:

$$P_{\text{ideal}} = (T_2 - T_1) \cdot I_S,$$

obteniendo para el rendimiento, según (5.9), el ya conocido factor de CARNOT (5.8). Efectivamente, la calefacción por resistencia derrocha tanto más energía, cuanto más alta es la temperatura del ambiente, ya que cuanto más alta es la temperatura del ambiente, tanto menor es la energía que se necesita para pasar desde T_1 hasta la temperatura deseada T_2 .

Con el mismo razonamiento se puede obtener el factor de CARNOT para el rendimiento de cualquier dispositivo que sirva para suministrar calor y que obtenga el 100% de la entropía por producción. Por consiguiente, en una central eléctrica el bajo rendimiento no lo debemos atribuir a la turbina, sino a la caldera.

En algunos libros de termodinámica [1] la definición representada en (5.9) es conocida como rendimiento exergético o "Second Law Efficiency", en inglés, sin embargo se presenta como un concepto "para avanzados". Proponemos introducir esta definición de rendimiento desde el comienzo del curso de termodinámica.

Referencias

[1] H. D. Baehr, *Thermodynamik*, Springer-Verlag, Berlin, 1981, p.142

El ciclo de Carnot

5.20 El ciclo de CARNOT

Tema

En los cursos universitarios de Física los estudiantes conocen el ciclo de CARNOT —Sadi CARNOT (1796–1832)—, en el cual un gas ideal recorre cuatro etapas o procesos alternos: dos isotérmicos y dos isentrópicos, regresando al finalizar a su estado inicial. Se muestra que en dicho proceso cíclico solo una parte bien determinada de calor se transforma en trabajo. A veces se generalizan los cálculos a un proceso cíclico cualquiera, descomponiéndolo en muchos procesos isotérmicos e isentrópicos infinitesimales. Para representar dicho ciclo se emplea generalmente un diagrama p - V .

Defectos

- 1 En su obra maestra CARNOT [1], presenta, desarrolla y fundamenta una idea brillante: En una máquina térmica (motor térmico) el “calórico” (en el original “calorique”) pasa de una temperatura alta a una baja y así realiza trabajo (en el original “puissance motrice”, o en español “potencia motriz”). Este trabajo es proporcional a la diferencia de temperatura y la cantidad del calórico (“quantité de calorique”) trasladado. CARNOT se percata de que el motor térmico es similar o análogo a una rueda hidráulica, donde el agua pasa de una altura mayor a una menor, realizando trabajo. En su obra, CARNOT primero presenta esta idea y solo después desarrolla los detalles, es decir, cómo se puede modelar el motor térmico y su funcionamiento. Hoy día esos detalles y los cálculos correspondientes son lo único que se enseña al estudiante, de la idea que subyace a dichos cálculos lamentablemente poco o nada se le menciona.
- 2 En el ciclo de CARNOT intervienen dos “formas de energía”: $p dV$ y $T dS$ (conocidas a veces como “energía de compresión” y “cantidad de calor”). Si se insiste en tratar el ciclo de CARNOT como habitualmente se hace, y representarlo gráficamente, entonces se debería representar en las coordenadas de ambas formas de energía, es decir, en un diagrama T - S y en uno p - V , Fig. 5.6. Es en el diagrama T - S que se muestra la simplicidad del proceso, y se ve más claramente la idea de CARNOT: el calórico (que hoy llamamos entropía) es absorbido por la máquina a una temperatura constante y alta (proceso A → B), y entregado a una temperatura constante y baja (proceso C → D). El diagrama T - S es independiente de cuál sea la sustancia de trabajo que se emplee, mas no así el diagrama p - V . Esta es una observación importante que CARNOT realza antes de tratar el ejemplo del gas ideal.

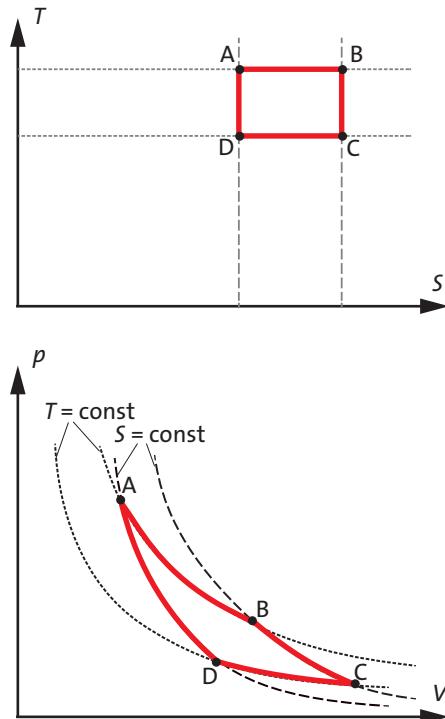


Fig. 5.6 Diagramas T - S y p - V del ciclo de Carnot. Durante un ciclo la máquina absorbe entropía a alta temperatura y la entrega a baja.

Sin embargo, es posible desistir por completo de ambos diagramas, ya que uno (p - V) no es muy interesante y el otro (T - S) es trivial, a condición de que se haya comprendido correctamente la idea inicial de CARNOT; en la obra de CARNOT no se encuentra ninguno de los dos.

- 3 Es posible llegar más fácilmente a la comprensión del motor térmico si se considera una máquina que trabaje en régimen continuo, en lugar de cíclico, tal como se hace con otros transformadores de energía.

Origen

- 1 En la década de los 50 del siglo 19, en el contexto de la euforia general que acompañó la “aparición” de la energía se interpretó el calórico de CARNOT como una “forma de energía”. Al hacer esto, las ideas de CARNOT parecían ser parcialmente erróneas, ya que según él en un motor térmico la cantidad de calórico no cambia, mientras la energía entregada por el depósito de alta temperatura es mayor que la absorbida por el de baja, correspondiendo la diferencia al trabajo realizado por la máquina.

Desde un punto de vista moderno es más apropiado identificar el calórico con la entropía. En efecto, la

cantidad de entropía no cambia al pasar del depósito de alta temperatura al de baja. La interpretación equivocada de la idea de CARNOT se ha mantenido hasta el día de hoy, a pesar de que varias veces se ha hecho notar el error.

- 2 La entropía es considerada una magnitud compleja y no intuitiva, y se trata en lo posible de eludirla. De este modo se pierde el diagrama $T-S$, quedando solamente el $p-V$, es decir, el menos interesante y más complejo.
- 3 En la época de CARNOT la única máquina térmica que existía —la máquina de vapor—, era cíclica. Todavía no existían máquinas de régimen continuo como las turbinas de vapor, por lo cual para CARNOT fue normal presentar su idea con el ejemplo de una máquina cíclica.

Eliminación

Los lectores se podrían preguntar: ¿Qué tiene que ver este tema en una publicación orientada fundamentalmente al nivel escolar? ¿No es definitivamente un tema para la universidad? En efecto, si se lo presenta como se suele hacer, no sería un tema adecuado para la secundaria. Si por el contrario es presentado tan clara y sencillamente como lo hizo el mismo CARNOT, entonces no solo se puede sino que resulta muy apropiado enseñarlo en la educación media.

Referencias

S. Carnot, *Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas adecuadas para desarrollar esta potencia*. Madrid: Alianza Editorial, 1987, p.140

5.21 Energía interna y calor

Tema

Después de suministrar calor a un cuerpo, dicho cuerpo contiene más calor que antes; si el cuerpo desprende calor entonces su contenido de calor disminuye. Una persona sin instrucción particular en Física no tendrá objeción ante dichas afirmaciones, sin embargo, la Física nos enseña que son falsas. Según esta, se puede suministrar calor a un cuerpo, pero a pesar de esto el cuerpo no contendrá calor, y se puede sustraer calor del cuerpo a pesar de que este no contenga calor. Parece arte de “magia”: el sombrero está vacío y de pronto sale un conejo. La Física nos dice que al suministrar o sustraer calor no cambia el contenido de calor del sistema, sino su energía interna o su entalpía. Pero decir que un cuerpo no contiene calor no es simplemente una manera de hablar o

una convención, no significa que al llegar al cuerpo solamente se le da otro nombre al calor. No es simplemente que no sea permitido llamar calor a la energía que ha llegado al cuerpo, sino que en general no es posible hacerlo.

Este hecho “molesto” se refleja de manera muy similar en varios libros de Física de diversos modos, algunos autores lo manifiestan tajante y directamente: “**¡Atención! Hay que distinguir cuidadosamente entre calor, energía interna y temperatura: un objeto no contiene calor, sino energía interna.**” [1]; otros aventuran dudosas explicaciones pretendiendo que se puede descomponer la energía interna —cosa que no podrían mantener si se les pidiera indicar valores cuantitativos—: Bajo el título “**Los componentes de la energía interna**” se enumeran: la energía de movimiento de las partículas, la energía contenida en la cohesión de las partículas, la energía química y la nuclear [2], ó: “**La energía de un objeto, que no se puede describir como energía mecánica** (energía potencial o cinética), se llama energía interna E_i . Pertenece a la energía interna, por ejemplo, las energías atómica, química y biológica. Una parte esencial es también la energía que esta vinculada con la temperatura del objeto.” [3] —ver [4]—; y a veces de un plumazo se identifica calor y energía interna: “**En todo caso, los cuerpos también realizan trabajo de fricción, de este modo una parte de la energía mecánica se transforma en una forma de energía a la cual no se la puede “retransformar” en energía mecánica, sino que será entregada al ambiente dentro o fuera del sistema como energía calórica o energía interna.**” [5].

Defectos

Es difícil imaginar que un estudiante comprenda el por qué es falso decir que el calor suministrado a un cuerpo, después no se encuentra contenido en él; la experiencia no reporta casos de estudiantes de Física que puedan justificar este hecho. Al estudiante le parece que esta afirmación es como un sofisma que se puede “archivar”, es decir, como uno de tantos temas que no se puede comprender y que no es necesario comprender.

Origen

La situación se origina en la descripción de procesos que requieren una medida para la cantidad de calor. El “calor” de la Física como “magnitud de proceso”, es tan innecesario como la energía interna o la entalpía tan apreciada por los químicos. Véase [6] y [7].

Eliminación

En esta ocasión la eliminación es sencilla, es posible describir los procesos mencionados por medio de la en-

Energía térmica

tropía. La entropía representa casi perfectamente el concepto de calor de una persona sin formación en Física, pero con buen sentido común. Al calentar un cuerpo se agrega entropía y luego de haberlo hecho el cuerpo tendrá más entropía. Es fácil indicar cuánta entropía contiene un cuerpo y más fácil aún en cuánto cambia su contenido al calentarlo [8].

Referencias

- [1] H. Deber, Ch. Gleixner u. R. Pippig, *Galileo 9*, Oldenbourg, 2000, p.98
- [2] T. Appel, G. Glas, u. J. Schröder, *Spektrum Physik*, Schroedel Verlag, Hannover, 2000, p.17
- [3] H. Deber, Ch. Gleixner u. R. Pippig, *Galileo 9*, Oldenbourg, 2000, p.93
- [4] Véase 2.1 *Formas de energía*, p.48
- [5] J. Grehn u. J. Krause, *Metzler Physik*, Metzlersche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1988, p.60
- [6] Véase 5.14 *Equivalencia entre calor y trabajo*, p.139
- [7] Véase 5.1 *Entropía*, p.124
- [8] Véase 5.3 *Medición de la entropía*, p.127

5.22 Energía térmica

Tema

Tanto en textos como en la red se encuentran citas como las siguientes:

- 1 “La energía térmica es la parte de la energía interna que cambia cuando cambia la temperatura del sistema. [...] En la práctica, el término “calor” se utiliza para dar a entender tanto energía térmica como transferencia de energía.” [1]
- 2 “Energía térmica es la energía cinética total que posee un sistema. La energía térmica es un componente importante de la energía interna de dicho sistema.” [2]
- 3 “La energía térmica es parte de la energía interna y esta esencialmente determinada por la temperatura. Ya que en muchos casos se puede suponer que las demás componentes son constantes, a veces se considera solamente la energía térmica... El calor nos dice cuánta energía térmica se transfiere de un sistema a otro... Para la relación entre calor transferido y cambio de energía es válido que:

$$Q = \Delta E_{\text{term}}. [3]$$

- 4 “La energía mecánica es la que se intercambia cuando se realiza trabajo. Sin embargo, existen otros intercambios de energía que no se pueden cuantificar por medio del trabajo.

El intercambio de energía térmica o calorífica se cuantifica por el calor, y este, por las variaciones de temperatura.” [4]

Defectos

La intención que esta en la base de las anteriores definiciones es clara, se quiere introducir una medida para el contenido de calor de un sistema, y se espera de ella que posea las siguientes propiedades:

- 1 Tener un valor bien definido en un estado determinado, es decir, ser una magnitud de estado.
- 2 Ser una magnitud tipo energía (una medida energética), es decir, una magnitud extensiva que se mida en J.
- 3 Ser una componente de la energía interna, distinta de otro componente que se llamaría energía química.
- 4 El cambio de dicha magnitud debería ser igual a lo que en Física se llama calor y se designa con la letra Q.

Desafortunadamente es imposible definir una magnitud con esas propiedades, no es posible distinguir la energía cinética y potencial de las partículas de una componente que se llame energía química. Cada aumento de la temperatura lleva a un aumento de las excitaciones electrónicas, de las excitaciones oscilatorias, del sistema de espines, de la disociación de las moléculas, del reagrupamiento o transposición de átomos, es decir, de reacciones químicas, y finalmente también de reacciones nucleares. Es imposible repartir la energía que participa en estos procesos de un modo inequívoco en los diversos sumandos, y además no existe una razón válida para hacerlo.

Si tal descomposición existiera, se podría manifestar observando que uno de los sumandos depende únicamente de la temperatura y no del potencial químico (se llamaría energía térmica), y otro solo del potencial químico y no de la temperatura, pero como se dijo no existe tal descomposición.

Origen

En Física, Química y Termodinámica técnica es indispensable una medida para la cantidad de calor, o una medida para el contenido de calor en un sistema. El sentido común sugiere que es posible definir tal magnitud, ya que en la vida cotidiana se opera continua y exitosamente con un concepto semejante. Sin embargo, al introducir tal medida en la Física en el siglo 19 se ha cometido un error, se ha supuesto que dicha cantidad tiene que ser una magnitud energética [5]. Pero es imposible definir una magnitud energética con todas las propiedades deseadas, existen construcciones que co-

rresponden a algunas de las expectativas, pero a otras no.

Así, la magnitud Q (a la que se ha atribuido el nombre de calor) tiene la desventaja de no ser una magnitud en el sentido usual, se dice que es una “magnitud de proceso”, ya que no tiene sentido atribuirle un valor en un sistema en un estado determinado.

Los químicos operan con otra construcción sustitutiva, la entalpía H , esta se comporta efectivamente como una medida de calor, pero únicamente a condición de que en los procesos considerados se mantenga constante la presión, una restricción en general inaceptable para un físico.

Como se ve ninguna de las dos magnitudes Q o H representa adecuadamente las justificadas expectativas de una medida de calor, es entonces tentador construir una nueva magnitud que se comporte como se esperaría en todos los casos, es decir, se crea la energía térmica.

Es interesante notar que el concepto de energía térmica se encuentra más frecuentemente en libros escolares que universitarios, ¿se debe entonces reprochar a los autores de dichos libros que “inventen” conceptos insostenibles, por falta de conocimientos termodinámicos? La respuesta es sí y no. Sí, porque la construcción no funciona. No, porque la culpa de que la termodinámica sea tan impopular e ignorada es en general de la universidad. La termodinámica tiene la mala reputación de ser demasiado abstracta, y en la universidad se promueve esa reputación, vanagloriándose a veces de requerir complicadas herramientas matemáticas que hacen difícil y “miedosa” dicha asignatura a los estudiantes: relaciones entre cuatro variables que cambian simultáneamente, derivadas parciales intercaladas, cambio de variables, magnitudes poco intuitivas como entalpía, energía libre, energía libre de GIBBS (¡qué nombre!)... Para un proceso tan sencillo como la compresión del aire en un motor DIESEL se utiliza el coeficiente de dilatación adiabática, que se define como el cociente de dos derivadas parciales, las cuales se distinguen por el hecho de que en un caso se mantiene constante una de las variables, y en el otro caso la otra. Al proceder de este modo es de esperar que se desarrolle una aversión hacia la termodinámica. Pero qué harán más tarde los estudiantes, cuando sean profesores, ¿cómo pueden presentar los fenómenos térmicos a un nivel que corresponda a las características propias del desarrollo y expectativas de sus alumnos? Es completamente comprensible que ellos construyan su propia termodinámica.

Eliminación

Es más fácil de lo que se podría pensar. Al abandonar la idea de que la medida de calor tiene que ser energética,

todas las dificultades desaparecen cuando se presenta la entropía como la medida buscada.

Referencias

- [1] R. Serway, *Física*. Tomo I. 2 ed. México: Mc-Graw-Hill, 1996. p. 554.
- [2] T. Engel a. P. Reid, *Physical Chemistry*. New York: Prentice Hall, 2006. p.13.
- [3] L. Meyer, G. Schmidt, *Physik*, Duden Paetec. Berlin: Schulbuchverlag, 2007. S.181.
- [4] Energía térmica. [en línea]. En: <https://de.scribd.com/document/415606890/ENERGIA-TERMICA> [consultado el 16 de enero de 2022]
- [5] Véase 5.14 *Equivalencia entre calor y trabajo*, p.139

5.23 Energía libre

Tema

“Energía libre, símbolo F ... , una variable de estado termodinámica que caracteriza la capacidad de un sistema para realizar trabajo. Se define como $F = U - TS$, donde U es la energía interna, T la temperatura en K y S la entropía.”

“La energía libre, también potencial de HELMHOLTZ, energía libre de HELMHOLTZ o energía de HELMHOLTZ en honor a Hermann von HELMHOLTZ, es un potencial termodinámico. Tiene la dimensión de una energía. La energía libre es una magnitud extensiva... ”

En termodinámica, los potenciales termodinámicos son magnitudes que, por su contenido de información, describen completamente el comportamiento de un sistema termodinámico en equilibrio.”

Defectos

- 1 ¿En qué contexto y con qué fin se introduce la energía libre? La primera definición parece decirlo: si se quiere que un gas realice trabajo, también es necesario saber cuánto trabajo puede realizar, así que se introduce la energía libre. Un primer problema con esto es que el valor de la energía interna contiene una arbitrariedad, porque el punto cero puede ser elegido libremente. Por supuesto, se podría tomar simplemente la energía total del gas en reposo. Sin embargo, esta incluye la energía de reposo, por lo que el valor es gigantesco, y aquí también se puede ver que tampoco se responde a la simple pregunta formulada. Por supuesto, algo no está bien aquí, no es así como debe entenderse la definición. Más bien, lo que se quería decir es que la diferencia de energía libre entre

Energía libre

dos estados indica cuánto trabajo puede realizar el gas durante una transición entre estos dos estados.

Sin embargo, acá se presenta el siguiente problema: se podría pensar que la energía libre muestra cuánto trabajo realiza, por ejemplo, el vapor que se distiende en el cilindro de la máquina de vapor de una locomotora. Pero no, no indica eso. La afirmación solo se refiere a los procesos a temperatura constante.

Dejemos de lado por el momentum dichas preocupaciones y consideremos el balance energético en la expansión isotérmica de un gas ideal, Fig. 5.7.

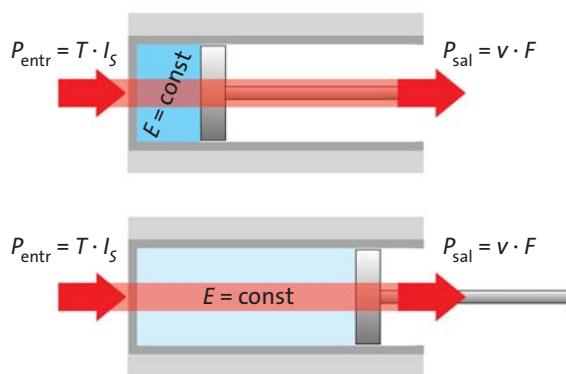


Fig. 5.7 Expansión de un gas ideal a temperatura constante. La energía atraviesa el gas.

El pistón se mueve hacia la derecha, el gas esta en equilibrio térmico con el entorno, el intercambio de entropía se produce a través de la pared izquierda del cilindro.

Dado que la energía interna solo depende de la temperatura, esta queda constante durante la expansión. Un flujo de energía, acompañado de un flujo de entropía, entra en el gas y el mismo flujo de energía sale de nuevo del gas a través del vástago del pistón, en este caso, junto con un flujo de momentum.

Ahora, este sencillo proceso se describe de forma bastante confusa empleando la energía libre. La intención es probablemente que no se quiera decir de la energía saliente que solo ha atravesado el gas. Más bien se quiere decir que sale algo que antes estaba contenido en el gas. Se quiere describir el flujo de energía que sale por un cambio en algún contenido del cilindro. ¿Pero el contenido de qué? La energía en el cilindro no disminuye. Así que se construye una magnitud que hace lo que se quiere y que se dice que es energía, pero no energía normal, sino "energía libre".

El problema es para aquellos que no solo quieren ver la descripción matemática de un proceso para en-

tenderlo, sino que también quieren formarse una idea intuitiva. Quieren ver que es como otra cosa ya conocida, en otras palabras, buscan una analogía.

En este caso, a manera de sugerencia, en lugar de la energía se puede tomar el agua. En lugar del cilindro, se toma un recipiente, de tal forma que el agua lluvia fluya hacia él. Ella se purifica de alguna manera, obteniendo agua potable. El agua lluvia corresponde al calor que fluye hacia el recipiente, es decir, energía acompañada de entropía. El agua potable corresponde al trabajo, es decir, a la energía que va acompañada del momentum. La contaminación que contiene el agua lluvia corresponde a la entropía. Hasta aquí todo parece encajar. Pero si se quiere indicar la cantidad de agua potable que hay en el recipiente, se observa que lo único que se podría obtener sería la cantidad total de agua, lo cual no corresponde a la cantidad de energía libre.

2 Otra pregunta que podría surgir, y quizás especialmente si se está interesado en una aplicación práctica, podría ser: ¿cómo puede un gas realizar trabajo si su presión es igual a la presión ambiental? La pregunta de cuánto trabajo puede realizar un gas (u otro sistema) tiene fácil respuesta. Viene dada por la exergía, que es bien conocida por los ingenieros. Sin embargo, a los físicos no parece gustarles mucho la exergía, porque su valor no solo está determinado por el estado del medio de trabajo, sino también por el estado del entorno.

3 Al igual que se aprende que la energía libre es el contenido de trabajo (si se realiza un proceso a temperatura constante), también se aprende que la entalpía describe el contenido de calor (si se realiza un proceso a presión constante). ¿No encanta de maravilla? El trabajo y el calor son las dos (únicas) "magnitudes de proceso" de la física, con las conocidas propiedades no deseadas. No se puede afirmar que tengan un valor determinado en un estado determinado. Por tanto, no se puede decir que un sistema contenga tanto trabajo o tanto calor. Este es un hecho con el que los estudiantes siempre tienen dificultades. Parece que el problema está resuelto, la entrada o salida de trabajo se expresa en un cambio de energía libre, la entrada o salida de calor en un cambio de entalpía. ¿No es posible elaborar así una ecuación de balance para el trabajo o el calor? Desgraciadamente no, porque se mantiene la inquietante condición "a temperatura constante" o "a presión constante".

4 En cuanto a la segunda cita, una afirmación que se encuentra a menudo en esta forma o en una similar,

dice que la energía libre es un potencial termodinámico. Acá también hay algo que no encaja. Aparte del hecho de que se puede tener la expectativa de que un potencial es una magnitud local, es decir, que su valor se refiere a un punto del espacio, se plantea aquí la cuestión de qué es la energía libre: ¿es una magnitud física cuyo valor está determinado inequívocamente por el estado del sistema considerado, o es una función? La definición citada se refiere a la función $F(T, V, n)$. Porque si la magnitud $U - TS$ se da en función de, por ejemplo, S , V y n , no es un potencial termodinámico en el sentido antes indicado. Por cierto, la misma inexactitud se encuentra en el caso mecánico análogo. La función lagrangiana $L(q_i, v_i)$ es una transformada de Legendre —Adrien-Marie LEGENDRE (1752–1833)— de la función hamiltoniana $H(p_i, v_i)$. Sin embargo, también se puede encontrar (por ejemplo, en Wikipedia) una definición como: “Para los sistemas... la función de Lagrange es

$$L = T - V,$$

donde T denota la energía cinética y V la energía potencial del sistema considerado.”

Sin embargo, en primer lugar, T y V no son funciones. Se puede escribir la energía cinética en función de las velocidades de las partículas o en función del momentum, pero solamente la referente a las velocidades pertenece a la función de LAGRANGE —Giuseppe Luigi LAGRANGE (1736–1813)—.

Además, otros potenciales, como el potencial eléctrico, el potencial magnético escalar y vectorial o el potencial químico tienen un valor bien definido en un estado. No solo se convierten en potenciales cuando se dan en función de determinadas variables.

- 5 Una observación general, es sabido que la termodinámica se considera difícil y no goza de popularidad. En la escuela, aunque figura en el programa de estudios, suele dejarse para los últimos cursos; tampoco parece ser popular en la universidad. ¿Cuál puede ser la razón? Al fin y al cabo, no es muy exigente desde el punto de vista matemático, no contempla ecuaciones diferenciales no lineales, ni tensores, ni siquiera vectores, ni conflictos cognitivos como en la teoría de la relatividad, ni espacios de alta dimensión como en la mecánica cuántica. Y hay que reconocerlo, cuando esta bien presentada, es de una cierta elegancia. La respuesta es sencilla, se trata de la intangibilidad de las magnitudes con las que opera: las magnitudes de proceso calor y trabajo, y las magnitudes H , F y G , o las funciones $F(T, V, n)$, $H(S, p, n)$ y $G(T, p, n)$.

- 6 Por último, una pequeña cosa más, el nombre. La palabra “libre” tiene otro significado en relación con la energía. Se dice que la energía se libera durante un proceso [1]. En este caso, el significado de que la energía sea libre no tiene nada que ver con el de “energía libre”.

Origen

La estructura de pensamiento al respecto se origina esencialmente con HELMHOLTZ —Hermann Ludwig Ferdinand von HELMHOLTZ (1821–1894)—. Su estética matemática puede verse aún mejor en representaciones más modernas, por ejemplo, en REIF [2] o CALLEN [3].

Sin embargo, todo esto no se habría construido si dos ideas hubieran surgido un poco antes:

- si se hubiera mantenido el calórico de CARNOT, que es esencialmente idéntico a la entropía, como medida de calor en lugar de definir el calor como la forma diferencial energética δQ ;
- si se hubiera puesto el acento en el potencial químico introducido por GIBBS —Josiah Willard GIBBS (1839–1903)—, una magnitud descriptiva, como la fuerza universal de las reacciones, de las transiciones de fase y de los procesos de difusión.

En ese caso, las magnitudes F , H y G y las funciones

$$F(T, V, n), H(S, p, n) \text{ y } G(T, p, n)$$

simplemente serían superfluas.

Eliminación

Se recomienda operar con las magnitudes extensivas energía, entropía, cantidad de sustancia, momentum, carga eléctrica..., así como con las correspondientes magnitudes intensivas (“conjugadas energéticas”). Todas estas magnitudes tienen un significado descriptivo. Se puede tratar con ellas como con la cantidad de un fluido ficticio y se pueden balancear localmente. Las magnitudes intensivas tienen el carácter de medidas de fuerza motriz. También son adecuadas para describir la termodinámica de los procesos irreversibles.

En ese caso, la energía libre ya no es necesaria, tampoco la entalpía H o la entalpía libre G .

Referencias

- [1] F. Herrmann, *Frei werdende Energie*, Altlasten der Physik
- [2] F. Reif, *Physikalische Statistik und Physik der Wärme*, Walter de Gruyter, Berlin, 1976, S. 185–191
- [3] H. B. Callen, *Thermodynamics*, John Wiley & Sons New York, 1960

Calor latente y calor sensible

5.24 Calor latente y calor sensible

Tema

El “calor latente” parece ser un término importante en el contexto de las transiciones de fase. He aquí algunas citas de respetadas revistas científicas:

“La parte del aire sin agua transporta mucho menos calor que el escaso porcentaje de agua, según parece. Uno es un transporte de calor sensible, el otro de calor latente.”

“The vapor carries with it a form of energy called latent heat. ... The energy contained in latent heat is substantial;...”

“Dado que durante la congelación la temperatura del agua permanece inicialmente inalterada porque la energía se libera como calor latente,...”

Defectos

Se comprende lo que se quiere decir. Pero es difícil conciliar esto con lo que realmente se dice en estas frases. Existen dos razones para ello.

Una de ellas ya se ha mencionado varias veces en esta serie de artículos: en la primera y segunda cita se dice que la parte sin agua del aire transporta menos calor. Si el aire transporta el calor, entonces seguramente el calor debería estar contenido en el aire, lo cual, como se sabe, no es cierto.

Pero ese no es el tema ahora, se trata de otro problema que se revela en las afirmaciones.

En la primera cita se dice que la fracción sin agua transporta mucho menos calor que el poco porcentaje de agua (gaseosa). Ambos gases son bastante comunes, gases ideales en una buena aproximación. ¿A pesar de la misma temperatura, la menor cantidad de gas contiene más calor latente que la mayor?

Es claro que algo no es correcto. No se está acusando a los autores de no entender los procesos que describen, se les recrimina por no expresar claramente lo que quieren decir. Sin embargo, hay que admitir que tampoco se hace fácil expresar lo que se quiere decir por medio de la desafortunada “variable de proceso” Q . Por tanto, analicemos el problema con la ayuda de la entropía.

El agua se evapora cerca de la superficie de la tierra, el vapor de agua se mezcla con el aire, y ambos ascienden. Ambos son gases y ambos llevan entropía, mucha comparada con el estado líquido. Sin embargo, la contribución de entropía del agua es pequeña comparada con la del nitrógeno y el oxígeno porque el porcentaje de vapor de agua en el aire es pequeño. A gran altura, el agua se condensa. En el proceso, cede más de la mitad de su entropía; el nitrógeno y el oxígeno no se condensan, conservan su entropía. La entropía que desaparece

el agua se llamaría entropía latente mientras esté contenida en el agua.

Ahora bien, en principio, también se podría haber licuado el nitrógeno y el oxígeno (con la ayuda de una máquina frigorífica). Entonces, retroactivamente, una gran parte de la entropía del nitrógeno y del oxígeno se habría convertido en entropía latente.

Y por último, también se podría argumentar que la entropía latente del agua se fijó demasiado baja, porque también se podría haber dejado que el agua se congelara, para que se formaran copos de nieve o granizo.

¿Cómo es posible describir la entropía del agua como latente, pero no la del aire residual? Se llama latente porque el agua probablemente se convertirá en líquido más adelante. Y la entropía del nitrógeno y del oxígeno no se llama latente porque estos gases probablemente no se licuarán en un futuro próximo.

La entropía latente, y más aún el calor latente, no es, por tanto, una magnitud física que caracterice un estado o que pueda verse en un estado. El hecho de que esté latente solo expresa que algo podría ocurrir con el gas en el futuro.

Es posible intentar liberarse de la trampa lógica expresándose de forma suficientemente vaga. Veamos de nuevo la segunda cita: “La energía contenida en el calor latente...” ¿Una magnitud física está contenida en otra? ¿Acaso existe energía contenida en la energía?

Origen

Los conceptos y sus denominaciones de calor latente y calor sensible (“latent heat”, o también “concealed heat”, así como “sensible heat”) se remontan a BLACK —Joseph BLACK (1728–1799) — [1]. El calor de BLACK era una variable de estado, que no debe confundirse con la forma diferencial δQ , a la que los físicos dieron el nombre de calor 50 años después. Corresponde más bien a la magnitud que se llamó entropía 65 años después [2]. Uno de los grandes méritos de BLACK es haber sido el primero en distinguir entre la magnitud intensiva temperatura y la magnitud extensiva calor. También describió correctamente el balance térmico en las transiciones de fase. Solo sus designaciones latentes y sensibles fueron probablemente una torpeza. No es que no se note el calor o que se disimule, es necesario aceptar que el contenido de calor no solo se manifiesta en la temperatura, sino también en el estado de agregación. A la misma temperatura, el vapor contiene más calor (en el sentido de BLACK) que el agua líquida.

Eliminación

Se recomienda describir los procesos de calentamiento y las transiciones entre sólido, líquido y gas con las va-

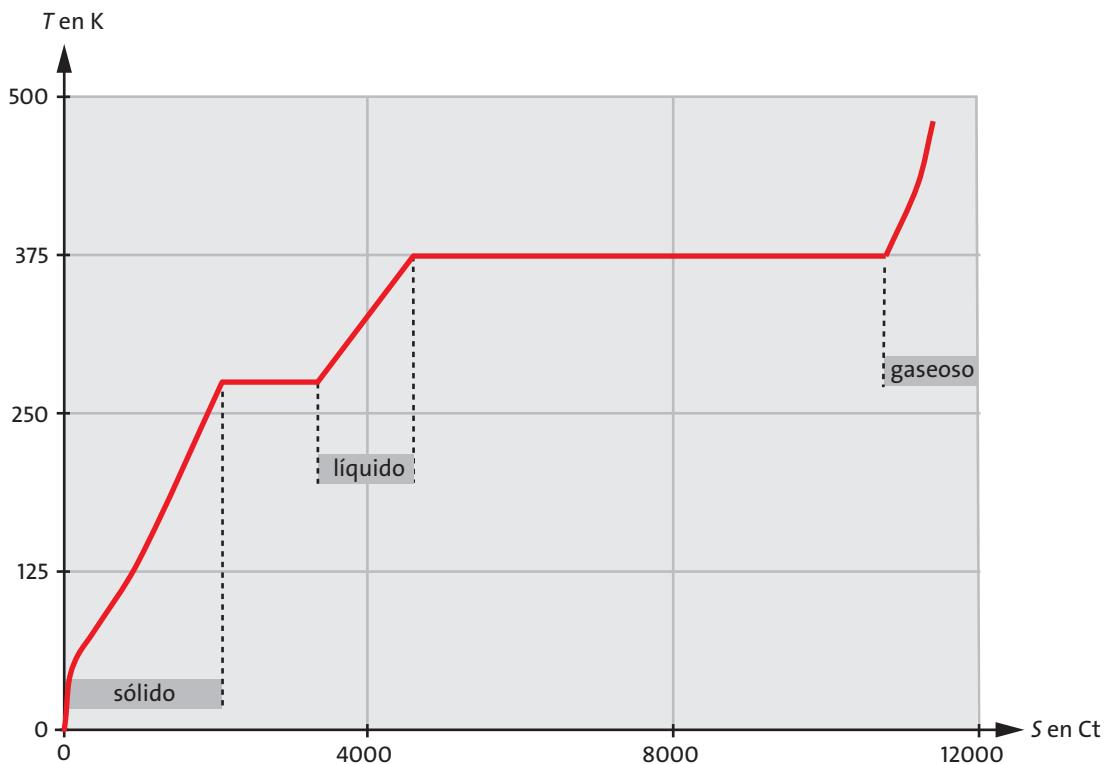


Fig. 5.8 Temperatura en función del contenido de entropía de 1 mol de agua

riables temperatura y entropía. La relación entre ellas se muestra en un gráfico de temperatura vs. entropía, Fig. 5.8. La entropía es la variable independiente porque es más fácil de manipular, se añade entropía al hielo o al agua líquida y se observa lo que ocurre, que pueden ser dos cosas: cambia la temperatura y/o el estado de agregación.

Referencias

- [1] J. Black, *Lectures on the Elements of Chemistry*, delivered in the University of Edinburgh by the late Joseph Black, M.D. Published from his manuscripts by John Robison, Edinburgh, Mundell a. Son, 1803, p.120ff.
- [2] G. Falk: *Entropy, a resurrection of calorific a look at the history of thermodynamics*, Eur. J. Phys., 1985, S.108–115

Defectos

Así o de forma similar se define el término exotérmico, aunque a menudo sea algo más incomprendible. Dicha definición no falta en ningún libro de texto de química, así que parece ser importante. Pero importante para qué?

Se puede responder más fácil si no se pregunta por el calor, sino por la entropía. El calor tiene la desventaja de no ser una “variable de estado”. A diferencia de la entropía, no se puede establecer un balance para el calor, o más exactamente, no se puede formular una ecuación de balance. No se puede decir que el calor está en algún lugar, no se puede indicar una densidad o una densidad de corriente. Así que en realidad no se debe decir que se cede calor, porque si alguien cede algo, debe haberlo poseído antes, y después otro debe poseerlo. Como se sabe, este no es el caso de la “variable de proceso” calor. Así pues, es más exacto y adecuado formular el “balance térmico” de una reacción por medio de la entropía (siendo conscientes de que la entropía describe exactamente lo que siempre se ha pensado que es el calor, al menos desde que se está fuera del recinto universitario o escolar).

Entonces, una reacción exotérmica es una reacción en la que se emite entropía. Hay que seguir teniendo en

5.25 Exotérmico y endotérmico

Tema

“Se llaman reacciones exotérmicas las reacciones en las que se cede calor al medio ambiente.”

Exotérmico y endotérmico

cuenta que la reacción tiene lugar a una temperatura constante.

Por supuesto, se puede evitar que la entropía se emita mediante un aislamiento térmico. Entonces se acumula en los productos de la reacción, y estos se calientan, es decir, su temperatura aumenta. Así que se puede formular la definición con un poco más de cuidado: *Si una reacción se efectúa a temperatura constante, es exotérmica cuando se emite entropía y endotérmica cuando se absorbe entropía.*

Ahora se puede ver mejor dónde está el problema. Cuando la entropía se emite en una reacción, puede provenir de dos fuentes.

Por un lado, hay que contar con que el contenido de entropía de los reactivos (A) y de los productos (B) (a la misma temperatura) no es el mismo. Esto significa que cuando la reacción está en marcha, o bien sobra entropía, que se emite, o bien falta entropía, por lo que es necesario absorberla. Por tanto, el exceso de entropía o la falta de entropía para un determinado avance de reacción ξ es simplemente:

$$\Delta S = S(A) - S(B)$$

Existe además otra fuente de entropía, si la reacción no se lleva a cabo de forma reversible, se genera entropía. En principio, cualquier reacción puede realizarse reversiblemente, por ejemplo, llevándola a cabo en una célula electroquímica. Si esto no se hace, la reacción avanza por sí misma en una determinada dirección, es decir, del potencial químico alto al bajo, o más exactamente: avanza de A a B, si la suma de los potenciales químicos de los reactivos A es mayor que la de los productos B. La energía que se emite en el proceso es:

$$E = (\mu_B - \mu_A) \xi$$

Donde μ_A es la suma de los potenciales químicos de los reactivos, y μ_B la de los productos.

En caso de que la reacción tenga lugar en una célula electroquímica (de funcionamiento reversible), esta energía saldría de la célula a través del cable. Si, por el contrario, se deja que la reacción siga su curso libremente, es decir, si no se aprovecha la energía, esta se utiliza para la producción de entropía o se desperdicia, y se tiene que:

$$(\mu_B - \mu_A) \xi = T S_{\text{prod.}}$$

Para la entropía total emitida o absorbida, se obtiene:

$$S_{\text{total}} = [S(A) - S(B)] + S_{\text{prod.}}$$

Por tanto, esta expresión es positiva en una reacción exotérmica y negativa en una reacción endotérmica. Dado que normalmente se permite que las reacciones químicas se desarrollen sin inhibición, y la contribución resultante $S_{\text{prod.}}$ suele ser grande frente a la diferencia $[S(A) - S(B)]$, muchas reacciones son exotérmicas. La reacción endotérmica parece una excepción.

Si solo se dispone del valor S_{total} , no se puede distinguir entre las dos contribuciones

$$[S(A) - S(B)] \text{ y } S_{\text{prod.}}$$

Si se sabe cuánta entropía se libera en una reacción (por ejemplo, por mol de avance de reacción ξ), no se sabe cuál de las dos fuentes origina la entropía. Sin embargo, esta es precisamente la información que sería importante para entender la reacción.

Este valor solo es útil si se está interesado únicamente en la entropía que se desprende, es decir, si no importa de dónde viene la entropía. En otras palabras, si solo se emplea la reacción para calentar algo. (Lo que ciertamente no constituye un uso sostenible de los recursos).

Para ilustrarlo mejor, se puede hacer una comparación averiguando cómo los habitantes de una casa emplean el agua. Para ello, se mide la cantidad de aguas residuales que salen de la casa a través del sistema de alcantarillado. (Se supone que esta medida es particularmente conveniente.) Pero de esta manera no se sabrá lo que realmente sería interesante, la cantidad de agua que utilizan los residentes, ya que las aguas residuales también incluyen el agua lluvia. Pero tampoco se sabrá cuánto ha llovido. Solo se conocerá la suma de los dos "componentes". Esta medida solo podría ser útil para una cosa, saber qué tan cargado está el sistema de alcantarillado.

Por último, un comentario desde el punto de vista de una persona ajena a la química.

Si se utiliza el término de forma coherente en el sentido definido anteriormente, también habría que decir: que la condensación del agua es un proceso exotérmico; que en la plancha de ropa se realiza un proceso exotérmico.

Ambos son casos especiales, la entropía proviene de una de las dos fuentes. En el primer caso del diferente contenido de entropía de las fases gaseosa y líquida, en el segundo es el 100 % de entropía recién generada. Los procesos no se denominan exotérmicos porque es innecesario introducir un término técnico para procesos tan simples. En lugar de decir "la reacción es exotérmica", basta con decir que se desprende entropía durante la reacción. Cuando una esfera conductora se descarga, no se dice que el proceso sea exoeléctrico, o cuando un cuerpo despidió momentum, que sea exomecánico.

¿Qué es la energía en realidad? ¿Qué es la entropía en realidad?

Origen

Probablemente existan dos razones para clasificar las reacciones según la entropía emitida.

- La entropía emitida se puede medir fácilmente, concretamente de forma calorimétrica. En este contexto, también se suele decir que se determina la entalpía de la reacción. La entalpía H tiene la ventaja sobre el calor Q de ser una magnitud física real, una “magnitud de estado”, como se dice. Sin embargo, surge otra dificultad, no es fácil ver por qué lo que se mide (y a menudo se interpreta como calor) debe ser descrito por la magnitud $H = U + pV$.
- Dado que, como se ha explicado anteriormente, la mayoría de las reacciones que se producen de forma libre son exotérmicas, la impresión inicial era que la producción de calor era una medida de la fuerza motriz de la reacción. Esta fue la idea de BERTHELOT —Marcellin Pierre Eugène BERTHELOT (1827–1907)— en la segunda mitad del siglo 19. No estaba completamente equivocado con esta idea, porque la fuerza motriz de la reacción $\mu_B - \mu_A$ entra en el balance de entropía. Pero hoy en día, o más exactamente, desde GIBBS —Josiah Willard GIBBS (1839–1903)—, se sabe mucho más, por supuesto.

Eliminación

No solo el balance térmico de una reacción, sino también muchos otros procesos se vuelven más transparentes y matemáticamente más sencillos si se utilizan las magnitudes entropía y potencial químico para su descripción. Ambos tienen un significado muy descriptivo: la entropía se corresponde casi perfectamente con el concepto cotidiano de calor, y el potencial químico refleja lo que se espera de una fuerza motriz para una reacción o un transporte de sustancias.

De este modo, no solo resulta superflua la desafortunada variable de proceso Q , sino también las transformadas de LEGENDRE —Adrien-Marie LEGENDRE (1752–1833)— de la función $E(V, S)$, es decir, las funciones $H(p, S)$, $F(V, T)$ y $G(p, T)$.

5.26 ¿Qué es la energía en realidad? ¿Qué es la entropía en realidad?

Tema

En un simposio, realizado en el marco de un reciente congreso (World Conference on Physics Education), al debatir sobre la introducción de la energía en una clase

de Física los participantes no se cansaban en insistir en que la energía es una magnitud abstracta. Claro que tenían buenos argumentos y soportes, ya que por ejemplo FEYNMAN —Richard FEYNMAN (1918–1988)— dice: “Es importante darse cuenta que en la física actual no sabemos lo que la energía es.” [1]

La situación no es muy diferente en lo que respecta a la entropía; VON NEUMANN —John von NEUMANN (1903–1957)— dice: “Nadie sabe lo que es la entropía en realidad, de modo que en un debate uno siempre tiene ventaja.” [2], o HEUSER —Harro HEUSER (1927–2011)— : “El concepto de entropía pertenece a los conceptos más ocultos de nuestra Física,...” [3]

Defectos

- 1 Las preguntas: ¿qué es la energía en realidad?, ¿qué es la entropía en realidad? están mal planteadas, se debía omitir el “en realidad”. Además las citas mencionadas son innecesariamente “fatalistas”. En lugar de inducir a pensar que estos conceptos son demasiado complicados, o complejos, generar dudas innecesarias, o cuestionamientos que no orientan a la clarificación de los mismos, se debería contestar: ambas son magnitudes físicas, y por ello son medidas de algo. Obviamente, esta respuesta genera inmediatamente otra pregunta: ¿pero medidas de qué? Sin embargo esta pregunta suena mucho menos trascendente que las iniciales, y no es tan difícil contestarla.
- 2 Se pregunta sobre qué es en realidad la energía y qué es en realidad la entropía, pero casi nunca sobre qué es en realidad la masa, la carga eléctrica, la temperatura o la presión. Sin embargo estas preguntas son igual de interesantes e igual de difíciles o fáciles de responder.
- 3 Una pregunta bien planteada define un conjunto de respuestas posibles, de las cuales generalmente una es la correcta. La pregunta ¿quién ha obtenido una nota de 5 en la prueba? exige como respuesta los nombres de algunos de los alumnos de la clase. Hay preguntas que no están bien formuladas, y hay preguntas mal formuladas. Una pregunta mal formulada no define las respuestas posibles y por ende es casi imposible satisfacer a quien la ha hecho. Los padres lo saben por experiencia, son en particular las preguntas que empiezan con un “por qué”. Si se contesta tal pregunta llega en seguida otro “por qué”, y así sucesivamente. Algo similar ocurre con las preguntas de tipo “qué es en realidad”, ¿cuál podría ser una respuesta que satisfaga a quien pregunta?
- 4 Se pueden intentar algunas respuestas. ¿Qué es la energía? Es lo mismo que la masa. A pesar de que la

Calor de evaporación, energía de evaporación, entalpía de evaporación

ecuación correspondiente a esta respuesta es citada más a menudo que cualquier otra ecuación, después de más de cien años, el mensaje todavía no ha llegado. Es claro que se podría seguir preguntando: ¿y qué es la masa?, pero casi nadie hace esa pregunta, y con razón. Se puede objetar que la respuesta de EINSTEIN —Albert EINSTEIN (1879–1955)— no es relevante en el marco de Física clásica, ya que se manifiesta solamente a velocidades muy altas. Pero la objeción no es acertada. La inercia y el peso se manifiestan por doquier, y estas son las propiedades de la energía-masa. El hecho de que no sea posible distinguir las diferencias de energía en una batería cargada y una descargada por medio de una balanza, no tiene nada que ver con que la velocidad no sea suficientemente alta, sino con la precisión limitada de la balanza.

Y ¿la entropía? Es lo que en términos cotidianos llamamos calor. Quien opina que esta respuesta es demasiado sencilla puede seguir preguntando: ¿Cuál es la interpretación microscópico-estadística de la entropía?, etc. Pero que no se diga que no se sabe qué es la entropía en “realidad”.

Origen

Históricamente se ha creado y mantenido el malentendido de que la energía es un “algo”, una especie de sustancia, que se encuentra en la naturaleza, y que es difícil desentrañar su índole. No se plantea la pregunta qué es la carga eléctrica, ya que se cree saber lo que ella es “en realidad”. Pero esta creencia está basada en el mismo malentendido: se confunde la magnitud carga eléctrica con el objeto o la partícula electrón.

Eliminación

Se sugiere introducir ambas magnitudes, la energía y la entropía, por medio de un modelo. Se puede imaginar en ambos casos un fluido, siendo la magnitud una medida para la cantidad de ese fluido. Uno de dichos fluidos representa la inercia y el peso, el otro el calor. Esta introducción es fácil de entender y además es una base adecuada para cuando se estudie Física avanzada.

Referencias

- [1] Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, Matthew Sands, *Física. Volumen I: Mecánica, radiación y calor*. Wilmington: Addison-Wesley Iberoamericana, 1987. p.4–2.
- [2] M. Tribus, E. C. McIrvine, *Energy and Information*, Sci. Am. 224, Sept. 1971, p.178–184
- [3] Harro Heuser, *Unendlichkeiten*, B. G. Teubner Verlag, Wiesbaden 2008, p.30

5.27 Calor de evaporación, energía de evaporación, entalpía de evaporación

Tema

- 1 “Para la transformación de fase líquido → gas se requiere un determinado calor de transformación Q_{lg} (dependiente de la temperatura)”.
- 2 “Para la evaporación de un líquido, hay que facilitar la entalpía de evaporación. Se extrae calor del ambiente o del líquido.”
- 3 “La energía térmica que se requiere para que un cuerpo pase de la fase líquida a la de vapor se denomina calor latente de vaporización. [...] En lugar de calor latente, también se puede utilizar el término entalpía de transformación.”
- 4 “Dado que durante la evaporación hay que realizar un trabajo contra las fuerzas de atracción moleculares, se consume calor. La cantidad de calor que es necesario suministrar a 1 g de un líquido para evaporarlo a una temperatura constante se llama calor específico de evaporación λ . [...] El calor de evaporación consta de un componente interno y otro externo. El calor externo se consume para expandir el volumen original [...] hasta el volumen de 1 g de vapor.”
- 5 “También se necesita energía para separar las partículas de un cuerpo durante la transición de líquido a gas. La energía necesaria para la fusión y la evaporación es debida a las fuerzas eléctricas de atracción existentes entre las partículas de la materia. La energía suministrada en este proceso se almacena entonces en la materia, en el llamado sistema termodinámico, como energía potencial de las partículas...”
- 6 “Cuando el agua se evapora, las moléculas de esta se alejan. En el proceso, tienen que desplazarse contra las fuerzas de atracción que actúan entre ellas y también empujar el aire. La energía necesaria para ello suele proceder de un dispositivo de calefacción. [...] El vapor de agua ha almacenado la energía adicional. Cuando se condensa, se transfiere de nuevo a otros cuerpos [...]”.

Defectos

Aunque los autores se expresan de forma muy diferente, cada una de las citas anteriores adolece del hecho de que se describe un proceso con una magnitud inadecuada, la energía. Las citas muestran de diferentes maneras que esto conduce a incoherencias lingüísticas y también conceptuales.

Calor de evaporación, energía de evaporación, entalpía de evaporación

- La cita 1 dice: “Para la transformación de fase líquido → gas se requiere un determinado calor de transformación Q_{lg} ”. Porque, se quiere continuar, el gas contiene más calor que el líquido. Quizá se crea que es así, pero no lo es.

Así se piensa porque la frase correspondiente en otro contexto bien podría expresarse de la siguiente manera: “Se necesitan dos sacos de turba para abonar un jardín”. La turba se utiliza para abonar y, por lo tanto, después de ser esparsa en el jardín, está en el jardín. ¿Cómo podría ser de otra manera? Sin embargo, en el caso de la transformación de fase es diferente. Por dos razones:

En principio, el calor nunca está en algún lugar, porque es una variable del proceso. No existe un trato lingüístico de esta forma diferencial que se corresponda a sus propiedades matemáticas y que, al mismo tiempo, permita formarse una idea del proceso correspondiente.

La energía que se suministra “en forma de calor” solo está en parte donde se supone que está, después de ser suministrada. Solo una parte está en el gas. La otra parte va a un sistema que tiene poco que ver con la transición de fase: al campo gravitacional.

- Se podría pensar que la cita 2 es correcta, porque de hecho la energía añadida no provoca un aumento igual de la energía de la sustancia que se evapora. Más bien, es igual a su aumento de entalpía. Por lo tanto: esta correctamente pensado, pero otra vez poco comprensible. Pues qué significa “facilitar” la entalpía. Seguramente significa que se obtiene de alguna parte. Pero eso es erróneo de nuevo, porque no se obtiene entalpía, se obtiene energía.
- El autor de la cita 3 cree que puede ayudar al lector explicando que el calor latente y la entalpía de evaporación son solo dos términos para la misma cosa, lo cual no es correcto. Todo el esfuerzo realizado para explicar a los estudiantes lo que es una variable de proceso se ve frustrado por tales afirmaciones.
- Según la cita 4 el calor de evaporación consta de dos partes, una “interna” y otra “externa”. Si algo consta de dos partes, habría que comprobarlo de alguna manera. Pero este no es el caso. Si el agua del grifo se utiliza para beber y cocinar, por un lado, y para enjuagar y lavar, por otro, probablemente no se diría que el agua entrante “consta” de dos partes, el agua de lavado y el agua potable.
- Hablando de “requerir”, en las citas 1 y 3, se puede decir así. Pero ¿en qué otras situaciones se utiliza realmente dicha palabra? Veamos en Linguee cómo se utiliza la palabra fuera de la física: se requiere un esfuerzo, se requiere competencia, se requieren in-

versiones en infraestructura energética, se requieren decisiones del consejo de supervisión etc.

Y consideremos también el “facilitar” de la cita B. ¿Cuál es el uso habitual del verbo? De nuevo un vistazo a Linguee: facilitar un consenso, facilitar una intervención, facilitar informes, etc.

En ambos casos, “requerir” y “facilitar”, sugiere que se trata de preparar una operación, no de traer algo que es de naturaleza cuantitativa. Uno no se siente animado a preguntar: ¿De dónde viene? ¿Por dónde va? ¿A dónde va?

Es posible que la persona acostumbrada a manejar estos conceptos considere pedantes las observaciones anteriores. Sin embargo, los profesores sabemos muy bien que la imprecisión conceptual es una de las principales causas de las dificultades en el aprendizaje.

- Los autores de libros de texto para la escuela secundaria saben que no se puede recurrir a afirmaciones como las que acabamos de mencionar. Y no porque los estudiantes no sean lo suficientemente inteligentes. Por eso los libros de texto se mueven en un territorio más seguro, ver citas 5 y 6: no hay afirmaciones sobre las “variables de proceso” calor y trabajo, no hay afirmación sobre la transformada de LEGENDRE —Adrien-Marie LEGENDRE (1752–1833)— entalpía, solamente sobre la variable de estado localmente balanceable “energía”. De este modo, se puede utilizar un lenguaje comprensible para los alumnos. Sin embargo, no se ha solucionado el problema. El hecho de que una parte de la energía vaya al campo gravitacional es a veces simplemente ignorado, cita 5. Se puede tener comprensión para esto, porque es, después de todo, solo un efecto secundario indeseable. Pero no es correcto. La cita 6 aborda este efecto. En nuestra opinión, esta sería la mejor manera posible de tratar el asunto. Sin embargo, algo aquí tampoco funciona bien. Trataremos de explicarlo con la ayuda de una parábola.

Se quiere comparar la cantidad de acero que se utilizó para construir diferentes puentes colgantes. Todos los puentes tienen la misma longitud, capacidad de carga, etc., pero están construidos de forma diferente. Se toma como medida de la propiedad buscada el dinero que costó construir el puente. De hecho (suponemos aquí) la mayor parte del gasto financiero sirve para comprar el acero. Sin embargo, una parte de los gastos financieros sigue siendo necesaria para otros fines, especialmente para pagar a las empresas de construcción. Así que se utilizó la medida equivocada para evaluar lo que realmente estaba en juego, se utilizó el valor monetario de la

Escalas preliminares de temperatura

construcción del puente, en lugar de la magnitud que realmente interesaba, es decir, la cantidad de acero. Esto es similar a la descripción cuantitativa del proceso de evaporación. A falta de una medida mejor (la entropía), se utiliza una magnitud sustitutiva, la energía, que, sin embargo, solo caracteriza parcialmente lo que realmente interesa.

Origen

- 1 La energía se maneja como a finales del siglo 19. Se ignora el desarrollo posterior. Solo desde principios del siglo 20 ha sido posible establecer un balance energético local, véase, por ejemplo, [1].
- 2 Se establece el balance de una magnitud inapropiada. Todo se vuelve más fácil con la entropía. En 1911 se demostró [2] que la entropía también puede balancearse localmente, pero todavía no se ha incluido en la mayoría de los libros de texto universitarios.

Eliminación

Si se quiere describir la evaporación, por ejemplo, del agua, mediante la energía:

Se añade energía a la porción de agua que se va a evaporar. Después, esta energía se encuentra parte en el vapor y parte como la llamada energía potencial en la atmósfera, que el vapor debe desplazar o elevar. (Es aún mejor denominar al campo gravitacional como almacén de energía.) Se puede expresar la energía total únicamente en términos de variables del sistema “agua que se evapora”: $E + pV$. Por tanto, también se puede decir que se añade la energía ΔE a una porción de agua. El cambio ΔH de su entalpía es igual a la energía añadida ΔE . La energía restante ha sido pasada a otro sistema.

La descripción se simplifica y aclara si se establece un balance de entropía en lugar de energía. La entropía se comporta exactamente como nos dice el sentido común: la entropía se añade al agua líquida, provocando su evaporación. La entropía añadida está en el vapor de agua recién formado. La entropía de evaporación puede medirse tan fácilmente como el calor de evaporación [3].

Referencias

- [1] G. Mie, *Entwurf einer allgemeinen Theorie der Energieübertragung*, Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, CVII. Band VIII. Heft 1898 , p.1113
- [2] F. Jaumann, *Geschlossenes System physikalischer und chemischer Differentialgesetze*, Wiener Berichte CXX, Abt. IIa, p.385–530
- [3] Véase 5.3 *Medición de la entropía*, p.127

5.28 Escalas preliminares de temperatura

Tema

Casi siempre se introduce el concepto de temperatura por medio de la expansión térmica de las sustancias, en particular de los gases, y solo más tarde (a veces nunca) se plantea su introducción como magnitud “absoluta” T , es decir, una magnitud independiente de las propiedades de cualquier sustancia termométrica.

Se plantea por ejemplo, la exigencia de que la eficiencia η en un ciclo de CARNOT con temperaturas T_2 y T_1 sea igual a

$$\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_2}$$

Defectos

Teniendo en cuenta que todos los gases de baja densidad se comportan de manera idéntica respecto a su dilatación térmica y olvidando todas las demás sustancias termométricas, se puede definir una escala Θ obteniendo así dos temperaturas: Θ y T , cuya definición, manejo y relación mutua es motivo de análisis. Como resultado se obtiene que $\Theta \sim T$, o que $\Theta \equiv T$, si se tiene para una misma temperatura que $\Theta = T$ (por ejemplo para el punto triple del agua). Esto no es difícil de demostrar aunque generalmente no se hace.

Origen

Los libros de texto repiten el recorrido histórico de la ciencia, y dado que seguimos utilizando termómetros de líquido en vidrio, la introducción de la temperatura a través de la dilatación térmica parece natural. Las leyes de los gases se consideran un objetivo importante en la enseñanza y por consiguiente resulta evidente tratar y estudiar la escala basada en ellos. Debido a la convicción general de que la entropía está más allá del horizonte del colegio, esta se considera fuera del campo de visión de maestros y pedagogos.

Eliminación

Abordar el concepto de temperatura por medio de la entropía, renunciando por completo a las escalas preliminares, así como a los procesos de CARNOT. Al introducir directamente una escala para la entropía S , se puede definir la temperatura por medio de la corriente de energía P que recibe un cuerpo al suministrárle una corriente de entropía I_S : $P = T \cdot I_S$. Se puede mostrar que la magnitud T , introducida de esta manera, tiene todas las propiedades habituales de la temperatura y se puede medir con los termómetros usuales. La física de las máquinas té-

micas y de las bombas de calor también se explica fácilmente, bastan dos o tres líneas y las cuatro operaciones fundamentales para lo que normalmente requiere diagramas de calor y trabajo, así como cálculo diferencial e integral de funciones de varias variables independientes.

Lo anterior solo es posible si se abandonan los prejuicios, cultivados durante siglo y medio hacia la entropía, a la cual se le niega sin ninguna razón cualquier propiedad que se pueda captar con nuestros sentidos.

5.29 Dilatación térmica de líquidos y sólidos

Tema

La dilatación térmica de líquidos y sólidos.

Defectos

Este es un efecto muy pequeño, para variaciones de temperatura de $\sim 10^\circ\text{C}$ es del orden de 10^{-3} . Existen muchísimos efectos de dicho orden de magnitud, los cuales normalmente no son abordados en los cursos escolares introductorios.

Se argumenta que la razón para tratar estos efectos en la escuela es su importancia para la comprensión de fenómenos del mundo cotidiano, que están basados en la dilatación de sustancias sólidas o líquidas, por ejemplo el termómetro de mercurio. Sin embargo, existen otros métodos para medir la temperatura, con importantes aplicaciones prácticas, a los cuales no se dedica ningún tiempo.

A veces se cita la expansión de puentes o rieles del ferrocarril como ejemplos para tratar la dilatación térmica de sólidos, esta tradición no está justificada hoy en día; si se explica la dilatación de un puente sería normal explicar también por qué la mayoría de los otros objetos no se dilatan: las casas, las calles, la tierra entera, etc. Y respecto a los rieles: ¿por qué en otros tiempos se empleaban juntas de expansión y hoy no se hace? ¿Por qué ya no se dilatan los rieles?

Existe otro efecto que se tiende a confundirse con la dilatación térmica a presión constante: el cambio de la presión con la temperatura a volumen constante, los dos efectos se describen por dos constantes distintas del material. Al contrario de la dilatación térmica, el mencionado efecto es de gran magnitud y de resultados impresionantes, pero a pesar de eso no se recomienda tratarlo en clase, ya que su importancia en la vida cotidiana es bastante limitada.

No hay que olvidar que el tiempo del cual se dispone para la enseñanza es limitado y hay cosas más importantes que no se estudian, en particular en la termodinámica. Un ejemplo es el hecho de que la temperatura disminuya con la altura, en Bogotá la temperatura promedio es $\sim 13^\circ\text{C}$ menor que en el valle del río Magdalena. Este es un efecto grande e importante y generalmente no se comenta en las clases de Física.

Origen

Es fácil ver el porqué se trata con tanto esmero la dilatación térmica: es un remanente del pasado. Antaño, la dilatación térmica del mercurio era la base de la escala de temperatura, es decir, la definición de la magnitud se fundamentaba en dicho efecto. Pero hace tiempo tenemos otra definición que no se basa en las propiedades de un material particular y que cuenta con la total aprobación del mundo científico.

Eliminación

Emplear menos tiempo en este tema, no se causaría especial daño al suprimirlo del programa escolar.

5.30 Magnitudes de estado

Tema

Al introducir el primer principio de la termodinámica se insiste en que la energía interna es una magnitud de estado, lo mismo ocurre cuando se introduce la entropía. Últimamente se utiliza cada vez más, en particular en la literatura escolar, el concepto de magnitud de estado para la presión.

Defectos

Originalmente se introdujo el concepto de magnitud de estado, para expresar que ciertas magnitudes tienen un valor determinado en cada estado del sistema considerado. Sin embargo, esto es cierto para cualquier magnitud física, con dos excepciones: el trabajo y el calor. Al recalcar solamente en algunos casos que cierta magnitud es “de estado” da la impresión de que ser magnitud de estado es la excepción y no la regla. Además, es completamente normal esperar que una magnitud tenga cierto valor en un estado determinado, lo curioso, lo inesperado, lo que parece contradictorio es que una magnitud no tenga un valor determinado en un estado. Entonces, se debería destacar que existen dos “magnitudes” que no corresponden a lo sensatamente esperado, aunque en sentido matemático estas no son magnitudes, sino formas diferenciales.

Tres formas de transferencia de calor

Origen

Atribuir de “magnitud de estado” no tuvo el mismo origen para la energía interna, la entropía, o la presión.

Energía interna

La primera formulación matemática de la conservación de la energía fue presentada en el primer principio de la termodinámica. En la ecuación correspondiente figuran las dos “magnitudes de proceso”: trabajo y calor, además de la energía interna. Al decir que la energía interna es una magnitud de estado se intentó acentuar que por lo menos una de las tres magnitudes de dicha ecuación tiene propiedades “normales”. Parecía destacable que la suma de dos magnitudes de proceso diera como resultado una de estado.

Entropía

Desde los comienzos de la termodinámica se buscó introducir una magnitud que representara una medida de lo que en términos del lenguaje común sería la cantidad de calor, obviamente, dicha magnitud sería de estado. A finales del siglo 18 Joseph BLACK (1728–1799) introdujo tal magnitud denominándola precisamente cantidad de calor (“quantity of heat” en inglés), la cual desde un punto de vista actual, es conveniente identificar con la entropía. Sin embargo, desde mediados del siglo 19 se utilizó el nombre de “calor” para una de las llamadas formas de energía, es decir, una magnitud de proceso. Así, la antigua medida para la cantidad de calor desapareció de la Física temporalmente hasta que fue reintroducida o reinventada por CLAUSIUS bajo el nombre de entropía. Ya que CLAUSIUS definió la entropía a través de la magnitud de proceso “calor”, pareció razonable destacar que el resultado, la entropía, era una magnitud normal, es decir, de estado. Solo más tarde se descubrió que la nueva magnitud era esencialmente idéntica al antiguo concepto de calor de los tiempos de BLACK y CARNOT [1, 2].

Presión

Generalmente se introduce la presión a través del concepto de fuerza. La fuerza siempre se ejerce de un cuerpo a otro, es un concepto que nació en una época cuando las interacciones mecánicas se interpretaron por medio de acciones a distancia. Así, es normal que al introducir la presión se busque el cuerpo que ejerce la presión y el cuerpo que la soporta (lo que constituye un grave error, pues presión se define como cantidad escalar) y para “subsanar” el problema de las acciones a distancia, se formula que la presión es una magnitud de estado. Entonces, la necesidad de acentuar este carácter de magnitud de estado es producto de una introducción inapropiada de la presión.

Eliminación

Solución parcial: no enseñar que la energía interna y la entropía son magnitudes de estado (esto debería ser claro de todos modos), sino destacar que el trabajo y el calor son construcciones que no encajan bien en el esquema normal.

Solución definitiva: renunciar por completo a introducir nombres y símbolos propios para las expresiones matemáticas que tradicionalmente se llaman trabajo y calor. Es posible, como maestros, que inicialmente se tenga la impresión de que falta algo importante, pronto se verá que esto no es cierto y que además se evita una serie de problemas.

Respecto a la presión es posible prescindir sin temor de la designación de magnitud de estado. En lugar de obtener la sencilla magnitud presión a partir de la más compleja fuerza, se introduce por derecho propio, iniciando por ejemplo con el concepto de diferencia de presión como “causa” de una corriente de agua o de aire. Así, resulta superfluo señalar que la presión es una magnitud completamente normal, es decir, de estado.

Referencias

[1] H. L Callendar, *The caloric Theory of Heat and Carnot's Principle*, Proc. Phys. Soc. London 23, 1911, S. 153: „Finally, in 1865 when its importance [the importance of caloric] was more fully recognised, CLAUSIUS gave it the name of 'entropy', and defined it as the integral of dQ/T . Such a definition appeals to the mathematician only. In justice to CARNOT, it should be called caloric, and defined directly by his equation..., which any schoolboy could understand. Even the mathematician would gain by thinking of a caloric as a fluid, like electricity, capable of being generated by friction or other irreversible processes.“

[2] G. Job, *Neudarstellung der Wärmelehre – Die Entropie als Wärme*, Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt am Main 1972. Existe una versión en castellano en: https://www.job-stiftung.de/pdf/buch/neudarstellung_spanisch.pdf

5.31 Tres formas de transferencia de calor

Tema

En diferentes textos y fuentes de todos los niveles se encuentran frases como las siguientes:

- “Existen tres formas diferentes de transmisión de la energía térmica de un lugar a otro: conducción, convección y radiación.” [1]

- “Las transferencias de calor se clasifican en tres tipos: la conducción... radiación... convección...” [2]
- “La transferencia o dispersión del calor puede ocurrir a través de tres mecanismos posibles, conducción, convección y radiación...” [3]

Defectos

La afirmación: “En la finca se tienen cuatro clases de plantas: árboles, plantas útiles, hortalizas y maleza” no es falsa, pero hay algo que molesta, sugiere que las categorías mencionadas permiten una clasificación de las plantas, lo cual no es cierto. Hay plantas que corresponden a varias de dichas categorías, como por ejemplo la zanahoria o el manzano.

Las citas mencionadas adolecen del mismo defecto, sugieren que cualquier transporte de calor corresponde a una de las tres “categorías”: conducción, convección o radiación, o que al menos es posible determinar en cada caso en qué porcentaje corresponde a cada una de ellas. Sin embargo, existen procesos de transferencia de calor que no permiten ser caracterizados en dicho esquema. Antes de considerar ejemplos, es conveniente conocer las principales características de las tres categorías:

1. Conducción

El calor (más exactamente, la entropía) atraviesa un material, el cual no se mueve. El proceso es disipativo, es decir, está acompañado de producción de nueva entropía. La “fuerza motriz” del transporte es un gradiente de temperatura.

2. Convección

El calor (la entropía) se “agrega” a un fluido (líquido o gas), que se mueve llevándose la entropía consigo. En este caso, para la transferencia de calor, no es necesario un gradiente de temperatura; para generar el flujo hace falta otra fuerza motriz, por ejemplo un gradiente de presión.

3. Radiación

El calor es transferido por radiación electromagnética. Según se observa, lo anterior no se puede considerar una clasificación. Los dos primeros “modos” (conducción y convección) se refieren a la “fuerza motriz” del transporte, la naturaleza de las partículas portadoras no importa, como se puede ver en el hecho de que a la primera categoría pertenece tanto la conducción en materiales no-metálicos (las partículas portadoras son los fonones), como la conducción en metales (las partículas portadoras son esencialmente los electrones), y la conducción en gases (las partículas portadoras son los átomos o moléculas).

La tercera categoría por el contrario está caracterizada únicamente por las partículas portadoras, es decir, los fotones. Además, es de notar que no todo transporte de energía con fotones es radiación térmica; la radiación con microondas monoenergéticas, por ejemplo, no transporta entropía y por consiguiente no es apropiado llamarla radiación térmica [4].

Un ejemplo de transmisión de calor que no entra en el esquema es el flujo de calor dentro del sol, desde el núcleo hacia la superficie. (El último décimo del recorrido hasta la superficie es convectivo y no interesa en este contexto.) El transporte de energía y entropía en el sol se efectúa mediante los fotones, entonces, podría considerarse categoría tres. Sin embargo, cada fotón es absorbido después de haber recorrido una corta distancia y un nuevo fotón es emitido en una dirección aleatoria cualquiera. La radiación avanza, retrocede, va a la derecha, a la izquierda, hacia arriba, hacia abajo; en otros términos es un proceso difusivo, así como la conducción normal, pero con fotones en lugar de fonones o electrones. De igual manera que en la conducción normal el transporte de calor se presenta solamente si existe un gradiente de temperatura, el cual en el sol es aproximadamente igual a 30 K/km. Por ello este proceso corresponde a la primera categoría.

Otro ejemplo, de la superficie terrestre hacia la parte superior de la troposfera existe transporte de calor (entropía), que después es irradiado al espacio. Una pequeña parte de dicho transporte —el 8 % aproximadamente— es del mismo tipo que en el sol. La tierra emite radiación, que es absorbida por la atmósfera, emitida nuevamente, etc. Este proceso pertenece simultáneamente tanto a la categoría de conducción como de radiación.

Existen diversos procesos difíciles de incluir en una de las categorías habituales: un haz de átomos, iones o electrones térmicos, el flujo de neutrinos térmicos en el proceso del colapso de una estrella, entre otros.

En este contexto se puede formular una pregunta: ¿Si existen tres tipos de corrientes de calor (de entropía), no habrá también tres tipos (o más) de corrientes eléctricas o de momentum? Efectivamente, es posible introducir categorías para otras corrientes, sin embargo, allí se encontrarán los mismos problemas que en las corrientes térmicas. ¿Cuántas y cuáles corrientes eléctricas existen? Corrientes eléctricas “normales” en un conductor metálico, corrientes con iones en un electrólito, haces de electrones, corrientes de varios portadores de carga en un plasma, conductores sólidos que se desplazan, corrientes en superconductores tipo I y II, entre otras. Probablemente nadie osaría declarar apodicticamente que existen tres, cinco, o diez tipos de corrientes eléctricas.

La ley de los gases ideales

Origen

Se atribuyeron nombres a los procesos de transporte de calor que se conocían y se supuso, equivocadamente, que no existían otros. Esto ocurrió cuando se sabía muy poco (o nada) sobre el interior del sol, el balance radiativo de la atmósfera, los campos electromagnéticos, los fotones, neutrinos y plasmas. No se puede excluir el rol que pudo jugar la “mística” de los nombres, “no hay dos sin tres”.

Eliminación

Si se quiere insistir en una clasificación se podría tratar de formular una que sea más robusta o estructurada que la analizada. Al intentar hacerlo se descubre que existen diversas posibilidades, como las siguientes: según la naturaleza de las partículas portadoras, según cuál sea la “fuerza motriz” (gradiente de temperatura, otro gradiente, o ningún gradiente), según si el transporte es disipativo o no. Sin embargo, al realizar tales clasificaciones probablemente se notaría que el beneficio no es grande; aquí como en muchos otros esfuerzos de definición o clasificación se nota que es mejor no hacerlo.

¿Qué hacer entonces con las tres categorías conducción, convección y radiación? ¿No es necesario distinguir entre dichos procesos? Claro que lo es. Pero también se hace distinción entre zanahorias y ortigas sin un sistema particular de categorías. Es decir, se pueden conservar y emplear los tres nombres, pero sin catalogarlos ni llamarlos sistema de clasificación.

Referencias

- [1] P. Tipler y G. Mosca, *Física para la Ciencia y la Tecnología*, Vol.1. 5^a ed. Barcelona: Editorial Reverté, 2005. p.589.
- [2] J. Casanova (Coord.), *Curso de Energía Solar*, Zaragoza: Publicaciones Universidad de Valladolid, 1993. p.333–334.
- [3] Tranferencia de Calor [en línea]. En: <https://concepto.de/transferencia-de-calor/> [consultado el 24 de junio de 2022].
- [4] Véase 5.36 Radiación térmica, p.167

5.32 La ley de los gases ideales

Tema

La ecuación $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$ se presenta con diversos nombres: Ley de los gases, Ley de los gases ideales, Ley universal de los gases, Ecuación general de los gases ideales, Ecuación de estado, Ecuación térmica de estado, entre otros. Ya que se trata de una ecuación que in-

volverá más de dos variables, es posible considerar relaciones solo entre dos de ellas, mientras se mantienen constantes las demás. También dichas ecuaciones se conocen bajo determinados nombres, es decir, son epónimas; así por ejemplo la relación entre p y V se llama ley de BOYLE-MARIOTTE —Robert BOYLE (1627–1691) y Edme MARIOTTE (1620–1684)—, la relación entre T y p es la ley de GAY-LUSSAC —Louis GAY-LUSSAC (1778–1850)—, la proporcionalidad entre p y T se conoce como ley de AMONTONS —Guillaume AMONTONS (1663–1705)—, la relación entre V y n se llama ley de AVOGADRO —Amedeo AVOGADRO (1776–1856)—; además en la literatura anglosajona la ley de BOYLE-MARIOTTE se llama ley de BOYLE y la ley de GAY-LUSSAC se denomina ley de CHARLES —Jacques CHARLES (1746–1823)—.

Defectos

- 1 Atribuir un nombre a una relación entre magnitudes físicas subraya su importancia, y si una ecuación tiene nombre propio es más fácil referirse a ella. La ecuación de los gases (así la llamaremos) es importante dada su amplia validez, independiente de la naturaleza de estos; es válida en general en un sentido muy amplio, a condición que la sustancia tenga una densidad bastante baja, y/o su temperatura sea bastante alta. Además de ser válida en numerosos casos para los gases, como por ejemplo el aire que nos circunda, también lo es para solutos diluidos (de baja concentración), o para el plasma muy denso en el interior del sol, entre otros; por consiguiente se puede afirmar que la ecuación merece un nombre propio. Otra cosa es si son apropiados los atributos “general” o “universal”, con los cuales a la ecuación se le asigna un “status” especial, ya que la denominación “universal” (o “general”) induce a pensar en una validez sin límite; además existen muchas otras leyes que podrían pretender a un tratamiento similar, y no lo tienen.
- 2 Sin duda es una costumbre justificada asignar a las ecuaciones el nombre de alguna personalidad de la ciencia, sin embargo en ciertos casos se exagera como lo muestra la ecuación de los gases, con la cual se honra simultáneamente a seis de ellas. Dar a una ecuación el nombre de un investigador puede generar además un problema que se conoce bien cuando se ha empleado en la denominación de las calles; ocurre que una persona puede obtener una honra inesperada por el hecho de que la calle que portaba su nombre un día pasó a ser una arteria principal. Por otro lado, han existido importantes científicos que no tuvieron la “suerte” de que su nombre fuera dado a una ecuación, por ejemplo DESCARTES —René

La ley de los gases ideales y las magnitudes olvidadas entropía y potencial químico

DESCARTES (1596–1650)–, o LEIBNIZ —Gottfried von LEIBNIZ (1646–1716)–. Otros han sido honrados por un hecho que en el contexto de toda su obra juega un papel poco significante, como por ejemplo HUYGENS —Christiaan HUYGENS (1629–1695)– por sus ondas elementales, o FARADAY —Michael FARADAY (1791–1867)– por el “pequeño” efecto FARADAY, o la más bien curiosa copa de FARADAY.

- 3** Volviendo a la ecuación de los gases, esta es equivalente a otras relaciones, que en apariencia representan un contenido totalmente distinto a ella:

(a) $E(V) - E(V_0) = 0$, si $T = \text{constante}$. Quiere decir que a temperatura constante la energía de un gas es independiente del volumen.

(b) $S(V) - S(V_0) = n \cdot R \ln(V/V_0)$, si $T = \text{constante}$. Significa que a temperatura constante la entropía depende logarítmicamente del volumen; esta ecuación está estrechamente vinculada con la conocida ecuación de BOLTZMANN —Ludwig BOLTZMANN (1844–1906)— $S = k \ln W$.

(c) $\mu(p) - \mu(p_0) = n \cdot R \ln(p/p_0)$, si $T = \text{constante}$. Dice que a temperatura constante el potencial químico depende logarítmicamente de la presión; de esta ecuación “surge” la ley de masas y la fórmula hipsométrica (también llamada barométrica).

Estas tres relaciones se pueden deducir sin más hipótesis físicas que para la ley de los gases, y de cada una de ellas se puede deducir la ley de los gases. Por consiguiente, se podría llamar a todas estas ecuaciones ley universal de los gases, pero esto no se hace.

- 4** Un gas no está descrito totalmente por la ley de los gases, ella es solamente una de varias “ecuaciones de estado” necesarias para una completa descripción del mismo. Ella no dice nada respecto a las “propiedades calóricas” del gas ideal, por ejemplo, ¿cómo depende su temperatura del contenido de entropía? (o lo que es equivalente: ¿cómo depende su energía interna de la temperatura?), a ello responde la llamada ecuación calórica de estado, que tiene un único nombre. Los efectos que ella describe no son menos llamativos que los descritos por la ecuación de los gases, pero tradicionalmente se considera de menor importancia, lo cual se refleja en la enseñanza al no incluir en los programas básicos el estudio de algunos fenómenos muy interesantes como la expansión isentrópica en la máquina de vapor o en el motor de combustión, o el decrecimiento de la temperatura con la altitud.

Origen

- 1** En la presentación tradicional de la ley de los gases o de las proporcionalidades parciales se reflejan los es-

tratos de las diversas épocas de su génesis. Se ve también que la historia puede ser diferente según el país.

- 2** El hecho de sobrevalorar la ecuación de estado térmica (ley de los gases) con las variables p , V y T , todas fáciles de medir, al compararla con la ecuación calórica, puede deberse a que las magnitudes entropía y potencial químico (igualmente fáciles de medir) nunca han encontrado gran aceptación, pues han sido, infortunadamente, consideradas “magnitudes conceptualmente difíciles”.

Eliminación

- 1** Se recomienda ser parco y cuidadoso con los nombres dados a las ecuaciones. En el caso de la ley de los gases se propone no dar nombres a las proporcionalidades parciales, y tener una particular reserva en el uso de atributos como “general” y “universal”.
- 2** Si en el curso ya se maneja el concepto de logaritmo, se recomienda analizar la dependencia de la entropía del volumen, y la dependencia del potencial químico de la presión (o concentración). En todos los casos es necesario discutir las propiedades “calóricas” de los gases, así como la relación entre temperatura y volumen a entropía constante, ya que esta permite comprender el funcionamiento de las máquinas térmicas y la disminución de la temperatura con la altitud en la atmósfera.

5.33 La ley de los gases ideales y las magnitudes olvidadas entropía y potencial químico

Tema

Parece que existe un consenso en que la ley de los gases ideales

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (5.10)$$

es la ecuación de estado más importante para describir la termodinámica de los gases. También suele ser la única que se trata en la escuela y la universidad.

Las ecuaciones de estado describen sistemas reales, generalmente materia, y la materia es complicada. Qué suerte que los gases puedan ser descritos en buena aproximación por una ecuación de estado tan sumamente sencilla. No hay una sola constante material en ella (a menos que se haga como en meteorología, donde en lugar de la cantidad de sustancia se pone la masa, de modo

La ley de los gases ideales y las magnitudes olvidadas entropía y potencial químico

que la constante de los gases pasa a depender del material). Y no solo se aplica a los gases normales; otros sistemas que ni siquiera se llaman gases también obedecen dicha ley, por ejemplo, las sustancias en solución diluida.

Ciertamente, los gases, aunque sean suficientemente ideales, tienen propiedades individuales y complejas, y por eso a veces se necesitan otras ecuaciones de estado además de la ecuación general de los gases, como la ecuación calórica de estado. Pero aparentemente, lo que más interesa es la ecuación general del gas.

Defectos

Al hacer la pregunta: ¿Qué variables tiene el sistema considerado, es decir, el gas? Por supuesto, se puede contestar cualquier número, porque se está en libertad de construir o definir cualquier número de variables.

Cuando se pregunta por las variables en el marco de las reglas establecidas en la física, y aquí concretamente en la termodinámica, se procede de otro modo: se recurre a la forma fundamental de GIBBS:

$$dE = T dS - p dV + \mu dn \quad (5.11)$$

La cual dice que la energía del sistema puede ser modificada de tres maneras, a saber: cambiando la entropía S , el volumen V o la cantidad de sustancia n , o dos de ellas al mismo tiempo e incluso las tres simultáneamente. En otras palabras, el sistema tiene tres grados de libertad. Se afirma al formular la ecuación (5.11). (También se podría haber decidido otra cosa, por ejemplo, que no se quiere cambiar la cantidad de sustancia del gas, entonces se habría omitido el término μdn . O que se quiere acelerar el gas, en ese caso se habría añadido un término $\bar{v} d\bar{p}$).

Si se opta por la ecuación (5.11), ante la pregunta sobre cuáles son las variables del sistema, la respuesta es: en primer lugar, la energía, y luego otras 6, o 3 pares, a saber, S y T , p y V , y μ y n .

Sin embargo, en la ley de los gases ideales se observa que dos de las 6 variables no aparecen. ¿A dónde fueron? Por supuesto, se podría decir que se ha corrido con suerte, si todavía estuvieran allí, probablemente la ecuación sería mucho más complicada. Además, y sobre todo, se ha tenido suerte, porque S y μ son precisamente las magnitudes con las que en general no se está tan a gusto.

El hecho de que no aparezcan también es bastante práctico por la siguiente razón: el sistema tiene tres grados de libertad, la ecuación (5.10) contiene 4 variables. Por lo tanto, se puede calcular la cuarta a partir de las otras tres.

Sin embargo, para quien insiste en preguntar por las dos variables S y μ , todavía no se tiene respuesta: ¿Cómo

se comportan S y μ cuando cambian los valores de las otras variables?

Claro esta que existen relaciones que no se pueden obtener sin información adicional sobre la naturaleza del sistema, por ejemplo: ¿cómo depende la temperatura de la entropía para un volumen fijo y una cantidad de sustancia fija? La ecuación (5.10) no dice nada al respecto, y no debe decirlo, ya que es solamente una ecuación de estado. No es una función de HAMILTON-LAGRANGE —William Rowan HAMILTON (1805–1865) y Joseph-Louis LAGRANGE (1736–1813)— o MASSIEU-GIBBS —François Jacques Dominique MASSIEU (1832–1896) y Josiah Willard GIBBS (1839–1903)— que contenga toda la información sobre el sistema.

Sin embargo, ¿es imposible decir algo sobre el potencial químico y la entropía sin más información? Por supuesto que no. Un breve cálculo (utilizando solo la ecuación (5.10)) lleva a

$$S(V) - S(V_0) = n \cdot R \cdot \ln \frac{V}{V_0} \quad (5.12)$$

$$\mu(p) - \mu(p_0) = R \cdot T \cdot \ln \frac{p}{p_0} \quad (5.13)$$

La ecuación (5.13) también puede escribirse en la forma

$$\mu(c) - \mu(c_0) = R \cdot T \cdot \ln \frac{c}{c_0} \quad (5.14)$$

donde c es la concentración.

Las tres ecuaciones (5.12), (5.13) y (5.14) se aplican a procesos en los que V o p varían, pero la temperatura se mantiene constante.

También aquí, por supuesto, no entra ninguna constante material.

La ecuación (5.12) muestra que, a temperatura constante, la entropía aumenta con el volumen. O, en otras palabras, cuando un gas se expande a temperatura constante, absorbe calor.

La ecuación (5.13) dice que el potencial químico aumenta (a temperatura constante) con la presión. La ley de acción de masas se deduce directamente de la ecuación. (También se puede decir que la ecuación (5.13) es la ley de acción de masas). Asimismo, se puede derivar la fórmula barométrica en unas pocas líneas sin tener que utilizar el equilibrio de fuerzas.

La ecuación (5.14) muestra, entre otras cosas, que la fuerza motriz para la difusión de una sustancia entre dos lugares cuya concentración difiere en un factor de 10 es siempre la misma, no importa si va de 0,1 a 0,01 mol/L, o de 0,00001 a 0,000001 mol/L. Es la responsable del funcionamiento de toda celda electroquímica.

Las ecuaciones (5.12) a (5.14) son también matemáticamente sencillas, y son la expresión de una regla general: con el gas ideal, todo se presenta lineal o logarítmicamente.

Origen

La razón del escaso empleo referente a las ecuaciones (5.12) a (5.14) es probablemente que se tiene una relación algo distante con las magnitudes μ y S . Una de las consecuencias es que en la escuela ni siquiera se plantean algunas preguntas interesantes que podrían responderse con su ayuda.

Eliminación

Sin tratar la ecuación de estado calórica o antes de hacerlo, se sugiere introducir las ecuaciones (5.12) a (5.14) para el gas ideal. Un efecto secundario es que la importancia de la ley de los gases ideales se relativiza un poco. Al igual que la ecuación (5.12) o (5.13) puede derivarse de (5.10), la ecuación (5.10) también puede derivarse de (5.12) o (5.13).

5.34 Calor y capacidad calorífica

Tema

La magnitud de proceso Q , que figura en la primera ley de la termodinámica, se llama cantidad de calor o sencillamente calor. La capacidad calorífica C se define como el cociente entre el calor suministrado ΔQ y el incremento de la temperatura ΔT :

$$C := \frac{\Delta Q}{\Delta T}.$$

En general se usa la capacidad calorífica específica (o calor específico) que es la capacidad calorífica por unidad de masa. En el presente artículo solo se va a considerar la capacidad C , que no se refiere a la unidad de masa.

Defectos

En primer lugar podría cuestionarse el término “capacidad calorífica” de igual forma que se cuestiona la “capacidad eléctrica” [1], ya que la unidad de medición del calor es el Joule, mientras la de C es Joule por Kelvin. En este artículo no se analizará este defecto, porque en el caso del calor existe un problema más grave, que ya se manifiesta en el nombre de la “magnitud”, que se quiere almacenar. Si se habla de calor o de cantidad de calor, entonces surge la expectativa de que para un sistema dado, una taza de café por ejemplo, Q tenga cierto valor.

Además es razonable esperar que el valor de Q sea tanto mayor cuanto más café haya en la taza, es decir, que Q sea una magnitud extensiva. En realidad, el calor Q tal como se lo define en la Física no tiene dichas propiedades, Q no es una magnitud en el sentido habitual, ver [2], es lo que se llama una forma diferencial. Por esta razón no es posible indicar un contenido de calor, aunque conozcamos el estado del sistema con toda exactitud. Si agregamos ΔQ a un sistema, no es posible afirmar que el contenido de calor cambie en ese valor; tenemos que limitarnos a una descripción más bien críptica: el suministro del calor ΔQ genera un aumento de la energía interna del sistema en el mismo valor. (Es como si fuera prohibido decir: “Al verter medio litro de agua en una botella, el contenido de agua aumenta medio litro”, mientras la afirmación correcta sería: “Al verter medio litro de agua en una botella, el contenido de líquido aumenta medio litro.”) Se podría pensar que todo esto es sofistería, pero no lo es. El problema radica solamente en el empleo de una denominación inapropiada. No es apropiado para ΔQ un nombre que sugiere que la magnitud tiene carácter extensivo. Todo sería más sencillo si la forma diferencial no tuviera ni nombre ni símbolo propios; entonces no surgirían expectativas imposibles de cumplir.

Si no es posible determinar un contenido de calor, por principio, no se puede indicar una capacidad para el calor; el significado de la magnitud C no puede ser el de una capacidad calorífica.

Quien ha enseñado Termodinámica conoce las dificultades para explicar que Q no es una magnitud de estado; el nombre de capacidad calorífica genera dificultades complementarias.

Origen

El nombre calor así como el nombre de capacidad calorífica datan del siglo 18, es decir, de una época cuando la magnitud de proceso Q todavía no existía. El nombre calor se aplicaba a una magnitud de estado y extensiva, que representaba lo que también en términos del lenguaje común se llamaría cantidad de calor. Cuando apareció la energía en la Física a mediados del siglo 19, se suprimió el nombre de esta antigua magnitud de estado, y se atribuyó dicho nombre a una de las llamadas formas de energía. Y debido a que esta “magnitud” tenía la desagradable propiedad de no tener un valor bien determinado en un estado dado, se la llama eufemísticamente “magnitud de proceso” [2].

Eliminación

Introducir desde el comienzo en los cursos de Termodinámica el concepto de entropía, como medida de lo que

Las ecuaciones adiabáticas

en términos de la vida común se llama calor. De ella siempre se puede afirmar qué cantidad hay dentro de un sistema, y es fácil definir la capacidad —con la restricción analizada en [1]—, es decir, dS/dT . Esta capacidad entrópica está relacionada con la “capacidad calorífica” por medio de:

$$C = T \frac{dS}{dT}.$$

A propósito, la capacidad entrópica se encuentra en algunos libros de Física del estado sólido bajo el nombre de “constante de SOMMERFELD” [3].

Así, la “magnitud” Q se vuelve superflua e innecesaria.

Referencias

- [1] Altasten der Physik, *Die elektrische Kapazität*
- [2] Véase 5.30 *Magnitudes de estado*, p.159
- [3] R. Kubo a. T. Nagamiya, *Solid State Physics*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1969, S. 94

5.35 Las ecuaciones adiabáticas

Tema

Para los procesos adiabáticos reversibles de un gas ideal se aplican las llamadas ecuaciones adiabáticas

$$\begin{aligned} p \cdot V^\gamma &= \text{const} \\ T \cdot V^{\gamma-1} &= \text{const} \\ T \cdot p^{(1/\gamma)-1} &= \text{const} \end{aligned}$$

Aquí γ es el cociente de las capacidades caloríficas a presión y a volumen constantes,

$$\gamma = c_p / c_V.$$

Defectos

En principio, todo está bien. Solo cabría preguntar: ¿Qué idea de los procesos abordados llega a los estudiantes?

- 1 Para un gas ideal de cantidad de sustancia constante, es decir, un sistema termodinámico típico, la relación fundamental de GIBBS —Josiah Willard GIBBS (1839–1903)— es:

$$dE = T dS - p dV, \quad (5.15)$$

por tanto el sistema tiene dos grados de libertad.

Sabemos que la termodinámica de los gases se entiende mejor si no se cambian todas las variables al

mismo tiempo. Así, se prefiere discutir los procesos en los que se mantiene constante una de las cinco variables que intervienen. Esto reduce el sistema a un grado de libertad. Los procesos correspondientes han recibido sus propios nombres: isotérmico, isoárico, isocórico, isoenergético y ¿...? ¡Adiabático!

“Adiabático” significa algo así como “impenetrable”.

En lugar de nombrar la magnitud que se mantiene constante en el proceso, es decir, la entropía, y llamar al proceso isentrópico, se nos dice cómo realizar el proceso para que la entropía se mantenga constante. Es necesario que las paredes sean impenetrables para el calor. Se podría objetar que isentrópico no es lo mismo que adiabático, porque es posible realizar un proceso adiabático en el que se genere entropía, de modo que no es isentrópico, y es posible realizar un proceso isentrópico en el que las paredes no son aislantes térmicos. Estas observaciones son correctas, pero en la práctica el término adiabático se utiliza solo para los procesos que son a la vez adiabáticos e isentrópicos.

- 2 Se puede definir y medir un gran número de coeficientes que caracterizan un sistema. En el caso del sistema de la ecuación (5.15), son la compresibilidad a temperatura constante, la compresibilidad a entropía constante, el coeficiente de expansión o dilatación volumétrica, el coeficiente de presión, la capacidad calorífica específica a presión constante y a volumen constante, y otros que no tienen nombre propio. Solo tres de ellos son independientes; los demás pueden calcularse a partir de estos tres. Para la enseñanza (en la escuela y en la universidad), la cuestión no es solo cuál de estos coeficientes introducir, sino también cómo hacerlo. ¿Introducimos un determinado coeficiente como representante característica de una determinada propiedad del sistema, o como una expresión cuyo significado solo puede entenderse remontándose a otros coeficientes? Esto último se hace en el caso de γ en la “ecuación adiabática”. A la pregunta: ¿Qué significa γ ? la respuesta sería: el cociente entre el calor específico a presión constante y el calor específico a volumen constante. No es fácil hacerse una idea clara de c_p y c_V por separado. Pero, además, ¿qué se puede entender por su cociente?
- 3 Se puede disponer de las variables térmicas de dos formas extremas: o bien se mantiene la temperatura constante permitiendo un perfecto intercambio de entropía con el entorno, o bien se mantiene la entropía constante impidiendo completamente el intercambio de entropía [1]. Estas dos situaciones son

complementarias, tienen la misma importancia y deberían discutirse en un contexto común. Por ejemplo, los procesos en sistemas pequeños son preferentemente isotérmicos, en los grandes isentrópicos. Cuanto más pequeño es el sistema, más se acerca al caso límite isotérmico; cuanto más grande, más se acerca al isentrópico. Asimismo, cuanto más lento sea el proceso, más cerca estará de la isoterma, cuanto más rápido, más cerca del caso límite isentrópico. Por tanto, tenemos la regla general: pequeño y lento → isotérmico; grande y rápido → isentrópico. A escala microscópica, todo es isotérmico; a escala macroscópica, todo es isentrópico. Los peces pequeños son isotérmicos, los grandes son isentrópicos. Los fenómenos meteorológicos son a gran escala, son en gran medida isentrópicos.

- 4 La ecuación adiabática que suele presentarse primero, ver al inicio, es la menos interesante, porque las relaciones p - V del gas en un proceso isotérmico e isentrópico solo difieren ligeramente. Mucho más interesantes son la segunda y la tercera, pero es mejor escribirlas de otra manera. Con la siguiente relación:

$$\alpha = \frac{1}{\gamma - 1}$$

se obtiene

$$V \cdot T^\alpha = \text{const} \quad (5.16)$$

así como

$$p \cdot T^{(1+\alpha)} = \text{const} \quad (5.17)$$

Así, la ecuación (5.16) nos dice cómo se enfriá un gas cuando se expande y la ecuación (5.17) nos dice que el aire es más frío a gran altura donde la presión es menor. En la Tab. 5.1 se indican algunos valores de α .

	α
Aire	2,5
Vapor de agua	3,3
Dióxido de carbono	3,4
Helio	1,5
Luz	3,0

Tab. 5.1 Algunos valores de α .

En nuestro entorno natural y técnico, los procesos isentrópicos son los más importantes. Son lo que se aspira y se consigue en gran medida en un motor térmico, y son los procesos decisivos en los fenómenos meteorológicos.

- 5 Si el exponente de la ecuación (5.16) se define en términos de los calores específicos el comportamiento de un gas en compresión isentrópica parece un proceso difícil de entender. Sin embargo, el hecho de que un gas se comporte de esta manera puede entenderse fácilmente sin referirse a los calores específicos: Cuando el gas se comprime, la entropía también se “comprime”, la densidad de entropía aumenta. Sin embargo, la experiencia general dice que el valor de la magnitud intensiva aumenta cuando se incrementa la densidad de la magnitud extensiva.

Origen

La “aversión” hacia la entropía también tiene un efecto en el tratamiento de los procesos isentrópicos.

Eliminación

Se introducen las ecuaciones

$$V \cdot T^\alpha = \text{const}$$

y

$$p \cdot T^{(1+\alpha)} = \text{const.}$$

No explicar el exponente α por medio de los calores específicos. Las ecuaciones nos indican cómo reacciona la temperatura al cambiar el volumen o la presión.

Referencias

[1] Véase 5.43 *La estratificación de la atmósfera por temperaturas*, p.175

5.36 Radiación térmica

Tema

Se analizarán tres afirmaciones sobre la radiación térmica que se encuentran en libros de texto y que se contradicen mutuamente o que sencillamente no son correctas.

- 1 El calor se puede transmitir por conducción, convección y radiación.
- 2 La radiación térmica es un tipo de radiación electromagnética de mayor longitud de onda que la luz visible pero menor que las microondas.
- 3 Con la luz del sol llega calor a la tierra y este se manifiesta en un aumento de la temperatura del cuerpo que la absorbe.

Defectos

Con el nombre de radiación térmica se caracteriza cierto modo de generar radiación electromagnética: un

Radiación térmica

cuerpo emite radiación térmica, si tiene una temperatura superior a 0 K. Sabemos que existen otros métodos para producir radiación electromagnética, en cuyo caso la radiación no se llama radiación térmica. Así, no llamamos radiación térmica a las microondas de un klystron, a la radiación de luminiscencia de un diodo semiconductor, o a la luz de un láser.

Iniciemos con una objeción algo trivial a las formulaciones arriba citadas: la radiación térmica no está limitada al infrarrojo. La luz del sol es térmica, pero transporta la mayor parte de su energía con luz correspondiente a la parte visible del espectro. La radiación cósmica de fondo es radiación térmica, pero su máximo energético se encuentra en una longitud de onda del orden de 5 cm, es decir, en la región de las microondas. En el interior de las estrellas hay radiación térmica de la región de los rayos X.

Un defecto más grave y más sutil tiene que ver con la afirmación de que la radiación transmite calor. Para analizarla, es necesario comprender qué se quiere decir cuando se afirma que en un proceso se transmite calor o energía en forma de calor. De modo general, el transporte de calor es transporte de energía, acompañado de un flujo de entropía. La corriente de energía P y la corriente de entropía I_S son proporcionales:

$$P = T \cdot I_S \quad (5.18)$$

donde T es la temperatura.

En general una corriente de energía tendrá varios componentes, o estará compuesta de varias “formas de energía”: calor, trabajo, energía eléctrica y energía química, entre otras, llamando calor solamente a la parte correspondiente a la ecuación (5.18).

Para decidir qué parte de cierta radiación electromagnética es calor, hay que considerar la entropía transportada y hay que conocer la temperatura de la radiación. Si se trata de radiación de cuerpo negro, es fácil conocer su temperatura, a partir del espectro correspondiente a la distribución de PLANCK. Sin embargo, el problema se vuelve tanto más complejo cuanto más selectiva es la radiación, ya que cada vez es más difícil definir una temperatura. Es relativamente sencillo cuando se trata de radiación emitida por dispositivos como el klystron, o por las ondas de una antena emisora. En este caso la corriente de entropía es prácticamente cero y no hay transporte de calor. Es importante notar que no se puede concluir que la radiación sea térmica por el simple hecho de que algo se calienta con ella (como en el microondas). La entropía que aparece al ser absorbida la radiación, y que se manifiesta en el calentamiento, puede tener dos orígenes: puede ser portada por la radiación o puede ser producida en el proceso de absorción.

Se observa entonces que en la tercera afirmación mencionada en el Tema, hay un error. El calentamiento de un cuerpo absorbente es independiente de que la radiación porte o no calor. Depende solamente de la energía transportada por la radiación y del hecho de que esta sea disipada al ser absorbida. Una radiación sin ninguna entropía, emitida por una fuente no térmica, produce el mismo calentamiento del cuerpo absorbente, que el producido por radiación de cuerpo negro de una fuente de radiación térmica, a condición que las dos radiaciones transporten la misma cantidad de energía por segundo, y que en ambos casos la misma fracción de energía sea disipada.

La situación es idéntica, pero tal vez más clara en el caso de radiaciones no electromagnéticas. Por ejemplo, al chocar un haz de electrones contra la materia esta última se calienta, es decir, se genera entropía. En este caso sabemos que la mayor parte de la entropía es producida al chocar los electrones contra la materia absorbente.

Origen

La radiación térmica se estudió mucho antes de que fuera posible comprender que su naturaleza era igual a la de la luz, y antes de que se comprendiera la relación entre energía y calor. El término “calor radiante” proviene probablemente de Carl SCHEELE (1742–1786) (descubridor del oxígeno) [1]. En su obra de 1790, Marc PICETT (1752–1825) expresó su convencimiento de que la luz y el calor existían independientemente [2]. En particular, creía haber mostrado que de la luna recibimos solamente luz, mientras del sol luz y calor. En las primeras décadas del siglo 19 se estableció la convicción de la identidad de las radiaciones luminosa y térmica. Sin embargo, para la clarificación definitiva faltaban aún dos grandes teorías: la electrodinámica de MAXWELL y la termodinámica estadística de la radiación de PLANCK [3].

Eliminación

No debe decirse que el transporte de calor es característico de la radiación infrarroja.

Debe decirse que la luz del sol transporta energía en lugar de decir que transporta calor. El calor (o la entropía) que se percibe al absorber dicha luz tiene dos orígenes: el portado por la radiación y el producido en el proceso de absorción. Para la luz del sol este último es veinte veces mayor que el primero.

Referencias

[1] E. Mach, *Die Principien der Wärmelehre*, Verlag von Johann Ambrosius Barth, Leipzig, 1919, p.126. Existe

versión en inglés: *Principles of the Theory of Heat: Historically and Critically Elucidated*. Berlín: Springer, 1986.

[2] M. A. Pictet, *Essai sur le feu*, Genève, 1790. Existe versión en inglés: *An Essay on Fire*. Trans. by W. Belcome, London: E. Jeffery, 1791.

[3] M. Planck, *Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung*, Johann Ambrosius Barth, Leipzig, 1913. Existe versión en inglés: *The theory of heat radiation*. Trans. By M. Masius, New York: Dover Publications, 1991.

5.37 Expansión libre en el vacío

Tema

En muchos aspectos, la entropía coincide en sus propiedades y comportamiento con lo que coloquialmente se denomina calor. Sin embargo, hay un experimento célebre en el que esta correspondencia no parece existir: la expansión en el vacío, también conocida como expansión de GAY-LUSSAC —Joseph-Louis GAY-LUSSAC (1778–1850)—.

Defectos

A los profesores que introducen la entropía como medida de lo que coloquialmente se llama calor se les objeta, a veces, que en la expansión de GAY-LUSSAC la entropía aumenta, a pesar de que no se “produce calor”.

Hay que tener en cuenta varias cosas:

1. La correspondencia entre una cantidad física y lo que su nombre parece indicar nunca es completa. Ejemplos de ello son la magnitud Q y su nombre habitual “calor”, o “cantidad de calor”. Es difícil para el alumno aceptar que es incorrecto decir que el calor se almacena en un cuerpo caliente. La situación es aún peor con la correspondencia entre el nombre y el significado físico de la magnitud F , llamada fuerza.
2. En nuestro caso, sin embargo, no se trata de la correspondencia entre el nombre de una magnitud y su significado físico, ya que el nombre de la magnitud S es entropía. Se trata simplemente de que parece conveniente, al introducir la entropía, señalar que sus propiedades coinciden en gran medida con las del concepto coloquial de calor. De hecho, la correspondencia aquí es tan buena como lo es para otras pocas magnitudes físicas.

Para comparar, consideremos la fuerza. Es común referirse a una sensación o sentimiento muscular al introducir la fuerza. Sin embargo, la “sensación muscular” apunta tanto a una fuerza (una corriente de

momentum) como a una corriente de energía. Sin embargo, casi nadie se molesta por esta comparación.

3. Respecto a la expansión de un gas en el vacío. En primer lugar, es un experimento que no se discute al principio de un curso de termodinámica. Se hace más tarde, cuando se consideran los gases. La discusión es más o menos así: un gas se expande en el vacío. Una vez establecido el equilibrio termodinámico, la temperatura es casi la misma que antes de la expansión. Entonces, ¿el calor (usando la palabra en sentido coloquial) no ha aumentado? A primera vista, no. Pero es un descuido juzgar el contenido de entropía antes y después de la expansión, solo con base en la temperatura, porque el volumen del gas ha cambiado. Por lo tanto, habrá que devolver el gas a su antiguo volumen de tal manera que no se añada, ni se quite, ni se produzca calor. Una vez hecho esto, el gas estará más caliente que al principio. Contiene más “calor” (coloquial), es decir, entropía.

Origen

Sospechamos que la reticencia a la idea de entropía como calor coloquial no tiene nada que ver con el hecho de que la coincidencia no sea perfecta. Más bien, se buscan ejemplos en los que la afirmación no es cierta por miedo a que la afirmación resulte verdadera; por miedo a darse cuenta de que la entropía no es tan complicada y difícil como se ha creído toda la vida.

Eliminación

Introducir la entropía asociándola con el calor coloquial. La correspondencia entre el nombre y el concepto físico es mejor que con la mayoría de las demás magnitudes físicas, cuya introducción se basa en la experiencia cotidiana sin mayores reservas.

5.38 La máquina de vapor

Tema

Es común el empleo de las TIC en los procesos de enseñanza-aprendizaje, y son muchos y variados los sitios web donde es posible encontrar estos recursos. Para el estudio de la máquina de vapor, como aplicación de la expansión isentrópica (adiabática) de un gas, se encuentran varios sitios que muestran el recorrido del pistón, en algunos de ellos mientras el pistón principal se mueve hacia un lado, el pistón de distribución deja abierta la entrada para el vapor hasta poco antes de llegar al punto de inversión, cuando esta se cierra [1], [2], [3], [4].

La máquina de vapor

Defectos

Los autores de las animaciones reportadas se han orientado no tanto por argumentos termodinámicos como mecánicos; se quiere que el vapor empuje al pistón lo más fuerte posible y por ello se deja abierta la válvula de entrada de vapor durante casi todo el recorrido del pistón.

En una máquina de vapor correctamente construida, de acuerdo a la termodinámica, la entropía pasa de alta a baja temperatura y en este proceso impulsa el pistón, algo similar a lo que ocurre en una rueda hidráulica donde el agua pasa del potencial gravitacional alto al bajo, haciendo girar la rueda. La entropía debe salir de la máquina solo cuando se encuentra a temperatura ambiente, así como el agua deja la rueda solo cuando se encuentra a nivel del desagüe. Por consiguiente la entrada para el vapor debe estar abierta solo en una parte del recorrido del pistón, después el vapor se expande en el cilindro de modo que su temperatura baja hasta la temperatura ambiente. También en las turbinas de vapor este se expande de manera que en la salida tiene casi la temperatura del entorno; es posible tocar los conductos de salida sin quemarse.

A veces y temporalmente en las locomotoras se dejaba abierta la entrada del vapor durante todo la mayor parte del recorrido del pistón, esto se hacía en máquinas antiguas cuando se requería un flujo energético muy alto, al arrancar el tren o en una fuerte subida; ello se manifestaba negativamente en la eficiencia de la máquina, además de producir el conocido “chacachá” del tren, debido a la libre expansión del vapor a alta presión en la atmósfera.

Una máquina en la cual el vapor se expande libremente en el ambiente al abrir la válvula de salida, como en los ejemplos citados, se puede comparar con una rueda hidráulica a la cual se suministra más agua de la necesaria, de tal manera que parte de ella cae por los lados de la rueda.

Origen

- 1 Falta de conocimiento de la termodinámica; no se conoce lo fácil que se hace la descripción de las máquinas térmicas cuando se realiza el balance de entropía en lugar del de calor.
- 2 Al tratar de comprender las máquinas térmicas se hace demasiado énfasis en el componente mecánico, posiblemente siguiendo los pasos de los pioneros de las mismas, NEWCOMEN, WATT, TREVITHICK —Thomas NEWCOMEN (1663–1729), James WATT (1736–1819), y Richard TREVITHICK (1771–1833)—, entre otros, quienes pensaban esencialmente en términos mecánicos; ellos no podían obrar de otra forma ya que aún no existía el trabajo de Sadi CARNOT (1796–1832). Exagerando un poco se podría decir

simplemente que en el siglo 18 aún no habían comprendido las máquinas térmicas; consecuentemente su eficiencia en esa época era muy baja.

Las ideas de CARNOT aún hoy día no han llegado a la enseñanza; inclusive en algunas clases universitarias de termodinámica se estudia el proceso de CARNOT, pero sin explorar o identificar para qué puede servir ya que no existe una máquina basada en él. El tratamiento complicado de esta ciencia no contribuye a motivar a los estudiantes a su aprendizaje, la mayoría de ellos nunca se enteran de la genial idea de CARNOT de comparar la máquina térmica con una rueda hidráulica.

Eliminación

En su conocida obra CARNOT describe la máquina térmica en las siguientes palabras:

“La potencia motriz de un salto de agua depende de su altura y de la cantidad de líquido; la potencia motriz del calor depende también de la cantidad de calórico empleado y de lo que se podría denominar, y efectivamente nosotros lo llamaremos así, la altura de su caída, la diferencia de temperatura de los cuerpos en los que se realiza el cambio de calórico.” [5]

Modernizando un poco el lenguaje se puede parafrasear a CARNOT diciendo:

“La energía que el agua puede entregar depende de su cantidad y la altura a que se encuentre; la energía que una máquina térmica puede entregar depende de la cantidad de entropía empleada y de lo que se podría llamar la altura de caída, es decir, la diferencia de temperatura de los cuerpos entre los cuales se realiza el intercambio de entropía.”

Referencias

- [1] Máquina de vapor. [en línea]. En: <https://www.gobiernodecanarias.org/educacion> [consultado el 23 marzo, 2022].
- [2] Steam engine in action. [en línea]. En: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Steam_engine_in_action.gif [consultado el 23 marzo, 2022].
- [3] Triple expansion engine animation. [en línea]. En: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Triple_expansion_engine_animation.gif [consultado el 23 marzo, 2022]
- [4] Walschaerts motion. [en línea]. En: https://es.wikipedia.org/wiki/Distribuci%C3%B3n_de_v%C3%A1lvula_de_Walschaerts#/media/Archivo:60163_Tornado_motion.jpg [consultado el 23 marzo, 2022]
- [5] S. Carnot, *Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas adecuadas para desarrollar esta potencia*. Madrid: Alianza Editorial, 1987. p.49.

5.39 Evaporación y ebullición

Tema

El agua, como cualquier otro líquido, puede pasar al estado gaseoso de dos maneras: evaporarse, o bullir o hervir. Al suministrar calor al agua líquida, inicialmente la temperatura aumenta, luego al alcanzar la temperatura de ebullición, esta permanece constante. Para la fusión no existen estas dos posibilidades.

A continuación algunos comentarios típicos que figuran en redacción muy similar en varios libros de texto:

“Cuando la presión de vapor se hace igual a la del gas que se encuentra sobre el líquido, este hiere. La formación de vapor ocurre no solo en la superficie del líquido, sino también en su interior; se forman burbujas de vapor.” [1]

“Un líquido hiere cuando su presión de vapor se hace igual a la del aire que reposa sobre él. Por lo tanto la temperatura de ebullición depende de la presión atmosférica.” [2]

“Hervir: al hervir, en el interior del líquido se forman burbujas de vapor. Mientras hiere, la temperatura no cambia... Evaporarse: la formación de gas ocurre en la superficie del líquido a temperaturas menores que la temperatura de ebullición.” [3]

“La ebullición, a diferencia de la evaporación, consiste en que aparecen burbujas de vapor en el seno del líquido que se calienta.” [4]

Defectos

Dichas formulaciones no permiten encontrar respuestas a dos preguntas obvias:

- 1 ¿Por qué el proceso de transición al estado gaseoso es lento para la evaporación y rápido para la ebullición?
- 2 ¿Por qué la temperatura no continúa aumentando después de alcanzar el valor de ebullición?

Sin embargo, es fácil contestar dichas preguntas: la velocidad del proceso de evaporación está determinada por la velocidad con que el vapor de agua producido puede moverse, desde la superficie líquida hasta lugares donde este tiene menor presión parcial. Este es un proceso de difusión y dicha clase de procesos son notoriamente más lentos. Se sabe que es posible forzar esos procesos, por ejemplo soplando, es decir, “ayudando” al transporte por medio de la convección. Al hervir, la velocidad de evaporación no está limitada por la difusión, ya que la presión del vapor de agua sobre la superficie es igual a la atmosférica, es decir, la fase gaseosa es simplemente vapor de agua. El transporte ya no es un proceso de difusión, sino un flujo sin resistencia alguna, el vapor se puede alejar

sin obstáculo. La producción del vapor depende solamente de cuán rápido se suministra calor al agua.

Al suministrar calor (entropía) —lo suficientemente rápido— al agua líquida que tiene una temperatura inferior a la de ebullición, el vapor producido no puede llevarse (transportar) toda esa entropía, esta se acumula y la temperatura del agua aumenta. Al alcanzar la temperatura de ebullición, este “problema” ya no existe, el vapor se forma en la medida en que se suministra nueva entropía. Esto también es válido cuando la presión atmosférica no es 1 atm, es decir, cuando la temperatura de ebullición no es 100 °C.

La formación de burbujas es un efecto llamativo pero no necesario para la ebullición. Si se calienta un líquido por encima, con una lámpara infrarroja, la ebullición empieza en cuanto la superficie alcanza la temperatura de ebullición, sin que se formen burbujas.

Origen

Al parecer lo visible —las burbujas— oculta lo esencial.

Eliminación

No es posible comprender correctamente el fenómeno sin considerar la presión parcial encima de la superficie del agua; en el proceso de evaporación esta es inferior a la atmosférica. El vapor de agua puede escaparse solamente por difusión, que es un proceso lento. Al hervir, el gas encima de la superficie del agua es puro vapor de agua, y para su desplazamiento no existe resistencia. Se puede explicar la formación de burbujas, pero aclarando que dicho fenómeno es un indicador de la ebullición solamente en el caso en que el líquido se caliente por debajo.

La explicación se hace más sencilla si primero se introduce el potencial químico, ya que ambos procesos —la transición del estado líquido al gaseoso y el transporte que sigue— son impulsados por una diferencia de potencial químico.

Referencias

- [1] Gerthsen-Kneser-Vogel, *Physik*, Springer-Verlag, Berlin, 1977, p.189
- [2] Sexl, Raab, Streeruwitz, *Das mechanische Universum*, Band I, Verlag Moritz Diesterweg, Frankfurt, 1980, p.205
- [3] Gross-Berhang, *Physik*, Ernst Klett Schulbuchverlag, Stuttgart, 1996, p.92
- [4] Y. Perelman, *¿Sabe Usted Física?* (Preparado por P. Barros y A. Bravo). [en línea]. En: <https://www.librosmaravillosos.com/sabefisica/pdf/Sabe%20Ud%20Fisica%20-%20Yakov%20Perelman.pdf> [consultado el 23 marzo, 2022].

Refrigeración con nitrógeno líquido

5.40 Refrigeración con nitrógeno líquido

Tema

“La refrigeración con nitrógeno licuado criogénico aporta una serie de ventajas. Los bajos costes de inversión y funcionamiento son algunas de las razones, junto con la aplicación sencilla y de bajo mantenimiento. Este método de refrigeración no solo es económico, sino que también aporta ventajas en términos de seguridad y medio ambiente. El nitrógeno líquido no es inflamable, no es tóxico y no produce residuos.”

“Los imanes de las grandes instalaciones de aceleración, como el CERN de Ginebra, suelen enfriarse hasta casi el cero absoluto con helio líquido. El satélite infrarrojo europeo Herschel también fue llevado a las temperaturas más bajas con helio para ser especialmente sensible a la radiación térmica de los objetos cósmicos.”

“La refrigeración se utiliza en muchos dispositivos técnicos que se calientan. Sin embargo, la mayoría de las veces se utiliza la refrigeración pasiva, es decir, la liberación de calor a través de disipadores de calor en el aire circundante. El ejemplo más conocido es el del frigorífico para conservar los alimentos. En los vehículos de motor se utiliza sobre todo la refrigeración por agua, mientras que en los ordenadores predomina la refrigeración por aire. Otro gran campo de aplicación es, por ejemplo, la climatización.”

“Refrigeración del procesador: se distingue entre refrigeración por aire, por agua, por ebullición, por PELTIER y por hielo seco.”

Defectos

Refrigerar significa llevar un objeto a una temperatura baja o mantenerlo a una temperatura baja. Esto se hace quitando entrópia del objeto.

En principio, existen dos posibilidades:

- 1 Se tiene un ambiente más frío que el cuerpo a enfriar. Entonces solo hay que asegurarse de que la entropía siga su tendencia natural de caliente a frío. Ejemplo: la refrigeración del motor del automóvil.
- 2 Si no se dispone de un entorno de este tipo (porque la temperatura del cuerpo a enfriar está por debajo de la temperatura ambiente), es necesario transportar la entropía desde la temperatura más baja a la más alta del ambiente. Para ello se necesita energía y un dispositivo: una bomba de calor (que en realidad debería llamarse bomba de entropía).

En mecánica se presenta un problema análogo. Para llevar un cuerpo (como un vehículo) a una mayor velocidad, o para mantenerlo a una velocidad elevada, es ne-

cesario suministrarle momentum. Acá también existen dos posibilidades:

- 1 Se acopla el cuerpo a un sistema que ya tiene una alta velocidad. El momentum sigue entonces su tendencia natural de alta a baja velocidad. Lo mismo ocurre al frenar, el freno establece una conexión conductora del momentum entre el vehículo y la tierra, y el momentum fluye hacia la tierra por sí mismo.
2. Si no se dispone de un “entorno” con la velocidad deseada, más alta, es necesario “bombar” momentum del entorno al vehículo, gastando energía. Esto es lo que hace el motor.

Pasemos por alto la correspondiente situación eléctrica y química.

Cuando se habla de refrigeración con nitrógeno líquido, helio o cubitos de hielo, se tiene la impresión de que el llamado refrigerante es el factor decisivo. Se enfrian las bobinas con helio líquido. Pero eso solo significa enfriar algo con otra cosa que ya está fría. La refrigeración se reduce a ajustar dos temperaturas.

¿Pero quién enfriá el helio? ¿Cómo se deshace el helio de su entropía? No se dice nada al respecto, al menos en las citas expuestas. Simplemente se licúa.

La tercera cita habla de la nevera y el aire acondicionado. Sin embargo, si se ha entendido bien el texto, el autor solo se preocupa de cómo la entropía en el intercambiador de calor de la parte trasera del frigorífico se transmite al aire circundante (ambiente). Obviamente, aquí es donde se enfriá el refrigerador. Lo que constituye el refrigerador, es decir, su bomba de calor, parece ser menos importante.

En la última cita las cosas se mezclan divertidamente. Los elementos PELTIER —Jean Charles Athanase PELTIER (1785–1845)— y el hielo seco se mencionan como si fueran esencialmente los mismos procesos. Sin embargo, el primero es una bomba de calor, el segundo solo una sustancia fría de la que previamente se ha extraído entropía.

El elemento crucial para la refrigeración, la bomba de calor, no se menciona en absoluto o solo aparece como un detalle técnico. Al fin y al cabo, se necesita “solo” para licuar o producir los cubitos de hielo para el refresco.

Origen

¿Cómo expresarlo más claramente si no se quiere o no se puede mencionar la entropía? En consecuencia, no se puede hablar, por supuesto, de bombeo de entropía. Y se complican las cosas con las construcciones sustitutivas energía térmica o entalpía. Así, es mejor no decir nada sobre el origen.

Eliminación

En general no se debe reducir la obra de CARNOT —Nicolas Léonard Sadi CARNOT (1796–1832)— al proceso cíclico un tanto intrincado, que es solo un ejemplo en su obra. Más bien se recomienda adoptar su ingeniosa idea: la comparación de la máquina de calor con una rueda hidráulica o molino de agua. El hecho de que CARNOT no pudiera comparar la bomba de calor con una bomba de agua se debió únicamente a que en aquel entonces no existían las bombas de calor.

Y cuando se hable de refrigeración, se debe poner en primer plano la máquina de refrigeración (bomba de calor). Su función es fácil de describir: la bomba de calor utiliza la energía para llevar la entropía de lo frío a lo caliente, igual que una bomba de agua lleva el agua de baja a alta presión. Esto es fácil de explicar. Los trucos técnicos que se utilizan en el proceso se pueden tratar después, o se pueden omitir por completo especialmente en la secundaria.

Por último, una sugerencia: no es necesario hacer la distinción entre bomba de calor y máquina frigorífica. Ciertamente, los dispositivos suelen estar construidos de forma diferente, pero al menos una referencia a que hacen lo mismo sería útil para los estudiantes.

5.41 Clima marítimo y clima continental

Tema

A menudo se dice que el clima marítimo es producto del elevado calor específico c del agua, el cual hace que su temperatura casi no cambie a lo largo del año.

Defectos

¿Por qué se compara aquí la capacidad calorífica de 1 kg de la sustancia, y no de 1 mol o de 1 m³? En este caso no

son adecuadas ni la capacidad calorífica respecto a la masa $C/m = c$, ni al volumen $C/V = c \cdot \rho$, sino la capacidad referente por unidad de área A , es decir, $C/A = c \cdot \rho \cdot h$, donde ρ es la densidad y h el espesor de la capa que participa en el intercambio de calor. Se puede considerar h como la profundidad hasta la cual son perceptibles las variaciones de la temperatura durante el año.

Para hacer un cálculo rápido y aproximado de h , se puede tomar el calor Q que durante el semestre de verano, medio año $a/2$, es absorbido a través del área A ; para simplificar se supone que la conductividad térmica λ y el gradiente de temperatura $\Delta T/h$ son constantes. Entonces

$$Q = 1/2 \cdot a \cdot A \cdot \lambda \cdot \Delta T/h.$$

De otro lado para estimar Q se puede recurrir a la capacidad calorífica $C = c \cdot \rho \cdot h \cdot A$, presuponiendo una desviación media de la temperatura, $1/2 \Delta T$, en la capa considerada:

$$Q = c \cdot \rho \cdot h \cdot A \cdot (1/2) \Delta T.$$

Igualando las dos expresiones para Q se obtiene que

$$h = \sqrt{\frac{\lambda a}{c \rho}}$$

de donde resulta que:

$$\frac{C}{A} = \sqrt{\lambda c \rho a}.$$

Los valores reportados en la Tab. 5.2 muestran que el agua no sale bien librada en esta comparación. Solamente si se tiene en cuenta que debido a la circulación del agua el intercambio de calor en el mar hace participar una capa mucho más gruesa que los dos metros estimados, y que la precipitación anual media de 1000 mm (típica para Cartagena o Barranquilla) esta vinculada

Material	ρ	λ	C/n	C/V	C/A	h
	Mg m ⁻³	J m ⁻³ s ⁻¹ K ⁻¹	kJ kg ⁻¹ K ⁻¹	MJ kg ⁻¹ K ⁻¹	MJ m ⁻³ K ⁻¹	m
Agua	1,0	0,6	4,2	4,2	9	2
Granito	2,8	3,6	0,8	2,3	16	7
Basalto	2,9	2,1	0,9	2,5	13	5
Arena ¹	1,6	1,1	1,0	1,7	7	5
Tierra ²	2,0	2,3	1,3	2,5	14	5

¹ De grano fino con 0,07g de humedad por gramo.

² Barrosa, de grano fino con 0,14 g de humedad por gramo.

Tab. 5.2 Valores de ρ , λ , C/m , C/V , C/A y h , para algunos materiales.

La transmisión del calor a través de la atmósfera

con un intercambio de calor suficiente para variar la temperatura de una capa de agua de 60 m de espesor en 10 K, se comprende la gran influencia del agua en el clima. Por consiguiente, lo importante para el clima es el hecho de que el agua es “líquida” y volátil y no su capacidad calorífica. Esta última no se manifiesta debido a su baja densidad y conductividad térmicas.

Origen

La existencia de una correlación entre el clima y las capacidades térmicas, posiblemente condujo a inferir que existe una relación causa-efecto, lo cual no es justificado en este caso. Una vez establecido el erróneo argumento puede propagarse y difundirse, ya que es relativamente difícil de refutar.

Eliminación

Siempre que para alguna fenomenología se dé alguna explicación, ella debe ser cuidadosamente revisada empleando los fundamentos teóricos pertinentes.

5.42 La transmisión del calor a través de la atmósfera

Tema

Para la luz del sol la atmósfera es transparente, por lo tanto esta incide y es absorbida casi totalmente por la superficie terrestre. Lo contrario ocurre para la radiación infrarroja (IR) emitida por la tierra, para la cual la atmósfera es opaca. La radiación infrarroja proveniente de la tierra es emitida por el aire a gran altitud, la llamada “altitud de emisión”. La energía correspondiente llega a esa altitud desde la superficie terrestre por medio de varios mecanismos, los cuales se suelen representar mediante diagramas de flujo energético, como en la Fig. 5.9. Llama la atención que entre la atmósfera y la tierra existen dos flujos de energía radiante que son mayores que el flujo que llega del sol.

Defectos

Una representación como la de la Fig. 5.9 sugiere que la forma de transporte energético más importante entre la superficie de la tierra y la troposfera superior es la radiación; las flechas correspondientes son más gruesas y los valores de la densidad del flujo energético son mayores. Generalmente el texto que acompaña a esa clase de figuras apoya dicha impresión.

Sin embargo, esta representación es engañosa, ya que el flujo neto de energía radiante desde la tierra hacia la troposfera superior es resultado de dos flujos

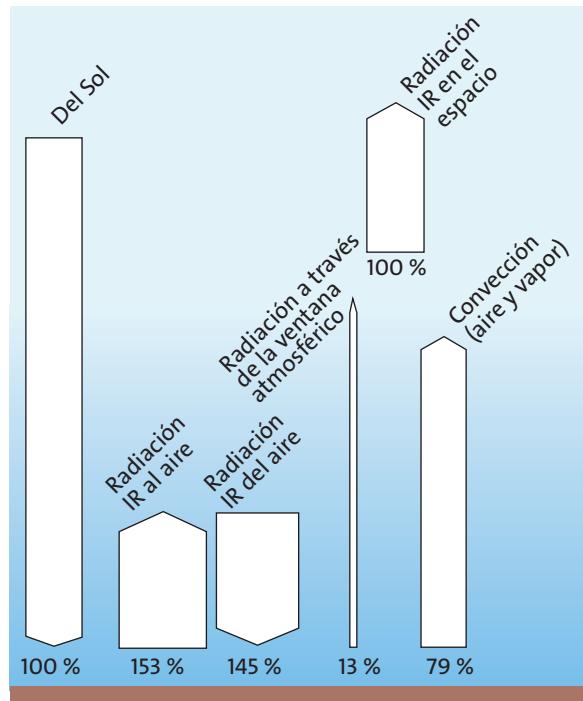


Fig. 5.9 Diagrama de flujo energético.

en direcciones opuestas, siendo el flujo neto solamente el 8 % del flujo total absorbido por la tierra. La Fig. 5.10 muestra el diagrama de flujo correspondiente. En esta figura se ve que no es la radiación el mecanismo de transmisión más importante, sino la convección. Incluso se puede prescindir completamente de la contribución de la radiación, si se quiere dar una representación aproximada.

Se puede argumentar que la Fig. 5.9 contiene más información que la Fig. 5.10, sin embargo, esta información en general no reviste mayor interés y además si no es interpretada cuidadosamente puede generar ideas erróneas en los estudiantes. Obviamente se puede “descomponer” cualquier flujo en sus componentes, y de una infinidad de maneras. Se puede descomponer mentalmente el aire en “reposo” de una habitación en dos componentes: uno que represente las moléculas que se mueven hacia la derecha, y el otro las que se mueven hacia la izquierda, obteniendo dos corrientes de aire muy fuertes. De igual manera se podría proceder con los electrones en un conductor sin corriente, resultando dos “corrientes eléctricas” muy grandes en direcciones opuestas. También se podría descomponer la componente horizontal de la radiación infrarroja. Otro ejemplo que corresponde particularmente bien al caso de la radiación infrarroja a través de la atmósfera es lo que ocurre en un cuerpo sólido —una barra de

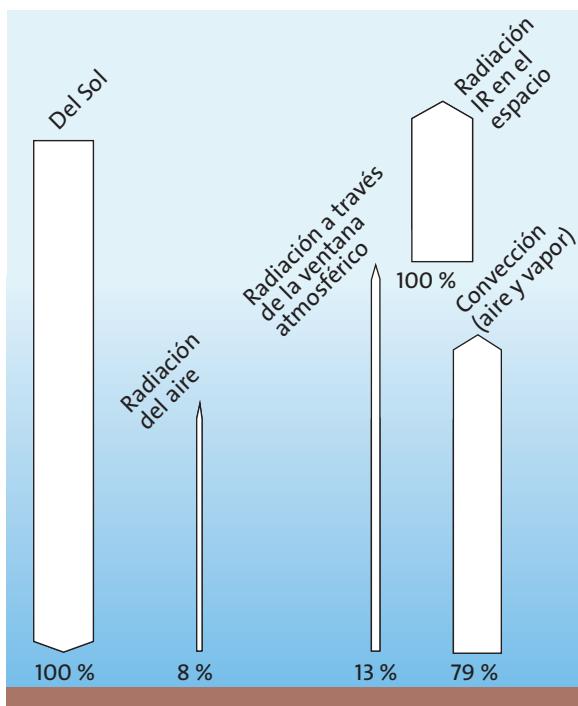


Fig. 5.10 Diagrama de flujo energético simplificado.

cobre, por ejemplo— que se calienta en uno de sus extremos y se enfriá en el otro. Lo que para la atmósfera serían los fotones, son los fonones en la barra de cobre, y la velocidad de la luz en la atmósfera correspondería a la velocidad del sonido en la barra. A nadie se le ocurriría descomponer la corriente de calor en la barra en dos corrientes de direcciones opuestas, cuando se trata solamente de establecer el balance calórico de la misma.

Es cierto que ninguna de las dos descripciones —la de la corriente neta y la de las corrientes parciales— es errónea, pero la descripción con las corrientes parciales es más complicada y puede generar confusiones.

El tema se presta para un breve comentario sobre el hoy popular efecto invernadero, el cual consiste en un aumento de temperatura debido a que los llamados gases de invernadero (vapor de agua, dióxido de carbono, entre otros) absorben y reemiten la radiación de onda larga, devolviéndola a la superficie terrestre. En un invernadero real, el vidrio —similar a la atmósfera— es transparente a la luz solar y opaco a la radiación terrestre, pero confina el aire en su interior, impidiendo que escape el aire caliente. Así, el interior del invernadero se mantendrá siempre tibio, ya que el vidrio no permite la pérdida de calor por convección hacia el aire que lo rodea. El proceso es algo distinto al que ocurre en la atmós-

La estratificación de la atmósfera por temperaturas

fera, por lo tanto el nombre no es el más apropiado, pero se ha hecho tan popular que es difícil deshacerse de él.

Origen

Probablemente el hecho de que las corrientes parciales son más fáciles de medir que la corriente total.

Eliminación

Representar el flujo de radiación por una sola magnitud: el flujo total neto, el cual tiene un valor determinado en cada punto. Así se ve claramente que el mecanismo dominante para el transporte de energía a través de la atmósfera es la convección.

5.43 La estratificación de la atmósfera por temperaturas

Tema

En las alturas “hace frío”. Es por todos conocido que en Bogotá la temperatura es más baja que en el valle del río Magdalena. Si el aire caliente y cargado de humedad asciende, se acumulan nubarrones produciendo lluvias frías y granizo. Las nubes, la lluvia, el granizo y la nieve deben su aparición a la baja temperatura en las alturas, la cual se mantiene a pesar de que el aire esté en continuo movimiento mezclándose permanentemente.

Defectos

En la Física escolar no se acostumbra discutir ni explicar tales fenómenos, que son cotidianos en la atmósfera, mientras si se analizan otros como la dilatación térmica de los sólidos, cuya variación es del orden de 10^{-3} , dedicándole en ocasiones un tiempo considerable, a pesar de que el fenómeno mencionado es fácil de observar y explicar e importante no solamente para comprender los procesos atmosféricos. Los mismos fundamentos teóricos permiten describir y explicar el funcionamiento de las neveras, las bombas de calor, las turbinas de vapor, los motores de un carro, entre otros. El calentamiento de los meteoritos al entrar en la atmósfera, la necesidad de un escudo térmico para las cápsulas espaciales y el llamado muro térmico, que limita la velocidad de las aeronaves, son consecuencias espectaculares que tienen la misma explicación, la cual consiste en que los gases (y en menor medida sólidos y líquidos) se calientan al comprimirse y se enfrian al dilatarse sin que sea necesario suministrar o sacar calor.

La fórmula barométrica

Los meteoritos se vaporizan parcial o totalmente debido a la alta temperatura del aire comprimido delante de ellos. La mezcla de gasóleo y oxígeno se auto-inflama en el cilindro de un motor diésel. La atmósfera terrestre debe su estratificación por temperatura con +15°C en el suelo y -50°C a 10 km de altitud a este efecto, que se manifiesta en que el aire al subir, debido a la disminución de la presión, se dilata, enfriándose y formando nubes. Al bajar el aire, la presión aumenta, este se calienta y las nubes desaparecen. Incluso cuando hay muchas nubes y tiempo tormentoso, en el suelo existe buena visibilidad, porque las nubes se disuelven al descender. La circulación del aire no dificulta la formación del gradiente de temperatura, sino que la condiciona.

Origen

En una burbuja de gas de 1 cm de diámetro, cualquier diferencia de temperatura desaparece aproximadamente en 1 s. Sin embargo, el tiempo de relajación aumenta con el cuadrado del diámetro de modo que para 100 m se tendrá un tiempo de relajación de 10^8 s. Cuanto más grande es la extensión, tanto menos importante es el intercambio de calor. Por eso en el espacio único “atmósfera” dominan procesos isoentrópicos, usualmente conocidos como adiabáticos, mientras en el espacio restringido “laboratorio” todo tiende a ser más bien isotérmico. La descripción física que se discute o analiza en clase se fundamenta generalmente en la experiencia del laboratorio donde la temperatura T es la magnitud dominante, mientras que la entropía S no es considerada, con el resultado de que también se excluyen toda una serie de fenómenos y conceptos que son difíciles de describir sin esta. Así, por ejemplo, se llama isotérmica (o isoterma) a una curva de temperatura constante, mientras una curva de entropía constante se denomina adiabática, en lugar de isoentrópica. Las diversas isotermas se caracterizan con las temperaturas correspondientes T_1 , T_2 , etc., mientras que para caracterizar las adiabáticas se debe recurrir a cierto tipo de paráfrasis. La distribución de la presión con la altitud se describe con la fórmula barométrica que hace referencia a una atmósfera isotérmica, lo cual es irreal en sumo grado.

Eliminación

Existirá dificultad para el tratamiento de procesos isoentrópicos, mientras no se reconozca la importancia y sencillez que para la descripción y explicación de diversos fenómenos aporta el concepto de entropía. Se pueden evitar los obstáculos mencionados (y otros), si se tiene en cuenta que la palabra coloquial “calor” describe muy bien lo que en la Física se cuantifica con la magnitud entropía. Si se habla de entropía de la misma manera como

del calor en la vida cotidiana, se llega a una descripción intuitiva y correcta de los fenómenos mencionados.

5.44 La fórmula barométrica

Tema

En el contexto del tema “presión atmosférica”, se discute la fórmula barométrica. Se señala que la suposición de una temperatura independiente de la altitud, en la que se basa la derivación, no es realista.

- 1 “Con la ayuda de la ecuación... se puede determinar la diferencia de altitud a partir de la presión atmosférica en dos altitudes diferentes (medición de la altitud barométrica). En la realidad no se cumple la condición de la temperatura constante. Si la diferencia de altitud no es demasiado grande, se puede utilizar la media aritmética de las temperaturas en las altitudes h_0 y h . ”
- 2 “Esta ecuación, que suele denominarse fórmula barométrica, ofrece la posibilidad de calcular la diferencia de altitud entre dos puntos si se conoce la presión y la temperatura del aire en ambas estaciones. Las dos ecuaciones [...] se aplican a una atmósfera isotérmica; en la naturaleza, la temperatura varía normalmente con la altitud. Sin embargo, se pueden aplicar las fórmulas de la atmósfera isotérmica a la atmósfera natural sin mayor error si se utiliza el valor medio de la temperatura entre las dos altitudes.”
- 3 “Bajo la suposición (poco realista) de que la atmósfera terrestre tiene la temperatura uniforme T , se puede dar una fórmula para la dependencia de la presión de los gases p con la altura h :...”
- 4 “En este caso, sin embargo, como se utilizó la ley de BOYLE-MARIOTTE —Robert BOYLE (1627–1691) y Edme MARIOTTE (1620–1684)—, se supone la constancia de la temperatura; una fórmula basada en la ley adiabática $p/\rho^\kappa = \text{const}$, que se deriva de manera análoga sería más precisa.”
- 5 “En realidad, la temperatura suele disminuir con la altitud en la troposfera (hasta 10 km – 12 km). Para el aire seco, la troposfera se describe mejor mediante la estratificación adiabática-indiferente.”

Defectos

Inicialmente se deriva la fórmula de la altitud barométrica suponiendo que la atmósfera está en equilibrio térmico en la dirección vertical, algo así como:

$$p = p_0 e^{-\frac{Mgh}{RT}}$$

y luego se desmiente esa suposición.

A veces (citas 1 y 2) se sigue sugiriendo cómo utilizar la fórmula a pesar de esta deficiencia: aplicándola a intervalos de altura pequeños y utilizando el valor medio de la temperatura.

El tratamiento matemático del problema da inicialmente la impresión de un enfoque riguroso. Pero luego se admite que la condición previa del cálculo “en la realidad no se cumple”, que es “poco realista”. Incluso se explica cómo podría hacerse mejor —citas 4 y 5— pero, no se hace mejor.

Se podría justificar este procedimiento diciendo que es una idealización, como cuando en mecánica a veces se supone que no hay fricción. Sin embargo, el caso de la fórmula barométrica es diferente: para derivarla, no se ha omitido ninguna influencia o efecto perturbador. Más bien, en lo que respecta al intercambio vertical de entropía, se asumió lo contrario de lo que está realizado en la naturaleza.

Se pueden considerar dos casos extremos de procesos termodinámicos: isotérmicos e isentrópicos. En el caso de la atmósfera, el comportamiento isentrópico —más precisamente, la suposición de entropía molar constante— es una buena aproximación; la suposición de que las temperaturas se equilibraran es incorrecta. Por lo tanto, aquí no se ha omitido una influencia perturbadora, como en el caso de la mecánica con la fricción. “Isotérmica” no es la primera aproximación de “isentrópica”, es lo contrario [1].

Es obvio que la suposición de una temperatura independiente de la altitud es una suposición poco realista. Parte de la hipótesis de que el aire a gran altura está en equilibrio térmico con el aire a baja altura. Sin embargo, el equilibrio térmico solo puede establecerse en caso de que pueda tener lugar un transporte de entropía que no sea convectivo, es decir, un intercambio de entropía entre una porción de aire y la otra. Un movimiento de aire, incluso una agitación vigorosa por turbulencia, no crea un equilibrio térmico entre porciones de aire a diferentes alturas. Por el contrario, la mezcla vigorosa del aire es el requisito previo para que se establezca un gradiente natural de temperatura.

Aparentemente, el gradiente natural de temperatura no se toma tan en serio como el de la presión. ¿A quién se le ocurriría calcular el gradiente de temperatura y suponer que la presión es constante?

Existen dos mecanismos que pueden favorecer la igualación de la temperatura entre diferentes porciones de aire: cuando el agua se evapora a baja altura o en el suelo y se condensa a gran altura, y luego vuelve a bajar por el aire en forma de lluvia, se produce un transporte de entropía a través del aire desde abajo hacia arriba, con tendencia a reducir el gradiente de temperatura; asimis-

mo, la radiación (neta) desde abajo hacia arriba, actúa en la misma dirección. Son efectos adicionales que, si se quiere entender la atmósfera, se ignoran inicialmente. Entonces, se empieza con la atmósfera “seca-isentrópica” (o como se suele llamar, la seca-adiabática).

El hecho de que la fórmula barométrica sea una ley muy sencilla que un principiante puede fácilmente entender, tampoco puede justificar la suposición de una temperatura constante, ya que la disminución de la presión de la atmósfera seca-isentrópica no es más complicada. Es una función potencial (con exponente fraccionario):

$$p(h) = p(0) \left(1 - \frac{Mg}{c_p T(0)} h \right)^{\frac{c_p}{R}}$$

La disminución de la temperatura con la altitud, que se supone no existe, sigue una ley más simple aún, es lineal¹:

$$T(h) = T(0) - \frac{Mg}{c_p} h$$

Otra peculiaridad expresada en las citas 1 y 2: se trata de explicar cómo se puede determinar la altitud por medio de la medición de la presión. Dado que la fórmula barométrica no es especialmente adecuada, se sugiere limitarse a pequeños intervalos de altitud. Fig. 5.11 muestra las curvas de presión con la altitud tal como se deducen de la fórmula barométrica y como corresponde a la atmósfera seca isentrópica. Como se puede ver, si se determina la altitud en intervalos pequeños, realmente no

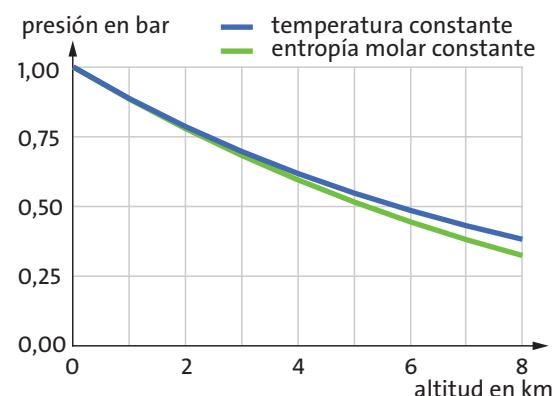


Fig. 5.11 Curva de presión con la altitud

¹ Esta ley tendría como consecuencia que la temperatura alcanza el cero absoluto a una altura de unos 30 km, es decir, muy por encima de la troposfera. Por supuesto, el aire se habría convertido en líquido antes de ese momento, por lo que ya no se cumplen los requisitos de la derivación.

Estrellas fugaces y cápsulas espaciales

importa cuál de las dos fórmulas se utilice. Sin embargo, se puede ahorrar todo el trabajo: una aproximación lineal servirá de igual forma.

Origen

- Si no se sabe manejar bien la entropía, la condición de entropía constante parecerá más complicada que la condición de temperatura constante. También es más difícil de formular si se quiere evitar mencionar la entropía [2].
- La fórmula barométrica es bienvenida porque parece ser un ejemplo sencillo para la aplicación de la ecuación de BOLTZMANN —Ludwig Eduard BOLTZMANN (1844–1906)—.
- Se puede derivar la ley utilizando solo la mecánica. De este modo, se evita tener que lidiar con la poco querida termodinámica. Al menos esta es la impresión que se tiene. De la termodinámica solo se toma la ley de BOYLE-MARIOTTE, en la que, sin embargo, solo aparecen las magnitudes mecánicas p y V . El hecho de que estas estén fuertemente acopladas a las magnitudes térmicas de un gas no se nota mucho. Mantener la temperatura constante aquí parece ser una medida del mismo tipo que mantener la temperatura constante, por ejemplo, cuando se demuestra la ley de OHM —Georg Simon OHM (1789–1854)—.

Eliminación

- Aclarar que en la atmósfera en equilibrio no solo existe un gradiente natural de presión, sino también un gradiente natural de temperatura, y que esto no puede descartarse con la observación de que el equilibrio térmico aún no se ha establecido.
- Tratar la atmósfera seca como una idealización. En este caso, la curva de temperatura es especialmente sencilla, es decir, lineal.

Referencias

- [1] Véase 5.43 *La estratificación de la atmósfera por temperaturas*, p.175
[2] Véase 5.35 *Las ecuaciones adiabáticas*, p.166

5.45 Estrellas fugaces y cápsulas espaciales

Tema

Las altas temperaturas que se generan al ingresar una cápsula espacial o un meteoroide en la atmósfera terrestre se atribuyen a menudo al rozamiento, no solamente en textos de divulgación, sino en textos escolares y uni-

versitarios, pudiéndose encontrar frases como las siguientes:

- 1 “En esta fase las temperaturas suben debido al rozamiento con la superficie exterior del vehículo espacial hasta 1600 °C, a estas temperaturas incluso la roca se fundiría.”
- 2 “Pequeños trozos de materia al entrar en la atmósfera serán calentados por el rozamiento de tal manera que se evaporaran como estrellas fugaces brillantes.”
- 3 “Ellos [los meteoroides] entran en la atmósfera terrestre con una velocidad de 30 km/s aproximadamente y se evaporan debido al rozamiento con las partículas del aire.”
- 4 “En aeronáutica, un escudo térmico es la capa protectora de una nave espacial o misil balístico que está diseñado para protegerlos de las altas temperaturas producidas por el rozamiento con las capas altas de la atmósfera durante su reentrada desde el espacio.”

Defectos

El rozamiento genera calor y calor significa aumento de temperatura, de lo cual existen muchos ejemplos y experiencias. El frotarse las manos hace que se calienten, lo propio ocurre al accionar los frenos de un carro, se puede llevar una barrena sin filo al “rojo vivo”, una hoja de sierra desafilada puede hacer quemar la madera, etc. Entonces, ¿no es lógico explicar las altas temperaturas de una cápsula espacial o de un meteoroide al entrar en la atmósfera por el rozamiento? Sin embargo, esa explicación no es correcta.

Un cuerpo que se mueve con gran velocidad comprime el aire delante de si (en su parte delantera). Si la velocidad es superior a la del sonido, delante del cuerpo se forma una onda de choque: un salto (cambio brusco) hacia valores altos de presión, densidad y temperatura, y hacia valores bajos de velocidad (en el sistema de referencia del cuerpo). Cuanto mayor sea la velocidad del cuerpo más grande será el salto. Para una cápsula espacial que ingresa a la atmósfera, la temperatura del aire comprimido alcanza un valor de 20 000 K aproximadamente, calentándose su escudo térmico a unos 2 000 K. En la expansión siguiente y los correspondientes procesos de rozamiento y turbulencia la temperatura disminuye significativamente, por lo tanto las altas temperaturas se producen delante de la “nariz” del objeto volador y no allí donde ocurren los procesos de rozamiento.

Surgen entonces dos preguntas:

- ¿Por qué aumenta la temperatura en la onda de choque?
- ¿Por qué la temperatura no sigue aumentando cuando empieza el rozamiento?

Es posible encontrar respuesta a ambas preguntas si se aclara lo que ocurre con la entropía. Se sabe que la entropía de cierta cantidad de gas depende de su temperatura y su volumen: cuanto más alta la temperatura (a volumen constante), y cuanto mayor el volumen (a temperatura constante), tanto más entropía contiene el gas.

En la onda de choque, generada por la nave espacial, el aire será comprimido muy rápidamente, y por consiguiente isentrópica o adiabáticamente, es decir, su entropía no cambia. Ya que su volumen disminuye, la temperatura tiene que crecer. Es el mismo fenómeno de aumento de la temperatura de una masa de aire descendiendo en la atmósfera [1].

Para comprender el segundo efecto, que puede parecer más sorprendente, —el hecho que la temperatura disminuye a pesar del rozamiento— es mejor considerar un modelo geométricamente más sencillo que la cápsula espacial o el meteorito: una corriente estacionaria de gas en un tubo con una resistencia (arrastre), Fig. 5.12. Ya que el aire se expande al pasar por la resistencia, la corriente (en litros por segundo) a la derecha de la resistencia es mayor que a la izquierda. Si se trata de un gas ideal, se puede describir el proceso con una ecuación bastante sencilla [2]:



Fig. 5.12 El aire fluye por una resistencia. Su temperatura disminuye, porque su velocidad aumenta.

$$c_p \cdot T + \frac{M}{2} v^2 = \text{constante}$$

Donde c_p es el calor específico molar a presión constante, T la temperatura absoluta, M la masa molar y v la velocidad. La ecuación muestra que la expresión tiene el mismo valor en cada punto de una misma línea de flujo, es decir, allí donde la velocidad es alta, la temperatura es baja, y viceversa, siempre y cuando el gas no intercambie energía a través de las paredes del tubo [3]. La ecuación sigue siendo válida en caso que exista una resistencia al flujo en el tubo.

Para el caso de la Fig. 5.12, la ecuación dice que la temperatura del gas detrás de la resistencia es mayor que delante, ya que detrás la densidad es mayor y por consiguiente la velocidad más baja. Aumentando el diámetro del tubo delante de la resistencia, se puede conseguir que las velocidades antes y después de la misma sean

iguales, Fig. 5.13. Ahora se comprende el porqué la resistencia no logra aumentar la temperatura del gas, debido al rozamiento el gas recibe entropía, la cual no se manifiesta en una temperatura más alta, sino en un mayor volumen. El valor constante de la temperatura en la Fig. 5.13 tiene la misma explicación que en el consabido experimento de expansión de Joseph Louis GAY-LUSSAC (1778–1850).

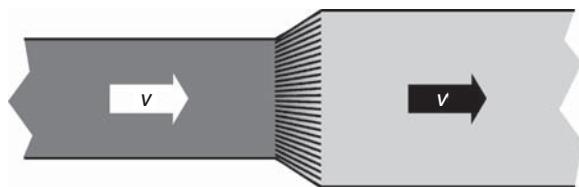


Fig. 5.13 Las velocidades delante y detrás de la resistencia son iguales. Por esta razón las temperaturas también lo son iguales.

Regresando a la nave espacial, también allí se tiene una expansión con procesos de fricción, sin embargo, en este caso la velocidad aumenta, y el aire se mezcla con el aire circundante; en ambos procesos la temperatura va disminuyendo [4].

Se puede concluir que en una compresión isentrópica la temperatura de un gas aumenta al comprimirlo y baja al expandirlo, o dicho de otra forma: un gas se “calienta”, aumenta la temperatura no por fricción, sino por compresión. La explicación intuitiva movimiento → fricción → calor, que es correcta para sólidos y líquidos, no es válida para gases. ¿Cuál es la razón para este comportamiento? El hecho de que el gas obedece a la conocida ley de los gases ideales ($pV = nRT$), o cualitativamente, el hecho que sea compresible.

Origen

La variación de la temperatura en una compresión o expansión isentrópica es un efecto omnipresente, cuya manifestación más llamativa y conocida es probablemente la nieve en las altas montañas. Para muchos efectos térmicos, el hombre del común tiene una explicación que coincide con el análisis del especialista en Física. En el caso de la nieve falta tal explicación, se observa fácilmente la relación con la altura, pero no con la presión. Por otro lado el hombre del común conoce efectos térmicos basados en la fricción, y parece lógico explicar el calentamiento de la nave espacial por medio de esta. Al parecer, en este contexto algunos físicos no tienen mayor ventaja sobre el hombre del común. El

Temperatura y energía cinética de las partículas

problema puede ser que, por una parte no se tiene suficiente cuidado al explicar la fenomenología y por otra no se sabe manejar una herramienta útil para dicha explicación: la entropía.

Eliminación

Mostrar que la compresión y expansión isentrópica y los correspondientes cambios de temperatura, son causas de muchos efectos térmicos llamativos. La alta temperatura, responsable del brillo de los meteoroides, o de la fusión de las capas exteriores del escudo de una nave espacial al ingresar en la atmósfera terrestre, son solamente algunos de estos efectos.

Referencias

- [1] Véase 5.43 *La estratificación de la atmósfera por temperaturas*, p.175
- [2] F. Herrmann, *Skripten zur Experimentalphysik, Thermodynamik*, Universität Karlsruhe, 2003, p.86.
- [3] Un ejemplo es el aire que sale de un neumático al abrir la válvula; en el neumático la velocidad es cero, después al salir es alta, por lo cual la temperatura baja.
- [4] En realidad los fenómenos relacionados con la cápsula espacial son bastante más complejos. Debido a las altas temperaturas ocurren excitaciones electrónicas, disociaciones y otros procesos químicos, todos ellos causan una baja adicional de temperatura.

5.46 Temperatura y energía cinética de las partículas

Tema

“Al suministrar calor la energía cinética de las partículas del gas aumenta. La temperatura es una medida para el valor medio temporal de la energía cinética de una partícula... Gracias a la relación entre la energía y la temperatura absoluta la temperatura logra un significado intuitivo.” [1]

Defectos

- Si no se conociera la relación con la energía cinética de las partículas, ¿no se tendría una idea intuitiva de la temperatura? Cualquier persona, totalmente profana en cuestiones de Física, no tiene ningún problema con dicho concepto, maneja los términos caliente y frío, y esta acostumbrada a utilizar no solo una apreciación cualitativa sino además una medida cuantitativa para ellos. En Física se pretende que la idea de partículas en movimiento puede mejorar la intuición y la concepción al respecto, pero al parecer

no es así. Tampoco hay que olvidar que las partículas que se sugieren y recomiendan al estudiante, es decir las caóticas y diminutas esferitas, son solamente un modelo insuficiente, ya que por ejemplo las diversas excitaciones de un sólido difícilmente encajan en esa idea.

- Se sugiere que la temperatura y la energía cinética son (aparte de un factor constante) la misma cosa, sin embargo esto no es así. En Física estadística la temperatura es un parámetro en la función de distribución de la energía de BOLTZMANN —Ludwig BOLTZMANN (1844–1906)— y no tiene importancia en qué grados de libertad se encuentra “almacenada” la energía. El grado de libertad “movimiento de translación” es solo uno de muchos otros, de tal forma que la energía no se encuentra únicamente en dicho movimiento, sino también en las rotaciones y oscilaciones de las moléculas, en las excitaciones electrónicas, los diversos estados de ionización, las excitaciones plasmónicas y magnéticas, entre otros. Se podría argumentar que el movimiento de las partículas puede servir por lo menos como indicador de la temperatura, pero ¿porqué justamente el movimiento de traslación? Es tan difícil de percibir directamente como otras excitaciones, indirectamente se puede ver en el movimiento Browniano, pero con otras excitaciones también ocurre lo mismo, por ejemplo se ven las excitaciones electrónicas en la incandescencia de un cuerpo, o se perciben las oscilaciones por la radiación infrarroja.

Origen

Probablemente es una remanencia del antiguo discurso sobre la naturaleza del calor, que a finales del siglo 18 se encontraba en pleno apogeo, se debatía en ese entonces sobre si el calor era un movimiento o una sustancia. [2]

Y ya que hubo que rechazar el calor como sustancia, quedaba la interpretación del calor como movimiento; a mediados del siglo 19 se interpretó además como forma de energía. A partir de 1911 se identifica también con la entropía. [3]

Eliminación

No es de objetar que se diga que la energía cinética de traslación es proporcional a la temperatura, pero se debe ser explícito en que esta no es la única manera en que se manifiesta la temperatura a nivel microscópico, ya que al aumentar la temperatura todos los reservorios de energía se van llenando. Respecto a la idea intuitiva de la temperatura no existe ningún problema, ya que cada persona común la tiene.

Referencias

- [1] *Physik*, Oberstufe, Berlin: Cornelsen Verlag, 2008. S. 501.
 [2] Joseph Black, *Lectures on the elements of chemistry*, v.1. Edinburgh: Mundell and Son, 1802. p.30–34
 [3] H. L. Callendar, Proc. Phys. Soc. London, 23, 1911, p.153

5.47 Distribución de MAXWELL-BOLTZMANN

Tema

La función de distribución de velocidades de las moléculas en un gas, calculada por MAXWELL, tiene valor cero cuando la velocidad $v = 0$, al aumentar la velocidad la función (curva) pasa por un máximo y tiende a cero, cuando $v \rightarrow \infty$. La velocidad más probable (a veces llamada erróneamente velocidad máxima, por el hecho de que su valor “coincide” con el máximo de la curva), la velocidad promedio y la raíz cuadrada del valor promedio del cuadrado de la velocidad (más conocida como velocidad cuadrática media) tienen valores distintos. En ocasiones se mide la distribución por medio de un haz de moléculas.

Defectos

- El aspecto de la gráfica de la función de la Fig. 5.14, que habitualmente se llama distribución de MAXWELL-Boltzmann —en honor a James MAXWELL (1831–1879) y a Ludwig BOLTZMANN (1844–1906)—, podría sorprender; es de esperar que las velocidades altas sean raras, pero ¿no debería la probabilidad ser tanto mayor cuanto más pequeña es la velocidad? En general, esta evidente pregunta no se analiza. En realidad el comportamiento del gráfico obedece básicamente a una representación inapropiada; la Fig. 5.14 muestra la distribución del módulo de la velocidad.

Las leyes de la mecánica serían complicadas y difíciles de entender si se formularan con el módulo de las magnitudes mecánicas (velocidad, momentum y fuerza). Si, en el caso tratado no se pregunta por la probabilidad de encontrar una molécula con módulo de velocidad en el intervalo dv , sino de encontrarla con un vector velocidad en el intervalo $dv_x dv_y dv_z$, se obtendría una distribución gaussiana —Johann GAUSS (1777–1855)—, con su máximo en $\vec{v} = 0$, llamado vector cero.

En la Fig. 5.15 se muestra la distribución de probabilidad de un componente del vector velocidad, ver también la ecuación (5.19).

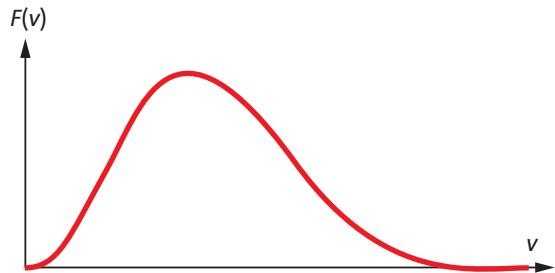


Fig. 5.14 Distribución del módulo de velocidad.

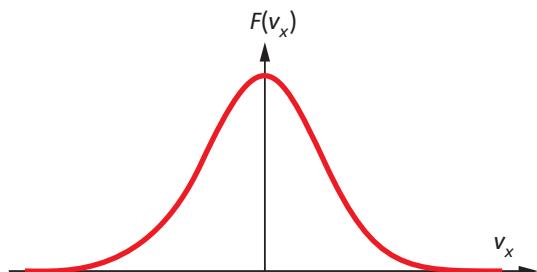


Fig. 5.15 Distribución del componente x de la velocidad

El hecho de que la función tienda a cero cuando $v \rightarrow 0$, si se representa el módulo de la velocidad, se debe a que no se están comparando “volúmenes iguales” del espacio de velocidades, sino intervalos iguales dv . El volumen $4\pi v^2 dv$, correspondiente al intervalo dv , en el espacio de velocidades aumenta (al mantener fijo dv) como el cuadrado del módulo de la velocidad, tal como se observa en la ecuación (5.20) en la Tab. 5.3.

Partícula con vector de velocidad \vec{v}

$$F_1(\vec{v}) = A \cdot e^{-\frac{mv^2}{2kT}} \quad (5.19)$$

Partícula con cantidad de velocidad v

$$F_2(v) = B \cdot v^2 \cdot e^{-\frac{mv^2}{2kT}} \quad (5.20)$$

Flujo de partículas con velocidad v en un haz molecular

$$F_3(v) = C \cdot v^3 \cdot e^{-\frac{mv^2}{2kT}} \quad (5.21)$$

Partícula con energía E

$$F_4(v) = D \cdot \sqrt{E} \cdot e^{-\frac{mv^2}{2kT}} \quad (5.22)$$

Tab. 5.3 Diferentes distribuciones de probabilidad. Las constantes se agruparon en factores A, B, C y D, respectivamente.

Microscópico versus macroscópico

De este modo se “favorecen” las velocidades grandes, desfavoreciendo las pequeñas. En su trabajo original, MAXWELL distingue claramente entre las dos posibilidades de representación.

- A menudo se enfatiza que la gráfica de la Fig. 5.14 no es simétrica. Sin embargo, no se precisa lo que se quiere entender por “simétrico”: que la curva misma no es simétrica o que la curva no se encuentra ubicada simétricamente respecto al eje de ordenadas. Y ya que no es simétrica, se destaca y enfatiza, que los diversos valores característicos del gráfico no coinciden: la velocidad más probable, la velocidad promedio y la raíz cuadrada del valor promedio del cuadrado de la velocidad; se dice que es necesario distinguir entre estos valores. Sin embargo para el estudiante el problema es que no se le aclara en cuál contexto se debe distinguir, generalmente tampoco se le aclara cuál es la necesidad o importancia de hacer dicha distinción, ni qué representa físicamente cada uno de esos valores y para qué sirven. Además, probablemente nunca tendrá la oportunidad de confundir dichos valores.
- Las ecuaciones (5.19) y (5.20) se refieren a la distribución de las velocidades en un gas que se encuentra en equilibrio termodinámico. A menudo se dice o se sugiere que esta distribución también corresponde a partículas (o moléculas) con velocidad v en un haz, y que se puede medir la distribución directamente mediante el haz. Efectivamente, la distribución de velocidades en un haz tiene el mismo aspecto cualitativo que en un sistema en equilibrio, pero la función realmente no es la misma, como se observa en la ecuación (5.21).

Aquí la velocidad que figura antes del llamado factor de Boltzmann se encuentra a la tercera potencia (5.21); por razones geométricas existe un factor v^2 , pero es necesario otro factor v adicional (obteniendo v^3), ya que en un haz una molécula rápida contribuye más a la densidad de corriente que una molécula lenta.

- Se insiste en la importancia de la distribución del módulo de la velocidad, pero el estudiante no reconoce —ni se le dice— para qué se necesita. Es posible calcular la presión con la distribución de los componentes de la velocidad. Para otros fines hace falta la distribución de la energía cinética E_c , que también es similar pero no idéntica a la distribución del módulo de la velocidad, ecuación (5.22).

Esta distribución sirve por ejemplo para responder las siguientes preguntas: cuántas moléculas de un gas tienen suficiente energía para inducir una reacción química exotérmica, o para arrancar un electrón (ionización por choque), o para excitarlo (excitación

por choque), o para escapar del campo gravitacional de la tierra o de otro planeta, o para superar la repulsión electrostática entre los núcleos atómicos (realizar una fusión nuclear) [2]. La única distribución que en general no se necesita es la del módulo de la velocidad.

Origen

- La distribución del módulo de la velocidad se encuentra en un trabajo de MAXWELL [3], y sus resultados fueron simplemente “transmitidos”.
- Tal vez para justificar la idea de que la velocidad de las partículas es una medida de la temperatura.

Eliminación

Se sugiere tratar otras distribuciones que son más interesantes.

Referencias

- [1] W. Döring, *Einführung in die theoretische Physik V, Statistische Mechanik*, Sammlung Göschen, Band 1957, p.16
- [2] H. Vogel, *Physik, Gerthsen-Kneser-Vogel*, 13. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 1977, p.169
- [3] J. C. Maxwell, *Erläuterungen zur dynamischen Theorie der Gase, Kinetische Theorie*, Band I, Wissenschaftliche Taschenbücher, Akademie-Verlag, Berlin, S. G. Brush (Hrsg.), 1970, p.221–222

5.48 Microscópico versus macroscópico

Tema

Según la concepción general la entropía es una magnitud física difícil, de la cual se puede lograr una comprensión verdadera solamente si se tiene un conocimiento de su interpretación microscópica; es una magnitud que caracteriza la distribución de probabilidad del sistema, o bien, de manera más intuitiva, una medida para el orden (o desorden) en la ocupación de los microestados del mismo.

Defectos

- La termodinámica fenomenológica (también llamada clásica) es una teoría, y la termodinámica estadística otra. En general una teoría es una descripción matemática (o modelo matemático) de cierta clase de objetos y fenómenos. Para cada clase de estos es posible construir varias teorías, que pueden distinguirse entre sí dependiendo de la precisión con que des-

criben los fenómenos, pero también de cuáles son los aspectos que describen o representan. Por consiguiente, de manera general, no es posible afirmar que una teoría es correcta y la otra falsa. Tomemos como ejemplo diversas teorías que se emplean para describir la luz: la óptica geométrica, la ondulatoria, la termodinámica de la luz y la electrodinámica cuántica, cada una de las cuales tiene su razón de ser. Nadie afirmaría que ya no es necesaria la óptica geométrica por el hecho de conocer la electrodinámica cuántica. Puede ocurrir que una teoría sea completamente inútil para la descripción de cierto fenómeno; por ejemplo la electrodinámica cuántica no sirve en absoluto cuando se trata del cálculo de una lente, tampoco es necesaria la óptica ondulatoria para dicho fin.

Desde ese punto de vista la termodinámica fenomenológica no es peor que la estadística, y es normal que para ciertos fines ella sea muy útil mientras la estadística no tenga aplicación, y viceversa.

- Se puede describir la naturaleza en diversas escalas de magnitud y complejidad, a veces se argumenta que la descripción se hace más sencilla cuanto más microscópica es. Desde la antigüedad se ha buscado lo indivisible (el “átomo”), lo elemental (las “partículas elementales”), es decir, partículas sin estructura, “partículas puntuales”, pero se ha encontrado que mientras más se penetra en lo microscópico, más se “aleja” la meta. En la dirección opuesta, hacia lo macroscópico, los fenómenos no resultan cada vez más caóticos como se podría suponer, se observa que de la complejidad surgen nuevas leyes sencillas. (En filosofía de la ciencia se habla de *emergencia*.) De dichas consideraciones se puede concluir que no hay razón para pensar que la descripción microscópica sea más “fundamental” que la macroscópica. La termodinámica fenomenológica no es menos fundamental que la estadística.
- En los niveles de educación media y tecnológica, e inclusive en los cursos básicos de Termodinámica en la universidad, la termodinámica fenomenológica es más apropiada que la estadística. Si se introduce la entropía adecuadamente resulta una magnitud particularmente intuitiva, cuyo trato puede ser tan sencillo que un niño pueda entenderlo bastante bien. Rápidamente se logra una descripción sencilla de los fenómenos térmicos más importantes, descripción que también puede ser cuantitativa: contenido calórico, conducción térmica, transiciones de fase, máquinas térmicas y eficiencia térmica, entre otros. Así, los tres principios de la termodinámica se convierten en algo sobrentendido.

- Nadie pretendería que para comprender un circuito eléctrico con una resistencia sea necesario conocer la descripción microscópica de la resistividad, es decir, el mecanismo de interacción electrón-fonón. Nadie iniciaría un curso de mecánica tratando la interpretación o causa microscópica de la masa mediante el campo de HIGGS —Peter HIGGS (1929–...)—. El origen microscópico del hecho que partículas como electrones o quarks (y por consiguiente protones) tengan la masa que tienen, es un problema todavía no definitivamente resuelto por la ciencia. Por consiguiente se podría argumentar que la mecánica se encuentra todavía en un estado muy “incipiente” mientras no se tenga una explicación de los valores de la masa de dichas partículas. Sin embargo, esto no impide emplear la física newtoniana y concebir la masa como medida de inercia y gravedad; se mide el valor de la masa del electrón o se toma de una tabla sin preguntar el porqué, ni poner en duda sus valores.

Origen

Reducir los fenómenos al campo microscópico y mecánico era para muchos científicos del siglo 19 el programa de la ciencia. Existían buenos argumentos para considerar dicho programa razonable, parecía que todo se ajustaba a él. La mecánica había logrado un desarrollo y “estado” casi perfecto, y tenía un adelanto de unos cien años respecto a otros campos de la Física. Así que parecía normal buscar para todos los fenómenos una explicación mecánica, lo cual en principio fue exitoso. Para MAXWELL, su electrodinámica era una teoría mecánica del éter; con la teoría cinética de los gases y la física estadística los fenómenos térmicos se reducían a fenómenos mecánicos. Parecía entonces que todo suceso físico podía reducirse a la mecánica, es decir, al movimiento y a la interacción de pequeñas partículas. Solo después de 1900 se comprobó que las teorías “no-mecánicas” eran más robustas, y que las descripciones mecánicas contenían gran parte de ficción.

Eliminación

Introducir la entropía en la termodinámica del mismo modo como se introduce la masa en la mecánica: como magnitud que se mide directamente y a la cual se asocia una idea intuitiva sencilla. Así como la masa es una medida para la inercia y la gravedad, la entropía es una medida para el contenido de calor. La masa así introducida es fundamento sólido para toda la mecánica clásica hasta el nivel universitario, y para la mecánica técnica, o la mecánica para ingenieros. De manera similar, la entropía introducida macroscópicamente como medida del calor puede ser una base sólida para toda la termodiná-

El modelo de partículas

mica clásica hasta el nivel universitario y gran parte de la termodinámica técnica.

5.49 El modelo de partículas

Tema

En la escuela se introduce el modelo de partículas. Se puede encontrar en casi todos los libros de texto de secundaria y parece ser un tema importante. ¿Qué se entiende por modelo de partículas? He aquí algunas afirmaciones marcadas como sentencias:

- 1 Libro de física, (para alumnos entre 11 y 12 años):
 - Modelo de partículas**
 - 1. Todas las sustancias están formadas por partículas.
 - 2. Las partículas están en constante movimiento.
 - 3. Hay fuerzas entre las partículas.
- 2 Libro de física, (para alumnos entre 13 y 14 años):
 - Modelo para cuerpos gaseosos: los gases están formados por partículas que se mueven libremente en el espacio.**
- 3 Libro de física para Universidad
 - Concepción de un modelo para gases ideales:**
 - 1 Las partículas se comportan de forma totalmente elástica en las colisiones.
 - 2 Excepto durante la colisión, las partículas no ejercen ninguna fuerza entre sí.
 - 3 En la pared del recipiente, las partículas rebotan elásticamente como esferas.
 - 4 En el movimiento desordenado de las partículas, todas las direcciones de movimiento son equivalentes.
 - 5 El volumen propio de todas las partículas juntas es insignificante comparado con el volumen del gas.

Defectos

En primer lugar, dos aclaraciones sobre términos: ¿qué es una partícula? y ¿qué es un modelo?

La partícula: en sentido coloquial, y también en el científico y técnico, es un objeto muy pequeño. En general, son muchas. Ejemplo típico, una partícula de polvo, una partícula de hollín. (En contraste con el no-diminutivo “parte”: una parte no es un objeto, sino una “porción” de algo, de un objeto).

Y en cuanto al término modelo: siempre se refiere al modelo de otra cosa. Sea B un modelo de A. A esta formado por elementos entre los que existen ciertas relaciones. Dado que B es un modelo de A, B también debe

estar formado por elementos vinculados por relaciones. Los elementos y las relaciones de A se “traducen” en los de B; se puede crear una especie de diccionario. Se pueden hacer inferencias en B y traducirlas en inferencias en A con la ayuda del diccionario. Si tales conclusiones son a menudo correctas en A, el modelo es bueno; si son a menudo erróneas, el modelo no es apropiado. En cualquier caso, el original y el modelo no coinciden en la mayoría de las propiedades. No existen modelos correctos o incorrectos, sino más o menos útiles.

Ahora vamos a las citas. No está claro por qué acá se utiliza el término “modelo”. ¿Qué (o quién) es un modelo de qué (o quién)? ¿Se supone que las partículas son el modelo de los átomos y las moléculas? Habría que explicar por qué un átomo no es una partícula en sí. Además, los textos dicen sistemáticamente que los átomos y las moléculas mismas son las propias partículas.

Un uso apropiado del término modelo puede encontrarse, por ejemplo, en el modelo atómico de BOHR —Niels Henrik David BOHR (1885–1962)—. El átomo (A) está construido y se comporta en algunos aspectos como un sistema planetario (B). En la mayoría de las propiedades, el átomo y el sistema planetario no se parecen en absoluto, pero en algunas de las propiedades que son importantes, son muy similares.

En un libro de química el autor se esforzaba por justificar el nombre de modelo, pero de una manera que no se acaba de entender:

- Sin embargo, las partículas más pequeñas no son visibles sin instrumentos...
- Este modelo es, por tanto, una ayuda a la reflexión. Es un modelo de pensamiento sobre la posible estructura de las sustancias.
- En el modelo de partículas, se supone que las partículas de las sustancias son muy parecidas a pequeñas esferas...

Ahora bien, la invisibilidad no es ciertamente una razón para hablar de un modelo. El hecho de que no se pueda ver el aire tampoco presupone introducir un modelo visible del mismo. ¿Y dónde está la ayuda para entender? ¿Se debe creer que “en realidad” las sustancias no están formadas por átomos? ¿Los átomos son solo una ayuda para pensar?

Tiene sentido hablar de un “modelo” de partículas, concretamente cuando los objetos de los que se habla ya no tienen las propiedades esenciales de las partículas coloquiales: cuando a temperaturas muy bajas la incertidumbre espacial de los átomos se vuelve significativamente mayor que su diámetro, cuando dos (o más) “partículas” están entrelazadas de modo que en realidad solo se puede hablar de una partícula deslocalizada, o

cuando las partículas tienen tan pocos grados de libertad internos que ya no se pueden distinguir dos “partículas”, de modo que tras un intercambio de estas se presenta el mismo estado que antes.

Ahora bien, se trata de estados y procesos que ciertamente no se tienen en mente al introducir el “modelo de partículas” en la escuela. A propósito, cuando se tratan posteriormente estos fenómenos, que cuestionan algo el concepto de partícula, el término partícula se vuelve a utilizar con una sorprendente falta de preocupación.

Pero ¿es malo que de vez en cuando una palabra no encaje del todo? El problema es que nuestros libros de texto contienen muchas formulaciones que sugieren que en ellas hay algo profundo escondido. Es una de las muchas pequeñas cosas que, en conjunto, hacen que la física sea tan poco atractiva; que la hacen parecer más complicada de lo que en realidad es. Lo que se transmite a los alumnos es que lo importante no es entender, sino poder repetir.

Origen

El término modelo de partículas proviene probablemente de los planes de estudio. No sabemos exactamente cómo llegó allí. No es de extrañar que los autores de los libros de texto se sientan algo confundidos con el término; tienen que escribir algo al respecto, pero no saben exactamente qué. ¿O tal vez piensan que la palabra suena tan bonita, tan profundamente epistemológica?

Eliminación

Nosotros, los profesores, los responsables de los planes de estudio, los autores de los libros de texto tenemos en gran parte la culpa de que la física sea una de las asignaturas menos queridas por los estudiantes. Lo que se necesita es el desarme. La eliminación en este caso concreto es sencilla: omitir el término modelo. De todos modos, es conveniente que los alumnos aprendan primero física. En caso de que exista el tiempo requerido en la escuela superior, se puede entonces hacer con gusto algo de metafísica y epistemología.

6 ELECTRODINÁMICA

6.1 Simetrías en el electromagnetismo

Tema

El electromagnetismo es rico en estructuras internas, simetrías o analogías. Estas se expresan en los fenómenos y se hacen visibles en la descripción teórica. Algunos ejemplos:

- COULOMB —Charles-Augustin de COULOMB (1736–1806)— descubrió y demostró lo que hoy se conoce como ley de COULOMB tanto para los cuerpos cargados eléctricamente como para los polos magnéticos.
- Hay dos fuerzas que actúan sobre un cuerpo cargado eléctricamente en movimiento, que a menudo se presentan como análogas entre sí: una es proporcional a la intensidad del campo eléctrico \vec{E} , la otra, la fuerza de LORENTZ —Hendrik Antoon LORENTZ (1853–1928)—, es proporcional a la inducción magnética \vec{B} .
- En ingeniería eléctrica, el condensador y la bobina, y por tanto también la capacidad C y la inductancia L , desempeñan papeles análogos. Esto queda claro en el caso del circuito eléctrico oscilante, por ejemplo.

Defectos

Las estructuras que aquí se consideran se basan en el hecho de que las magnitudes físicas, así como las relaciones matemáticas entre dichas magnitudes, se corresponden. Si se sustituyen las magnitudes que aparecen en una ecuación según ciertas reglas de “traducción” que caracterizan a la analogía, se obtiene una ecuación que de nuevo es correcta.

Si uno no es consciente de que no existe una sola analogía, inevitablemente entrará en conflictos. ¿Cuál es la magnitud magnética análoga a \vec{E} ? ¿Es \vec{B} o es \vec{H} ? A veces parece ser una, a veces la otra. A veces se tiene la impresión de que se defienden puntos de vista ideológicos: La intensidad de campo magnético “correcta” o “real” es \vec{B} (o es \vec{H}); en algunos libros de texto, la inducción magnética pasa a llamarse intensidad de campo magnético sin más.

El problema solo se resuelve cuando nos damos cuenta de que se trata de analogías diferentes y que conocemos ambas (o en nuestro caso las tres). Entonces solo puede ser una cuestión de cuál es la apropiada para el problema concreto.

Con la ayuda de tres tablas recordamos las tres analogías del electromagnetismo. Cada una contiene tanto

Magnitudes eléctricas vectoriales	Magnitudes magnéticas vectoriales
intensidad del campo eléctrico \vec{E}	intensidad del campo magnético \vec{H}
densidad de flujo eléctrico \vec{D}	inducción magnética \vec{B}
polarización \vec{P}	magnetización \vec{M}
Carga eléctrica	Carga magnética
carga total Q	carga total Q_m
Densidad de carga	Densidad de carga
carga total ρ	carga total ρ_m
carga libre ρ_F	carga libre $\rho_{mF} = 0$
carga de polarización ρ_P	carga de polarización ρ_{mP}
Primera ecuación de MAXWELL	Segunda ecuación de MAXWELL
$\text{div } \vec{D} = \rho_F$	$\text{div } \vec{B} = \rho_{mF} = 0$
$\text{div } \vec{P} = -\rho_P$	$\text{div } \vec{M} = -\rho_{mP}$
$\epsilon_0 \text{ div } \vec{E} = \rho_F + \rho_P$	$\mu_0 \text{ div } \vec{H} = \rho_{mF} + \rho_{mP} = \rho_m$
Densidad de corriente eléctrica	Densidad de corriente magnética
corriente de conducción \vec{j}_L	corriente de conducción $\vec{j}_{mL} = 0$
corriente de desplazamiento $\vec{j}_V = \vec{D}$	corriente de desplazamiento $\vec{j}_{mV} = \vec{B}$
Tercera ecuación de MAXWELL	Cuarta ecuación de MAXWELL
$\text{rot } \vec{E} = -\vec{j}_{mL} - \dot{\vec{B}} = -\dot{\vec{B}}$	$\text{rot } \vec{H} = \vec{j}_L + \dot{\vec{D}}$
Leyes de fuerza	Leyes de fuerza
$\vec{F} = Q \cdot \vec{E}$	$\vec{F} = Q_m \cdot \vec{H}$
$ \vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$	$ \vec{F} = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{Q_{m1} \cdot Q_{m2}}{r^2}$

Densidad de corriente de energía

$$\vec{j}_E = \vec{E} \times \vec{H}$$

Tab. 6.1 Analogía en la que \vec{E} y \vec{H} se corresponden. La carga eléctrica libre y la corriente de conducción eléctrica no tienen un análogo magnético.

Fuentes del campo eléctrico	Fuentes del campo magnético
densidad de carga eléctrica ρ	densidad de corriente eléctrica \vec{j}
Magnitud del campo vectorial eléctrico	Magnitud del campo vectorial magnético
intensidad del campo eléctrico \vec{E}	inducción magnética \vec{B}
Magnitud tipo potencial	Magnitud tipo potencial
potencial eléctrico φ	potencial vectorial magnético \vec{A}
Derivada del potencial	Derivada del potencial
$\vec{E} = -\text{grad } \varphi$	$\vec{B} = \text{rot } \vec{A}$
Leyes de fuerza	Leyes de fuerza
$\vec{F} = Q \cdot \vec{E}$	$\vec{F} = I \cdot (\vec{s} \times \vec{B})$ (fuerza de LORENTZ)
$ \vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$	$ \vec{F} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 \cdot I_2}{r}$ (dos corrientes paralelas)

Tab. 6.2 Analogía en la que \vec{E} y \vec{B} se corresponden.

las magnitudes como las ecuaciones que se corresponden

1. La analogía $\vec{E} - \vec{H}$

Se manifiesta en las ecuaciones de MAXWELL —James Clerk MAXWELL (1831–1879)—, Tab. 6.1.

Es particularmente útil para el tratamiento de la magnetostática, ya que el campo \vec{H} tiene fuentes y, por lo tanto, se puede dibujar una imagen de la línea del campo \vec{H} con la misma facilidad que una imagen de las líneas del campo \vec{E} en la electrostática. Es bien sabido que los estudiantes (y no solo ellos) tienen dificultades para dibujar líneas de campo magnético [1].

2. La analogía $\vec{E} - \vec{B}$

Se basa en la representación del electromagnetismo con cuadrivectores. La componente temporal de un cuadrivector corresponde a las tres componentes espaciales. Al igual que el tiempo y la posición, o la energía y el momentum, la densidad de carga eléctrica y la densidad de corriente, así como el potencial eléctrico φ y el potencial vectorial magnético \vec{A} se corresponden entre sí. La derivada espacial de los potenciales, es decir, el gradiente de φ y la rotación de \vec{A} dan como resultado las dos

Magnitudes físicas
carga eléctrica $Q \Leftrightarrow$ flujo magnético $-\Phi$
tensión eléctrica $U \Leftrightarrow$ corriente eléctrica I
capacidad $C \Leftrightarrow$ inductancia L
resistencia eléctrica $R \Leftrightarrow$ conductancia eléctrica G
energía $E \Leftrightarrow$ energía E
corriente de energía $P \Leftrightarrow$ corriente de energía P
Ecuaciones
$I = \frac{dQ}{dt} \Leftrightarrow U = -\frac{d\Phi}{dt}$
$P = U \cdot I \Leftrightarrow P = U \cdot I$
$Q = C \cdot U \Leftrightarrow \Phi = L \cdot I$
$E = \frac{C}{2} U^2 \Leftrightarrow E = \frac{L}{2} I^2$
Elementos eléctricos
condensador \Leftrightarrow bobina
alimentación a tensión constante \Leftrightarrow alimentación a corriente constante
Reglas topológicas
conexión en serie \Leftrightarrow conexión en paralelo
cortocircuito \Leftrightarrow circuito abierto

Tab. 6.3 Importante analogía para la ingeniería eléctrica. No solo se corresponden magnitudes físicas y ecuaciones, sino también componentes técnicos y reglas topológicas.

magnitudes vectoriales \vec{E} y \vec{B} , respectivamente, con las que se formulan las leyes de fuerza, Tab. 6.2.

3. La analogía $U - I$

Es particularmente útil en la ingeniería eléctrica. Es una variante de la analogía $\vec{E} - \vec{H}$. Sin embargo, aquí la correspondencia se presenta “de forma cruzada”: la carga eléctrica no corresponde a la carga magnética, sino al flujo magnético, Tab. 6.3.

Esta analogía es de un tipo diferente a las dos descritas anteriormente. Aquí, un circuito corresponde a otro, y la tabla de “traducción” se aplica tanto de izquierda a derecha como de derecha a izquierda. En este contexto, se habla de un dualismo. Por ejemplo, se sustituye la tensión por la corriente y la corriente por la tensión, el condensador por la bobina y la bobina por el condensador, o la conexión en paralelo por la conexión en serie y la conexión en serie por la conexión en paralelo, etc.

Déficit y exceso de electrones

Esto implicaría hacer corresponder el flujo eléctrico con la carga magnética. Los componentes técnicos correspondientes serían el “condensador magnético”, así como una bobina, por cuyo alambre fluye una “corriente magnética”.

Como no hay carga magnética libre ni corrientes de conducción magnética (sino solo carga ligada y corrientes de desplazamiento), ambas componentes carecen de interés.

Origen

La analogía \vec{E} - \vec{H} era la obvia debido a la electrodinámica clásica en la formulación maxwelliana. Con la relatividad y el espacio-tiempo de MINKOWSKI —Hermann MINKOWSKI (1864–1909)—, la descripción con cuadrivectores llegó a la física, y con ella se popularizó la analogía \vec{E} - \vec{B} . La tercera analogía debe su popularidad al hecho de que es particularmente útil en ingeniería eléctrica y, además, es la base de una analogía entre la ingeniería eléctrica y la mecánica (donde el condensador corresponde al resorte, la bobina al cuerpo inercial y la resistencia al amortiguador de fricción de STOKES —George Gabriel STOKES (1819–1903)— [2]).

La disputa sobre si \vec{H} o \vec{B} es la más adecuada, más correcta o verdadera puede tener dos causas:

- Se conoce una de las analogías, la otra es desconocida.
- Se identifica el sistema físico “campo” con la magnitud física “intensidad de campo”, es decir, se ignora el hecho de que las magnitudes físicas son invenciones o construcciones humanas.

Incluso el gran SOMMERFELD —Arnold Johannes Wilhelm SOMMERFELD (1868–1951)— parecía opinar que la elección de la representación es una cuestión de acierto o error, y no simplemente de conveniencia [3]:

“La ecuación de inducción de FARADAY-MAXWELL muestra que la inducción magnética es una magnitud de intensidad al mismo tiempo que la intensidad de campo eléctrico \vec{E} ; \vec{B} , y no \vec{H} , merece el nombre de intensidad de campo magnético [...]”

Que \vec{B} pertenece a \vec{E} y \vec{H} a \vec{D} , se desprende de la teoría de la relatividad, donde las magnitudes $c\vec{B}$ y $-i\vec{E}$, por un lado, y las magnitudes \vec{H} y $-i\vec{cD}$, por otro, están acopladas cada una a un sextivector (tensor antisimétrico). ”

Eliminación

- Sobre todo, nada de dogmatismo; nada de afirmaciones sobre qué magnitud es la verdadera intensidad de campo.
- Explicar a los alumnos que existen diferentes analogías en el electromagnetismo.

Referencias

- [1] Véase 6.8 *El campo de los imanes permanentes*, p.194
- [2] Véase 6.11 *La inductancia*, p.199
- [3] A. Sommerfeld, *Elektrodynamik*, 4. Auflage, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, Leipzig, 1964, Vorwort, S. VI

6.2 Déficit y exceso de electrones

Tema

Los bornes de una fuente de alimentación o de una batería son llamados polo “positivo” y polo “negativo” y se los caracteriza con los símbolos “+” y “-”, respectivamente. Se dice que en el polo positivo hay exceso de electrones y en el negativo déficit.

Defectos

Se presentan varias incongruencias, existiendo un vínculo entre ellas. Se mostrará que:

- es inconveniente caracterizar los bornes con los símbolos “+” y “-”,
- en general es inapropiado, y a veces incorrecto, hablar de un exceso o déficit de electrones.

Los signos más y menos sugieren que alguna magnitud tiene valores positivos o negativos en los bornes. ¿Existe tal magnitud?

En principio se podría pensar en la carga eléctrica. ¿Cuál es la carga en los bornes de una batería, incluidos los electrodos? Su valor depende por un lado de la capacidad interna C_B de la batería misma, es decir, se considera la batería como condensador. En este caso, si U_B es la tensión eléctrica de la batería, la carga en los polos (incluidos los conductores en el interior de la batería) es:

$$Q = C_B \cdot U_B, \text{ o } Q = -C_B \cdot U_B,$$

respectivamente, a condición de que la capacidad entre bornes y tierra sea 0.

Sin embargo, la hipótesis de que no existe capacidad borne tierra no es realista; teniendo en cuenta dicha capacidad se obtiene una carga adicional en los bornes. En general, la batería entera se encuentra a un potencial cualquiera respecto a tierra, de tal forma que la carga en cada uno de los bornes depende de las capacidades de cada uno de ellos respecto a tierra, y de la correspondiente diferencia de potencial. Por consiguiente, no es

possible afirmar, en general, que el llamado polo positivo tenga carga positiva y que el negativo esté cargado negativamente. Cada uno puede tener carga positiva o negativa.

Otro candidato, en el cual se podría pensar al buscar una magnitud que tome valores positivos o negativos en los dos polos, es el potencial eléctrico. Sin embargo, de la reflexión precedente se deduce que el polo positivo no tiene necesariamente un potencial positivo y el negativo no tiene obligatoriamente que tener potencial negativo; además el punto con potencial cero podría ser elegido arbitrariamente.

Se puede concluir que la caracterización de los polos con los símbolos “+” y “-” puede ser causa y origen de confusiones y falsos conceptos.

La afirmación según la cual en el polo positivo hay déficit de electrones y en el negativo exceso, en general es falsa. Déficit de electrones significaría carga positiva, pero se acaba de ver que el polo positivo no está necesariamente cargado positivamente.

Incluso cuando se ajusta el circuito, o el punto de referencia, de tal forma que el potencial del “polo positivo” sea positivo y el del “polo negativo” sea negativo, ó, que el polo más tenga carga positiva y el menos carga negativa —una cosa no garantiza la otra—, sería inapropiado emplear este hecho para caracterizar los polos.

La capacidad C_B de una fuente de alimentación o batería es del orden de 10^{-10} F, con una tensión del orden de 1 V, se obtendría una carga de 10^{-10} C. Al hablar de exceso de electrones se sugiere que dicho exceso está relacionado con la carga que fluye en la batería cuando el circuito está cerrado, sin embargo las cargas que se observan en este caso son mayores en varios órdenes de magnitud. La carga que atraviesa la batería en un segundo, en caso de que se encuentre conectada a un bombillo es del orden de 10^{10} veces mayor que la carga de exceso o déficit de los bornes.

Lo inapropiado de esta manera de presentar las cosas se ve más claramente al comparar la batería en el circuito eléctrico con una bomba de agua en un circuito hidráulico. Una batería a la cual nada está conectado corresponde a una bomba de agua que funciona pero cuyas bridas de entrada y salida están cerradas. Al hablar de un exceso o déficit de electrones en el caso de la batería, se debería hablar de un exceso o déficit de agua en el tubo de entrada o salida de la bomba de agua. En este caso dicha forma de expresarse es más justificada que en el caso de la batería, ya que el agua es más compresible que la carga eléctrica. Sin embargo, es claro que el exceso o déficit de agua no tiene nada que ver con el funcionamiento de la bomba, la cual funcionaría igual al ser el agua completamente incompresible. Lo mismo

es válido para la batería. Nada esencial cambiaría al tener los bornes una capacidad de 0 F en lugar de 10^{-10} F; la batería seguiría funcionando.

Origen

La mayoría de los conceptos inapropiados analizados tuvieron cierta justificación en otra época. Sin embargo, nos encontramos ante un caso cuya presentación fue incongruente desde el comienzo. La convención de llamar a los polos “positivo” y “negativo” era plausible y se la adoptó sin mayores análisis ni cuestionamientos.

Eliminación

Caracterizar los bornes por “alto” y “bajo” en lugar de “positivo” y “negativo”. Dicha caracterización se refiere al potencial de la fuente en el caso de circuito abierto, como es costumbre en la electrónica digital, donde se emplea H de “high” y L de “low” en los bornes. Una alternativa sería caracterizar la fuente en el estado de corto circuito, en cuyo caso sería apropiado llamar a los bornes “entrada” y “salida” respectivamente. Debe evitarse hablar de exceso y déficit de electrones.

6.3 Dos tipos de carga eléctrica

Tema

Se encuentran formulaciones que afirman que existen dos tipos de carga eléctrica, o que cargas similares se repelen y cargas diferentes se atraen.

Defectos

Esta manera de hablar sugiere que se trata de dos magnitudes físicas distintas, Q_A y Q_B por ejemplo. Obviamente se puede describir el estado electrostático de un cuerpo indicando cuánto contiene de Q_A y cuánto de Q_B , pero las magnitudes Q_A y Q_B tienen una propiedad desagradable: no son magnitudes conservadas (conservativas). Sin embargo, la producción de una está vinculada a la producción de la otra; si se produce cierta cantidad de Q_A debe producirse simultáneamente la misma cantidad de Q_B . Matemática y conceptualmente es mucho más sencillo utilizar solamente la magnitud “carga eléctrica” Q que puede admitir valores positivos y negativos. Para Q es válida la ley de conservación.

La situación es más inapropiada en lo referente a los polos magnéticos. Mientras en el caso de la electricidad por lo menos los nombres (“positiva” y “negativa”) aluden a la relación matemática entre los dos “tipos” de carga, los nombres “norte” y “sur” para los polos magnéticos no hacen ninguna referencia al hecho de que se

El sentido convencional de la corriente eléctrica

trata de la descripción de una única magnitud extensiva. Dichas denominaciones sugieren, erróneamente, que los dos polos de un imán tienen dos calidades distintas, entre las cuales no hay una transición continua, así como ocurre, por ejemplo, con las calidades masculino y femenino para clasificar seres vivos.

Origen

En los primeros intentos para describir los fenómenos electrostáticos se discutió sobre la existencia de uno o dos fluidos eléctricos; un problema similar se presentaba con respecto al magnetismo. La teoría de los dos fluidos se ha mantenido hasta el día de hoy en el lenguaje científico.

Eliminación

Evitar hablar de dos tipos de carga eléctrica; existe una sola magnitud que puede tener valores positivos o negativos. Llamar a los polos de un imán el polo positivo y el polo negativo. En lugar de hablar de cargas similares y diferentes se debe hablar de cargas (eléctricas y magnéticas) de signos iguales u opuestos.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{j} = 0.$$

Esta ecuación plantea que la densidad de carga ρ en un punto disminuye, si en dicho punto la divergencia de la densidad de corriente \vec{j} es positiva, es decir, la carga en una región disminuye cuando una corriente sale de dicha región. Se ve que la dirección del vector \vec{j} está definida cuando se ha determinado el signo de la carga eléctrica, y por lo tanto el de la densidad de carga. Es posible cambiar la definición de la dirección de la corriente, pero eso implica cambiar la definición del signo de la carga eléctrica. Es decir, cuando se hable de una convención respecto a la dirección de la corriente no se quiere significar que dicha situación se deba a la convención sobre el signo de la carga, sino que es una convención independiente de esta última.

Origen

El sentido de la corriente, del cual se dice que esta basado en una convención, no es la dirección del vector \vec{j} , sino la dirección de la velocidad de desplazamiento \vec{v} de los portadores de carga. Las dos magnitudes vectoriales están relacionadas por:

$$\vec{j} = \rho \cdot \vec{v}.$$

Aquí ρ es la densidad de carga de los portadores de carga “libres”. La ecuación muestra que se obtiene la misma densidad de corriente con portadores positivos ($\rho > 0$) que se mueven en una dirección o portadores negativos ($\rho < 0$) en dirección contraria. A propósito, la dirección de \vec{j} coincide con la densidad de la corriente de masa. Por lo tanto se puede caracterizar el error en la cita inicial de la siguiente forma: se confunde la corriente de masa con la corriente de carga.

Eliminación

Se debe hacer una distinción meticulosa entre la carga y los portadores de carga, es decir, distinguir entre dos “movimientos” con sus direcciones: el movimiento de la carga y el de los portadores de carga. Mientras la carga fluye al exterior de la fuente de energía eléctrica, del potencial eléctrico alto al bajo, los portadores se mueven en una u otra dirección según el signo de su carga.

Para explicarlo en clase se puede emplear el siguiente “experimento”: hacer pasar a lo largo de una fila de alumnos fichas rojas y azules desde cada uno de los extremos de la misma, cada alumno las pasa a su vecino asumiendo que cada ficha roja representa un valor de \$ 100 y cada ficha azul de -\$ 100. En un momentum inicial cada alumno, aparte de los dos situados en los

6.4 El sentido convencional de la corriente eléctrica

Tema

La dirección de la corriente eléctrica está basada en una convención. Históricamente la corriente eléctrica se definió como un flujo de cargas positivas y se fijó la dirección de circulación de la corriente como la correspondiente al flujo de cargas desde el polo positivo al negativo. Posteriormente se observó que en los metales los portadores de carga son negativos (los electrones), los cuales fluyen en dirección contraria a la convencional.

Defectos

En Física, cuando en un fenómeno aparece una dirección, en general esta se describe por un vector. El vector que describe la dirección de la corriente eléctrica es el vector densidad de corriente eléctrica, así como el vector densidad de corriente de energía nos indica la dirección de la corriente de energía, o el vector densidad de corriente de masa define la dirección de la mencionada corriente.

La dirección del vector densidad de corriente eléctrica no está basada en una convención, sino que resulta inequívocamente de la ecuación de continuidad para la carga eléctrica, que vincula la densidad de carga eléctrica ρ y la densidad de corriente eléctrica \vec{j} :

extremos de la fila, tiene una ficha roja y una azul, es decir, posee un valor monetario de \$0. Luego, para realizar corrientes o transportes de valor monetario a través de la fila desde el alumno del extremo izquierdo hasta el del extremo derecho, se procede —con la ayuda de un metrónomo (o “ticómetro”)— así: a cada golpe del metrónomo cada estudiante pasa su ficha roja al vecino de su derecha, de tal forma que cada uno, exceptuando los extremos, quedará con un monto de \$0. Como resultado el alumno del extremo izquierdo se vuelve cada vez más pobre y el del extremo derecho más rico. Después se realiza el transporte de derecha a izquierda con el siguiente método: a cada golpe del metrónomo cada alumno pasa su ficha azul a su vecino de la izquierda, nuevamente todos los alumnos (menos los de los extremos) quedan con \$0, y de nuevo el del extremo izquierdo se vuelve más pobre y el del extremo derecho más rico. Finalmente un tercer método: a cada golpe cada alumno pasa simultáneamente su ficha roja a su vecino de la derecha y su ficha azul a su vecino izquierdo. En estas tres realizaciones de la corriente, se presenta transporte de valor monetario hacia la derecha mientras los portadores del valor se desplazaron en una u otra dirección.

6.5 Polos magnéticos

Tema

- Los extremos de un imán, donde se halla la máxima fuerza de atracción se llaman polos, estos se pueden “visualizar” con limaduras de hierro; a veces se pinta el polo norte de rojo y el sur de verde.
- La descripción de la interacción entre los polos magnéticos se limita a afirmaciones sobre atracción y repulsión, es decir, a la dirección de la fuerza.

Defectos

La magnetización es un campo vectorial que describe la densidad de los dipolos magnéticos, es decir, el momentum dipolar magnético por unidad de volumen. Los polos de un imán son los lugares donde las líneas del campo de magnetización empiezan o terminan; la magnitud que describe un polo cuantitativamente es la carga magnética ligada Q_m [1]. Dicha carga es el análogo de la carga eléctrica, más exactamente de la carga eléctrica ligada, es decir, la carga que aparece en la superficie de un dieléctrico polarizado. En la mayoría de los textos no se introduce la carga magnética, pero sin ella resulta difícil describir cuantitativamente un imán permanente.

Sin carga magnética no es posible formular la relación

$$\vec{F} = Q_m \cdot \vec{H},$$

que corresponde a la relación electrostática

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{E},$$

así como tampoco la ley de COULOMB —en honor a Charles de COULOMB (1736–1806)— para polos magnéticos. Utilizando la carga magnética se puede formular el importante teorema que dice que la carga magnética total de un cuerpo o de una partícula siempre es cero [2]. Sin carga magnética solo queda la pálida constatación de que un imán tiene dos polos distintos.

En un imán recto las líneas de polarización empiezan y terminan en las caras de los extremos, lo cual significa que la carga magnética está ubicada en dichas superficies, es decir, que los polos magnéticos son las caras de los extremos. Sin embargo, estas no coinciden con los sitios (regiones) donde se adhieren las limaduras de hierro. Las limaduras adhieren en partes de la superficie donde la intensidad del campo \vec{H} es grande; las líneas de campo salen de la superficie no solamente en los polos, sino también en las superficies laterales del imán [3]. Por consiguiente, las limaduras no son un indicador para los polos magnéticos sino para la intensidad del campo magnético; la confusión se acentúa cuando se pinta una mitad del imán en rojo y la otra en verde, que induce a pensar que esos son los polos del imán. No sobra decir que lo dicho se refiere a un imán perfecto, es decir, un imán de un material magnéticamente “duro”, en el cual no hay magnetismo inducido.

Origen

Antaño el concepto de carga magnética figuraba en todos los libros de electricidad y magnetismo, desapareciendo posteriormente de muchos libros (más no todos), debido a un malentendido. Del hecho de que no se observan monopolos magnéticos aislados se concluyó que no es adecuado utilizar una magnitud que permita describir distribuciones de carga magnética. Sin embargo, las magnitudes físicas no son algo que se encuentre en la naturaleza, son construcciones de la razón humana; utilizar o no utilizar una magnitud es solo cuestión de conveniencia. Introducir la carga magnética es conveniente, porque con ella se puede, por ejemplo, formular la ley de COULOMB para el magnetismo.

El hecho de que generalmente se suele analizar la ley de COULOMB electrostática y no la magnetostática (que

La curva de histéresis

es más fácil de verificar), muestra que los contenidos de la enseñanza de la Física son algunas veces determinados por convenciones más que por argumentos racionales.

Eliminación

Introducir la magnitud extensiva “carga magnética”, y formular el siguiente principio: “La carga magnética total de un imán es igual a cero.” La validez de dicha aseveración se puede corroborar con un sencillo experimento —propuesto por MAXWELL [4]—: se dota un pequeño imán de barra con piezas de corcho de modo que pueda flotar en el agua. En el agua el imán se orientará en dirección norte-sur sin realizar un movimiento de translación en ninguna dirección.

De otro lado, el hecho de que al partir un imán surjan dos nuevos polos, es otra consecuencia del mencionado teorema. También, al unir dos imanes de herradura idénticos el uno al otro, se nota que el objeto resultante no muestra efectos magnéticos en el exterior, es decir, no atrae piezas de hierro. (Para este experimento demostrativo se requieren dos imanes muy similares. Debido a que el empleo frecuente de un imán hace que su magnetización se modifique, es conveniente reservar dos imanes exclusivamente para la práctica mencionada.)

Referencias

- [1] W. Macke, *Elektromagnetische Felder*, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig 1960, S.77
- [2] “En cada imán la cantidad total de magnetismo es algebraicamente igual a cero.” En: J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*. v.2. 3rd. edition (edition 1954). New York: Dover Publications. p.4.
- [3] A. Sommerfeld, *Vorlesungen über Theoretische Physik*, Band III, Elektrodynamik, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig 1964, S.78
- [4] J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*. v.2. 3rd. edition (edition 1954). New York: Dover Publications. p.4–5.

6.6 La curva de histéresis

Tema

Al estudiar las “propiedades magnéticas de la materia” generalmente se introducen los fenómenos de diamagnetismo, paramagnetismo y ferromagnetismo, presentándose como característico para las sustancias ferromagnéticas el efecto de histéresis. También se introduce el concepto de magnetismo remanente.

Defectos

No solo los alumnos de colegio, sino también los estudiantes y profesores de Física, son menos “expertos” en los fenómenos magnetostáticos que en los electrostáticos, a pesar de ser más fácil experimentar con las interacciones magnétostáticas que con las electrostáticas. Una de las razones de esta deficiencia es que generalmente el ferromagnetismo se introduce en el contexto de la curva de histéresis; en los estudiantes queda la impresión de que el comportamiento de los imanes está determinado por esta complicada curva.

En realidad la histéresis se puede concebir como expresión de una “imperfección” de los materiales magnéticos. Existen dos clases de materiales ideales respecto a su magnetismo: los magnéticamente blandos y los duros. Los materiales blandos ideales no dejan penetrar en su interior el campo magnético, es decir, en su interior $|\vec{H}| = 0 \text{ A/m}$. Representan el análogo de los materiales conductores ideales acerca de sus propiedades eléctricas: los conductores ideales no dejan penetrar un campo eléctrico, $|\vec{E}| = 0 \text{ V/m}$.

Los materiales magnéticamente duros ideales se distinguen por el hecho de que tienen cierta magnetización, la cual no varía por efecto de un campo magnético externo, es decir, $|\vec{M}| = \text{const}$. Es precisamente esta propiedad la que se espera de un imán permanente, dado que un imán “permanente” que cambie su magnetización bajo la influencia de un campo magnético es un imán de mala calidad. Desde hace algo más de 30 años los dos materiales ideales se pueden obtener con muy buena aproximación.

La curva de histéresis pone de manifiesto que se puede modificar la magnetización de un material duro por medio de un campo suficientemente grande, y también que un campo suficientemente grande penetra en un material blando, es decir, que el material se satura; sin embargo, en la generalidad de los casos, estos efectos no son importantes en los materiales modernos. Empezar el estudio del magnetismo con la histéresis significa empezar con las particularidades de los materiales “imperfectos”. Es como si al estudiar en mecánica el resorte se comenzara estudiando casos en los cuales este no se “ajusta” a la Ley de Hooke —Robert Hooke (1635–1703)— o estirándolo más allá de su límite elástico, aquí también se presentaría un “efecto de histéresis”.

Origen

Hace solamente algunas décadas estaba completamente justificado comenzar el estudio del magnetismo con la histéresis, las propiedades de los mejores materiales magnéticos de los cuales se disponía estaban aún bas-

tante lejos de las propiedades ideales. Los imanes permanentes eran muy susceptibles a los campos magnéticos, de tal forma que al tener una geometría inapropiada no soportaban su propio campo magnético. Fue entonces necesario dar un nombre a la magnetización que quedaba después de suprimir el campo exterior, se la llamó magnetización remanente.

Eliminación

Se recomienda comenzar el estudio del magnetismo de la materia con la introducción de dos clases de materiales ideales: los magnéticamente duros y los blandos. Para los materiales duros $|\vec{M}| = \text{const.}$, para los blandos $|\vec{H}| = 0 \text{ A/m}$. No llamar magnetismo remanente a la magnetización de un imán permanente, y dejar la histéresis para más tarde. Los fenómenos de paramagnetismo y diamagnetismo pueden analizarse en cursos universitarios posteriores.

6.7 Monopolio magnético y carga magnética

Tema

No existen partículas portadoras de carga magnética. Se dice que no existen monopolos magnéticos. De esto se colige, —así se argumenta— que la magnitud física “carga magnética” no existe.

Defectos

Primero algunas aclaraciones:

La densidad de carga magnética ρ_m , esta definida por:

$$\mu_0 \operatorname{div} H = \rho_m \quad (6.1)$$

Ella describe las fuentes del campo H , ya que:

$$\mu_0 \operatorname{div} H = -\operatorname{div} M \quad (6.2)$$

También describe los sumideros de la magnetización. La integral espacial sobre esta magnitud se llama “carga de magnetización”, “carga magnética” o, como lo hizo MAXWELL, “cantidad de magnetismo”.

El concepto monopolio magnético, se emplea en dos sentidos:

Al decir que no existen monopolos magnéticos se hace referencia a partículas u objetos que portan carga magnética. Tales objetos no se han encontrado hasta el día de hoy.

Pero el término también se utiliza para expresar un aspecto matemático, es decir, un concepto más abstrac-

to. Se usa para designar la fuente de un “campo magnético coulombiano”, es decir, un campo cuya intensidad H decrece según $1/r^2$.

Tal campo existe en la naturaleza en una buena aproximación. Es el campo en la vecindad del polo de un imán muy largo y delgado.

Quien postula que no existen monopolos magnéticos justifica su opinión en la constatación de que no existen partículas magnéticamente cargadas. Sin embargo, es posible explicar lo que es una partícula monopolio solamente si antes se ha introducido la magnitud “carga magnética”, por ejemplo, por medio de la relación (6.1).

Si existe o no una magnitud física nunca se puede concluir de la sola observación de la naturaleza, ya que las magnitudes son construcciones humanas [1]. Se introduce una magnitud cuando es conveniente, cuando es útil para la descripción de algún fenómeno de la naturaleza. Es conveniente introducir la magnitud carga magnética, se la necesita entre otras cosas para:

- la expresión de la observación de que no existen partículas monopolos;
- la descripción de que los dos polos de un imán portan carga magnética de la misma cantidad y de signo contrario);
- formular la Ley de COULOMB para polos magnéticos [2].

Por supuesto se podría prescindir de la introducción de dicha magnitud. Entonces habría que formular: no existen partículas para las cuales la integral de volumen de la divergencia de la intensidad de campo magnético sobre la región del espacio que contiene la partícula sea cero. Sin embargo, del mismo modo se podría prescindir de la carga eléctrica, con lo que probablemente nadie estaría de acuerdo.

Origen

Lo que aquí llamamos carga magnética, es una magnitud de larga tradición, que se encuentra en la literatura con diferentes nombres. En la época de COULOMB se imaginaba que el magnetismo era causado por dos fluidos magnéticos (análogamente a los fenómenos electrostáticos, que se interpretaban como causados por dos fluidos eléctricos).

Tanto para los fluidos eléctricos, como para los magnéticos COULOMB descubrió que la fuerza es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia [3].

En la obra de MAXWELL la carga magnética aparece bajo el nombre de “intensidad del polo” (“strength of the pole”) [4]: “La repulsión entre dos polos magnéticos esta en la línea recta que los une, y es numéricamente

El campo de los imanes permanentes

igual al producto de las intensidades de los polos dividido por el cuadrado de la distancia entre ellos.”

Dos páginas más adelante se usa el término “cantidad de magnetismo”: “La cantidad de magnetismo en un polo de un imán es siempre igual y opuesta a la del otro, o dicho de modo más general:

En todo imán la cantidad total de magnetismo (calculada algebraicamente) es cero.”

En un libro de texto del año 1912 se trata la ley de COULOMB para el magnetismo, y se emplea para la carga magnética la palabra “cantidad magnética” [5].

Aunque la ley de COULOMB de los polos magnéticos es más fácil de verificar experimentalmente que la ley correspondiente para cargas eléctricas, esta ley ha desaparecido completamente de los libros de texto. Esto se hizo en la medida que la intensidad de campo magnético H se ha relegado a un segundo plano. Si ya no se pregunta por la intensidad de campo, ya no es necesaria la ecuación:

$$\mu_0 \operatorname{div} H = \rho_m$$

Un libro algo más moderno que opera consecuentemente con la carga magnética y también llama a la magnitud así, es el de MACKE [6]: “Una diferencia importante entre los fenómenos electrostáticos y magnetostáticos es que en la naturaleza las cargas magnéticas nunca aparecen separadas, sino siempre en pares. No hay polos magnéticos aislados, solamente dipolos magnéticos. Sin embargo, este hecho no tiene importancia para la descripción teórica.”

Eliminación

En secundaria se puede introducir la carga magnética desde el comienzo de la magnetostática como magnitud física nueva e independiente, así como se hace con la carga eléctrica en electrostática. Pero teniendo la particularidad de que la carga magnética total de un imán es siempre cero. En la universidad se la introduce después de la magnetización como:

$$\rho_m = \mu_0 \operatorname{div} H$$

Referencias

- [1] G. Falk u. W. Ruppel, *Mechanik, Relativität, Gravitation*, Springer-Verlag, Berlin 1973, p.2
- [2] A. Sommerfeld: *Elektrodynamik*, 4. Auflage, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig 1964, p.38–39
- [3] C. A. Coulomb, *Second Mémoire sur l'Électricité et le Magnétisme, Où l'on détermine, suivant quelques loix le Fluide magnétique, ainsi que le Fluide électrique*,

agissent, soit par répulsion, soit par attraction, Mémoires de l'Academie Royale des Sciences, 1785, p.593

[4] J. C. Maxwell, *Lehrbuch der Electrizität und des Magnetismus*, Zweiter Band, Verlag von Julius Springer, Berlin, 1883, p.5–7

[5] E. Riecke, *Lehrbuch der Physik*, Zweiter Band, Leipzig 1912, Verlag von Veit & Comp., p.15f

[6] W. Macke, *Elektromagnetische Felder*, Leipzig 1960, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, p.78

6.8 El campo de los imanes permanentes

Tema

En varios libros escolares de Física se encuentran imágenes que representan el campo magnético de un imán de barra, como las compiladas en la Fig. 6.1.

Defectos

Los polos de un imán de barra son las caras de los extremos [2]. La Fig. 6.2a muestra correctamente las líneas de campo al exterior del imán, allí no es necesario distinguir entre las líneas de \vec{H} y \vec{B} , ya que ellas tienen el mismo trazado.

En la mayoría de libros escolares consultados, la figura correspondiente es errónea, lo cual se ve al comparar las imágenes en la Fig. 6.1 con la Fig. 6.2a. No es posible justificar dichos errores diciendo que se ha supuesto otra distribución de los polos, ya que no existe una distribución de polos tal que produzca las líneas de campo mostradas en la Fig. 6.1.

Los errores encontrados no son los mismos en los diversos libros, he aquí algunos de ellos:

- 1 Las líneas de campo encuentran la superficie del imán solamente en las caras de los extremos, Fig. 6.1a y Fig. 6.1b. En realidad también encuentran la superficie en las superficies laterales.
- 2 Las líneas de campo son perpendiculares a la superficie del imán, Fig. 6.1a. En realidad solamente la línea central en las caras de los extremos es perpendicular a la superficie.
- 3 Las líneas que pasan por la superficie lateral tienen una dirección errónea, Fig. 6.1c, Fig. 6.1d, Fig. 6.1e y Fig. 6.1f.

Se encuentran errores análogos en imágenes de las líneas de campo para imanes de herradura, así como en las del campo magnético terrestre.

A veces, al lado de la figura con las líneas de campo se presenta una fotografía que muestra el imán con lima-

duras de hierro para visualizar el trazado de dichas líneas. Entonces, es posible apreciar en un mismo libro en dos figuras contiguas la discrepancia entre lo que pretende el esbozo del campo y la realidad.

Origen

No es necesario que un dibujo de líneas de campo, así como cualquier otro dibujo ilustrativo, sea exacto en todos los aspectos; debe mostrar lo esencial y se puede prescindir de detalles de menor interés, si de esta manera se gana en claridad. Sin embargo, en las imágenes de la Fig. 6.1 no se está simplificando, sino que se están transmitiendo o al menos insinuando interpretaciones erróneas y equivocadas, las cuales son memorizadas por los estudiantes. Esto se puede comprobar fácilmente en cualquier prueba de evaluación, muchos de ellos creen que las líneas de campo salen perpendicularmente de las caras de los extremos del imán. La mayoría de dibujos y representaciones hechas por estudiantes contienen los mismos errores que presentan las imágenes de la Fig. 6.1; al parecer sencillamente reproducen lo que han visto alguna vez, y no lo que correspondería a sus conocimientos de la teoría.

En realidad, los errores detectados tienen alguna "justificación". El error que se comete con la dirección de las líneas que salen de los lados del imán se podría explicar así: se sabe que la inducción \vec{B} no tiene divergencia, las líneas correspondientes no tienen comienzo ni fin; entonces se completan las líneas de \vec{B} en el interior del imán. Y aquí se comete el error, al suponer que al entrar al imán no hay un "codo", es decir, que al atravesar la superficie del imán continúan con la misma dirección; en la Fig. 6.1e las líneas son representadas de este modo. El trazado correcto está representado en la Fig. 6.2b; nótese el ángulo agudo de las líneas al entrar en el imán.

Es posible que quienes representen la entrada y salida de las líneas solamente en los extremos, piensen que en el interior las líneas de \vec{B} coinciden con la magnetización, pero no es el caso, ya que la magnetización es un campo homogéneo.

También es posible que quienes representen la entrada y salida de las líneas perpendicularmente crean que aquí es válida una regla similar a la empleada para las líneas del campo eléctrico en la superficie de un conductor, lo que tampoco es cierto.

Es de anotar que en la mayoría de los libros universitarios consultados al respecto, no aparecen gráficas ni correctas ni incorrectas, en el resto los dibujos son correctos. Se presenta una coexistencia estable entre lo erróneo en un ámbito y lo correcto en otro, es decir, en este campo existe algo así como una "Física escolar" con

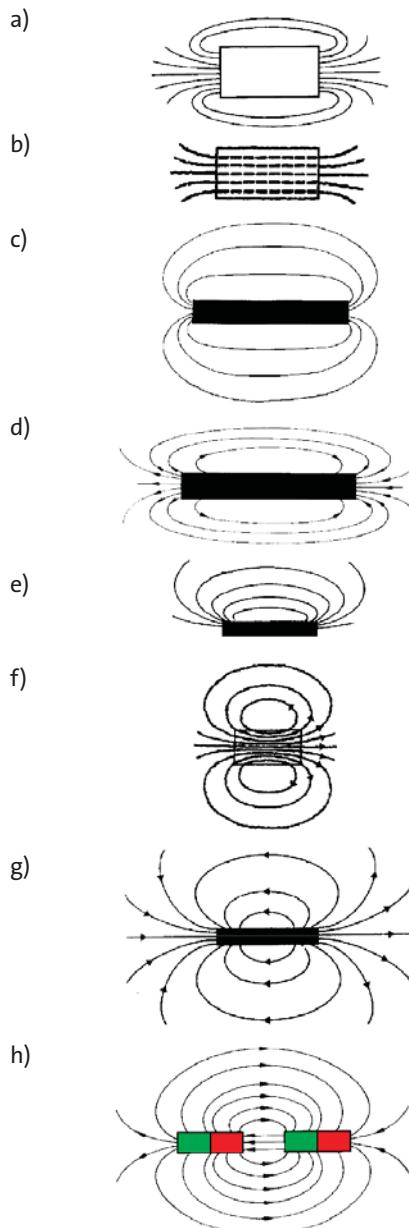


Fig. 6.1 Representaciones incorrectas del campo magnético de un imán de barra [1].

vida propia e independiente de la Física universitaria. También se puede constatar que un libro "nuevo" en general no siempre es nuevo, sino que presenta antiguos errores en un nuevo formato.

Eliminación

Dibujar las líneas del campo magnético correctamente. Es recomendable representar las líneas \vec{H} en lugar de las

Electroimanes

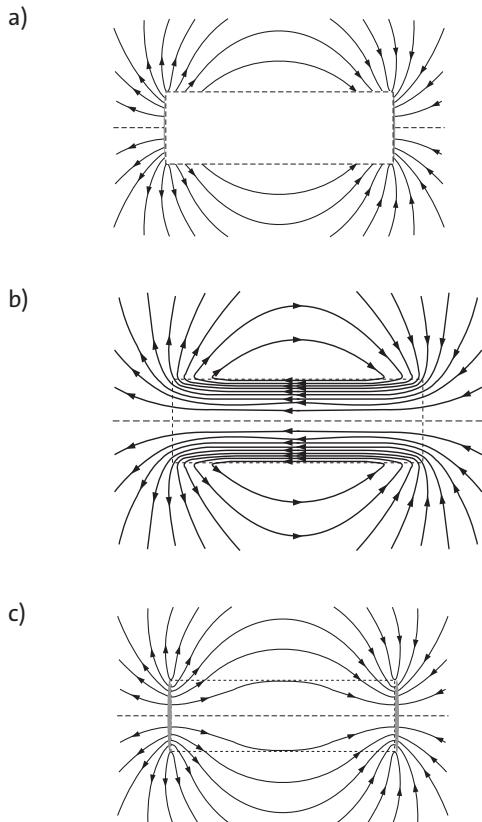


Fig. 6.2 (a) Representación correcta de las líneas de campo al exterior de un imán [3], (b) Representación de las líneas \vec{B} del campo magnético [3] c) Representación de las líneas \vec{H} que salen de los lados de un imán [3].

líneas \vec{B} , Fig. 6.2c. Los polos magnéticos (o las cargas magnéticas) son las fuentes de dicho campo. Para facilitar la representación es posible imaginar que las caras de los extremos del imán están cargadas eléctricamente en lugar de magnéticamente; dibujar las líneas de \vec{E} tiene la misma solución que el problema original, es decir, dibujar las líneas \vec{H} . La imagen de las líneas del campo magnético es la misma que la de dos placas (bastante alejadas) cargadas eléctricamente.

Referencias

[1] La Fig. 6.1 es una compilación de ilustraciones representadas en varios textos de diferentes países de manera muy similar, las acá presentadas fueron tomadas de:

- a) S. Pugliese Jona, *Fisica e Laboratorio 2*. Torino: Loescher, 1991. p.112.
- b) Gross-Berlag, *Felder*, Stuttgart, Ernst Klett Schulbuchverlag, 1994. p.60.

- c) W. Kuhn, *Physik*, Band I, Braunschweig: W. Schulbuchverlag, 1990. p.217.
 - d) W. Bredthauer, K. Bruns u. M. Grote, *Impulse Physik*, Klasse 8–10. Stuttgart: Ernst Klett Verlag, 2003. p.183.
 - e) J. Ballif u. W. Dibble, *Anschauliche Physik*, Berlin, W. de Gruyter, 1973. p.379.
 - f) Metzler Physik. Stuttgart: Metzlersche Verlagsbuchhandlung, 1988. p. 60.
- [2] Ver 6.5 *Polos magnéticos*, p.191
 [3] Figuras tomadas de: A. Sommerfeld, *Vorlesungen über Theoretische Physik*. Vol. III. Elektrodynamik. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft, 1964. p.78–79.

6.9 Electroimanes

Tema

Generalmente el funcionamiento de un electroimán se explica del modo siguiente: al introducir un núcleo de hierro blando dentro de un solenoide, el núcleo se magnetiza y se transforma en imán. El campo de dicho imán se suma al del solenoide, resultando un campo mayor que si se tomara el solenoide separadamente.

Defectos

Esta explicación sugiere que la magnetización es tanto mayor cuanto mayor sea la permeabilidad μ . Se esperaría entonces que también el campo al exterior del electroimán sea tanto mayor cuanto mayor sea el valor de μ ; sin embargo esto no es correcto. Para transformar un solenoide en un electroimán basta que μ sea grande respecto a la unidad. Prácticamente no existe diferencia al variar el valor de μ de 1000 a 10000, o a 100000.

Origen

El funcionamiento de un electroimán es fácil de explicar por medio de la ley de AMPÈRE —André-Marie AMPÈRE (1775–1836)—, la cual da información sobre la intensidad del campo \vec{H} . Sin embargo, se ha establecido la costumbre de describir los campos magnéticos exclusivamente por medio de la magnitud \vec{B} , justificando esa elección con argumentos que poco tienen que ver con la Física. Se dice que \vec{B} es el campo magnético propio o fundamental, mientras \vec{H} es una magnitud derivada o auxiliar, cometiendo así un error que en otras circunstancias se reprocha a los estudiantes, es decir, confundir una magnitud con el objeto que con ella se describe. La afirmación “la masa está suspendida del resorte” no es correcta, debido a que una magnitud física no puede es-

tar suspendida. Análogamente, ni \vec{H} ni \vec{B} son el campo, son magnitudes empleadas para describirlo.

Ahora bien, la descripción del comportamiento de un núcleo de hierro en un solenoide resulta mucho más sencilla si se emplea la magnitud \vec{H} en lugar de \vec{B} . Por una parte, es más fácil definir lo que es un material magnéticamente blando, ya que es un material en el cual $\vec{H} = 0$, cualquiera que sea el campo al exterior del mismo [1]. Se pierde dicha propiedad cuando el material está saturado, pero entonces ya no es magnéticamente blando.

Por otra, por medio de \vec{H} se puede definir una magnitud tal, que al introducir el núcleo en el solenoide no cambie su valor, es decir, que sea invariante. Esta es la integral de línea de \vec{H} sobre la curva que rodea una vez al conductor. Si en alguna parte de la curva —en el interior del núcleo— la intensidad del campo \vec{H} es igual a cero, la contribución a la integral en el resto del trazado —al exterior del solenoide— debe aumentar de manera correspondiente.

Al explicar el funcionamiento del núcleo con la magnitud \vec{B} , es difícil caracterizar el material magnéticamente blando y no se dispone de una invariante.

Eliminación

Para describir los fenómenos relacionados con el magnetismo de la materia es aconsejable utilizar la intensidad del campo magnético \vec{H} . Si se considera dicha cantidad como medida, se puede formular el hecho de que en un material magnéticamente blando $\vec{H} = 0$ de la siguiente manera: los materiales magnéticamente blandos no dejan penetrar un campo magnético en su interior, así como un conductor no deja penetrar un campo eléctrico. También es fácil describir el funcionamiento del electroimán: al introducir un núcleo de hierro en el solenoide, manteniendo la corriente eléctrica constante, el hierro “expulsa” el campo fuera del solenoide.

Referencias

[1] Véase 6.6 *La curva de histéresis*, p.192

6.10 La permeabilidad magnética

Tema

Al tratar la inducción magnética B en un electroimán largo (longitud l , número de espiras N , permeabilidad magnética relativa del núcleo μ_r), a veces se presenta la siguiente ecuación, sobre todo en libros no universitarios:

$$B = \mu_0 \mu_r \frac{N \cdot I}{l} \quad (6.3)$$

Se da por supuesto que la corriente eléctrica no es tan grande para que el material presente saturación magnética. En algunos textos se encuentra una relación equivalente a la ecuación (6.3):

$$B = \mu_r \cdot B_0 \quad (6.4)$$

Aquí B es la inducción magnética dentro del material del núcleo y B_0 la de la bobina vacía, es decir, la bobina sin núcleo. Se considera que la corriente es la misma antes y después de introducir el núcleo.

Defectos

Las ecuaciones (6.3) y (6.4) no son correctas en general. Son válidas únicamente si todo el espacio en el cual hay campo se encuentra ocupado con material de permeabilidad μ_r : “En los casos donde el material magnético ocupa todo el espacio del campo magnético, o una parte de él, de tal modo que las líneas de campo no corten la superficie del material magnetizado en su interior, es válido

$$B = \mu_r \cdot B_0,$$

donde μ_r es la permeabilidad magnética...” [1]

Las ecuaciones mencionadas son correctas, por ejemplo, en el caso de un solenoide anular con núcleo cerrado. Para entender el porqué no son válidas para un electroimán “normal”, es decir, recto, se analizarán primero las expresiones que corresponden a las ecuaciones (6.3) y (6.4) en el caso de una bobina con un núcleo anular con entrehierro, Fig. 6.3. Posteriormente se deducirá el comportamiento de una bobina recta.

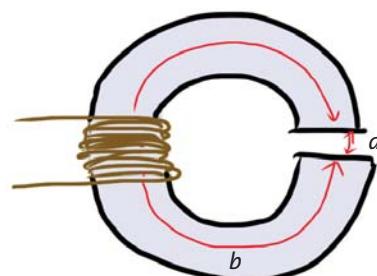


Fig. 6.3 La densidad del flujo magnético dentro del núcleo y en el entrehierro es proporcional a μ_r , solamente si la distancia d (ancho del entrehierro) es lo suficientemente pequeña.

Asumiendo que el ancho del entrehierro d es pequeño en comparación con el radio de la bobina, se puede considerar —en una buena aproximación— el campo dentro del entrehierro como homogéneo; debido a que se esta

La permeabilidad magnética

lejos de la saturación, y que el material se supone isótropo, se tiene que:

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H. \quad (6.5)$$

Si la bobina tiene N espiras y la corriente eléctrica se designa por I , se tiene que:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{r} = N \cdot I$$

donde se integra a lo largo de la trayectoria circunferencial en el interior del toroide.

Suponiendo, además, que el radio del anillo es grande comparado con el de la bobina, se puede evaluar el valor de la integral de línea:

$$b \cdot H_M + d \cdot H_E = N \cdot I \quad (6.6)$$

Donde el subíndice M se refiere al material, y E al entrehierro; b es la parte del camino de integración que se recorre al interior del material, y d la correspondiente al entrehierro.

Ya que el campo de inducción magnética no tiene divergencia, es válido decir que $B_M = B_E = B$, dicho campo es el mismo tanto dentro del material como del entrehierro. Utilizando la ecuación (6.5) se obtiene que:

$$\mu_r \cdot H_M = H_E,$$

empleando esta relación en la ecuación (6.6) se tiene:

$$H_M = \frac{N \cdot I}{b + \mu_r d}$$

y por medio de la ecuación (6.5):

$$B = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N \cdot I}{b + \mu_r d}. \quad (6.7)$$

Se observa que la relación entre la inducción magnética y μ_r es diferente a lo expresado en la ecuación (6.3).

Para la bobina vacía se tiene que:

$$B_0 = \mu_0 \frac{N \cdot I}{l}$$

donde l es el camino total de integración, con esto empleando (6.7) se obtiene que:

$$B = \frac{\mu_r \cdot l}{b + \mu_r d} B_0.$$

La relación entre B y B_0 es diferente a la mostrada en la ecuación (6.4).

Al emplear la ecuación (6.7) en dos casos particulares se tiene:

- Si el imán no tiene entrehierro, es decir, si $d = 0$, o también si $b \gg \mu_r d$, aproximadamente se obtiene:

$$B = \mu_0 \mu_r \frac{N \cdot I}{b}. \quad (6.8)$$

En esta aproximación la inducción magnética es independiente de la anchura del entrehierro y proporcional a la permeabilidad magnética. Ya que en este caso el camino b dentro del material es casi igual al camino total l en la circunferencia dentro del toroide, la ecuación es “idéntica” a la ecuación (6.3). Se puede concluir que la ecuación (6.3) es correcta solamente si el núcleo no tiene entrehierro, o si el ancho de este es muy pequeño comparado con b/μ_r .

- Si $b \ll \mu_r d$ la ecuación (6.7) se simplifica y se puede aproximar a:

$$B_0 = \mu_0 \frac{N \cdot I}{l} \quad (6.9)$$

Ahora B es independiente de μ_r , pero inversamente proporcional al ancho del entrehierro; la comparación con la inducción magnética de la bobina vacía muestra que:

$$B = \frac{l}{d} B_0. \quad (6.10)$$

También aquí se ve que B es independiente de μ_r .

Ahora, ¿cuál de las dos aproximaciones corresponde al caso analizado en los libros mencionados?

Para el caso de un imán anular con longitud total de 50 cm, como es típico en un montaje de bobinas y núcleos de un laboratorio escolar, con un entrehierro no inferior a 0,2 cm (para poder introducir un sensor Hall, $d > 0,2$ cm), y $\mu_r = 1000$, al comparar los dos sumandos del denominador de la ecuación (6.7), se observa que el primer término b es claramente menor que el segundo $\mu_r d$, en una relación del orden de 1:4. Estos resultados se aproximarían más a los obtenidos de las ecuaciones (6.9) y (6.10), y no de la (6.8).

Sin embargo, para la medición de μ_r en los niveles básicos, en general no se utiliza una bobina anular, sino una recta. En este caso la distancia entre los dos polos es mucho mayor que en el caso precedente, de modo que se estaría prácticamente en el ámbito de aplicación de la ecuación (6.9). Efectivamente, al medir con la bobina recta, se obtienen valores demasiado bajos para μ_r , en un factor de por lo menos 10.

Por las ecuaciones (6.3) y (6.4) se esperaría que la inducción magnética en el núcleo de un electroimán sea mayor en la misma relación en que aumenta la permeabilidad magnética. Esto significaría que también en el

exterior, cerca de la superficie del núcleo, la inducción aumente en dicho factor. Un electroimán con un núcleo con $\mu_r = 100\,000$ tendría un campo que es 100 veces el de un electroimán con $\mu_r = 1000$. La ecuación (6.9) por el contrario, así como el sentido común, indica que esto no es posible. Un electroimán con $\mu_r = 500$ no se puede “mejorar” empleando otro material para el núcleo. Esto no significa que para ciertas aplicaciones un μ_r extremadamente grande no sea útil, por ejemplo para el llamado blindaje magnético.

Origen

Las ecuaciones incorrectas se han encontrado en algunos (no todos) de los libros escolares que se han consultado, pero en ningún libro de carácter universitario, ni en enciclopedias científicas, lo cual sugiere cuál ha sido el origen del error. Por razones comprensibles en Física elemental se procura emplear un mínimo de magnitudes físicas; para introducir la permeabilidad se busca un método que no requiera la intensidad del campo magnético. La equivocación puede haber surgido al realizar el procedimiento en el caso del campo magnético de la misma forma como se hace con el campo eléctrico al introducir la permitividad ϵ_r . Para ello se coloca un dieléctrico entre las placas del condensador y se mide la diferencia de potencial, y así la intensidad del campo eléctrico. Las intensidades del campo eléctrico con y sin dieléctrico están relacionadas de la siguiente forma:

$$\vec{E}_0 = \epsilon_r \cdot \vec{E}$$

relación que es correcta si el dieléctrico ocupa todo el condensador. La razón es que aquí todo el espacio ocupado por el campo se “rellena” con el dieléctrico, y además, en los materiales habituales los valores de ϵ_r son mucho más pequeños que los de μ_r para el hierro dulce.

Eliminación

La descripción de los fenómenos de la magnetostática se hace más clara si se emplea H en lugar de B . Al proceder así se puede formular la siguiente regla: *Un material magnéticamente blando desaloja el campo magnético de su interior, así como un material conductor desaloja el campo eléctrico del suyo.*

Para la mayoría de las aplicaciones no tiene importancia si el campo se ha desalojado en un 99,9% o en 99,9999%, según el valor de μ_r .

El no introducir la intensidad del campo magnético H , tiene serias consecuencias. Se establece una relación entre los valores de una magnitud antes y después de introducir un material; tales comparaciones son siempre más difíciles de realizar que considerar la rela-

ción que existe entre dos magnitudes distintas al mismo tiempo, y en el mismo lugar. En el caso acá tratado esto significa que, en lugar de preguntar por la relación de B antes y después de introducir el material magnético, se debe preguntar cómo reacciona el material al campo magnético. Esta pregunta es más fácil de hacer y responder si se formula así: ¿Cómo depende la magnetización de la intensidad del campo magnético? Para el caso en que la permeabilidad es muy alta la respuesta es sencilla: la magnetización se “acomoda” de tal modo que la intensidad del campo magnético al interior del material sea cero (así como en un material conductor la carga se distribuye de tal modo que la intensidad del campo eléctrico es cero en el interior).

Referencias

- [1] B. M. Jaworski u. A. A. Detlaf, *Physik griffbereit*, Braunschweig: Vieweg Verlag, 1972, p.410

6.11 La inductancia

Tema

Por lo general la inductancia se introduce por medio de la ley de inducción, siendo el factor de proporcionalidad entre la tensión inducida (o “fuerza electromotriz”) y la rapidez de variación temporal de la corriente:

$$U_{\text{ind}} = -L \frac{dI}{dt} \quad (6.11)$$

Defectos

En electrotécnica se conocen tres elementos pasivos y lineales (en general la linealidad es una aproximación): la resistencia, el condensador y la bobina (existen elementos mecánicos análogos que son el amortiguador con rozamiento tipo STOKES, la masa puntual o puntiforme y el resorte de Hooke). Para cada uno de dichos elementos es válida una relación lineal:

$$\text{Resistor:} \quad U = R \cdot I$$

$$\text{Condensador:} \quad Q = C \cdot U \quad (6.12)$$

$$\text{Bobina:} \quad n\Phi = L \cdot I \quad (6.13)$$

R , C y L dependen de las dimensiones geométricas y de las propiedades de los materiales correspondientes. Mientras en el resistor se disipa energía, el condensador y la bobina ideales son elementos no-disipativos y representan “depósitos” de energía.

Para circuitos eléctricos que contienen dichos elementos, y además solo fuentes de energía, es posible

El campo como región del espacio con propiedades

emplear una simetría interna: se puede reemplazar el circuito original por otro que se obtiene por medio de ciertas “reglas de traducción”, el nuevo circuito se describe por ecuaciones que tienen la misma estructura matemática que las del circuito inicial. Un ejemplo sencillo es la correspondencia entre el circuito RC y el circuito RL . Las reglas de traducción más importantes son:

U (tensión eléctrica)	$\Leftrightarrow I$ (intensidad de corriente eléctrica)
Q (carga eléctrica)	$\Leftrightarrow n\Phi$ (flujo magnético)
C (capacidad eléctrica)	$\Leftrightarrow L$ (inductancia)
R (resistencia eléctrica)	$\Leftrightarrow 1/R = G$ (conductancia eléctrica)
ley de los nodos	\Leftrightarrow ley de las mallas
círculo paralelo	\Leftrightarrow circuito en serie
estabilización de tensión	\Leftrightarrow estabilización de corriente

La doble flecha significa que se puede remplazar V por I e I por V , Q por $n \cdot \Phi$ y $n \cdot \Phi$ por Q , etc. La presencia del número de espiras n , que altera un poco la “estética”, se debe al hecho de que por flujo magnético Φ de una bobina se entiende normalmente el producto de la densidad de flujo B y la sección de la bobina. Sería más consecuente y lógico llamar flujo a la magnitud $\Phi' = n \cdot \Phi$, en lugar de Φ , ya que el área efectiva atravesada por las líneas de campo magnético es n veces el área de la bobina.

Al definir la inductancia por medio de la ecuación (6.11) queda oculta esta simetría. La analogía entre el solenoide y el condensador es menos evidente.

También se observa lo inconveniente de introducir L por medio de la ecuación (6.11), cuando se escribe la ecuación análoga para la capacidad (por medio de la tabla de traducción):

$$I = C \frac{dU}{dt} \quad (6.14)$$

Esta ecuación describe el proceso de cargar o descargar un condensador; al emplearla para introducir la capacidad, podría quedar la impresión de que la capacidad se manifiesta solamente en esta clase de procesos. La introducción por medio de la ecuación (6.12) es más directa, C aparece como medida del “esfuerzo” necesario para almacenar una cantidad dada de carga eléctrica en un condensador. ¿Es necesaria una gran tensión eléctrica o basta una pequeña?

Lo mismo es válido para la inductancia; si se la introduce a través de la ecuación (6.11), podría parecer que la inductancia se manifiesta solamente en procesos de inducción. La ecuación (6.13), al contrario, permite una interpretación de L sin hacer referencia a la inducción. Nos indica el “esfuerzo” necesario para obtener en una

bobina un cierto flujo magnético. ¿Se necesita una gran corriente eléctrica o basta una débil?

Origen

En principio se puede introducir la inductancia —así como la capacidad, la resistencia o muchas otras magnitudes— por medio de cualquier ecuación en la cual figure la magnitud. Para definir la inductancia además de las ecuaciones (6.11) y (6.13), es posible encontrar en libros universitarios la siguiente relación:

$$E = \frac{L}{2} I^2 \quad (6.15)$$

Esta ecuación muestra la energía contenida en el campo magnético de una bobina. Las tres posibilidades de introducción de L —representadas por las ecuaciones (6.11), (6.13) y (6.15)— coexisten en la literatura desde los comienzos de la electrodinámica. Se observa nuevamente que la Física escolar está bastante aislada de la Física universitaria.

Eliminación

Se recomienda introducir el flujo magnético como $B \cdot A$, mostrando experimentalmente que la densidad del flujo en una bobina es proporcional a la intensidad de corriente eléctrica en la misma. De lo cual se obtiene que también el flujo total $n \cdot \Phi$ es proporcional a la corriente:

$$n \cdot \Phi \sim I,$$

llamando inductancia al factor de proporcionalidad:

$$L := \frac{n\Phi}{I} \quad (6.16)$$

Para obtener la ecuación (6.11) se emplea (6.16) en la ley de inducción:

$$U_{\text{ind}} = -L \frac{dI}{dt}$$

6.12 El campo como región del espacio con propiedades

Tema

En general el campo se considera un concepto difícil. Se encuentran formulaciones que dan la impresión de que se trata de algo misterioso. He aquí algunas citas:

- 1 “Campo eléctrico es toda región del espacio donde se ejercen acciones sobre una carga eléctrica situada en cualquier punto de la misma.” [1].

El campo como región del espacio con propiedades

- 2 “Una carga crea un *campo eléctrico* en la región que la rodea, y este ejerce una fuerza sobre cualquier carga que se coloque en él.” [2].
- 3 “En el espacio al rededor de un cuerpo cargado está un algo invisible llamado campo eléctrico.” [3].
- 4 “Se dice entonces que la esfera cargada crea un *campo eléctrico*. Si en alguna forma se le quita la carga eléctrica, desaparece la modificación que sufría el espacio que le rodeaba...” [4].
- 5 Campo es una región del espacio donde existe una distribución de una magnitud escalar o vectorial, que puede además ser o no dependiente del tiempo. *Campo eléctrico* es la región del espacio donde actúan las fuerzas eléctricas.” [5].

Las citas anteriores indican que el campo es una región del espacio; existen otras afirmaciones en las cuales se considera el campo como una “situación”, como un “efecto”, o simplemente se da una definición operacional, confundiendo el concepto de campo eléctrico con el de intensidad del mismo. Véase 6.16 *La carga de prueba*, p.206

Defectos

Un campo es un sistema físico, semejante a otros sistemas como por ejemplo el gas ideal, el cuerpo sólido o el líquido ideal. Como los demás sistemas, el campo también tiene energía, momentum, momentum angular y según el estado en el cual se encuentre, entropía. Así como otros sistemas “materiales”, tiene cierta presión y puede tener cierta temperatura; y al igual que los demás sistemas consta de porciones elementales, que en el caso del campo electromagnético son los fotones. Por lo tanto, esta plenamente justificado tener una idea tan concreta de campo como se tiene habitualmente de cualquier sustancia material, como del agua o del aire por ejemplo.

Sin embargo, en las citas mencionadas el campo se presenta como: “región del espacio”. Generalmente los estudiantes conciben el espacio como algo vacío, exento de cualquier cosa, como la negación de cualquier presencia, o la nada. Pero, ¿cómo puede dicha nada tener propiedades? No es de extrañar que los estudiantes consideren el campo como un concepto difícil.

Origen

Para Michael FARADAY (1791–1867), creador del concepto de campo, y para sus contemporáneos el campo era algo sencillo, un concepto que no exigía gran capacidad de abstracción. Según ellos el espacio entero estaba lleno de un medio, llamado éter, del cual se formaron una idea muy concreta e intuitiva. El campo no era me-

nos concreto: era una parte del éter en un estado particular, caracterizado —según FARADAY— por el hecho de que el éter se encuentra bajo tensión o presión mecánica.

James Clerk MAXWELL (1831–1879), quien dio forma matemática a las ideas de FARADAY, definió el campo así: “El campo eléctrico es la porción de espacio alrededor de cuerpos electrificados, considerado con referencia a los fenómenos eléctricos.” [6]. No se debe olvidar que para MAXWELL todo el espacio estaba lleno de éter, es decir, que para él los conceptos de éter y de espacio eran idénticos. Del experimento de Albert MICHELSON (1852–1931) y Edward MORLEY (1838–1923) y de la teoría especial de la relatividad se aprendió que el éter no tiene las sencillas propiedades mecánicas que se le habían atribuido inicialmente. Una conclusión algo prematura de algunos científicos fue la de negar rotundamente la existencia del éter; efectivamente, el éter desapareció de muchos libros de Física, mas no de todos.

Dicho sea de paso, Albert EINSTEIN (1879–1955), no negó la existencia del éter: “Esta variabilidad espacio-temporal de las relaciones mutuas entre varas de medir y relojes [...] ha hecho descartar definitivamente la idea de que el espacio esté físicamente vacío.”[7]. “Según la teoría general de la relatividad es impensable la existencia de un espacio sin éter, porque en un espacio así no solo nos encontraríamos con que nunca se produciría la propagación de la luz, sino que además no sería posible la existencia de varas de medir o de relojes, por lo que tampoco habría distancias espacio-temporales en el sentido de la física. Sin embargo, no se puede concebir que el éter esté dotado de la propiedad característica de los medios perceptibles, que es la de estar constituidos por partes de las que se puede hacer un seguimiento en el tiempo; el concepto de movimiento no se puede aplicar al éter.” [8].

El cambio radical que implicó la negación de la existencia del éter en la mayoría de los libros tuvo consecuencias graves para la evolución de algunos conceptos. Surgió algo que ya a los filósofos de la antigüedad les había parecido impensable, la existencia del espacio completamente vacío, es decir, la existencia de la nada. Las consecuencias de esta manera de pensar fueron particularmente negativas para el desarrollo del concepto de campo. Los textos seguían definiéndolo tal como lo hiciera MAXWELL, es decir, como “el espacio” alrededor de los cuerpos cargados y le atribuían propiedades.

De este modo el concepto de campo perdió su fundamento inicial. Antes, el campo era un estado particular del éter, luego se “convirtió” en un estado de algo que no existe. Al parecer la falla lógica no fue percibida, ya que el mismo MAXWELL en su definición de campo habla

Superficies equipotenciales

del espacio y no del éter. Sin embargo, para MAXWELL un espacio sin éter hubiera sido impensable.

El periodo durante el cual el campo no tuvo un fundamento, no debería haber durado mucho; en la misma época, es decir, a comienzos del siglo veinte, fue cada vez más claro —en particular por los trabajos de Max PLANCK (1858–1947) sobre la radiación térmica— que el campo electromagnético es un sistema como los demás. Desafortunadamente el concepto de campo ha sobrevivido hasta el día de hoy en la forma inadecuada en que fue formulado después del experimento de MICHELSON y MORLEY.

Además de este desarrollo histórico algo intrincado, otro hecho contribuyó a generar confusión: el empleo de la palabra “campo” con dos significados. Por un lado es el nombre de un sistema físico, y por otro es un concepto matemático: se llama campo a la distribución de una magnitud local en el espacio. Así, se habla de un campo de temperatura, de presión o de densidad. Pero a menudo no se distinguen estos dos conceptos; es común por ejemplo hablar del “campo eléctrico \vec{E} ”. Se sugiere evitar este tipo de formulación ya que no es claro si se refiere al sistema “campo eléctrico” o la distribución $\vec{E}(x, y, z)$ de la magnitud física “intensidad del campo eléctrico”.

Eliminación

Es recomendable introducir el concepto de campo de la misma manera como se introducen sistemas materiales. Para explicar lo que se entiende por gas ideal, se puede comenzar por ejemplo así: “El gas ideal es un sistema o ente con las siguientes propiedades: ...” Igualmente en la introducción de campo puede empezarse por: “El campo (eléctrico, por ejemplo) es un sistema con las siguientes propiedades: ...” Lo importante es presentar el campo como una “cosa” o un sistema material y no como una región del espacio.

Lo inapropiado que es introducir el campo como región del espacio con ciertas propiedades, se ve más claramente cuando se emplea el mismo método para explicar qué es el aire. No sería falso decir: “El aire es una región del espacio en la cual actúa una fuerza sobre la superficie de un pequeño recipiente, con paredes impermeables.” Pero esta definición es sencillamente disparate, y prácticamente nada aporta para saber qué es el aire.

Referencias

- [1] M. Alonso, y V. Acosta, *Introducción a la Física*, v.2, Bogotá: Editorial Cultural, 1984, p113.
- [2] S. Lea, y J. Burke, *Física*. v. 2. México: International Thomson Editores, 1999. p.771.

[3] O. Ochoa, *Física*, 6º año de enseñanza media.

Bogotá: Editorial Bedout, 1982, p.101.

[4] J. Casas, J. Muñoz y J. Quiroga, *Física*, v.1, Comité para la enseñanza de la Física (CEF). Bogotá: Editorial Norma, 1ra edición, 1974, p.208.

[5] *Campo eléctrico*. [en línea]

<https://www.buenastareas.com/ensayos/Campo-Electrico/49221057.html>

[citado 15 abril, 2022]

[6] J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, v.1. 3rd. edition (edition 1954). New York: Dover Publications. p.47.

[7] A. Einstein, *Äther und Relativitäts-Theorie*. Berlin: Verlag von Julius Springer, 1920. p.12. Existe versión en castellano: *El éter y la teoría de la Relatividad*. En: Einstein. (Ed. J. M. Sánchez Ron,) Barcelona: Crítica, 2005, p.142.

[8] Ibid., p.15. En castellano, p.145.

6.13 Superficies equipotenciales

Tema

Para representar gráficamente un campo se emplean líneas de campo. Los campos electrostáticos también pueden representarse mediante superficies ortogonales a las líneas de campo, llamadas superficies equipotenciales.

Un dibujo con líneas de campo representa dos aspectos del mismo:

- 1 Indica la dirección del vector de la intensidad del campo en cada punto. Estos vectores son tangenciales a las líneas de campo.
- 2 Indica la ubicación de las “fuentes” del campo. Son los lugares donde las líneas comienzan o terminan.

A veces se dice que la densidad de las líneas de campo es una medida del módulo del vector intensidad de campo. En realidad, esto es correcto solamente en casos particulares [1, 2].

Defectos

En la representación gráfica de un campo se ve rápidamente aquello que necesitaría muchas palabras de explicación de no contar con dicho medio de representación. A pesar de que existen varias posibilidades de representar gráficamente un campo, normalmente se emplea un solo método: la representación de las líneas de campo. Es tal la costumbre de utilizar dicho método que no se piensa en procedimientos alternativos. Una alternativa es la de representar las superficies ortogonales a las líneas de campo, las “superficies de campo”.

Ya que normalmente se enseña una idea bastante vaga de campo, las líneas se convierten en lo “principal”, dando como resultado que los estudiantes tienden a identificar el campo con las líneas de campo.

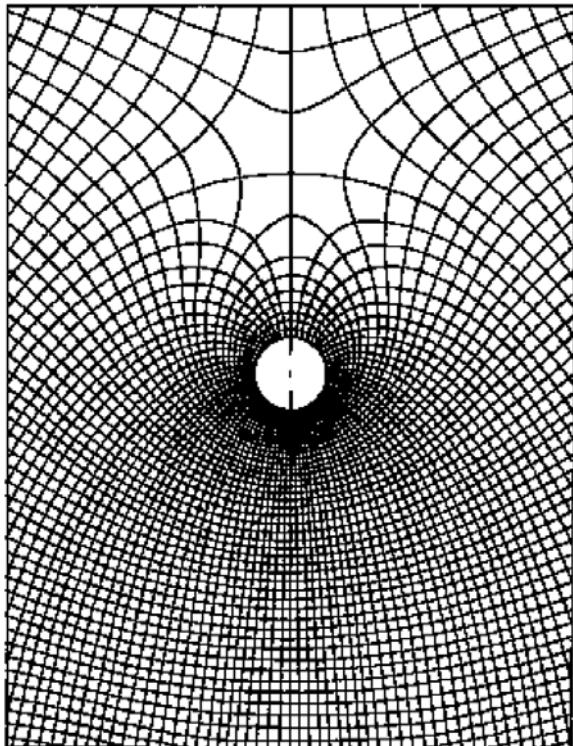


Fig. 6.4 Superposición de los campos magnéticos de una corriente eléctrica (perpendicular al plano del dibujo) con un campo magnético homogéneo [3].

Origen

Originalmente las líneas de campo se llamaron líneas de fuerza y las superficies de campo superficies de nivel. Para MAXWELL (1831–1879) era normal representar ambos elementos para todos los campos, Fig. 6.4; este era su método para generar una imagen informativa de un objeto invisible. A finales del siglo 19, cuando se desenterró el éter de la Física, el campo se convirtió en un concepto muy abstracto. Desde ese momento, las líneas de campo eléctrico no fueron otra cosa que una herramienta matemática para determinar la fuerza ejercida sobre una carga de prueba. Las superficies de campo sobrevivieron solamente en forma de superficies equipotenciales en una clase particular de campos, los campos gradiente o conservativos. Llegando a establecerse la opinión de que se puede definir un potencial solamente en un campo gradiente, por lo cual las super-

ficies equipotenciales existen solamente en dicha clase de campos. No se tuvo en cuenta que lo “único” molesto era el nombre. Efectivamente, es posible dibujar superficies ortogonales para cualquier campo vectorial. Si el campo no es un campo gradiente, estas superficies no son superficies equipotenciales, pero su utilidad para una representación sugestiva del campo no se ha perdido, al contrario, para un campo no-conservativo son más útiles ya que nos indican en donde el rotacional del campo es diferente de cero.

Eliminación

Es más conveniente decir que donde la divergencia no es cero se encuentran **fuentes de flujo**, y que en los lugares donde el rotacional no es cero se hallan **fuentes de vórtice**.

Las líneas de campo se originan y terminan en las fuentes de flujo, y las superficies de campo se originan y terminan en las fuentes de vórtice. Por consiguiente, en una representación de las líneas de campo se ven claramente las fuentes de flujo, y en una representación de las superficies de campo se aprecia más claramente la ubicación de las fuentes de vórtice. Por eso es recomendable representar en un mismo dibujo los dos elementos: líneas y superficies de campo. (En una representación bidimensional las superficies también aparecen como líneas).

Como ejemplo consideremos un campo eléctrico. En este caso las fuentes de flujo son las cargas eléctricas, mientras las fuentes de vórtice están representadas por un flujo magnético que cambia con el tiempo. En la Fig. 6.5 están representadas dos cargas lineales (hilos delgados cargados, perpendiculares al plano del dibujo), así como tres solenoides delgados con un flujo magnético que cambia con el tiempo. La variación es constante de modo que existe un campo eléctrico estacionario alrededor de los solenoides; los solenoides también son perpendiculares al plano del dibujo, y dado que son muy delgados aparecen como puntos.

También es posible interpretar la figura como un campo magnético. En este caso las fuentes de flujo son las cargas magnéticas (polos magnéticos lineales), y las fuentes de vórtice son corrientes eléctricas, o variaciones del campo eléctrico.

Referencias

- [1] A. Wolf, S. J. van Hook u. E. R. Weeks, *Electric field line diagrams don't work*, American Journal of Physics 64, 1996, S.714
- [2] F. Herrmann, H. Hauptmann a. M. Suleder, *Representations of Electric and Magnetic Fields*, American Journal of Physics 68, 2000, S.171

¿Dónde está el campo?

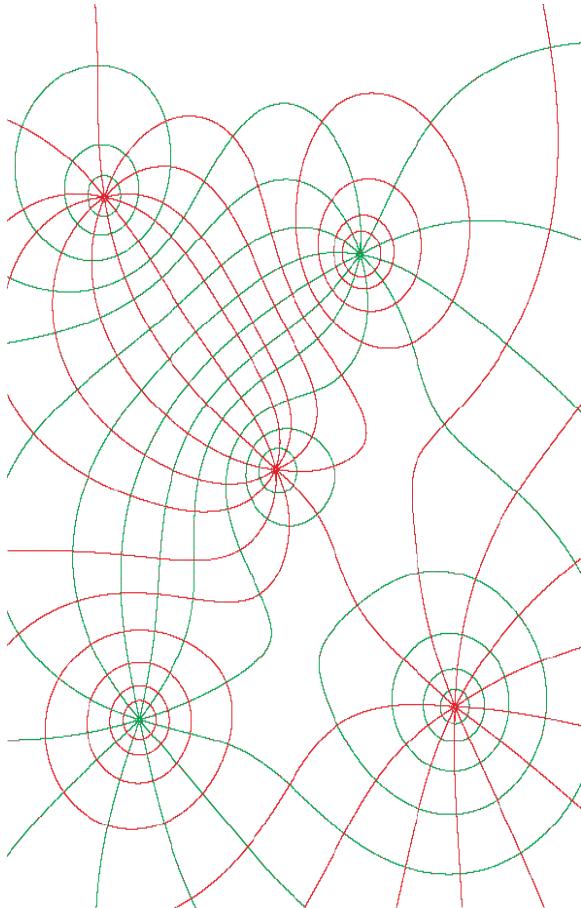


Fig. 6.5 Campo de dos fuentes de flujo y tres fuentes de vórtice (líneas de campo en rojo; superficies de campo en verde).

[3] Figura tomada de: J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, v.2. 3rd. edition (edition 1954). New York: Dover Publications. Fig. XVII, Art. 496.

6.14 ¿Dónde está el campo?

Tema

Para representar campos gráficamente se utilizan casi exclusivamente las llamadas líneas de campo.

Defectos

La información que se obtiene a partir de las líneas de campo sobre dónde se encuentra este es algo engañosa. Pero, ¿qué significa esa pregunta? El campo se encuentra distribuido en el espacio, y su intensidad cambia de

un punto a otro. ¿Tiene sentido esa pregunta? Lo tiene. Si alguien pregunta dónde se encuentra el aire de la atmósfera, se sabe cómo responder, se dice algo sobre la distribución de la densidad. Qualitativamente una respuesta simple podría ser: cerca al nivel del mar hay mucho aire, arriba poco y a más de 40 km de altura casi no queda nada.

La única magnitud que en el caso del campo eléctrico o magnético podría desempeñar el papel de la densidad es la densidad de energía; si se quiere tener una idea sobre dónde está el campo, es razonable preguntar por la distribución de la densidad de energía.

Ahora bien, la representación de las líneas de campo transmite una información no adecuada, ya que se interpretan intuitivamente como la imagen de un flujo.

Para entender mejor esto se pueden analizar algunos ejemplos: un conductor esférico cargado eléctricamente. El flujo de intensidad del campo eléctrico \vec{E} es el mismo en el caso de la superficie de una esfera de radio grande como de radio pequeño. La representación por medio de las líneas de campo sugiere que en una capa de espesor radial dr hacia afuera hay “tanto campo” como en una capa del mismo espesor dr hacia adentro.

Esta conclusión sería correcta para un cuerpo esférico que emite radiación, una estrella por ejemplo. La energía es la misma en cada capa de espesor dr cualquiera que sea la distancia radial r .

Sin embargo, para un campo eléctrico estático esta conclusión no sería correcta; la intensidad del campo decrece con la segunda potencia de r (con $1/r^2$), es decir, la densidad de energía con la cuarta potencia (con $1/r^4$). Si el conductor esférico analizado tiene radio R , el 90 % de la energía total del campo se encuentra dentro de una región esférica de radio $10R$, y el 99 % en una región con radio $100R$. Esto significa que el campo está concentrado en una región relativamente pequeña alrededor de la esfera cargada.

Otro ejemplo: el campo magnético de un solenoide. Una imagen con las líneas de campo sugiere que dentro del solenoide el campo se encuentra más “concentrado”, pero en lo que concierne a la “cantidad de campo”, afuera del solenoide queda una parte considerable. Hemos propuesto, vease arriba, considerar la energía como medida de la cantidad de campo, como se considera por ejemplo la masa como medida de la cantidad de aire. Aquí también la impresión es muy distinta si se considera una representación de la densidad de energía en lugar de las líneas de campo. Si el solenoide no es muy corto, prácticamente toda la energía está localizada al interior del mismo, así como la energía del campo eléctrico de un condensador se encuentra localizada entre sus placas.

Origen

Es habitual definir el campo como una región del espacio en la cual actúan fuerzas, las cuales se reconocen mediante las líneas de campo. Lo único “tangible” según esta definición son las líneas de campo, por lo cual se convirtieron en las representantes del mismo.

Eliminación

Se recomienda introducir el campo como sistema físico por derecho propio, es decir, no solo como una herramienta matemática para el cálculo de fuerzas. Ya que el campo es un sistema extenso es apropiado describirlo por medio de una distribución de densidad, antes de estudiar las fuerzas que ejerce sobre un cuerpo que se introduce en él. Se recomienda que solo después de esto se analice el hecho de que el campo es anisotrópico, es decir, se puede identificar una dirección particular en cada punto. Se puede comparar este modo de proceder con el que se emplearía para describir un material cualquiera, como la madera por ejemplo. No se comenzaría con dibujar las líneas que representan la textura de la madera, sino que se mostraría que se trata de un material homogéneo con cierta densidad.

6.15 Campo conservativo y no-conservativo

Tema

En ocasiones se afirma que un campo eléctrico inducido no tiene potencial, es decir, que para un campo eléctrico inducido no se puede definir un potencial. “Si el campo no es conservativo no existe función potencial [...]. Un campo de fuerzas no es conservativo si su rotor es distinto de cero”. [1].

Defectos

Aunque el análisis se limitará a considerar campos eléctricos, los argumentos expuestos también son válidos y aplicables a campos magnéticos y corrientes de líquidos. Los campos eléctricos se pueden clasificar en dos categorías con propiedades particulares: campos conservativos (o irrotacionales) y campos no-conservativos (rotacionales, o de circulación). Un campo conservativo es aquel que no tiene rotores, es decir, para el cual el $\text{rot } \vec{E} = 0$ en todas partes. Esto significa que el campo debe tener fuentes (“fuentes de flujo”) en alguna parte, o dicho de otro modo que no en todas partes la $\text{div } \vec{E} = 0$, porque en caso contrario no existiría campo.

Un campo de circulación “puro” es un campo para el cual el $\text{rot } \vec{E} \neq 0$ en alguna parte, y la $\text{div } \vec{E} = 0$ en todas

partes, se podría decir que tiene “fuentes de circulación”.

En general no cualquier campo pertenecerá a alguna de las dos categorías, pero a pesar de esto los dos conceptos juegan un papel importante en la electrodinámica. La razón es que en física a menudo se supone que no existe algo diferente a un dipolo eléctrico, un condensador, un solenoide con corriente, o cosa similar. De los campos correspondientes es posible afirmar cosas sencillas como por ejemplo que el campo eléctrico de un dipolo es conservativo, o que el campo eléctrico alrededor del solenoide cuyo flujo magnético está cambiando es un campo de circulación.

A veces, la sencillez de esta clasificación deviene en conclusiones que exceden lo que realmente implica, como afirmar que un campo eléctrico inducido no tiene potencial.

Para ver el problema que se puede presentar, es necesario tener claro cómo utilizar el concepto de “campo”.

Por una parte se habla del campo eléctrico de una carga puntual, de un dipolo, o de un condensador (o del campo magnético de un solenoide, de un circuito sencillo —una bobina de una sola espira—, de un imán permanente, entre otros.), limitando el análisis a casos conceptualmente similares.

Por otra, se habla del campo en una región del espacio dada, y es posible que en este caso no interesen las fuentes o la causa del campo.

Frases como la mencionada en el Tema se basan en el primer concepto de campo, son afirmaciones básicas que se refieren a sistemas de una extensión infinita, y pueden resultar útiles para facilitar la comprensión del fenómeno, pero son inapropiadas cuando es necesario aplicarlas a un problema concreto. Cuando se trata del estudio de un fenómeno particular y concreto no es necesario “especular” sobre todo el universo, basta situarse en los límites del problema. Cabe entonces preguntarse, por ejemplo: ¿Existen fuentes de rotación o fuentes de flujo en la región considerada? Si en la región de interés no hay fuentes de rotación se puede introducir un potencial para dicha región. Si existen, pero están limitadas a algunas partes de la región considerada, entonces se puede “aislar” una región conexa que no tenga fuentes de circulación y definir un potencial para ella. El hecho de que fuera de esa región existan fuentes no tiene importancia para el estudio de la fenomenología en la región de interés.

Quien considere imprescindible la afirmación del inicio, tendría que acostumbrarse a “vivir” casi siempre sin potencial. No se podría decir que en uno de los contactos del enchufe se encuentra el potencial a tierra, mientras el otro corresponde a una función sinusoidal, ya que el campo total del circuito incluye en alguna par-

La carga de prueba

te un transformador y en este hay un $\text{rot } \vec{E} \neq 0$; aparte del hecho de que en el sitio donde se encuentre el enchufe existen muchas otras fuentes de campos eléctricos. Como segundo ejemplo se puede considerar el circuito de un dispositivo electrónico, si este funciona con batería se podría atribuir un potencial eléctrico a cada uno de sus puntos, pero en cuanto se conecta con la red el uso de los potenciales estaría “prohibido”.

Origen

En electrodinámica se suele operar con cargas puntuales, dipolos, solenoides, etc., describiendo estos sistemas con sus campos como si no hubiera otras formas de hacerlo. Sin duda, aunque este modo inicial de proceder es conveniente, las reglas que son válidas en determinadas situaciones no son necesariamente correctas ni apropiadas para sistemas de extensión limitada.

Eliminación

Si se considera que la afirmación referida en la cita es importante debe formularse cuidadosamente, como se hace por ejemplo en el libro de Bergmann-Schaefer, donde para el caso del campo magnético se dice: “Al exterior del conductor existe un potencial magnético no unívoco; para el cálculo del campo esta ambigüedad no tiene importancia.” … “Al interior del conductor con corriente no existe un potencial magnético.” [2]. Quien considere que estas formas son demasiado detalladas, sencillamente puede dar menos importancia al tema. En particular, no se aconseja formular frases como “**un campo inducido no tiene potencial eléctrico**”. La decisión sobre si un potencial puede introducirse, debe tomarse solamente con referencia a la región de espacio relevante para el problema en consideración. O bien, escoger la región de tal forma que no contenga lugares con $\text{rot } \vec{E} \neq 0$.

Referencias

- [1] Complementos de Energía – Los Campos Vectoriales. [en línea]. En: <https://sites.google.com/site/fisicarelatividad/relatividad-especial/complementos-de-energia> [consultado el 1 de septiembre de 2022].
- [2] Bergmann-Schaefer, *Lehrbuch der Experimentalphysik*, Band II, *Elektrizität und Magnetismus*, Walter de Gruyter, Berlin, 1971, p.176

6.16 La carga de prueba

Tema

Se suele definir la intensidad del campo eléctrico por medio de la siguiente ecuación:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q}$$

Algunos autores piensan ser más rigurosos si la definen así:

$$\vec{E} = \lim_{Q \rightarrow 0} \frac{\vec{F}}{Q}$$

[1], [2], [3], [4].

Defectos

Al definir la intensidad del campo eléctrico por medio de:

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{E} \quad (6.17)$$

por una parte se quiere presentar un procedimiento para determinar los valores de dicha *intensidad*, es decir, de una magnitud física y por otra generar una idea intuitiva del *campo*, es decir, de un sistema físico. Estos son dos objetivos distintos y la ecuación mencionada no es conveniente para ninguno de ellos.

1 En la vasta experiencia experimental difícilmente se encuentra el empleo de la ecuación (6.17) para medir la intensidad de campo, lo que no significa que no se midan o calculen intensidades de campo, pero no empleando la mencionada relación. Las fuerzas eléctricas en sistemas macroscópicos son tan minúsculas que una medición basada en la ecuación (6.17) en general no generaría resultados confiables. Se acostumbra recomendar y sugerir experimentos de demostración pero la interpretación de estos no es muy clara: una esfera con carga eléctrica, que se encuentra suspendida en un hilo entre dos placas de un gran condensador, es desviada; ya que las placas son conductoras, la carga de la esfera causa un desplazamiento de las cargas en las placas. Aun si el resultado del experimento es aceptable, no se sabe el porqué.

Pero ¿cómo se determina en realidad la intensidad del campo eléctrico? En principio se puede emplear cualquier ecuación en la que aparezca dicha intensidad. En el caso del campo homogéneo de un condensador es particularmente sencillo cuando se emplea la relación $E = U/d$. También es conveniente hacerlo por medio de la tensión mecánica en el campo:

$$\sigma = \frac{\epsilon_0}{2} \vec{E}^2$$

La tensión mecánica (o densidad de corriente de momentum) σ se obtiene a partir de la fuerza (corriente de momentum) y del área. Cuando se trata de un condensador se mide la fuerza que una placa ejerce

Tensión mecánica en los campos eléctrico y magnético

sobre la otra (la corriente de momentum que fluye de una placa a la otra, a través del campo).

Otro problema relacionado con la medición o definición de la intensidad del campo por medio de la ecuación (6.17) es que el procedimiento no es claro al saber que la intensidad del campo que se mide no es la del campo que se encuentra en el instante de la medición en el sitio donde se localiza la carga de prueba. Esta es la razón por la cual algunos autores insisten en que el valor de la carga de prueba tiene que tender a cero (tiene que ser muy pequeño). Se cree que de este modo se hace claridad conceptual. La recomendación es plausible, y es sabido que en otras situaciones se emplean precauciones similares: el instrumento de medición no debe modificar el valor que se quiere medir (un voltímetro debe tener una resistencia interna muy alta, un termómetro una capacidad calórica muy baja, etc.). Sin embargo, el caso que acá se analiza es diferente. Una gran carga de prueba no perturba la medición (por lo menos mientras no cause un desplazamiento de las cargas que generan el campo, es decir, mientras no existan efectos de influencia) En realidad, la carga de prueba puede ser tan grande como se quiera, incluso más grande (y mucho más grande) que las cargas que generan el campo que se quiere medir. En este caso el campo original puede ser completamente desfigurado pero la medición sigue suministrando el valor correcto de la intensidad del campo sin carga de prueba.

Por consiguiente, no es necesario tomar una carga de prueba pequeña; hacerlo implica agravar más el problema práctico, el efecto que ya es pequeño será aun más pequeño.

- 2 Al fundamentar la idea intuitiva del campo únicamente en la ecuación (6.17) se crea la convicción de que la fuerza sobre la carga de prueba es la única característica de este. Esto sería mal punto de partida para la comprensión de la electrodinámica que requiere que se conciba el campo electromagnético como un sistema físico que existe independiente mente de que se ejerzan fuerzas y de que sea medido. La mayor parte de “los sucesos electrodinámicos” en el mundo no tienen nada que ver con la carga eléctrica. Esta última representa solamente el enlace entre el campo y la materia.

Origen

James MAXWELL (1831–1879) lo plantea así desde las primeras páginas de su conocida obra. En esa época parecía natural presentar los fenómenos electrodinámicos con referencia a la mecánica.

Eliminación

Se sugiere no vincular la idea del campo en primer lugar a la fuerza sobre una carga de prueba, e introducir el campo como sistema autónomo que tiene diversas propiedades, entre ellas la de poder almacenar energía. Se puede mostrar que para caracterizarlo basta una sola magnitud vectorial. Se pueden introducir diversos procedimientos para medir esta magnitud, no solamente con la carga de prueba.

Referencias

- [1] P. Tipler y G. Mosca, *Física para la ciencia y la tecnología*. Vol. 2. 6a ed. Barcelona: Editorial Reverté, 2010. p.705.
- [2] Campo eléctrico. [en línea]. En: http://es.wikipedia.org/wiki/Campo_el%C3%A9ctrico [consultado el 18 de febrero de 2022].
- [3] Campo eléctrico. [en línea]. En: https://es.educaplay.com/recursos-educativos/1158758-campo_electrico.html [consultado el 18 de febrero de 2022].
- [4] Intensidad de campo eléctrico. [en línea]. En: https://www.academia.edu/23953774/Campo_El%C3%A9ctrico [consultado el 18 de febrero de 2022]

6.17 Tensión mecánica en los campos eléctrico y magnético

Tema

Los campos eléctricos y magnéticos se encuentran en un estado de tensión mecánica, la cual es fuerte y evidente, y se puede calcular por medio de sencillas ecuaciones.

Defectos

A pesar de la omnipresencia de dichas tensiones generalmente en los libros escolares y universitarios no se las menciona, a veces se las descarta considerándolas tensiones ficticias. Al tratar las fuerzas eléctricas y magnéticas sin las mencionadas tensiones, dichas fuerzas aparecen necesariamente como acciones a distancia. Al decir que las dos placas de un condensador se atraen, sin explicar que el campo entre ellas se encuentra en un estado de tensión, se debe concluir que entre las placas actúa una fuerza a distancia. Sin embargo, desde que se conoce la electrodinámica maxwelliana nadie tomaría en serio tal posibilidad. Ya NEW-

Las líneas cerradas del campo magnético

TON —Isaac NEWTON (1643–1727)— consideraba las acciones a distancia como una idea incorrecta, y MAXWELL —James Clerk MAXWELL (1831–1879)— mencionó repetidas veces, que no contemplaba la idea de una “*actio in distans*”.

Origen

El problema se fundamenta en que el concepto de fuerza que aun hoy día se emplea sugiere las acciones a distancia. NEWTON introdujo con reticencia el concepto de fuerza y la terminología correspondiente, y no pudo proceder de otra forma ya que todavía no disponía del concepto moderno de campo. Cuando FARADAY —Michael FARADAY (1791–1867)— y MAXWELL —ver por ejemplo [1]— introdujeron el campo, ya era tarde, dado que la “solución de emergencia” propuesta por NEWTON (el cuerpo A ejerce una fuerza sobre cuerpo B sin que el medio entre ellos juegue algún papel), se había convertido en una norma.

Pero a esto se agregó un percance tal vez mayor, con la desaparición del éter en la Física el campo se transformó en un simple artificio, apenas en una herramienta matemática para el cálculo de fuerzas. Un ente que se encuentra bajo tensión mecánica era algo demasiado concreto para acoplarse al concepto de campo que caracterizaba el interregno en que la Física duró sin éter. Con el surgimiento de la teoría general de relatividad y la electrodinámica cuántica el espacio se volvió a llenar, pero de nuevo fue tarde, las tensiones mecánicas en el campo se consideraron “ficticias”, o peor, fueron ignoradas.

Eliminación

Se debe tomar el campo completamente en serio, este tiene todas las propiedades estandar que posee cualquier sistema material, solo que en distinto grado. Es fácil calcular las tensiones mecánicas a partir de las intensidades de campo. Por ejemplo, para el campo eléctrico la tensión mecánica (fuerza por área) en la dirección de las líneas de campo se puede expresar como:

$$\sigma_{\parallel} = -\frac{\epsilon_0}{2} |\vec{E}|^2.$$

La presión en las direcciones ortogonales a las líneas de campo será:

$$\sigma_{\perp} = +\frac{\epsilon_0}{2} |\vec{E}|^2$$

Se observa que, excluyendo el signo, los valores son iguales a la densidad de energía en el campo.

Para el campo magnético las expresiones son análogas, basta colocar μ_0 en lugar de ϵ_0 , y \vec{H} en remplazo de \vec{E} .

Para ayudar a que el estudiante se haga una idea más concreta del campo se puede mencionar el hecho de que un litro del campo magnético de una estrella de neutrones tiene una masa de 1 kg, y además que ese litro pesa $2 \cdot 10^{11}$ veces lo que un cuerpo de 1 kg pesa en la tierra.

Referencias

- [1] J. C. Maxwell: *A Treatise on Electricity and Magnetism* v.1. 3rd. edition (edition 1954). New York: Dover Publications. p.157.

6.18 Las líneas cerradas del campo magnético

Tema

A menudo, tanto en textos como en la red, se afirma que las líneas del campo magnético son cerradas:

- 1 “Las líneas de campo eléctrico comienzan en las cargas positivas y terminan en las cargas negativas; las líneas de campo magnético son cerradas.” [1]
- 2 “...las líneas del campo magnético no empiezan ni terminan en algún lugar del espacio sino que forman rizos cerrados...” [2]
- 3 “Cabe destacar que, a diferencia del campo eléctrico, en el campo magnético no se ha comprobado la existencia de monopolos magnéticos, solo dipolos magnéticos, lo que significa que las líneas de campo magnético son cerradas...” [3]

Defectos

- Cuando se habla de líneas de campo magnético se está haciendo referencia a las líneas de la densidad de flujo \vec{B} ; el hecho de tener comienzo y fin no es una particularidad de las líneas de campo eléctrico. Así como las líneas de \vec{E} de sistemas electrostáticos, las líneas de campo de \vec{H} de sistemas magnetostáticos tienen comienzo y fin, empiezan en el polo norte y terminan en el polo sur del cuerpo magnetizado.
- El hecho de que el campo \vec{B} no tenga divergencia no significa que sus líneas sean cerradas, en realidad en general no lo son. La ecuación

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

indica solamente que las líneas no tienen comienzo ni fin.

¿Qué se quiere decir al afirmar que las líneas son cerradas? Probablemente quien lea las citas anteriores imagine lo siguiente: al considerar una corriente eléctrica en

Las líneas cerradas del campo magnético

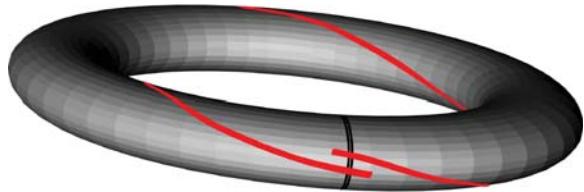


Fig. 6.7 Imán cilíndrico permanente y flexible que se ha torcido y doblado formando un toroide.

un conductor bien definido, por ejemplo un alambre, una línea de campo arbitrariamente escogida la circundará, y si se inicia un recorrido en un punto cualquiera de dicha línea y se sigue por ella, después de una vuelta completa se debe regresar al punto de partida.

Ahora bien, no existe razón física alguna para que la línea se cierre después de realizar una vuelta completa, en realidad la probabilidad de que esta se cierre es mínima. Si lo hace, excepcionalmente, la razón no es física sino geométrica, ocurre solamente cuando el circuito eléctrico está ubicado en un plano. Un caso particular es que el conductor sea completamente recto e infinitamente largo, la más mínima desviación de esta condición hace que al circundar al conductor la línea de campo no retorne a su punto de partida. Se podría argüir que otro sistema con líneas cerradas es la bobina (solenoide), pero eso no es así [4], su forma helicoidal hace que inevitablemente —luego de una vuelta— la línea no se encuentre en su punto de partida.

La Fig. 6.6 muestra una distribución de corrientes eléctricas cuyas líneas de campo magnético no se cierran, una corriente en un conductor rectilíneo y otra en un conductor circular.

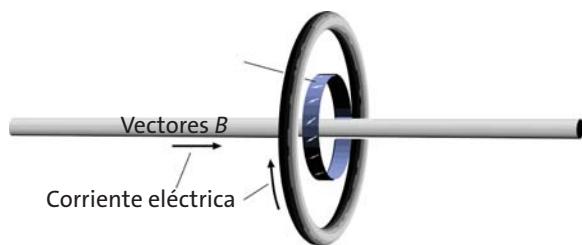


Fig. 6.6 Corrientes eléctricas recta y anular. Las líneas de campo cerca del plano del anillo forman una hélice levógira al interior del anillo y una dextrógiro al exterior.

Analizando los vectores del campo magnético en el plano del anillo, se puede observar que al interior de este la superposición de los campos de la corriente recta y anular converge en una estructura tipo sacacorchos levógiro, al exterior el recorrido de las líneas de campo corresponde a un sacacorchos dextrógiro. Por consiguiente, la probabilidad de volver a su punto de partida al moverse en una línea de campo es cero.

Otro ejemplo para líneas de campo no cerradas se muestra en la Fig. 6.7, en la cual se representa un imán cilíndrico permanente y flexible, uniformemente magnetizado, que se ha torcido (respecto al eje cilíndrico) y doblado. Las líneas de magnetización, y con ellas las del campo \vec{B} , giran en el anillo helicoidalmente y en general no se cierran.

En los campos magnéticos que se encuentran en la naturaleza, por ejemplo en el interior de la Tierra o en los campos magnéticos cósmicos, las líneas de campo son tan intrincadas que no habría forma de suponer que al seguir una de dichas líneas se retornaría algún día al punto de partida. Un ejemplo técnico de un campo donde sus líneas siempre estarán bastante lejos de sus puntos de partida es el campo en el plasma de un reactor de fusión.

Joseph SLEPIAN (1891–1969) en un interesante artículo publicado en 1951 mostraba, sin utilizar una sola ecuación o figura, que las líneas del campo magnético no son cerradas [5], posteriormente se ha publicado diversa literatura sobre el tema [4], [6].

Origen

1 En general en la enseñanza escolar, e inclusive en la universitaria, se estudian solo campos bastante sencillos, el campo del imán de barra, del imán de herradura, de un conductor rectilíneo o anular, y del soleñoide. Para un imán de barra ideal, es decir, con magnetización perfectamente homogénea, así como para un imán de herradura ideal las líneas de campo realmente serían cerradas, también para el conductor completamente recto o el anular; en el caso del soleñoide lo son solo de manera aproximada. Este contexto puede inducir a la conclusión de que las líneas siempre son cerradas.

2 Las líneas de campo son una herramienta para representar un campo gráficamente, sin embargo a menudo son percibidas como algo que corresponde a una realidad física. Al concebir o imaginar las líneas como entes físicos se presenta un argumento en favor de las líneas cerradas, aun si esto no ocurre luego de una única vuelta alrededor de la corriente eléctrica. Si en lugar de líneas de campo se considera un hilo común con el cual se ha hecho un ovillo totalmente desordenado, y se asegura que el hilo no tiene comienzo ni fin, en ese caso la conclusión de que el hilo es cerrado sería correcta. Pero, ¿porqué el argumento no funciona con las líneas de campo? Las líneas de campo no son objetos físicos sino matemáticos, son líneas. Lo máximo que se puede afirmar es que al se-

Los polos magnéticos de un solenoide

uir una de esas líneas alguna vez se llegará a un punto arbitrariamente cercano al punto de partida.

Eliminación

Se recomienda no afirmar que las líneas de campo son cerradas, basta decir que no tienen comienzo ni fin. Sin embargo el problema es más profundo, y con lo anterior se eliminaría solamente un síntoma; la verdadera causa del equívoco es que a menudo las líneas de campo se consideran como algo real.

Por esta razón es más importante no iniciar la introducción del campo con dibujos que muestren líneas de campo, la primera imagen que se enseñe de un campo podría ser la representación de la densidad de energía, como en la Fig. 6.8.

Solo después se recomienda abordar el hecho de que en cada punto el campo tiene una dirección específica, es decir, que no es isótropo. Para representar esta propiedad gráficamente se puede comenzar por dibujar las flechas del vector, y luego llegar a una representación en la que no solo se dibujen las líneas de campo sino también las superficies de campo, Fig. 6.9.

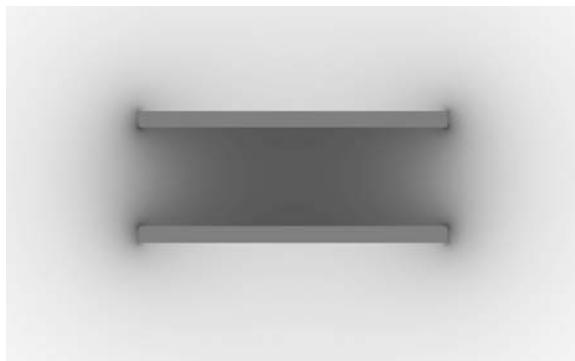


Fig. 6.8 Densidad de energía del campo magnético de un solenoide empleando sombreados de gris.

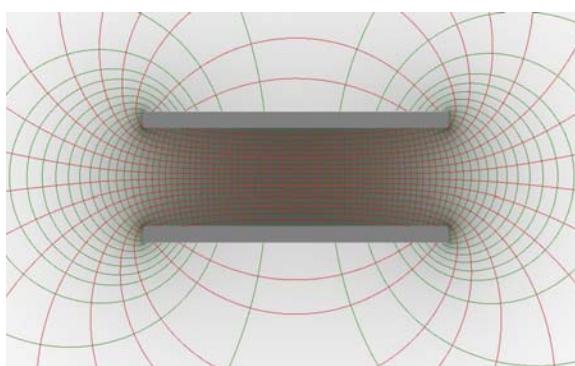


Fig. 6.9 Campo de un solenoide con líneas y superficies de campo, y sombreados de gris.

Por “superficies de campo” se entiende las superficies ortogonales a las líneas de campo, que en campos conservativos son idénticas a las superficies equipotenciales. Para MAXWELL —James Clerk MAXWELL (1831–1879)— era natural representar en cada dibujo de un campo sus líneas y superficies [7]. Ambos elementos tienen una interpretación sencilla: en la dirección de una línea de campo existe tensión mecánica, y en todas las direcciones ortogonales hay presión. Si esto es sabido no se presentará la tendencia a interpretar las líneas de campo como “hilos” que pasan por él, sino como un medio para representar las tensiones y presiones mecánicas en el campo.

Referencias

- [1] P. A. Tipler y G. Mosca, *Física para la ciencia y la tecnología*. Electricidad y magnetismo. 6a ed. Barcelona: Editorial Reverté, 2010. p.891.
- [2] E. Jones y R. Childers, *Física contemporánea*. 3ra. ed. México: McGraw-Hill, 2001. p.599.
- [3] Campo magnético. [en línea]. En: http://es.wikipedia.org/wiki/Campo_magn%C3%A9tico [consultado el 18 de febrero de 2022].
- [4] M. Lieberherr, *The magnetic field lines of a helical coil are not simple loops*. Am. J. Phys. 78, 2010. p.1117–1119.
- [5] J. Slepian, *Lines of Force in Electric and Magnetic Fields*, Am. J. Phys. 19, 1951, p.87–90
- [6] M. Schirber, *Magnetic Fields in Chaos*. Phys. Rev. Focus. 24, 2009.
- [7] J. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, v.2. 3rd. edition (edición 1954). New York: Dover Publications. Fig. XIV–XIX.

6.19 Los polos magnéticos de un solenoide

Tema

Al estudiar el campo del solenoide generalmente se hace notar que el campo de inducción magnética de una bobina cilíndrica es idéntico al de un imán de barra con magnetización homogénea de la misma geometría. Además, a menudo se dice que la bobina tiene dos polos en sus extremidades: “Un solenoide con corriente tiene polos como un imán de barra.” [1]. A veces se presenta una figura que muestra una bobina con una “N” a un lado y una “S” al otro, indicando norte y sur.

Semejantes afirmaciones se hacen respecto a un anillo o espira por el que circula una corriente eléctrica: “El anillo atravesado por una corriente es un imán con dos polos.” [1]; en la figura correspondiente se ha dibujado

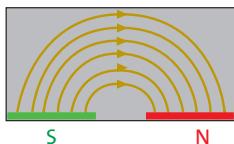


Fig. 6.10 Magnetización de un disco.

al interior del anillo un área circular con la letra “N”; la “S” no se ve porque se supone que se encuentra en el lado posterior del dibujo.

Defectos

Para saber dónde se encuentran los polos de un imán lo más sencillo es considerar la magnetización \vec{M} que en general se puede tomar como conocida. La magnetización es una magnitud vectorial que describe el estado magnético de la materia, indica cuál es el momentum dipolar por unidad de volumen en cada punto material. La Fig. 6.10 representa las líneas del campo de magnetización de un disco, cuyos dos polos se encuentran en el mismo lado de su superficie. Donde comienzan las líneas de magnetización se encuentra el polo sur, y donde terminan el norte. Ni la bobina, ni el anillo con corriente tienen magnetización, y por lo tanto no tienen polos.

Para saber dónde se encuentran los polos magnéticos se puede también analizar el dibujo de las líneas de campo magnético \vec{H} . En el polo norte (donde terminan las líneas de magnetización) nacen las líneas de campo magnético, y terminan en el polo sur (donde empiezan las líneas de magnetización). En el campo de un solenoide, o en cualquier otro campo de una distribución de corrientes eléctricas sin medios magnéticos, las líneas de campo \vec{H} no tienen divergencia y por consiguiente no existen polos.

Es correcto afirmar que al exterior de una bobina el campo es idéntico al de un imán de barra cilíndrico, y que el campo de una corriente circular es idéntico al de una lámina magnética, coincidencia que vale la pena hacer notar a los estudiantes. Pero si se sostiene que la bobina o la corriente circular tienen polos, la comparación ya no es una ayuda sino una inexactitud y un error, el cual propicia que el estudiante no comprenda lo que es en realidad un polo en un imán permanente o en un electroimán.

Si se pretende que una bobina y una corriente circular tengan polos magnéticos, entonces cualquier otra distribución de corrientes también debería tenerlos. Pero, ¿dónde están esos polos en un circuito enrollado y con nodos?, o ¿dónde están los polos en un hilo recto con corriente? Por cierto, en este último caso se suele insistir que no existen polos.

Origen

La comparación de los campos de imanes permanentes y distribuciones de corrientes eléctricas es uno de los temas estandar del curso de electrodinámica universitario. Allí el tema no está fuera de lugar, ya que se aprende mucho de las similitudes y diferencias entre las fuentes de flujo y de circulación, es decir, de la divergencia y el rotacional. ¿Cómo deben estar distribuidas las divergencias para obtener un campo idéntico al causado por una distribución de rotacionales en una determinada región?

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{\nabla} \times \vec{H}$$

Al parecer la Física de la escuela secundaria ha tomado apartes, “abusando” de los polos magnéticos. En el COF 6.8 *El campo de los imanes permanentes*, p.194, se ha mostrado que en muchos textos escolares las aseveraciones sobre los imanes permanentes no son correctas.

La idea de que una corriente eléctrica origina polos magnéticos también se mantiene viva por el hecho de que en geografía se habla de polos magnéticos de la tierra. En el sentido de la Física estos “polos” no son polos magnéticos, porque, primero, el campo magnético de la tierra se origina en corrientes eléctricas y, segundo, según los geógrafos los “polos magnéticos” de la tierra son puntos (puntos en los cuales la componente horizontal del campo magnético es cero). Aún si el campo terrestre fuera de origen ferromagnético, los polos no serían puntos sino extensas regiones al interior de la tierra.

A veces se encuentra la afirmación de que la misma tierra es un imán [2, 3], idea que se debe a William GILBERT (1544–1603), quien descubrió que la causa de lo que hoy día se llama campo magnético se encuentra en el interior de la tierra, y no en el cielo. Él supuso que en el interior de la tierra se encuentra un imán. Su obra “*De Magnete*” fue publicada en el año 1600, es decir, 220 años antes de que Hans Christian OERSTED (1777–1851) descubriera la relación entre la corriente eléctrica y el campo magnético, y antes de que se supiera que en el interior de la tierra la temperatura es tan alta que ningún material puede conservar su ferromagnetismo. La afirmación de que la tierra es un imán es plausible pero incorrecta, si se buscara una correspondencia sería más acertado comparar la tierra con un ovillo de hilo eléctrico con corriente.

Eliminación

Es acertado mencionar que el campo magnético al exterior de una bobina es similar al campo de un imán de barra, pero para la corriente circular semejante mención ya no es de gran ayuda. Debe evitarse decir que la

La ley de LENZ y el signo “menos” en la ley de inducción

bobina tiene polos. Hablando del electroimán es imperativo decir que es su núcleo quien tiene polos en lugar del electroimán.

Referencias

- [1] Dorn-Bader, *Physik*, Mittelstufe, Schroedel Schulbuchverlag, 1997, p.146
- [2] Gross-Berhag, *Physik für die Sekundarstufe I*, Ernst Klett Schulbuchverlag, Stuttgart, 1996, p.112
- [3] W. Beck, H. Ganninger a. A. Lang, *Einblicke Physik und Chemie*, Ernst Klett Schulbuchverlag 1996, p.93

6.20 La ley de LENZ y el signo “menos” en la ley de inducción

Tema

La ley de LENZ —Heinrich LENZ (1804–1865)— dice que las fuerzas electromotrices o las corrientes inducidas son tales que se oponen a la variación del flujo magnético que las produce; esta ley se manifiesta en el signo “menos” en la ley de inducción de FARADAY.

$$U = -n \frac{d\Phi}{dt}$$

Generalmente se presenta una argumentación como la siguiente: si en un solenoide conectado a una batería se introduce un núcleo de hierro, se observa que la corriente eléctrica disminuye, siendo la variación de flujo magnético positiva y la fuerza electromotriz (FEM) negativa, concluyendo que debe haber un signo menos en la ley de inducción.

Para destacar la importancia de este signo “menos”, se muestra que al reemplazarlo por uno “más”, se estaría violando el principio de conservación de la energía.

Defectos

Cuando en Física se habla de una dirección, generalmente se hace referencia a la dirección de un vector, el vector del cual trata la ley de LENZ es el vector “densidad de corriente eléctrica”.

Dentro de la temática se presentan una serie de afirmaciones superfluas que han sobrevivido por tradición y propiciado conclusiones erróneas:

- Al hablar de un signo en una ecuación, se debería poder verificar su validez por medio de la misma ecuación. El signo menos en la ley de inducción dice que la FEM inducida tiene un signo opuesto al del cambio temporal del flujo magnético. Para verificar

dicha afirmación es necesario saber cómo se mide una FEM y la variación de un flujo magnético, incluyendo los signos respectivos.

Analicemos el siguiente caso de variación de flujo: el vector \vec{B} está orientado en la dirección x positiva y su módulo va aumentando, ¿qué signo tiene entonces $d\Phi/dt$? ¿se mantiene el signo al girar el sistema de coordenadas en 180° , de modo que ahora esté orientado en la dirección x negativa? Ahora, supongamos que dicho flujo está rodeado por un conductor, en un plano $y-z$, al cual se ha conectado un voltímetro, ¿cómo se registra en el voltímetro que la FEM es positiva o negativa? En general, los alumnos no saben contestar a estas preguntas, es decir, el signo menos en la ley de inducción que se ha deducido con tanto esfuerzo no sirve para gran cosa.

- En algunos libros se ha encontrado un error en la deducción del signo menos; error que parece tener vida propia, pues a pesar de existir otras maneras para obtenerlo, la versión errónea se encuentra repetidamente.

Se dice que al activar una corriente eléctrica en un solenoide $d\Phi/dt > 0$. Esta afirmación no es correcta, el flujo magnético está relacionado con la inducción \vec{B} por la siguiente relación:

$$\Phi = \int \vec{B} d\vec{A}$$

Teniendo en cuenta que el elemento de superficie $d\vec{A}$ tiene carácter vectorial, se obtiene un flujo Φ positivo o negativo, según la elección de la orientación de dicha superficie.

- Si se dedica tanta atención al signo menos en una ecuación, deberían tener la misma atención los signos “más” en otras incontables ecuaciones. ¿Qué significa el signo más en la ley de OHM, en la segunda ley de NEWTON o en la ecuación $P = \vec{v} \cdot \vec{F}$? O, ¿cuál es el signo correcto en la ley de HOOKE? Si se considera un resorte extendido verticalmente, se tienen cuatro fuerzas relacionadas con él: la fuerza que el resorte ejerce sobre el soporte superior, la fuerza sobre su soporte inferior, la fuerza del soporte superior sobre el resorte y la fuerza ejercida por el soporte inferior; todas estas fuerzas tienen el mismo módulo. Dos de ellas están orientadas hacia arriba y dos hacia abajo, existiendo posibilidad de “elección” arbitraria para la dirección del signo positivo. A pesar de que este problema no es más fácil de resolver que el problema del signo en la ley de inducción, generalmente tampoco se analiza y se pasa por alto.
- ¿Por qué insistir precisamente acá en que un signo equivocado causa la violación de la ley de conserva-

Dos causas para la inducción electromagnética

ción de la energía? Parecería que la inducción tiene alguna particularidad respecto a la energía. Hay muchas otras leyes, en las cuales se produciría una violación de la conservación de la energía al cambiar un signo, por ejemplo $U = R \cdot I$, $P = \vec{v} \cdot \vec{F}$ o $F = -Ds$. Al colocar un signo erróneo, se pueden violar también otras leyes de conservación o no-conservación, por ejemplo el principio según el cual no se puede destruir la entropía.

- Es usual honrar a un personaje dando su nombre a una ecuación o ley. Sin embargo, es tal vez exagerado llevar la orientación de un vector, que además surge de las ecuaciones de MAXWELL, al rango de ley y asociarla al nombre de un científico.

Origen

Una teoría amplia y general tiene sus precursores y antecedentes. A menudo nos permitimos el lujo de enseñar a cada generación de alumnos no solamente la última y más clara versión de una teoría sino también sus antecedentes. La ley de LENZ es un ejemplo entre muchos otros.

En el año 1834, es decir, tres años después de descubierta la inducción por FARADAY, LENZ la formuló así: “Si por un circuito primario A fluye una corriente eléctrica y, si debido al movimiento del circuito A o del circuito secundario B, se induce una corriente en B, entonces la dirección de esta es tal que la acción de la fuerza electromagnética entre la corriente inductora y la corriente inducida opone una resistencia al movimiento relativo de los circuitos” [1].

En esa época preguntarse por la dirección de una corriente inducida era una pregunta legítima, y la afirmación de LENZ fue un resultado nuevo en la investigación científica; trece años más tarde Hermann von HELMHOLTZ (1821–1894) estableció balances de energía y mostró que la ley de LENZ se puede deducir del principio de conservación de la energía. Más tarde, 25 años después, se formula la teoría electrodinámica por MAXWELL, en la cual la ley de LENZ está contenida como uno de muchos detalles.

Tratar el signo de una de las ecuaciones de MAXWELL con tanto esmero es sencillamente una tradición. No olvidemos que en general una temática de la Física se convierte en tema de clase si el profesor (o un programa) lo definen como tal.

Eliminación

No formular la ley de LENZ como ley o regla. En su lugar emplear las llamadas “reglas de la mano”: la conocida regla de la mano derecha y una análoga, menos conocida, para la mano izquierda. La regla de la mano derecha

es consecuencia de la primera ley de MAXWELL, la de la izquierda de la segunda.

Regla de la mano derecha: si teniendo la mano derecha extendida, de modo que el pulgar quede perpendicular a los restantes dedos, este señala el sentido de la corriente eléctrica o del cambio temporal de la intensidad del campo eléctrico, los demás dedos indicarán el sentido del vector de la intensidad del campo magnético.

Regla de la mano izquierda: si el pulgar de la mano izquierda señala el sentido del cambio temporal de la intensidad del campo magnético, los cuatro dedos restantes señalarán el sentido del vector de la intensidad del campo eléctrico inducido.

Para tratar con el signo en la ley de inducción se presentan dos posibilidades:

- 1 Explicar con esmero lo que significan los signos positivo y negativo de las diversas magnitudes físicas. En particular explicar cómo se decide si una tensión o una corriente eléctricas tienen valor positivo o negativo. Pero si se quiere entender el signo menos en la ley de inducción, esto no basta. Hay que analizar también la convención sobre como están vinculados los signos de la integral de contorno y la integral de superficie en el teorema de STOKES —George STOKES (1819–1903)—: si el pulgar de la mano derecha señala la dirección positiva de la superficie de la integral de superficie, los dedos señalan el sentido del recorrido de integración de la integral cerrada. Sin embargo no se recomienda proceder así, al menos en la enseñanza media, ya que esto complica el proceso de enseñanza-aprendizaje, y el esfuerzo no esta recompensado por una mayor comprensión.
- 2 No es necesario formular la ley de inducción con signo alguno, así como se suele hacer en muchas otras ocasiones.

Referencias

- [1] J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, v.2. 3rd. edition (edition 1954). New York: Dover Publications. p.190.

6.21 Dos causas para la inducción electromagnética

Tema

Al estudiar la inducción electromagnética se insiste en que existen dos efectos de inducción, y se presenta al menos uno de los dos experimentos que se describen brevemente en el siguiente párrafo. Algunos físicos han comentado que la ley de FARADAY —Michael FARADAY

Dos causas para la inducción electromagnética

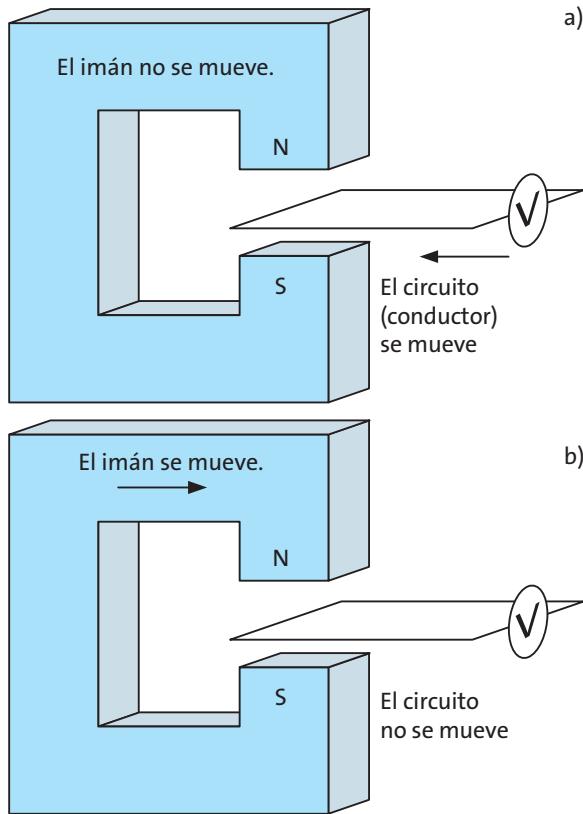


Fig. 6.11 Experimento de inducción en dos sistemas de referencia distintos. a) El imán está en reposo, el circuito (conductor) se mueve. b) El imán se mueve, el circuito está en reposo.

(1791–1867)— es una ecuación que describe dos fenómenos diferentes [1].

En uno de los experimentos mencionados el conductor se mueve a través de un campo magnético homogéneo y constante en el tiempo, Fig. 6.11a; la generación de la diferencia de potencial (tensión eléctrica), entre los extremos del conductor, se explica así: Debido a la fuerza de LORENTZ —Hendrik LORENTZ (1853–1928)— los portadores de carga se desplazan hasta que la fuerza electrostática resultante compensa a la de LORENTZ (equilibrio de fuerzas para los portadores), dando como resultado una diferencia de potencial entre los extremos del conductor, la cual se puede medir con un voltímetro. En el segundo experimento se utiliza un circuito eléctrico inmóvil mientras varía la intensidad del campo magnético, lo cual se puede hacer, por ejemplo moviendo un imán, como en la Fig. 6.11b. En este caso también el voltímetro registra una diferencia de potencial; sin embargo, este resultado no se puede interpretar por medio de la fuerza de LORENTZ. Al parecer se trata de otro efecto físico diferente al del primer experimento.

a)

Normalmente se resumen los dos resultados en una única ecuación, la conocida ley de inducción:

$$U_{\text{ind}} = -d\Phi/dt.$$

A veces se comenta que sorprendentemente dos causas diferentes para la inducción se pueden describir con la misma ecuación.

Defectos

En los dos casos se trata del mismo experimento, que se describe empleando dos sistemas de referencia distintos.

En el experimento de la Fig. 6.11b, el circuito está en reposo mientras el imán permanente se mueve. Para explicar la tensión de inducción es necesaria la primera ecuación de MAXWELL —James MAXWELL (1831–1879)— (ley de FARADAY):

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{B}; \quad (6.18)$$

al interior del circuito la inducción magnética \vec{B} está cambiando lo cual genera un campo eléctrico de circulación. Con la forma integral de la ecuación:

$$\oint \vec{E} d\vec{r} = -\dot{\Phi}, \quad (6.19)$$

se puede decir que cambia el flujo magnético a través del circuito.

En el experimento representado en la Fig. 6.11a, sobre los portadores de carga del conductor en el campo densidad de flujo magnético actúa la fuerza de LORENTZ, la cual está en equilibrio con la fuerza electrostática. Existe entonces un campo electrostático, es decir, un campo eléctrico sin rotación, en este caso la inducción magnética \vec{B} es independiente del tiempo. Para “armonizar” las dos explicaciones, comúnmente se emplea un “truco” matemático no muy elegante. Al calcular el flujo magnético como integral de área sobre la inducción magnética se supone que el área de integración depende del tiempo, en realidad esta operación corresponde a un cambio no explícito del sistema de referencia.

Un mismo experimento se describe de manera distinta en dos sistemas de referencia; al pasar de un sistema a otro las intensidades de campo se transforman. Solo así es posible que en un caso se tenga un campo con rotación y en el otro sin ella.

Para percibir mejor las consecuencias de un cambio de sistema de referencia se puede plantear un experimento más sencillo: Un polo magnético norte P (uno de los extremos de un imán de barra largo), se mueve con

relación a un cuerpo Q cargado eléctricamente, Fig. 6.12; el movimiento es perpendicular a la línea que une a P y Q.

Ese experimento se puede analizar desde dos sistemas de referencia: el sistema donde P está en reposo (arriba), y donde Q está en reposo (abajo).

1. Sistema de referencia con P en reposo.

La carga eléctrica que se mueve con el cuerpo Q (movimiento hacia dentro del plano del dibujo), Fig. 6.12a, representa una corriente eléctrica, alrededor de la cual existe un campo magnético, el cual es descrito por la segunda ecuación de MAXWELL (ley de AMPÈRE —André-Marie AMPÈRE (1775–1836)—):

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J} + \vec{D}.$$

P “siente” el campo magnético y experimenta una fuerza hacia arriba, mientras la fuerza de LORENTZ dirigida hacia abajo actúa sobre Q. Se observa que la interacción en-

tre P y Q está determinada por el campo magnético. En la parte superior izquierda de la figura, es decir Fig. 6.12a, las contribuciones de P y de Q al campo magnético están representadas separadamente. Así, se “aprecia” la fuerza sobre P en el campo de Q y la fuerza sobre Q en el campo de P; lo propio ocurre en la representación de la derecha, Fig. 6.12b. Por encima de Q las líneas de campo son más densas que por debajo; ya que existe presión perpendicular a las líneas de campo resulta que Q es empujado hacia abajo. Las líneas de campo también son más densas por encima de P que por debajo de P, y teniendo en cuenta que hay tensión en la dirección de las líneas de campo, este “tira” a P hacia arriba.

2. Sistema de referencia con Q en reposo.

El polo magnético que se mueve representa una corriente magnética de desplazamiento, (movimiento hacia afuera del plano del dibujo), Fig. 6.12c, alrededor del cual hay un campo eléctrico, descrito por la primera ecuación de MAXWELL. Q “siente” este campo y experi-

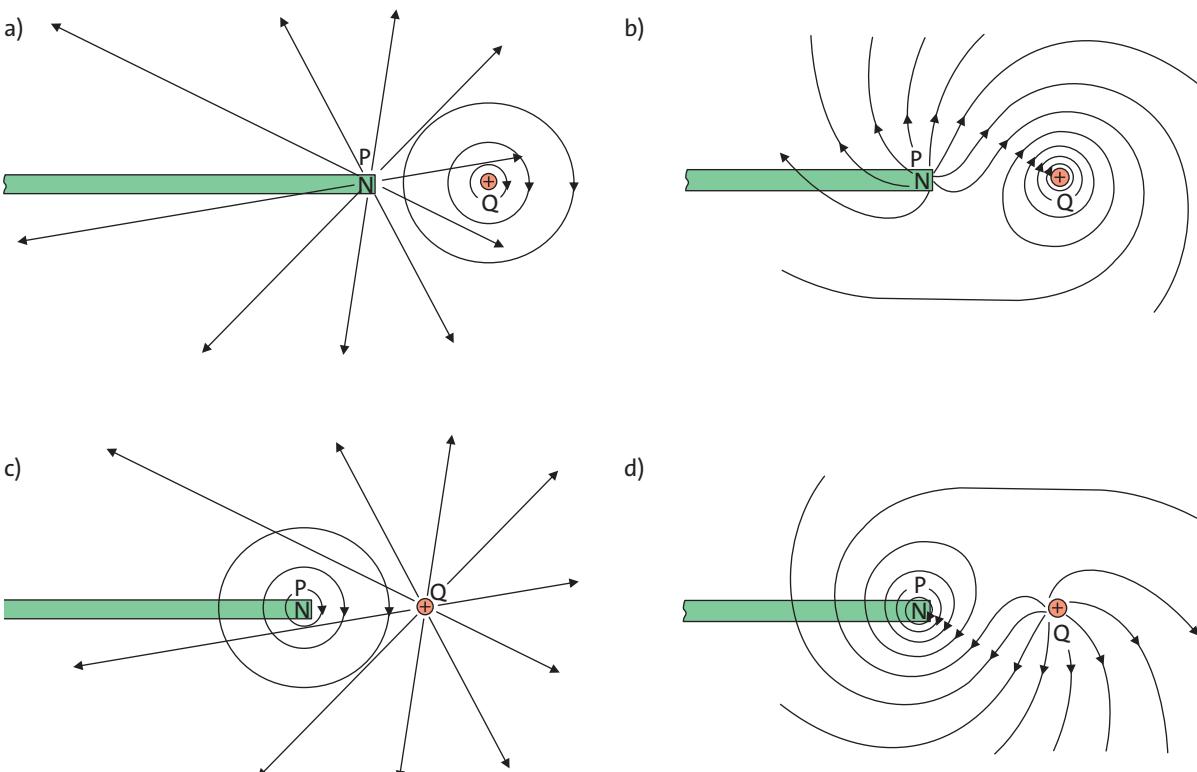


Fig. 6.12 Un cuerpo Q, eléctricamente cargado se mueve con relación a un polo magnético P. El proceso se describe en dos sistemas de referencia distintos: a) y b) El imán está en reposo, y el cuerpo cargado se mueve hacia dentro del plano del dibujo. c) y d) El cuerpo está en reposo, el imán se mueve hacia afuera del plano del dibujo. Las líneas en las figuras a) y b) son líneas del campo magnético (densidad de flujo magnético), las de las figuras c) y d) del eléctrico. Las figuras de la izquierda a) y c) muestran las contribuciones del polo magnético y de la carga eléctrica separadamente. Las figuras a la derecha b) y d) muestran los campos resultantes.

Tensión de inducción

menta una fuerza hacia abajo, una fuerza dirigida hacia arriba actúa sobre P. Esta última se puede considerar el análogo eléctrico de la fuerza magnética de LORENTZ (corriente magnética en el campo eléctrico). En este caso la interacción entre P y Q esta determinada por el campo eléctrico. Aquí también se pueden “ver” las fuerzas bien sea en la figura de izquierda, Fig. 6.12c, o en la de la derecha, Fig. 6.12d.

El ejemplo muestra que un cambio del sistema de referencia puede hacer que un mismo efecto sea descrito bien con la primera, o con la segunda ecuación de MAXWELL, y que una misma interacción en una ocasión este determinada por el campo eléctrico y en otra por el magnético.

Origen

En general los cambios de sistemas de referencia se analizan preferentemente en mecánica, de modo que no se tiene mucha experiencia cuando se trata de las implicaciones que dichos cambios pueden tener en electrodinámica.

Eliminación

Del estudio de la mecánica se sabe que un cambio del sistema de referencia puede causar complicaciones, y que un sistema mal elegido puede dificultar la descripción de un fenómeno. Si el cambio del sistema de referencia no hace parte explícita del problema que se discute en clase, es recomendable evitar su empleo. Para describir la inducción electromagnética se recomienda tomar un sistema en el cual la intensidad del campo magnético cambie con el tiempo, es decir, el sistema en el cual la bobina de inducción esté en reposo.

Si se formula que: “Un campo magnético que varía en el tiempo causa una tensión de inducción”, ya se ha decidido sobre el sistema de referencia.

Referencias

[1] Faraday's law as two different phenomena. [en línea]. En: http://en.wikipedia.org/wiki/Faraday%27s_law_of_induction#cite_note-Griffiths1-9 [consultado el 29 agosto de 2022].

6.22 Tensión de inducción

Tema

En libros, tanto de educación media como universitarios, es posible encontrar citas como las siguientes:

1 “La variación de la intensidad de corriente eléctrica induce en la bobina un campo eléctrico, que a su vez empuja las cargas en la misma dirección.” [1].

2 “La variación de la intensidad de corriente I en una bobina o el cambio de la intensidad del campo magnético \vec{B} que es proporcional a dicha corriente genera en la misma bobina que genera el campo una intensidad de campo eléctrico \vec{E}_{ind} , y junto con esta una tensión inducida U_{ind} , que actúa en contra del cambio.” [2].

3 “Las leyes de KIRCHHOFF son válidas también para corrientes alternas:

Ley de nodos: En cada bifurcación de corrientes la suma de las corrientes entrantes es igual a la de las corrientes salientes.

Ley de mallas: Cada malla, es decir, cada segmento cerrado del circuito, tiene la tensión eléctrica total igual a cero. En otras palabras, entre dos puntos de un circuito existe la misma tensión en cualquier rama que se mida.” [3].

4 “El voltaje inducido en una bobina es proporcional al producto del número de vueltas de la bobina por la rapidez con la que el campo magnético cambia dentro de esas vueltas.” [4]

5 “Al variar el campo en la bobina 1 aparece una tensión inducida en la bobina 2.” [5].

Defectos

Los valores de las magnitudes físicas comunes se refieren a uno de los cuatro entes topológicos siguientes: un punto (ejemplo: temperatura), una línea orientada (ejemplo: tensión eléctrica), una sección o área orientada (ejemplo: fuerza), o una región del espacio (ejemplo: masa). Al indicar el valor de una magnitud se debe tener claro a qué punto, línea, sección, o región corresponde. Así por ejemplo, se puede decir que la temperatura en el punto P es de 20 °C, la masa del cuerpo C (en la región que este ocupa) es de 500 g, o la fuerza en la sección S de una cuerda es de 40 N.

En las citas mencionadas no se precisa dicha información, ni cuando se trata de la tensión eléctrica ni cuando a la intensidad del campo se refiere; los valores de ambas magnitudes son atribuidos vagamente a la bobina, pero en realidad no corresponden a esta.

La tensión se puede definir como la integral de línea de la intensidad del campo eléctrico:

$$U = \int_P^Q \vec{E} d\vec{r},$$

esto significa que la tensión se refiere a una trayectoria orientada; en la Fig. 6.13 la trayectoria s entre los puntos P y Q. La trayectoria de integración también puede ser cerrada, en ese caso la tensión se refiere a una trayectoria cerrada y orientada, la cual en ocasiones se denomina tensión anular.

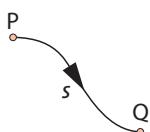


Fig. 6.13 La tensión eléctrica se refiere a una trayectoria orientada.

En caso de que el campo eléctrico sea un campo conservativo, el valor de la tensión depende solamente de los puntos inicial y final de la trayectoria; si φ_P y φ_Q son los valores del potencial eléctrico en los puntos P y Q, se obtiene la tensión $U_{QP} = \varphi_Q - \varphi_P$. Esta tensión se puede atribuir al par ordenado (P, Q) de los puntos. El valor de la tensión $U_{PQ} = \varphi_P - \varphi_Q = -U_{QP}$, que corresponde al par (Q, P) ordenado en sentido opuesto, tiene signo contrario.

A menudo interesa solamente el módulo de la tensión, en este caso se acostumbra hablar sencillamente de la tensión entre dos puntos sin resaltar el orden; así como se habla de la distancia entre dos puntos y se le asigna un valor positivo. No hay nada que objetar a este modo de proceder, mientras se tenga conciencia de los errores que se pueden cometer o a los que pueda inducir.

¿Qué se puede concluir de lo anterior sobre los conceptos de inducción de las citas?

Para estudiar la situación se presenta un circuito RL simplificado, cuya bobina tiene una sola espira, Fig. 6.14.

Para la integral de circulación de la intensidad del campo eléctrico se tiene:

$$\oint \vec{E} d\vec{r} = - \iint \vec{B} d\vec{A}$$

Si se toma como trayectoria de integración el camino de la corriente eléctrica, la tensión se encuentra en el interior del conductor y del resistor. En este caso, ¿cómo se distribuye la tensión eléctrica en los diversos tramos del circuito? ¿Cuál es el valor de la integral

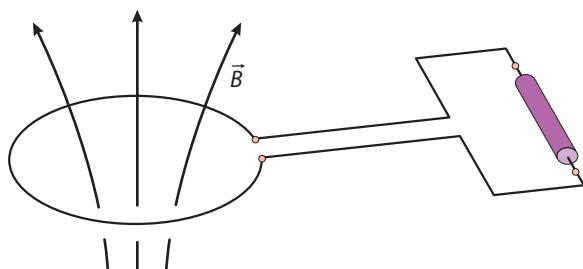


Fig. 6.14 Solo el resistor contribuye a la integral sobre \vec{E} en el camino cerrado del circuito RL.

$$U = \int_P^Q \vec{E} d\vec{r}$$

para las diversas posiciones de P y de Q? Se debe tener en cuenta que se integra siempre en la dirección de $d\vec{r}$, Fig. 6.15, de modo que Q se encuentre delante de P; para cada segmento del conductor es válida la conocida ley de OHM —Georg OHM (1789–1854)—,

$$U = \frac{R}{I}.$$

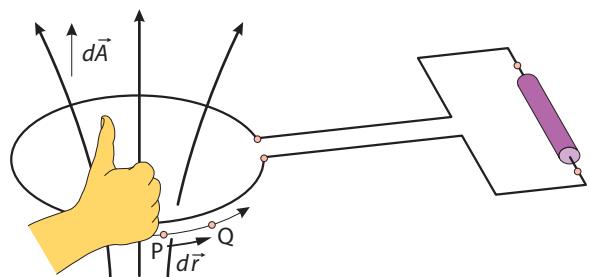


Fig. 6.15 La orientación del elemento de superficie y el elemento de trayectoria en la segunda ecuación de MAXWELL están relacionados entre sí mediante la regla de la mano derecha.

Si se considera que la resistencia de la espira de inducción y de los demás conductores es despreciable comparada con R_0 (resistencia del resistor), esto significa que la tensión es igual a cero para todos los segmentos PQ fuera del resistor; a la integral de línea sobre el camino cerrado (integral anular) contribuye solamente la trayectoria dentro del resistor. Solo en el resistor la intensidad del campo eléctrico no es cero, y solamente en él la corriente eléctrica necesita una fuerza motriz.

El razonamiento es el mismo si en lugar de una espira se considera una bobina con N espiras. En este caso el flujo magnético total a través del circuito es N veces el flujo correspondiente a una sola espira, y la superficie de integración tiene una forma más complicada. Pero el resultado es el mismo, a la integral anular contribuye solo el segmento de camino dentro del resistor.

Regresando a las citas 1, 2 y 5, se dice que se genera una tensión “dentro de la bobina”. ¿Qué se quiere decir con esto? Para ser precisos se tendría que mencionar la trayectoria de integración; la frase “dentro de la bobina” sugiere una trayectoria al interior de esta. Sin embargo, para tal trayectoria la contribución a la integral anular es cero, la tensión dentro de la bobina es cero. Asimismo, la intensidad del campo eléctrico —mencionada en las dos primeras citas— es cero en el conductor de la espira.

El campo de dispersión del transformador

Como ya se mencionó, tal situación no se limita a textos escolares, las citas 3, 4 y 5 son de libros universitarios. En la cita 3, se emplea la primera regla de KIRCHHOFF —Gustav KIRCHHOFF (1824–1887)— (regla de la malla) para encontrar la ecuación diferencial para el circuito resonante, y se insiste en que es necesario medir la tensión a lo largo de una trayectoria. Sin embargo, no es correcto que en ambas ramas resulte la misma tensión, la primera regla de KIRCHHOFF no es válida cuando el flujo magnético a través de la malla cambia con el tiempo.

Origen

En general la tensión eléctrica se introduce en el contexto de campos conservativos, donde es posible y permitido atribuir la tensión a un par de puntos, y no es necesario mencionar la trayectoria de integración. Cuando se trata de describir la inducción electromagnética con dicha costumbre, los problemas son casi inevitables.

Se tiene también la convicción de que es posible definir la tensión operacionalmente (“en la práctica”), diciendo que “la tensión es aquello que se mide con un voltímetro”. Se puede creer que un voltímetro está conectado correctamente cuando sus dos contactos se han unido con dos puntos de un circuito eléctrico. Sin embargo, en el circuito de la Fig. 6.14 se puede obtener cualquier valor para la tensión entre dos puntos fijos, dependiendo de cómo se ubiquen los cables. ¡Los mismos cables pueden formar una bobina!

Eliminación

Cuando se trata de un campo conservativo, la tensión es igual a una diferencia de potencial, y se debe hacer referencia a los puntos respectivos de manera ordenada. Sin embargo, el mencionar el orden de los puntos hace de la descripción algo “complicado” y “laborioso”, por lo cual casi nunca se hace. La tarea se facilita cuando en lugar de la tensión se mencionan los potenciales de los dos puntos separadamente.

Solo cuando el signo de la tensión no tenga importancia se puede hablar de “la tensión entre los dos puntos”.

Cuando se trata de la inducción, las cosas son más complicadas, se proponen dos formas de proceder dependiendo de quiénes sean los estudiantes.

Secundaria: en general se recomienda emplear circuitos con una bobina, es decir, no circuitos con una sola espira. Se “retira” mentalmente la bobina del circuito y se estudia solamente la parte no suprimida, sobre la cual se puede proceder de manera similar a lo aprendido para el caso de circuitos de corriente continua, diciendo por ejemplo que a cada punto le corresponde un potencial.

Universidad: al tratar la tensión siempre se debe mencionar la línea orientada a la cual corresponde. Esta línea puede tener un punto de inicio y uno final, o puede ser cerrada; si es cerrada y coincide con el circuito eléctrico entonces basta mencionar dicho circuito.

Referencias

- [1] F. Dorn, H. Oberholz u. F. Bader, *Physik in einem Band*, Hannover: Schroedel Verlag, 2002. p.421.
- [2] J. Grehn u. J. Krause (Hrsg.), *Metzler Physik*, Hannover: Schroedel Verlag, 1989. p.252.
- [3] C. Gerthsen, H. Kneser u. H. Vogel, *Physik*. Berlin: Springer-Verlag, 1993. p.282.
- [4] P. Hewitt, *Física conceptual*, México: Pearson Educación, 2004. p.480.
- [5] A. Senner, *Principios de electrotecnia*, Barcelona: Editorial Reverté, 1994. p.119.

6.23 El campo de dispersión del transformador

Tema

El llamado campo de dispersión de un transformador se presenta con frases como las siguientes:

- 1 “... el flujo magnético Φ debe concentrarse totalmente en el interior del núcleo de hierro, es decir, atravesar ambas bobinas con la misma intensidad (ningún flujo de dispersión).” [1]
- 2 “El hecho de que el voltaje secundario al medir con mayor precisión resulte inferior a lo encontrado por el cálculo, se debe en parte a las pérdidas óhmicas de calor. Otra causa es que del flujo de inducción en la bobina primaria debido a la dispersión solamente una parte atraviesa la bobina secundaria.” [2]
- 3 “Como el transformador presenta una serie de pérdidas (sic), debidas principalmente a flujo de dispersión del campo magnético...” [3]
- 4 “Además, cuando se desprecia la dispersión del flujo magnético entre el primario y el secundario, la potencia eléctrica en una y otra bobina es la misma...” [4]

Defectos

Se conocen los campos de dispersión como algo que debe evitarse, en principio no son necesarios y es permitido suponer, sin violar ningún principio físico, que no existen. Es similar a lo que ocurre con la fricción mecánica, la cual también aparece a menudo solo como un efecto perturbador que se intenta eliminar, o al menos no tener en cuenta.

El campo de dispersión del transformador

Una comparación un poco más general es la fuga en una manguera de jardín, la cual puede tener algunas perforaciones o no ser completamente hermética en las conexiones, pero en principio, dichos “escapes” de agua se pueden, con relativa facilidad, identificar y eliminar. En realidad, a menudo, lo mismo puede afirmarse para un campo de dispersión. Un blindaje metálico impide el “surgimiento” de campo eléctrico, un revestimiento de mu-metal “empareda” el campo magnético o lo aleja del dispositivo.

También se habla de campos de dispersión en algunos casos en que la función del dispositivo se basa precisamente en dicho campo, existen varios ejemplos, pero aquí se quiere analizar únicamente lo referente al transformador, considerándolo perfecto o ideal.

Analicemos un transformador tal como se lo conoce en laboratorios básicos de ciencias: un núcleo de hierro cerrado y rectangular, con las bobinas ubicadas en dos lados del rectángulo, Fig. 6.16, haciendo los supuestos habituales:

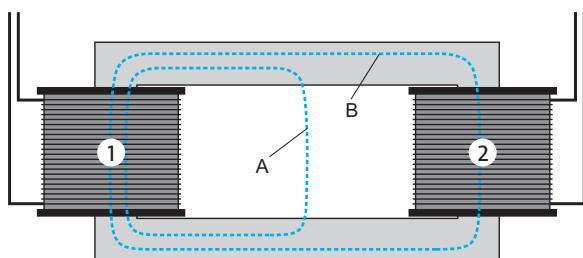


Fig. 6.16 La intensidad del campo magnético es distinta de cero solo en la parte del recorrido de la integración que se encuentra fuera del núcleo de hierro.

- Las resistencias óhmicas de las bobinas son pequeñas comparadas con las resistencias inductivas correspondientes,
- La resistencia de carga es pequeña en comparación con la resistencia inductiva de la bobina secundaria,
- La resistencia de carga es grande en comparación con las resistencias óhmicas de las dos bobinas,
- La permeabilidad relativa μ_r del material del núcleo es mucho mayor que 1.

Al aplicar la ley de AMPÈRE —André-Marie AMPÈRE (1775–1836)— al transformador, en primer lugar se integra a lo largo de la trayectoria cerrada (o camino) A Fig. 6.16:

$$\int_A \vec{H} d\vec{r} = n_1 \cdot I_1 \quad (6.20)$$

Donde H es la intensidad del campo magnético producida por la corriente I , $d\vec{r}$ es el elemento diferencial a lo largo de la trayectoria de integración, y n es el número de espiras en la bobina, el subíndice 1 se refiere a la bobina primaria.

El valor de la integral es igual a la corriente total $n_1 \cdot I_1$ que atraviesa el camino de integración; la intensidad del campo magnético en el interior del núcleo de hierro es mayor que fuera en un factor μ_r , y dado que los valores típicos de μ_r son mayores de 1000, la contribución a la integral del recorrido dentro del hierro es despreciable en comparación a la contribución del recorrido fuera. Es decir a la integral contribuye prácticamente solo el “campo de dispersión”.

Respecto al camino de integración B (Fig. 6.16), este es atravesado por corrientes de las dos bobinas y teniendo en cuenta que se encuentra totalmente dentro del núcleo, la integral es igual a cero:

$$\int_B \vec{H} d\vec{r} = n_1 \cdot I_1 - n_2 \cdot I_2 = 0$$

El subíndice 2 hace referencia a la bobina secundaria. De lo anterior se desprende una relación bien conocida:

$$n_1 \cdot I_1 = n_2 \cdot I_2.$$

Si no existiera el campo de dispersión, es decir, si la intensidad del campo de dispersión fuera igual a cero, esta ecuación no sería válida.

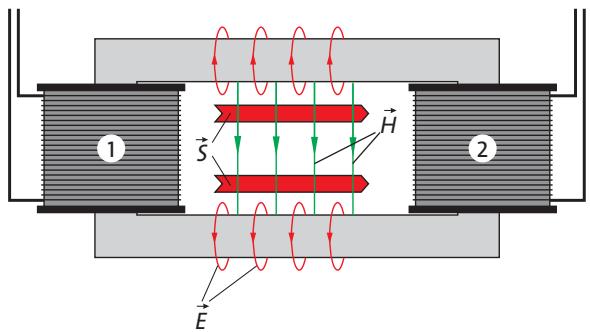


Fig. 6.17 Campos entre los lados del núcleo de un transformador. El flujo de energía va de izquierda a derecha.

Veamos otro aspecto de la importancia del “vilependiendo” campo. En la Fig. 6.17 se observan esquemáticamente tanto las líneas de campo magnético \vec{H} como las del campo eléctrico \vec{E} ; el cambio del flujo magnético en el núcleo de hierro es la causa de un campo eléctrico de circulación, es decir, un campo con

$$\text{rot } \vec{E} \neq 0,$$

El campo de dispersión del transformador

alrededor de los lados del núcleo del transformador. Además, en la figura se muestra el vector de POYNTING —John POYNTING (1852–1914)—:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}, \quad (6.21)$$

es decir, la densidad de flujo de energía con el campo. Se observa que la energía fluye de la bobina primaria a la secundaria a través del campo.

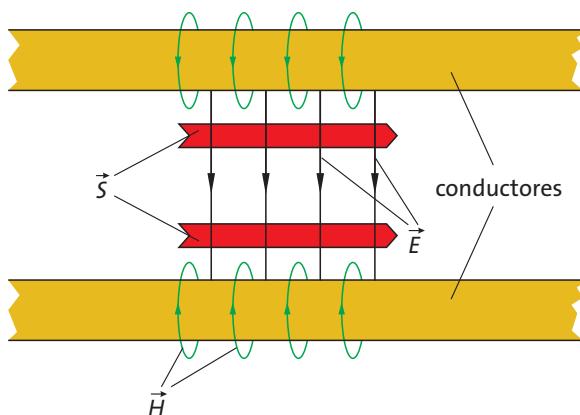


Fig. 6.18 Campos entre los dos conductores de un cable. El flujo de energía va de izquierda a derecha.

La situación es análoga a la del transporte de energía por medio de un cable eléctrico normal, pero allí los campos eléctrico y magnético están “intercambiados”, Fig. 6.18. Dado que los dos conductores se encuentran a diferentes potenciales eléctricos, las líneas de campo eléctrico van de un conductor al otro y dado que en los conductores fluye una corriente eléctrica, ellos estarán rodeados por un campo magnético de circulación. El flujo de energía tiene una distribución espacial similar que en el transformador.

El campo (magnético) de dispersión no tiene ninguna “ingerencia” en las pérdidas energéticas del transformador, así como el campo (eléctrico) de un cable eléctrico tampoco es causa de pérdidas; en ambos casos la eficacia está limitada por la disipación. En el caso del transformador esta se debe a la resistencia óhmica de las bobinas y a la continua inversión magnética en el núcleo de hierro. Una medida de esta última disipación es la intensidad del campo magnético en el interior del núcleo de hierro, que idealmente tendría que ser cero, al igual que la intensidad del campo eléctrico en el interior de los dos conductores de un cable. Ya que las pérdidas en el núcleo de hierro son particularmente elevadas, en un transformador se procura que la distancia entre las

bobinas primaria y secundaria sea lo más corta posible, a fin de minimizar las pérdidas.

Origen

En la explicación tradicional del funcionamiento del transformador, no se tiene en cuenta la intensidad del campo magnético \vec{H} , sino que se limita a considerar la densidad de flujo magnético \vec{B} . Ya que esta última es mucho mayor dentro del hierro que en el exterior, queda la impresión de que el campo exterior no tiene una función crucial. Este es uno de los muchos ejemplos que demuestran que la descripción parcial, y por tanto incompleta de los campos magnéticos por medio de la densidad de flujo da lugar a interpretaciones incorrectas, véase [5], [6], [7].

Otra razón puede ser el hecho de que se elude la discusión de una pregunta fundamental: ¿Por dónde pasa la energía de la bobina primaria a la secundaria?

Eliminación

- No “despreciar” en general todos los campos de dispersión. Dado que el término “campo de dispersión” tiene la connotación de algo indeseable y evitable, no debería llamarse campo de dispersión al campo magnético entre los lados de un transformador.
- Al estudiar el transformador, analizar no solamente la trayectoria de las líneas de la densidad de flujo, sino también la de la intensidad del campo magnético.
- Formular siempre las preguntas: “¿Dónde se encuentra la energía?” y “¿Qué camino toma la energía?”

Referencias

- [1] Gerthsen, *Physik*, 21. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 2002, p.414
- [2] W. Kuhn (Hrsg.): *Handbuch der experimentellen Schulpysik, Elektrizitätslehre III*, Aulis Verlag, Köln, 1965, S. 70
- [3] Transformador ideal y transformador real. [en línea]. En: <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/corrientes-alternas-con-un-transformador-electrico> [consultado el 31 de mayo de 2022]
- [4] El Transformador. [en línea]. En: http://www.fisicanet.com.ar/fisica/electrodinamica/ap04_transformadores.php [consultado el 31 de mayo de 2022]
- [5] Véase 6.5 Polos magnéticos, p.191
- [6] Véase 6.8 El campo de los imanes permanentes, p.194
- [7] Véase 6.9 Electroimanes, p.196

6.24 El oscilador de HERTZ

Tema

Generalmente, previo a la introducción de las ondas electromagnéticas se analiza el circuito oscilante: primero las oscilaciones libres, luego las amortiguadas y finalmente las forzadas. En ocasiones para la generación de las oscilaciones forzadas se introduce el circuito con el llamado acoplamiento regenerador, y a veces se explica cómo generar frecuencias muy altas con el circuito HARTLEY (basado en el oscilador LC); el condensador y el solenoide se reducen a “trozos” de conductor para conseguir frecuencias aún más altas. Se deforma el circuito de manera que resulta un dipolo oscilante. Se discute el aspecto de los campos eléctrico y magnético en la inmediación del dipolo, el llamado campo cercano, y se afirma y muestra experimentalmente que este dipolo emite una onda electromagnética, onda que representa el campo lejano.

Defectos

Se pueden formular varias críticas:

La explicación se orienta desde el comienzo al intrincado campo del dipolo radiante. La descripción de dicho campo es complicada y se presenta además el problema de distinguir entre los campos cercano y lejano. Todo esto es innecesario, al menos en un primer nivel. Existen ondas más sencillas: las ondas planas senoidales, las cuales son suficientes para describir y explicar la manera como se propagan las ondas. Aún más sencillas son las ondas rectangulares.

Para introducir las ondas electromagnéticas se explica el funcionamiento de la antena bipolar, creyendo que los estudiantes comprenderán bien el concepto de onda si saben cómo es generada. En realidad el proceso de generación es más complicado que la misma onda. Esta manera de proceder es semejante a la siguiente: se quiere explicar qué es una onda sonora y se comienza por explicar cómo funciona un clarinete. Este es un resonador del cual se “desacopla” y emite una pequeña fracción de la energía que oscila dentro del mismo. Es evidente que es más difícil explicar el clarinete que la onda sonora, y también más difícil comprender el dipolo de HERTZ que la onda electromagnética. El dipolo también es un resonador, y la mayor parte de la energía oscila entre los campos eléctrico y magnético, mientras una pequeña parte de ella es emitida por la antena bipolar.

Los trucos técnicos que se emplean para generar oscilaciones de alta frecuencia y el vocabulario técnico correspondiente pertenecen al ámbito de los especialistas y no a la cultura general.

A pesar del empeño y meticulosidad al introducir las ondas electromagnéticas no se logra el objetivo. Se in-

tenta avanzar, con pequeños pasos, del circuito oscilante —supuestamente sencillo— a las complicadas ondas, sin embargo exactamente en el lugar esencial se presenta una falla. Se analiza que el dipolo está rodeado de campos eléctrico-magnéticos, debido a la corriente eléctrica en el dipolo y a la carga eléctrica en sus extremos, pero no se explica el porqué una parte de dichos campos que aparecen y desaparecen periódicamente se desprende de la zona cercana al dipolo. Solamente se lo menciona. Si el desfase de las intensidades de los campos eléctrico y magnético fuera $\pi/2$, tal como se dice o sugiere en la aproximación de campo cercano, entonces la antena no emitiría en absoluto.

Origen

Las ondas electromagnéticas fueron obtenidas por Heinrich HERTZ (1857–1894) de un modo particular, él no tenía un generador de alta frecuencia a su disposición y tuvo que imaginar un dispositivo ingenioso para generarlas. El complicado oscilador de HERTZ ha sobrevivido en la enseñanza. Siendo un buen teórico HERTZ fue capaz de calcular los campos de su oscilador, cálculo que se repite en muchos libros. En dicho cálculo se ve que en el campo cercano el desfase entre los campos eléctrico y magnético se desvía de $\pi/2$.

Eliminación

Se recomienda limitarse, en la etapa inicial, a la descripción de ondas con geometría sencilla: ondas planas senoidales o rectangulares, y no analizar en esta etapa los generadores de altas frecuencias. La generación se puede de explicar cualitativamente, por ejemplo así: en una placa metálica muy larga comienza a fluir repentinamente una corriente eléctrica (sin importar por el momento la causa), inmediatamente delante de la placa comienza a generarse un campo magnético. La variación de este campo induce un campo eléctrico, donde ya existe campo magnético. De la placa se aleja un frente que separa el espacio lleno de campo del espacio desprovisto del mismo. Al suspender la corriente eléctrica se forma un segundo frente, detrás del cual hay espacio sin campo. El campo entre los dos frentes representa una onda rectangular.

6.25 El vector de POYNTING y el tensor de MAXWELL

Tema

Por lo general, el vector de POYNTING —John Henry POYNTING (1852–1914)— se define así:

La chispa de encendido y la radiación electromagnética

El vector de POYNTING \vec{S} representa la densidad del flujo de energía del campo electromagnético. Se calcula como el producto vectorial de la intensidad de campo eléctrico \vec{E} y la intensidad de campo magnético \vec{H} :

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}, \quad (6.22)$$

Defectos

¿Por qué la densidad de flujo de energía en el campo electromagnético necesita su propio nombre y símbolo? El sentido de una magnitud física es que mide una misma propiedad en los más diversos sistemas físicos. De este modo, permite comparar los sistemas entre sí, por ejemplo, el comportamiento inercial de la Tierra con el de un electrón con ayuda de la masa. De este modo se puede decir que la masa de la Tierra es grande y la del electrón pequeña. Si las masas de la Tierra y del electrón hubieran recibido nombres diferentes, la afirmación correspondiente sería más complicada.

Además, cabe preguntarse, si se da un nombre propio a la densidad de flujo de energía en el campo electromagnético, ¿no sería coherente dar también nombres a las densidades de flujo de energía en otros sistemas, por ejemplo, el de la tubería hidráulica de una excavadora, que se calcula como $p \cdot \vec{v}$ a partir de la presión y la velocidad?

Ahora bien, el procedimiento correspondiente es bastante común en otros contextos. Por ejemplo, con la magnitud que a veces se denomina distancia, pero que en otros casos también es longitud, anchura, altura, desplazamiento, radio o diámetro. Pero se trata de magnitudes muy descriptivas y firmemente ancladas en el lenguaje cotidiano.

Con la energía es diferente, y en particular en el contexto de los campos. A menudo se subraya que el “concepto de campo” es un concepto difícil, y se lo introduce de manera que da la impresión de que un campo no es más que una construcción matemática que permite calcular la fuerza sobre un punto de masa [1].

De hecho, un campo es un sistema físico como los demás, como un cuerpo, un gas o un líquido. Como en cualquier otro sistema, en un campo las magnitudes físicas estandar tienen valores determinados, la densidad de energía (densidad de masa), la densidad de corriente de energía, el momentum, la densidad de corriente de momentum, la densidad de carga, la densidad de entropía y, según el estado, también la velocidad, la temperatura y el potencial químico.

Parece que el nombre de vector de POYNTING promueve la idea de que hay algo misterioso en el campo y que no hay que tomar el flujo de energía en el campo electromagnético al pie de la letra, o que es algo que de

alguna manera es diferente de un flujo de energía “real”.

Origen

La ecuación (6.22) data de la época en la que se empezaba a entender cómo se podían describir localmente las distribuciones de energía.

Una característica particular era que la nueva magnitud energía era una magnitud física de la que no se podía decir qué propiedad estaba midiendo. Sus valores solo podían inferirse o calcularse a partir de otras magnitudes medibles, aunque de forma diferente según el sistema y el estado. No fue hasta 1905, 20 años después de la introducción del vector de POYNTING, cuando quedó claro que la energía también medida una propiedad específica, la inercia y la gravedad.

Algo similar es válido para el tensor de tensiones maxwelliano. En lugar de decir que la ecuación encontrada por MAXWELL —James Clerk MAXWELL (1831–1879)— permite calcular las tensiones mecánicas en el campo, se llama a estas tensiones maxwellianas, como si difirieran en algo de las tensiones mecánicas comunes.

Eliminación

Se sugiere escribir la ecuación así:

$$\vec{j}_E = \vec{E} \times \vec{H},$$

donde \vec{j} es la densidad del flujo energético.

Pero ¿dónde queda POYNTING, a quien se quería honrar con el nombre del vector? Sería más apropiado relacionar a POYNTING no con el vector, sino con la ecuación; esta podría llamarse fórmula de POYNTING-HEAVISIDE —Oliver HEAVISIDE (1850–1925)—, ya que fue encontrada por ambos independientemente.

Referencias

[1] Véase 6.12 *El campo como región del espacio con propiedades*, p.200

6.26 La chispa de encendido y la radiación electromagnética

Tema

Es conocido que las chispas eléctricas perturban la recepción de las ondas de radio. Durante una tormenta, al accionar un interruptor, al poner en funcionamiento un motor de corriente continua, al recibir una señal con amplitud modulada se percibe un chasquido o ruido. También al encender un motor a gasolina se perturbaría

la recepción de no existir un sistema de eliminación de los llamados ruidos parásitos (o interferencias).

En el experimento original de Heinrich HERTZ (1857–1894) que permitió generar y detectar ondas electromagnéticas también un explosor —que es el sitio donde se crea el arco que descarga el condensador y crea la oscilación de alta frecuencia—, desempeña un papel importante.

Se encuentra muy extendida la opinión de que la radiación perturbadora emana del explosor (de la chispa):

- 1 “Ruido causado por el hombre. Las fuentes principales de este ruido son los mecanismos que producen chispas, como por ejemplo los conmutadores de los motores eléctricos, los sistemas de encendido automotriz, el equipo generador y conmutador de energía eléctrica y las lámparas fluorescentes.” [1].
- 2 “HERTZ razonó que al saltar estas chispas se produciría un campo eléctrico variable en la región vecina a las esferas chicas, que según MAXWELL debería inducir un campo magnético, también variable. Estos campos serían una perturbación que se debería propagar, es decir, debería producirse una onda electromagnética.” [2].
- 3 “Así, por ejemplo, en el experimento de HERTZ la chispa que salta de una esfera a la otra... esta compuesta de electrones acelerados que emiten ondas electromagnéticas.” [3].
- 4 “El arco eléctrico radiaba parte de la energía de la chispa en forma de ondas electromagnéticas.” [4].

También se encuentran imágenes del experimento de HERTZ, en las cuales la onda electromagnética parece emanar de la descarga de chispa, que conecta las dos mitades del oscilador.

Defectos

No es la chispa la que emite la onda electromagnética sino el conductor, del cual la chispa es solo una minúscula parte, en el caso del oscilador de HERTZ el conductor es toda la antena. El explosor juega solamente el papel de un interruptor que conecta las dos mitades de la antena en cuanto la tensión eléctrica ha alcanzado un valor muy alto.

En el oscilador de HERTZ es necesario generar una tensión muy alta entre las dos partes de la antena, para que la intensidad del campo eléctrico también sea muy alta y para que después de cerrar el interruptor la intensidad de la corriente eléctrica sea alta; para “cargar” la antena las dos mitades deben estar inicialmente desconectadas. En lugar de conectarlas por medio de un interruptor normal se utiliza el explosor, en cuanto la tensión ha alcanzado un valor suficientemente grande se

genera una chispa que representa la conexión conductora. Hay que anotar que cuando la tensión alterna de alta frecuencia que se inicia pasa por cero, la chispa no se interrumpe porque la ionización del aire sobrevive dicho intervalo.

La misma situación es válida para la chispa en un interruptor o en los colectores de un motor eléctrico, la emisión de la onda electromagnética no se produce solamente en la chispa sino en todo el conductor en el cual la corriente eléctrica oscila.

Así la chispa es una condición necesaria para la generación de la onda, pero la fuente de la radiación es el conductor completo en el cual se produce la variación rápida de la corriente eléctrica (y/o de la carga eléctrica).

Origen

Es conocido que cuando se produce una chispa, se presenta ruido en la radio. La chispa es llamativa, emite luz y sonido, y parece plausible que la perturbación electromagnética también provenga de ella. Este concepto incorrecto ha sobrevivido a pesar de estar en contradicción con lo que se aprende sobre el oscilador de HERTZ, es decir, que toda la antena (y en general el conductor) es responsable de la emisión.

Eliminación

Explicar que el rol del explosor es solamente el de un interruptor, la chispa realiza una conexión entre dos conductores metálicos.

Referencias

- [1] W. Tomasi, *Sistemas de comunicaciones electrónicas*, México: Pearson Ed., 2003. p.35.
- [2] Ondas electromagnéticas. [en línea]. En: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/112/htm/sec_17.htm [consultado el 27 de octubre de 2022].
- [3] Emisión de ondas electromagnéticas. [en línea]. En: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/112/htm/sec_19.htm [consultado el 27 de octubre de 2022].
- [4] La radio en el mundo. [en línea]. En: <http://www.slideshare.net/D1Evan/la-radio-en-el-mundo> [consultado el 28 de octubre de 2022].

6.27 Amplificadores

Tema

Al estudiar los amplificadores se muestra que por medio de transistores es posible amplificar la corriente eléctri-

Amplificadores

ca I o la tensión eléctrica U , distinguiendo entre amplificación de corriente y de tensión. Para explicar estos procesos se analiza el funcionamiento del transistor, introduciendo numerosos términos técnicos y estudiando curvas características.

Defectos

Como ocurre a menudo, también aquí se da más importancia a detalles complicados y secundarios que a lo esencial y sencillo. Se estudian los amplificadores de transistor y los diversos circuitos correspondientes, haciendo una distinción entre amplificación de corriente y de tensión, sin mencionar ni explicar lo que hace que se llame amplificador a una caja con una entrada y una salida para una señal. Un amplificador tiene necesariamente que aumentar la corriente modulada de energía que acompaña a una señal:

$$P_{\text{salida}} > P_{\text{entrada}}.$$

Si se trata de un amplificador eléctrico (y no de uno mecánico, acústico u óptico) la corriente de energía se puede expresar así:

$$P = U \cdot I.$$

Para este amplificador se tiene que:

$$U_{\text{salida}} \cdot I_{\text{salida}} > U_{\text{entrada}} \cdot I_{\text{entrada}}.$$

Obviamente, dicha condición se puede cumplir de varias maneras, al amplificar la señal una de las magnitudes U o I puede incluso disminuir.

También un transformador “amplifica” la tensión eléctrica o la corriente, disminuyendo la otra cantidad, sin embargo, no se lo llama amplificador ya que el producto de U e I no aumenta.

Origen

Al parecer el tema ha llegado a la escuela propuesto por aficionados a la electrónica. El hecho que en un amplificador se aumenta la corriente de energía era tan evidente para ellos, que no se dieron cuenta que faltaba este importante detalle en la enseñanza.

Eliminación

Se puede introducir la noción de amplificador, en general, de la siguiente manera: para transmitir datos por medio de señales se requiere energía y como en cualquier otro proceso de transporte, a lo largo del camino esta “se pierde”, empleándose en producir calor (entropía). Por esta razón el transporte de señales necesita de

vez en cuando provisión de energía, es decir, adicionar una cierta cantidad de energía para “reponer” la disipada, función que cumple el amplificador. El amplificador tiene una entrada y una salida para las señales, junto con la energía correspondiente. La corriente de datos, medida en bit/s, al entrar al amplificador es la misma que al salir. Ya que la corriente de energía en la salida (P_{salida}) es mayor que la corriente en la entrada (P_{entrada}) el amplificador necesita otra entrada para la energía, por eso es necesario conectarlo a la red eléctrica o a una batería. En Fig. 6.19 se muestra el diagrama de flujo de un amplificador eléctrico. El cociente

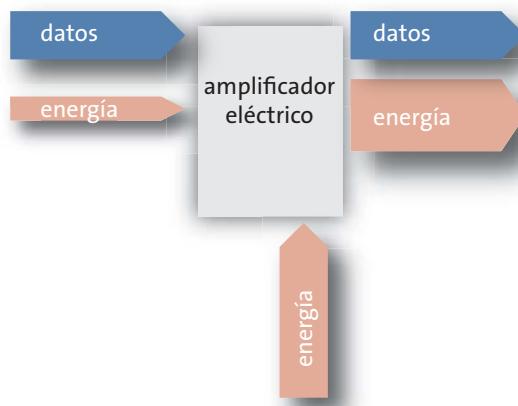


Fig. 6.19 Diagrama de flujo de un amplificador eléctrico.

$$V = P_{\text{salida}} / P_{\text{entrada}},$$

es el coeficiente de amplificación.

Se recomienda tratar varios ejemplos de amplificadores, no solamente eléctricos, enfatizando que en cada caso aumenta la corriente de energía.

7 OSCILACIONES Y ONDAS

7.1 Frecuencia de resonancia y frecuencia propia

Tema

En algunos textos al tratar las oscilaciones forzadas se insiste en que la frecuencia de resonancia no es exactamente (solo aproximadamente) igual a la frecuencia propia o natural del oscilador.

Defectos

Al parecer la naturaleza no ha conseguido presentar las cosas de manera razonable; al comienzo se aprende que hay resonancia, es decir, un movimiento muy fuerte cuando existe concordancia entre la excitación y el movimiento propio del oscilador. Pero al mirar más de cerca se nota que no es como se esperaba, es como si hubiera un aguafiestas, la frecuencia de resonancia y la frecuencia propia no coinciden exactamente. Entonces, ¿es válida la idea que se tenía del fenómeno? ¿Es falso que haya resonancia cuando la excitación está en concordancia con el oscilador?

Es fácil resolver esta incongruencia al considerar que resonancia implica que la energía absorbida y disipada por el oscilador tiene un valor máximo, en función de la frecuencia. Ya que $P = \vec{v} \cdot \vec{F}_0$, dicho máximo se encuentra en la misma frecuencia donde la velocidad alcanza su valor máximo, cuando la amplitud de \vec{F}_0 es constante.

De

$$x(t) = x_0(\omega) \cdot \sin(\omega t),$$

se obtiene que:

$$x'(t) = \omega \cdot x_0(\omega) \cdot \cos(\omega t) = v_0(\omega) \cdot \cos(\omega t)$$

y

$$x''(t) = -\omega^2 \cdot x_0(\omega) \cdot \sin(\omega t) = a_0(\omega) \cdot \sin(\omega t).$$

Si la amplitud de la velocidad $v_0(\omega) = \omega \cdot x_0(\omega)$ tiene un valor máximo a una frecuencia ω_{res} , entonces ni la amplitud de la posición $x_0(\omega)$, ni de la aceleración $a_0(\omega) = -\omega^2 \cdot x_0(\omega)$ pueden tener un máximo a dicha frecuencia. El valor “falso” de la frecuencia de resonancia resulta del hecho de considerar la magnitud equivocada, es decir, la posición del oscilador en lugar de su velocidad. Al considerar varias magnitudes distintas en función de la frecuencia, se observará que el máximo correspondiente a cada magnitud se encuentra en una posición diferente en el eje de las frecuencias. Nadie concluiría de esta observación que la frecuencia de resonancia depende de la magnitud considerada.

Origen

Se tiene la tendencia a destacar en primer plano las magnitudes que reflejan lo que “vemos” con nuestros sentidos. Se suele considerar un problema mecánico solucionado cuando se conoce la trayectoria de los cuerpos, es decir, las posiciones en función del tiempo.

Eliminación

Es necesario aprender y enfatizar que en mecánica las magnitudes fundamentales son las magnitudes dinámicas momentum y energía. Entonces, no se debe definir la resonancia por medio de la amplitud de la posición —lo aparente—, sino por la energía absorbida o disipada.

7.2 La fuerza recuperadora

Tema

Para un oscilador armónico mecánico, donde un cuerpo realiza un movimiento de vaivén, la fuerza ejercida sobre el cuerpo es proporcional a la elongación. Se atribuye mucha importancia a este hecho y se lo formula

La fuerza recuperadora

como un teorema resaltado en varios libros escolares, encontrando citas como las siguientes:

- 1 “Una oscilación mecánica libre es armónica, cuando y solo cuando obedece a la siguiente ley $F = -D \cdot s$, donde s es la elongación desde la posición de equilibrio.”
- 2 “Definición: Un movimiento periódico, causado por la fuerza recuperadora F , para la cual es válida una ley de fuerzas lineal de la forma $F = -D \cdot y$, se llama oscilación armónica.”
- 3 “La característica principal de un oscilador armónico es que esta sometido a una fuerza recuperadora, que tiende a devolverlo al punto de equilibrio estable, con una intensidad proporcional a la separación respecto de dicho punto.”

Defectos

- 1 Frases como las anteriores ostentan un rigor exagerado, que no siempre es posible justificar. Por ejemplo, de acuerdo con la primera frase, no se puede afirmar que existen oscilaciones armónicas libres para las cuales el torque sea proporcional al ángulo. Sin el “cuando y solo cuando” se podría pasar por alto este defecto. Para la segunda, se sabe que también en un pistón (émbolo), que realiza un movimiento de vaivén gracias a un volante (o un motor) por medio de una biela, actúa una fuerza —para la cual es válida una ley de fuerzas (casi) lineal—, sin embargo dicho sistema no se llama ni se considera oscilador armónico.
- 2 Generalmente los teoremas y oraciones resaltadas se presentan con la pretensión: “¡Lo que se dice es importante!” Sin embargo, las aseveraciones citadas no merecen dicho grado de importancia. Para describir matemáticamente el oscilador se emplean otras dos magnitudes para las cuales existe una proporcionalidad: la cantidad de movimiento y la velocidad. En cuanto al formalismo matemático las dos relaciones tienen un significado análogo.

$$p = m \cdot v \quad (7.1)$$

$$F = -D \cdot y \quad (7.2)$$

Cada una caracteriza completamente un sub-sistema de un oscilador: la primera el cuerpo y la segunda el resorte. Para establecer la ecuación diferencial del oscilador bastan las ecuaciones (7.1) y (7.2), y la ley de conservación de la cantidad de movimiento.

Se puede entender que en la definición del oscilador armónico se mencione únicamente la segunda ecuación, por el hecho de que se sobreentiende la validez de la primera, ya que las desviaciones observa-

das se presentan solamente para velocidades del orden de la velocidad de la luz. Parecería entonces innecesario insistir en dicha proporcionalidad, pero ¿no ocurre algo similar con la ecuación (7.2)? Al considerar e introducir el oscilador como un sistema consistente en un cuerpo y un resorte, ¿no se sobreentiende la validez de la ecuación (7.2)? ¿Quién supondría que en esta situación el resorte se puede extender más allá de su límite elástico?

Un buen método para analizar un problema mecánico es compararlo con uno eléctrico. Evidentemente, un circuito eléctrico oscilante oscila armónicamente solo si para los dos elementos que constituyen el circuito, es decir, el condensador y el solenoide, son válidas las siguientes relaciones lineales:

$$Q = C \cdot U$$

y

$$n\Phi = L \cdot I.$$

Para establecer la ecuación diferencial del circuito oscilante bastan estas ecuaciones, más la ley de conservación de la carga eléctrica. En este caso es muy fácil alterar las proporcionalidades, por ejemplo, si se escoge un condensador electrolítico y/o un solenoide con un núcleo de hierro. A pesar de esto no se formula un teorema de la forma:

“Una oscilación eléctrica libre es armónica, cuando y solo cuando obedece a...”

- 3 ¿Es realmente necesario un nombre especial —fuerza recuperadora— para la fuerza del oscilador? Al hacer lo propio en el caso eléctrico se tendría que “renombrar” la tensión en el circuito oscilante: “tensión descargadora” por ejemplo, cosa que afortunadamente no se hace.

Origen

Las definiciones citadas son algunos de los muchos ejemplos del trato preferencial que se consagra a la mecánica, debido seguramente a su supremacía histórica.

Eliminación

En general no se debe emplear frases y sentencias pretendiendo un rigor donde este no existe, ni se encuentra científicamente justificado. En este caso basta el empleo de frases y explicaciones “normales”, es decir, se puede mencionar la proporcionalidad entre la fuerza y la elongación, pero sin darle una importancia particular. Es una proporcionalidad que existe al igual que muchas otras, que no se mencionan específicamente.

Las diferencias de fase en las oscilaciones forzadas

7.3 Las diferencias de fase en las oscilaciones forzadas

Tema

Al estudiar las oscilaciones forzadas se dice que en el caso de la resonancia la diferencia de fase entre la coordenada espacial (de posición) del excitador y la del oscilador es de $\pi/2$; este hecho se considera tan importante que a menudo se formula casi como un teorema, resaltándolo de diversas formas. Se encuentran afirmaciones como la siguiente: “Si la frecuencia de excitación coincide con la frecuencia característica del resorte, la amplitud de oscilación va creciendo cada vez más (resonancia); en este caso, las oscilaciones del resorte están retrasadas alrededor de un cuarto de período respecto a la excitación.” [1]

Defectos

- Una diferencia de fase siempre se refiere a dos cantidades distintas, que tienen una dependencia temporal sinusoidal; en la cita una es la coordenada espacial (posición) del excitador y la otra la coordenada espacial del oscilador. En general este hecho no se menciona explícitamente, ya que se habla solamente de coordenadas espaciales, nadie sospecha que se podría tratar de otra cosa; sin embargo, se podría estudiar diferencias de fase entre otras magnitudes. Entre ellas —aparte de la posición— la velocidad, la aceleración, y el momentum del cuerpo oscilante o la fuerza que actúe sobre él; y por otra parte la posición, la velocidad o la aceleración del excitador. De dichas variables se podría combinar dos cualesquier y analizar la diferencia de fase correspondiente, aunque la mayoría de estas diferencias de fase son difíciles de interpretar, pero ello también ocurre para la diferencia de fase que nos ocupa. ¿Qué significa que en el caso de resonancia la diferencia de fase entre las coordenadas de posición del excitador y del oscilador sea de $\pi/2$?
- Un oscilador mecánico de resorte excitado, de modo que realice una oscilación forzada, tiene los siguientes componentes: el cuerpo oscilante, el resorte y el excitador; si se agrega un amortiguador como cuarto componente se tendrá una oscilación amortiguada. En un sistema eléctrico análogo este sería una resistencia óhmica. Es posible combinar estos cuatro elementos de varias maneras, o en otros términos: el “circuito” mecánico puede tener diferentes configuraciones, al igual que en el correspondiente circuito resonante eléctrico. Para que el comportamiento del oscilador esté claramente determinado, es necesario conocer las propiedades de la fuente de energía, es

decir, del excitador. No es suficiente saber que la excitación es sinusoidal, también se debe conocer cuál magnitud permanece constante al hacer variar la frecuencia: la amplitud de la posición, de la velocidad, de la fuerza o talvez la amplitud del flujo de energía (potencia); según la elección la curva de resonancia tendrá diferentes características.

Entre las posibles combinaciones que se han mencionado, hay dos para las cuales el problema se hace particularmente evidente:

- 1 Se conectan todos los cuatro componentes en paralelo y al registrar la curva de resonancia se mantiene constante la amplitud de la fuerza del excitador.
- 2 Se conectan los cuatro componentes en serie y se mantiene constante la amplitud de la velocidad del excitador.

También para el circuito resonante eléctrico existen estas formas básicas: en el “circuito en paralelo” se mantiene constante la amplitud de la corriente, y en el “circuito en serie” la tensión.

Pero lo expresado en la cita no es válido ni para una ni para otra de las formas básicas mencionadas, sino para una forma híbrida de serie y paralelo. En consecuencia, aquí la interpretación de la afirmación sobre la relación de fase resulta difícil, en el caso de las dos formas básicas es simple. Veamos el caso del oscilador en paralelo.

“Resonancia” significa que el promedio temporal del flujo de energía desde el excitador (subíndice E) hacia el oscilador:

$$\bar{P} = \overline{v_E \cdot F_E}$$

es máximo. Con

$$v_E = v_{E0} \cdot \sin(\omega t) \text{ y } F_E = \hat{F}_E \cdot \sin(\omega t - \varphi)$$

se obtiene

$$\bar{P} = \frac{\hat{v}_E \cdot \hat{F}_E}{2} \cos \varphi$$

En esta expresión los tres factores, a saber \hat{v}_E , \hat{F}_E y $\cos \varphi$ pueden depender de la frecuencia.

Para el oscilador en paralelo (Fig. 7.1), la amplitud de la fuerza \hat{F}_E es constante, es decir, independiente de la frecuencia, cada uno de los otros dos factores tiene un máximo para la frecuencia de resonancia. Para la resonancia se tiene en particular que $\cos \varphi = 1$, o $\varphi = 0$, es decir, la velocidad y la fuerza del excitador están en fase, afirmación que es evidente. Si se quiere excitar un oscilador de manera óptima hay que empujar o halar con

Diapasón y caja de resonancia

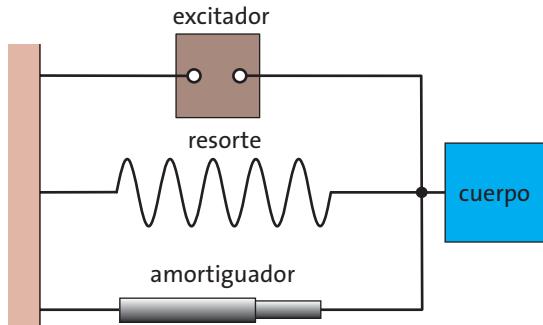


Fig. 7.1 Oscilador en paralelo.

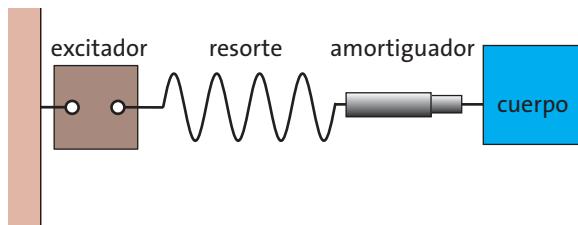


Fig. 7.2 Oscilador en serie.

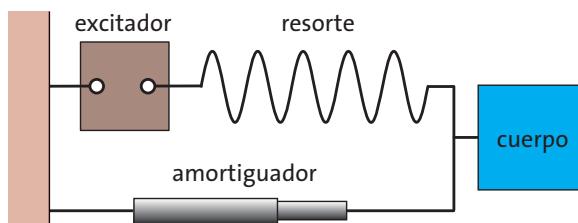


Fig. 7.3 Oscilador comúnmente considerado

mayor intensidad cuando el oscilador tiene su máxima velocidad. Para el oscilador en serie, Fig. 7.2, la amplitud de la velocidad es independiente de la frecuencia, y para la frecuencia de resonancia tanto la amplitud de la fuerza como el $\cos \varphi$ tienen un máximo, es decir, al igual que para el oscilador en paralelo se tiene que $\varphi = 0$.

La forma del oscilador que se considera en la mayoría de los casos en mecánica es la representada en la Fig. 7.3, y resulta que este oscilador es matemáticamente equivalente al oscilador en paralelo, donde la fuerza se representa por

$$D \cdot \hat{x}_E \cdot \sin(\omega t).$$

En el caso de resonancia esta fuerza está en fase con la velocidad del oscilador, lo que se demuestra de la misma

forma como se hace para la diferencia de fase cero en el oscilador en paralelo. Ya que la posición del oscilador está desfasada en $\pi/2$ respecto a la velocidad, se obtiene el resultado que se está analizando y que se menciona en la referencia.

Origen

Véase 7.1 *Frecuencia de resonancia y frecuencia propia*, p.225. El hecho de dar relevancia a las amplitudes de la posición del oscilador y del excitador corresponde a una tradición de la mecánica, según la cual se considera resuelto un problema cuando se conoce la relación posición-tiempo, es decir, aquello que se “nota” directamente. Sin embargo, se comprende mejor la mecánica cuando en primer lugar se estudian las magnitudes momentum y energía, así como las corrientes correspondientes. Puede existir otra razón para preferir el oscilador de la Fig. 7.3, con él es más fácil realizar un experimento cuantitativo, cuya versión “rotativa” es la conocida rueda (o péndulo) de POHL —Robert POHL (1884–1976)—.

Eliminación

Vale la pena considerar una relación de fase en función de la frecuencia de excitación solamente si se interpreta dicha función. Es fácil interpretar la diferencia de fase entre la velocidad y la fuerza, el producto de las dos es la corriente de la energía disipada por el oscilador. La diferencia de fase cero ayuda a que este producto sea máximo para la frecuencia de resonancia del oscilador.

Referencias

[1] La teoría de los movimientos armónicos forzados es fundamental en muchos ámbitos de la física y la ingeniería. [en línea].

En: <https://www.monografias.com/trabajos12/forzados/forzados.shtml> [consultado el 2 de junio de 2022]

7.4 Diapasón y caja de resonancia

Tema

1 “Si se pone el pie de un diapasón golpeado en contacto con un cuerpo de resonancia, como el tablero de una mesa o también con el hueso del cráneo, el tono producido se amplifica y se puede escuchar con mucha más claridad.”

2 “Se golpea un diapasón y se mantiene contra varios objetos. El sonido a veces se hace más fuerte. El sonido es más fuerte con un diapasón con caja de resonancia.”

Péndulos acoplados, oscilaciones acopladas y sincronización

3 “Las ondas sonoras producidas por un diapasón que vibra son muy débiles. Una superficie dura sirve de caja de resonancia al diapasón para que la vibración se amplifique y sea audible para nosotros.”

Defectos

Ya en el libro de POHL [1] (libro algo antiguo, bastante conocido en Europa y texto de física en Alemania) se puede leer: “A menudo se oye decir: ‘las vibraciones se amplifican por resonancia’. Es una forma sesgada de expresarlo.” Pero lo de POHL fue hace mucho tiempo, y lo que escribió entonces, obviamente, no ha trascendido. Nuestras citas, que son típicas, lo demuestran: aún hoy se oye (o se lee) que el sonido se amplifica mediante un cuerpo o caja resonante, o simplemente que el sonido se hace más fuerte. Esto no es erróneo, pero es “sesgado”, como dice POHL. Porque parece que aquí se obtiene algo a cambio de nada.

La declaración es similar a la siguiente: si gastas mucho dinero, tu facturación aumenta. Esto también suena bien al principio. Pero aquí se ve más claramente el problema: si se genera una alta facturación en la primera semana del mes, no queda nada para las tres semanas siguientes.

Lo mismo ocurre con el sonido: con una caja de resonancia, el sonido del diapasón es más fuerte, pero dura menos tiempo. Debido a la radiación, la vibración de la caja de resonancia está fuertemente amortiguada, y a través de la caja de resonancia se amortigua la vibración del diapasón.

Es similar al circuito eléctrico mostrado en la Fig. 7.4. El circuito oscilante de la izquierda, tomado solo, está débilmente amortiguado; una vez cargado de energía,

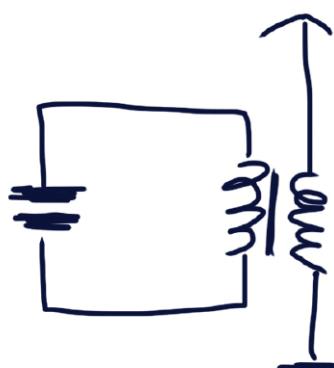


Fig. 7.4 El circuito oscilante de la izquierda está inicialmente cargado de energía. Si no estuviera acoplado al circuito resonante de la antena, oscilaría durante mucho tiempo. Pero debido al acoplamiento, pierde su energía rápidamente. La energía “desaparece” con la onda electromagnética emitida.

oscilaría durante mucho tiempo. Sin embargo, esta acoplado al circuito resonante de la antena. El circuito resonante de la antena está fuertemente amortiguado porque emite una onda electromagnética. Debido al acoplamiento inductivo, el primer circuito oscilante se ve rápidamente privado de su energía, por lo que solo oscila durante un breve periodo de tiempo.

Ciertamente, no es bueno hablar aquí de “amplificación”, porque normalmente se utiliza la palabra en la ciencia natural y la tecnología con un significado diferente: en un amplificador, una señal entra junto con una pequeña corriente de energía y sale con una grande. Para que esto sea posible, el amplificador debe estar conectado a una fuente de energía. La caja de resonancia, en cambio, solo garantiza que la energía del diapasón salga rápidamente.

Origen

La llamativa percepción sensorial está en primer plano, no el balance de la energía.

Eliminación

Explicar que la caja de resonancia hace que la energía discorra más rápidamente. El flujo de energía es más fuerte y el sonido también, pero no dura tanto como sin la caja de resonancia.

Referencias

- [1] R. W. Pohl, *Mechanik, Akustik, Wärmelehre*, Springer-Verlag, Berlin, 1969, p.235

7.5 Péndulos acoplados, oscilaciones acopladas y sincronización

Tema

En varias obras de física figuran los siguientes títulos:

- “Péndulos acoplados”
- “Oscilaciones acopladas”

En ambos casos se trata de lo mismo. Dos péndulos u osciladores de resorte están acoplados entre sí con la ayuda de un resorte débil.

Defectos

Los péndulos, Fig. 7.5, están acoplados. Decir que las oscilaciones están acopladas es poco acertado, porque la idea es precisamente que se trata de dos movimientos independientes, es decir, no acoplados. En física, siem-

Péndulos acoplados, oscilaciones acopladas y sincronización

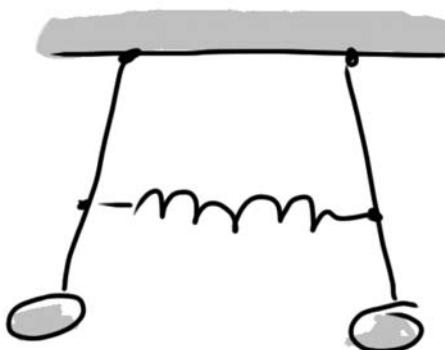


Fig. 7.5 Péndulos acoplados, pero no oscilaciones acopladas

pre se habla de acoplamiento cuando un sistema no se puede descomponer en dos subsistemas sin interacción. O, en otras palabras, cuando el hamiltoniano no se descompone en sumandos que no contienen variables comunes.

Sin embargo, con una elección adecuada de las coordenadas, a saber, las coordenadas normales, el sistema de péndulos se descompone en dos subsistemas libres de interacción. Cada una de las dos coordenadas describe una de las dos oscilaciones normales.

La tendencia a considerar los péndulos individualmente en lugar de sus oscilaciones naturales desacopladas también se observa en la forma de explicar la llamada sincronización, un fenómeno sorprendente descubierto por HUYGENS —Christiaan HUYGENS (1629–1695)—: Varios relojes de péndulo idénticos, montados en una caja común, oscilan, si se les da un poco de tiempo, exactamente de forma sincronizada y con una relación de fase específica. Al principio, parece casi milagroso que los péndulos individuales se dejen convencer por sus vecinos para oscilar no solo con la misma fase, sino también con la igual frecuencia. ¿No tiene cada uno su frecuencia “favorita”? ¿Cómo se supone que pueda cambiar?

Las explicaciones habituales recurren a una herramienta algo exagerada: el proceso no es lineal. Esta explicación es completa y correcta, pero innecesariamente intimidante. No se tiene en cuenta una regla útil en la enseñanza de la física: explicar un fenómeno mediante el ejemplo más sencillo en el que se produce. Con las oscilaciones normales, se procede de la misma manera: primero la oscilación armónica no amortiguada, y si aún queda tiempo, también la amortiguada, la forzada, la autoexcitada, la no lineal, la oscilación de relajación...

Origen

La tendencia a hacer lo que se percibe con los ojos la base de la descripción. En este caso, los movimientos de los péndulos individuales.

Eliminación

No hablar de oscilaciones acopladas sino de péndulos acoplados. También se podría decir: un oscilador armónico con dos grados de libertad.

En cuanto a la sincronización:

Consideremos el ejemplo más sencillo: el oscilador de resorte de la Fig. 7.6. Si se excita el sistema de alguna manera, los dos cuerpos se moverán generalmente de forma desordenada.

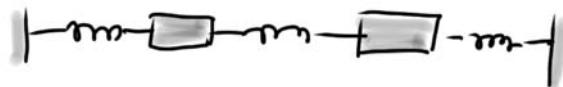


Fig. 7.6 Oscilador de resorte con dos grados de libertad

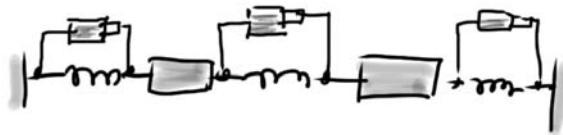


Fig. 7.7 Oscilador de resorte con amortiguación. Una de las oscilaciones naturales está más amortiguada que la otra.

A continuación, se introduce la amortiguación, representada en la Fig. 7.7 por los símbolos del amortiguador de vibraciones. En general, las dos oscilaciones naturales se amortiguarán en distinto grado. Así que una oscilación se extingue antes que la otra. Si se trata de una oscilación autoexcitada, como en los relojes de HUYGENS, el sistema obtendrá preferentemente la energía en el ritmo de la oscilación que no decae, de modo que una oscilación se mantiene mientras se quita energía a la otra.

Este comportamiento se presenta como una sincronización: si vemos los dos cuerpos como subsistemas, parecen ponerse de acuerdo entre sí, coincidir en una frecuencia y una fase comunes, un “milagro”. Si, por el contrario, dirigimos nuestra mirada a las dos oscilaciones naturales, el proceso resulta ser la desaparición de una de ellas. Este comportamiento es de esperar para dos oscilaciones independientes. Sería bastante improbable que ambos estuvieran igualmente amortiguados.

8 ÓPTICA

8.1 Los componentes de la luz

Tema

Se dice que la luz blanca esta formada por luz de diferentes longitudes de onda o frecuencias:

- 1 “Si la luz blanca incide sobre un prisma de forma que se refracta dos veces, entonces se descompone en sus componentes...”
- 2 “En la naturaleza, especialmente en la radiación solar (radiación planckiana), existe una superposición de longitudes de onda debido a la formación de la radiación.”
- 3 “... demostrando así que la luz ‘blanca’ esta formada por las diferentes longitudes de onda del espectro.”
- 4 “La luz esta formada por fotones; un fotón tiene una determinada longitud de onda; la luz esta formada por componentes de diferentes longitudes de onda.”
- 5 “Why does white light consist of many different wavelengths?”
- 6 “White light consists of a mixture of all wavelengths of light.”

Defectos

No comentaremos deslices como que “la luz blanca esta formada por diferentes longitudes de onda”, es decir, formulaciones que deben incomodar a cualquiera que esté acostumbrado a la claridad conceptual. El tema se debatió en el COF 1.9 *¿Es exacta la terminología técnica?*, p.18. Aquí se trata de otra cosa.

Se puede describir la luz de diferentes maneras. En otras palabras, existen diferentes teorías de la luz: la óptica geométrica, que se ocupa de la formación de imágenes ópticas, la óptica sin imágenes (anidólica), que se centra en la distribución de la corriente de energía, la óptica física (u ondulatoria), que es esencialmente una descripción electrodinámica, la descripción termodinámica, que desempeña un papel en el cálculo de la eficiencia de las celdas solares, y finalmente la óptica cuántica. Ninguna de las teorías es errónea, por

supuesto que no. Tampoco se puede decir que una sea mejor que la otra. La teoría que se utilice solo depende del tipo de problema que se quiera resolver.

Volvamos a las citas que pueden considerarse típicas. Según esto, la luz se compone de partes de diferentes longitudes de onda.

Ahora bien, la luz no esta formada por componentes sinusoidales si se utiliza la expresión “estar formada por” como es habitual en el lenguaje coloquial. “Estar formado de” o “consistir en” significa: los componentes de un objeto están contenidos en el objeto y pueden ser reconocidos en él. En lugar de “consistir en”, se podría decir mejor: se puede descomponer la luz en contribuciones de diferentes longitudes de onda.

Porque no solo se puede descomponer en partes sinusoidales, hay muchas posibilidades de descomponerla.

¿Se dice que las ondas del agua en el mar consisten en ondas de diferentes longitudes de onda? Si alguien lo dijera, probablemente responderíamos espontáneamente: puedes ver que no son ondas sinusoidales. Hasta que se nos ocurre que el movimiento desordenado del agua puede descomponerse en componentes de FOURIER —Jean-Baptiste Joseph FOURIER (1768–1830)— al igual que la luz solar.

Es de temer que creemos en la mente de los alumnos o estudiantes una imagen parecida a la de la Fig. 8.1, posiblemente asimilando enseguida las colas de onda como fotones. (Quizás también se diga que un fotón tie-

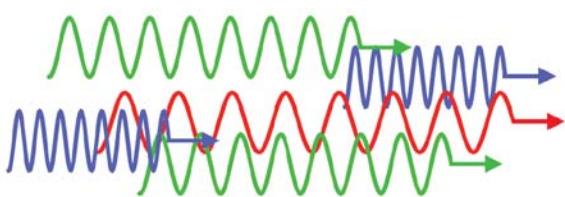


Fig. 8.1 ¿Componentes de la luz? ¿Fotones?

El principio de Huygens

ne una determinada longitud de onda, véase nuestra cuarta cita. Pero entonces tendría que ser infinitamente largo. Sin embargo, al mismo tiempo se dice que no es muy largo, sino más bien puntiagudo, y no se menciona en absoluto la anchura).

Sería más apropiado comenzar la descripción del estado del campo electromagnético presente en la luz solar sin hacer referencia a la descomposición de FOURIER: el campo se encuentra en un estado de máximo desorden o de máxima entropía; también se puede decir de máxima dispersión en el espacio de fase o de máxima incoherencia. El desarrollo temporal de la intensidad de campo en un punto se parece a la Fig. 8.2.



Fig. 8.2 Luz blanca: curva de intensidad de campo en un lugar en función del tiempo.

Como físico, uno se siente inclinado a encontrar un campo así de inhomogéneo. En la ingeniería de comunicaciones, se llamaría ruido, y el ruido es un fenómeno que se debe evitar. ¿No es la luz monocromática la más adecuada para la experimentación? Y la descripción matemática de la luz monocromática es también mucho más sencilla que la de la luz blanca caótica, ¿no es así? No necesariamente. Porque la luz de máximo desorden o "radiación térmica" es muy simple en otro sentido. Se puede describir por el valor de solo dos variables: la temperatura y el potencial químico, siendo el potencial químico cero, en la mayoría de los casos. Así pues, lo que nos parece sumamente complicado desde un punto de vista es particularmente sencillo desde otro. Los teóricos de la ciencia utilizan el término emergencia para describir este tipo de simplicidad que surge del desorden.

Origen

En primer lugar, del prisma: si salen por detrás contribuciones de luz de distintos colores, la conclusión es obvia: ya estaban allí antes. Encontramos un descuido similar al tratar con "consiste en" en otros contextos, por ejemplo, en la física atómica: se dice que la capa de electrones esta formada por orbitales atómicos. Pero también se puede diseccionar la capa electrónica de otra manera, y se hace cuando es apropiado. Las partes reciben entonces el nombre un tanto desalentador de orbitales híbridos. Al estudiante le parece que aquí ha ocurrido algo fundamentalmente nuevo y quizá difícil de

entender, quizá también una especie de "truco". Sin embargo, en realidad, todo el "pastel" de la capa electrónica solo se ha dividido en trozos de distinta forma.

Un hábito lingüístico probablemente también contribuye a la idea de que la luz blanca esta formada por ondas sinusoidales. La frase "la luz es una onda electromagnética" no es errónea en el sentido de la física. Por otro lado, en el lenguaje coloquial se entiende que una onda es un fenómeno regular y periódico. Un efecto como el que se muestra en la Fig. 8.2 no se llamaría onda.

Eliminación

- Tener cuidado con el uso del lenguaje. Es necesario aclarar que la descomposición espectral es solo una de las muchas posibilidades de descomposición.
- No introducir las ondas sinusoidales como lo real, es decir, como la verdad más profunda. Y sobre todo: mostrar también imágenes de distribuciones de luz que no sean sinusoidales.
- Y por último, de nuevo: un poco de termodinámica no hace daño.

8.2 El principio de HUYGENS

Tema

El principio de HUYGENS se utiliza no solo para explicar la difracción de una onda en una rendija simple, doble, o en una red, sino también para describir la reflexión y la refracción.

Defectos

- El principio de HUYGENS —Christian HUYGENS (1629–1695)— es una herramienta matemática sencilla para determinar la amplificación y extinción en fenómenos de interferencia. Sin embargo, para los experimentos más sencillos de difracción y al mismo tiempo más importantes, no es necesario. Es normal que detrás de un pequeño orificio en un obstáculo al que llega una onda plana, salga una onda circular o esférica. Tampoco se requiere una explicación particular —a nivel de "principio"— para mostrar que detrás de dos rendijas salen dos ondas esféricas o cilíndricas, y detrás de una red, muchas. Para el estudio de los fenómenos correspondientes de interferencia no es necesario un nombre propio: "onda elemental" y tampoco un principio particular. El principio de HUYGENS se necesita cuando se considera una sección más grande de un frente de onda, como fuente de una onda emergente.

- Tampoco se requiere el principio de HUYGENS para la descripción del comportamiento de una onda al ser reflejada o refractada; generalmente cuando se hace esto se remplaza la onda plana por muchas ondas circulares. Como es sabido se puede descomponer una función de muchas maneras: en componentes armónicas, en armónicas esféricas, en funciones de BESSEL —Friedrich BESSEL (1784–1846)— y muchas más. Pero siempre es conveniente elegir el sistema de funciones básicas de tal manera que se tenga en cuenta la simetría del problema, cosa que no se hace al descomponer una onda plana en ondas circulares o esféricas. La onda original, siendo plana, tiene la mayor simetría que una onda puede admitir. La reflexión y la refracción se comprenden fácilmente considerando la misma onda plana.
- La designación “principio” hace suponer que se trata de una ley que no está contenida en los demás principios o leyes estudiados, lo que no es correcto. La demostración de que el principio de HUYGENS surge de la ecuación de onda, es uno de los temas difíciles de la óptica [1].
- A veces en este contexto se llama a las ondas circulares “ondas elementales”, nombre que no es apropiado, ya que al adjetivo “elemental” se emplea normalmente en el sentido de “básico” o “fundamental”. Pero las ondas de HUYGENS no son nada elemental, son una de muchas descomposiciones matemáticas posibles.

Origen

HUYGENS formuló el principio en su obra “*Traité de la Lumière*” en 1690, más de cien años antes del surgimiento formal de la óptica ondulatoria que empezó con FRESNEL y YOUNG —Augustin FRESNEL (1788–1827) y Thomas YOUNG (1773–1829)—, y faltando 150 años para la electrodinámica de FARADAY y MAXWELL —Michael FARADAY (1791–1867) y James Clerk MAXWELL (1831–1879)—. HUYGENS conocía las leyes de reflexión y refracción, sabía que la luz se propaga con velocidad finita y que la luz blanca se puede descomponer en “luces de colores”. ¿Qué papel desempeñó el principio de HUYGENS en esa época? ¿Por qué se ha mantenido hasta el día de hoy? En esa época existía una teoría corpuscular de la luz, defendida por CARTESIO —René DESCARTES (1596–1650)— y ampliada por NEWTON —Isaac NEWTON (1643–1727)—, a la cual HUYGENS contrapuso su teoría ondulatoria. La validez de dicha teoría se juzgó por su capacidad de explicar los fenómenos de reflexión y de difracción. Con “explicar” se entiende aquí la reducción a otros fenómenos supuestamente elementales que no requerían explicación, para HUYGENS las ondas elementales eran esa clase de fenómenos que no necesitan explicación.

Desde FRESNEL la comprensión de la reflexión y la refracción no necesitaba de las ondas de HUYGENS y, cuando finalmente MAXWELL desarrolló su teoría de ondas, el método de HUYGENS se hizo definitivamente obsoleto; aunque desde el comienzo no se sabía porqué dicho principio, que suponía ondas longitudinales, era válido también para las ondas electromagnéticas que son transversales. Aún faltaba KIRCHHOFF —Gustav KIRCHHOFF (1824–1887)—, quien finalmente pudo deducir la validez del principio de HUYGENS a partir de la electrodinámica.

El papel que juega el principio de HUYGENS en la enseñanza contemporánea en la escuela y la universidad refleja su otra importancia. Como la ley de LENZ —Heinrich LENZ (1804–1865)—, o las de KEPLER —Johannes KEPLER (1571–1630)—, ha sobrevivido a la aparición de leyes posteriores con una validez más amplia. Es cierto que el principio de HUYGENS todavía puede ser de alguna utilidad, pero no merece el estatus de principio, sino el de una herramienta común y corriente.

También surge una sospecha, no fácil de refutar: el tema “difracción e interferencia” —con el principio de HUYGENS— se mantiene vivo con insólito detenimiento por el hecho de que tradicionalmente sirve de fuente inagotable de problemas para las pruebas escritas del bachillerato.

Eliminación

Para tratar en la escuela los fenómenos de difracción en rendijas simples, dobles, o en una red no hace falta el principio de HUYGENS. Si de todas formas a este nivel se quiere abordar temas que implicarían conocimientos como el teorema de FOURIER —Jean Baptiste FOURIER (1768–1830)—, por ejemplo una rendija alargada, entonces el “principio” de HUYGENS puede servir; sin embargo, se considera que estas son temáticas para cursos y niveles posteriores.

Referencias

- [1] E. Hecht, y A. Zajac, *Óptica*, México: Fondo Educativo Interamericano S.A., 1977, p.413–417.

8.3 El experimento de la doble rendija

Tema

En la enseñanza de la óptica, particularmente en secundaria, se considera muy importante el experimento de difracción (en rendija simple y doble), en el cual se analizan los detalles del denominado patrón de difracción.

El experimento de la doble rendija

Se presenta el experimento de la doble rendija como prueba del carácter ondulatorio de la luz, y más tarde se lo utiliza (generalmente en forma de “experimento mental”) para mostrar la naturaleza de los llamados objetos cuánticos.

Defectos

- Se estudia la difracción de la luz en los dos tipos de rendija con un detenimiento y esmero que va más allá de las exigencias de la física escolar, es decir, de propiciar una educación básica y general. Cuando Thomas YOUNG (1773–1829) realizó por primera vez el experimento de la doble rendija, este tenía características de *experimentum crucis*, pero ya no las tiene desde hace mucho tiempo. Hoy día, el experimento de la doble rendija no es más que uno de los muchos indicios sobre el carácter ondulatorio de la luz. Además, hoy se sabe que la luz representa solo una mínima sección del espectro electromagnético. No se muestra tanto esmero y dedicación con radiaciones de otras longitudes de onda, para las cuales en general ni se menciona.
- Los experimentos con rendija simple o doble no son sencillos, ya que reúnen dos clases de fenómenos: difracción e interferencia. La combinación de ellos no es trivial; incluso a veces se afirma que son lo mismo: “Nunca nadie ha sido capaz de definir la diferencia entre la interferencia y difracción satisfactoriamente. Es solo un problema de uso y no hay ninguna diferencia física específica importante entre ellas.” [1]. “No existe una verdadera diferencia entre interferencia y difracción.” [2]. “No existe ninguna diferencia física específica entre la interferencia y la difracción.” [3].
- Si se planea realizar la interferencia de dos ondas luminosas, difícilmente alguien que no conozca los experimentos con la doble rendija, tendría la idea de emplearla para dicho fin; probablemente pensaría inicialmente en utilizar dos fuentes luminosas. Sólo cuando se ha comprendido verdaderamente porqué esta propuesta no funciona —incluso no funciona con dos láseres—, se acepta que hace falta otra solución. Generalmente, cuando un experimento es adecuadamente seleccionado, el estudiante debería tener la sensación de que es tan obvio, tan natural que él mismo hubiera podido tener esa idea. Seguramente esto no ocurre con el experimento de la doble rendija.
- En física cuántica el experimento de la doble rendija sirve de escenario para diversas “interpretaciones” algunas contradictorias e increíbles. Se imagina la luz integrada por fotones, es decir, pequeños “cuerpecitos”.

tos”, los cuales para trasladarse de la fuente de luz al detector, tienen que pasar por una de las dos rendijas. A pesar de todas las advertencias que se coligen de la teoría y que efectivamente se hacen, la idea de los fotones como pequeños cuerpos permanece inalterable; para poner de relieve su carácter particular ya no se los llama corpúsculos, sino objetos cuánticos. Aparte de esto, se habla de ellos como se habla de “cuerpecitos”; tan pronto se formula y analiza la pregunta de por cuál de las dos rendijas pasa el fotón, se ha admitido tácitamente la idea de corpúsculo. Al mismo tiempo se hace, sin decirlo explícitamente, una afirmación sobre el tamaño de los fotones: su diámetro transversal debe ser inferior a la anchura de la rendija.

Origen

- Antes de los experimentos de interferencia de YOUNG y FRESNEL —Augustin-Jean FRESNEL (1788–1827)— existían buenos argumentos tanto para la teoría corpuscular como ondulatoria de la luz; se consideraba que solamente una podía ser correcta. O bien la luz es una onda o se compone de partículas. Con el experimento de YOUNG el asunto parecía resuelto; con el tiempo se fueron hallando y desarrollando muchos otros argumentos en favor del carácter ondulatorio de la luz. Pero además, con la teoría de James MAXWELL (1831–1879), surgida 70 años después del experimento de Young, se comprendió finalmente la naturaleza de la onda, o al menos eso se creyó; encontrando cada vez más ondas electromagnéticas a ambos lados del intervalo llamado “visible”. A pesar de dichos logros el experimento de YOUNG conservó su importancia en la enseñanza, como si fuera el único experimento que muestra el carácter ondulatorio de la luz.
- El experimento de la doble rendija ha tenido un nuevo “florecimiento”, la física cuántica enseña que fue prematuro creer que se conocía plenamente la verdadera naturaleza de la luz.
- Se ha desarrollado una tradición tal, que es difícil imaginar una evaluación sobre óptica en bachillerato sin un ejercicio relacionado con la interferencia o la difracción.

Eliminación

Se sugiere lo siguiente:

- 1 Si se quiere mostrar experimentalmente la interferencia de la luz, primero se debe analizar cuidadosamente porqué el experimento no funciona con dos fuentes luminosas distintas, aunque sean láseres.
- 2 Realizar los experimentos con una red de difracción, son más convincentes.

- 3 Para algunos fines el interferómetro de MICHELSON —Albert MICHELSON (1852–1931)—, o el de MACH-ZEHNDER —en honor a MACH —Ernst Waldfried Josef Wenzel MACH (1838–1916) y Ludwig ZEHNTER (1854–1949)—, son más apropiados, no hace falta emplear la función seno, ni la difracción; sin embargo los experimentos realizados presentan otras falencias para los niveles de enseñanza mencionados.
- 4 Mostrar el fenómeno de difracción con ondas para las cuales es más significativo, como el sonido y/o las ondas de radio, y luego analizar el porqué el efecto es tan pequeño para la luz. Si ya se conoce que la luz es una onda, entonces no es necesaria una explicación para su difracción, sino para el hecho de que normalmente la luz se propaga prácticamente sin esta.

Referencias

- [1] R. Feynman, R. Leighton y M. Sands, *Física*, Volumen I: *Mecánica, radiación y calor*, Wilmington: Addison-Wesley Iberoamericana, 1987. p.30–1.
- [2] E. Hecht, *Óptica*, Madrid: Addison-Wesley, 1999, p.441.
- [3] Difracción. [en línea]. <https://didactalia.net/comunidad/materialeducativo/recurso/difraccion-educarchile/ceab2b73-e590-4029-ba51-6196d76aa751> [consultado el 30 de junio de 2011].

8.4 Coherencia

Tema

En los libros de texto el concepto de coherencia se explica y comenta de diversas maneras. He aquí algunas citas de diferentes textos.

- 1 “Trenes de ondas que muestran interferencia se llaman coherentes, los que no interfieren entre sí se llaman incoherentes.”
- 2 “Dos excitadores que producen un patrón de interferencia constante se llaman coherentes. Para ello, deben oscilar con la misma frecuencia y una diferencia de fase fija.”
- 3 “En el caso de una fuente de luz extendida, como el filamento luminoso de una lámpara incandescente, los trenes de ondas que inciden en el ojo desde dos puntos diferentes del filamento en un instante son incoherentes, es decir, tienen fases y direcciones de polarización muy diferentes.”
- 4 “Solo la luz que ha salido de un único punto de una fuente luminosa puede ser llevada a la interferencia después de haber sido dividida y pasada por diferentes caminos.”

- 5 “Dado que la luz emitida espontáneamente por un cuerpo caliente es emitida por átomos individuales independientes entre sí, es imposible que dos fuentes de luz diferentes realicen la misma oscilación, es decir, que emitan trenes de ondas coherentes.”
- 6 “Una rendija emite luz coherente siempre que se cumpla lo siguiente para su anchura d y para el ángulo de apertura 2α de su cono de luz: $d \cdot \sin \alpha < \lambda/2$.”

Defectos

No solo los alumnos de colegio, sino también los de universidad tienen problemas con el concepto de coherencia. Las citas anteriores muestran que esto no debe ser una sorpresa. Algunas de dichas afirmaciones son ya de por sí desconcertantes. Sin embargo, resulta especialmente difícil cuando se intenta conciliar las diversas explicaciones.

¿A qué se refieren las afirmaciones mencionadas sobre la coherencia? Según las citas 1, 3 y 5, se refieren a una relación entre dos “trenes de ondas”. Pero ¿qué se debe entender por tren de ondas? ¿Toda la onda? ¿Una sección espacial de esta? ¿Cuál sección? Según la cita 2, la coherencia expresa una relación entre dos “excitadores”. Los excitadores deben oscilar con la misma frecuencia y una diferencia de fase fija, dice. Según esto, ¿debería haber excitadores que oscilen con la misma frecuencia pero con una diferencia de fase cambiante? ¿Qué aspecto tiene dicha oscilación? Por último, la cita 6 simplemente asigna coherencia a la “luz”.

¿Son solo diferentes formulaciones de un mismo hecho o acaso algunas de las afirmaciones de la 1 a la 6 se contradicen entre sí?

La cita 3 afirma que solo la luz que proviene de un mismo lugar es coherente. La 4 enumera algo similar, aunque no aparece la palabra coherencia. ¿Pero qué son dos puntos diferentes? ¿Cuál es la distancia máxima entre los puntos? La cita 5 lo dice aún más claramente, la luz que proviene de átomos diferentes no puede ser coherente. Sin embargo, la luz procedente de una estrella se utiliza para medir su diámetro con la ayuda del interferómetro estelar de MICHELSON —Albert Abraham MICHELSON (1852–1931)—; en dicho proceso se hace interferir la luz que proviene de lugares de la estrella que están a millones de kilómetros de distancia.

Origen

En todas las citas, de la 1 a la 6, figuran afirmaciones sobre cómo generar luz coherente o cómo demostrar la coherencia, pero ninguna dice cómo es un campo de ondas coherente o incoherente en sí mismo. Si solo se dice algo sobre las fuentes, ¿cómo se supone que se puede juzgar la coherencia de un campo de ondas cuyas

Coherencia

fuentes se desconocen, por ejemplo, las de las ondas de agua en el mar?

Se observa aquí la tendencia a centrarse en el proceso de producción o en el proceso de detección, en lugar de describir el fenómeno en sí mismo. Sin embargo, dichos procesos son más complicados que el propio fenómeno. Para entender lo que es una bicicleta, no es necesario conocer su proceso de fabricación. Para entender qué es una onda sonora, no hace falta saber cómo funciona el tubo de un órgano o el oído humano.

Otra causa de las discrepancias es probablemente la tendencia a considerar que un fenómeno está explicado solamente cuando se relaciona con una afirmación del mundo microscópico. Ahora bien, la coherencia es un fenómeno que puede describirse exhaustivamente con los medios de la teoría ondulatoria clásica. En cuanto se busca una interpretación basada en los fenómenos cuánticos, se corre el riesgo de perderse en la maleza de las interpretaciones y de los modelos.

Eliminación

En primer lugar, dos observaciones generales sobre el concepto de coherencia:

- 1 La coherencia más o menos pronunciada es una propiedad de la luz. Por supuesto, la luz debe sus propiedades a una fuente luminosa, pero eso no significa que la coherencia sea una propiedad de la fuente.
- 2 La coherencia es una propiedad local de la luz. Esto significa que una determinada distribución de luz puede ser, y generalmente es, más coherente en un punto que en otro. Por ejemplo, la luz emitida por una estrella es espacialmente incoherente al máximo inmediatamente por encima de la superficie de la estrella, mientras que aquí en la Tierra, es decir, a una gran distancia de la estrella, es casi perfectamente coherente espacialmente. Cuando se afirma que la coherencia es una propiedad local de la luz, no se quiere decir que la coherencia pertenezca a un punto en el sentido matemático. (En este sentido, ninguna magnitud física es local).

La coherencia se puede explicar de diferentes maneras. Se manifiesta en cada una de las teorías que se emplean para describir la luz, y estas son esencialmente la óptica geométrica, la óptica ondulatoria clásica, la termodinámica y la electrodinámica cuántica. Como el objetivo aquí es explicar el concepto a los principiantes, se elegirá la más sencilla de estas teorías, es decir, la óptica geométrica.

Inicialmente se sugiere cómo se puede realizar la explicación con la óptica ondulatoria, no se aconseja una explicación atomística o mecánico cuántica; este es un

tema para un curso posterior en la universidad. También nos limitamos aquí a evaluar la coherencia cualitativamente, por lo cual no se define una medida para esta.

Nos proponemos describir la luz en una pequeña zona del espacio, directamente frente a nosotros. ¿Qué tipo de rayos de luz atraviesan esta zona? Vamos a analizar cuatro situaciones especialmente sencillas.

Nos encontramos dentro de una niebla densa. Nuestra zona es atravesada por rayos de luz de todas las direcciones y tenemos una mezcla que contiene luz de todos los colores espectrales, representada en la Fig. 8.3. A continuación, imaginemos que es de noche, de nuevo hay niebla densa, y estamos bajo una farola que emite luz espectralmente pura. De nuevo, la luz proviene de varias direcciones, Fig. 8.4. Una tercera situación, es de noche, sin niebla, sin luz de luna y sin estrellas, y existe una bombilla a una gran distancia horizontal. Todos los

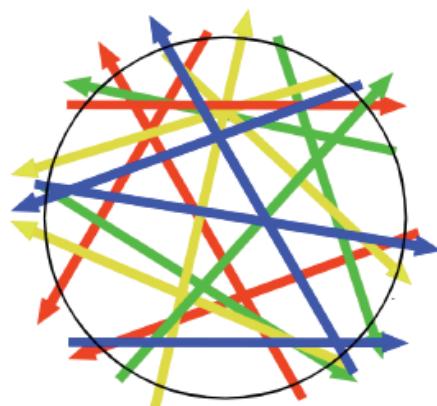


Fig. 8.3 Todos los colores, todas las direcciones. La luz es temporal y espacialmente incoherente.

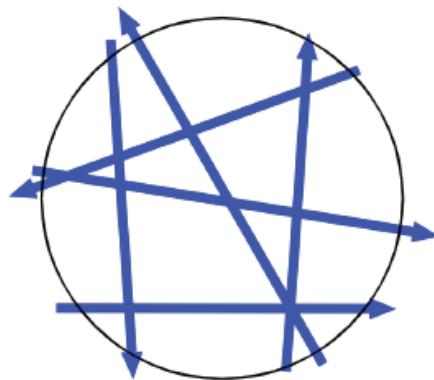


Fig. 8.4 Un color, todas las direcciones. La luz es temporalmente coherente.

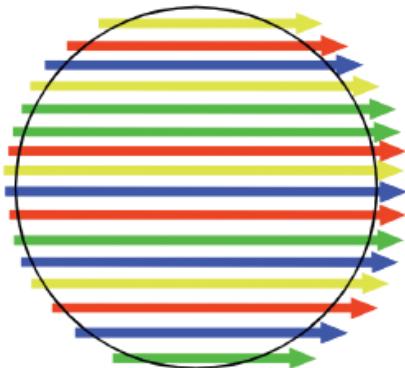


Fig. 8.5 Una dirección, todos los colores. La luz es espacialmente coherente.

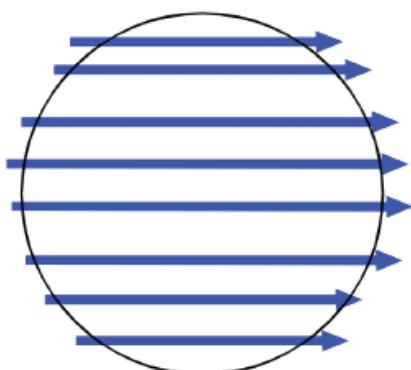


Fig. 8.6 Un solo color, una sola dirección. La luz es temporal y espacialmente coherente.

rayos en nuestra área espacial tienen la misma dirección, pero se trata de luz de los más diversos colores espectrales, Fig. 8.5. Finalmente, la misma situación anterior, solo que esta vez se supone que la lámpara emite luz espectralmente pura, Fig. 8.6. Todos los rayos tienen ahora la misma dirección y toda la luz tiene el mismo color espectral puro.

La luz de la Fig. 8.3 es completamente incoherente, la de la Fig. 8.4 se denomina temporalmente coherente. Por tanto, “temporalmente coherente” significa lo mismo que “espectralmente puro”. La luz de la Fig. 8.5 se denomina espacialmente coherente, por tanto, “espacialmente coherente” es lo contrario de “difuso”. Por último, la luz de la Fig. 8.6 es temporal y espacialmente coherente.

He aquí una parábola que puede contarse a los estudiantes. Se tiene una gran caja con muchas manzanas diferentes en dos características, el tamaño y el color. Se quiere clasificarlas, inicialmente por su tamaño, en 10 cajas separadas, con un intervalo de tamaño diferente en cada una. Se obtendrán manzanas uniformes en cada

una de las cajas en lo que respecta a uno de los dos criterios de clasificación. A continuación, se ordenan las manzanas de cada caja por colores, repartiéndolas de nuevo en 10 cajas diferentes y más pequeñas cada una. Se tendrá, ahora, un total de 100 cajas y en cada una, manzanas uniformes según los dos criterios de orden: tamaño y color.

La correspondencia entre las manzanas y la luz va aún más allá. Se observa que solo es posible obtener conjuntos ordenados de manzanas, a partir del lote inicial de manzanas diversas, eliminando todas aquellas que no cumplen el criterio de selección. No se puede convertir una mezcla de manzanas en un conjunto puro de estas, al igual que no se puede convertir la luz incoherente en coherente. Esto implicaría la destrucción de entropía y, por tanto, estaría en contra de la segunda ley. Pero se pueden cultivar manzanos que produzcan solo un tipo de manzana desde el principio. Lo mismo ocurre con la luz, existen fuentes que solo producen luz coherente desde el comienzo, son los llamados láseres.

Se insinúa una breve explicación óptico-ondulatoria: la luz es temporalmente coherente si la dispersión de la magnitud de los vectores k de la luz es baja; y es espacialmente coherente si su dispersión direccional es baja.

También se puede ver la coherencia directamente en un campo de ondas representado gráficamente. Un campo de ondas extendido, por ejemplo, de ondas de agua en un lago, revela zonas que parecen secciones de una onda sinusoidal con frentes de onda rectos. Estas zonas tienen una longitud y una anchura determinadas. La longitud es una medida de la coherencia temporal, la anchura de la coherencia espacial.

8.5 Luz no polarizada

Tema

¿Qué se entiende por luz no polarizada? Las siguientes citas intentan dar una respuesta:

“Los vectores del campo \vec{E} de las ondas de luz no oscilan en ninguna dirección preferente. Se habla de polarización cuando los vectores del campo \vec{E} se mueven de una manera determinada. La luz blanca generalmente no está polarizada.”

“... porque la radiación electromagnética suele ser la superposición de una multitud de ondas individuales con diferentes orientaciones del plano de oscilación y fase relativa. La mayor parte de la luz que se presenta en la naturaleza es inicialmente no polarizada como radia-

Luz no polarizada

ción térmica, es decir, las ondas individuales están distribuidas estadísticamente en sus propiedades.”

“La luz natural no suele estar polarizada. Se genera por las transiciones de radiación atómica de un gran número de átomos. Cada uno de estos átomos emite una onda luminosa cuya dirección de polarización está estadísticamente distribuida en el espacio, de modo que el plano de oscilación de la luz emitida cambia continuamente.”

A veces, la luz no polarizada se visualiza con un esbozo como el de la Fig. 8.7, aparentemente una instantánea de la intensidad del campo eléctrico (más exactamente, la punta de la flecha vectorial) sobre la coordenada espacial en la dirección de desplazamiento del haz de luz. Se pueden ver varias “ondas” simultáneamente en el mismo lugar.

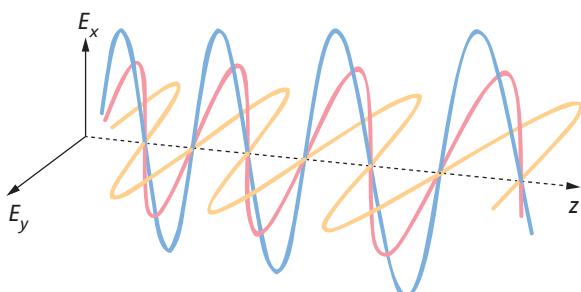


Fig. 8.7 Representación de luz no polarizada en algunos libros

Defectos

Es cierto que no es difícil entender qué es una onda electromagnética polarizada, también es fácil entender lo que hace un polarizador. Más difícil parece ser la cuestión de lo que debe imaginarse por luz no polarizada. Este tema se suele descuidar en los libros de texto.

Existen diferentes teorías sobre la luz: óptica geométrica, electrodinámica clásica, electrodinámica cuántica, termodinámica. Según cada teoría, se utilizan diferentes modelos y, según estos, la explicación de lo que es la luz no polarizada es algo diferente. Nos limitaremos aquí a la electrodinámica clásica.

La mejor manera de describir el estado de polarización de un haz de luz es mencionar cómo se comporta el vector intensidad del campo eléctrico en un plano de sección fijo transversal al haz de luz en el transcurso del tiempo; o en representación gráfica, cómo se mueve la punta de flecha del vector. (Se supone que el haz de luz es homogéneo en su extensión transversal).

La luz puede existir en una variedad de “estados de polarización”. Entre ellas, las más importantes y conocidas son la polarización lineal, la polarización elíptica

(con el caso especial de la polarización circular) y la ausencia total de polarización.

Si la luz está polarizada linealmente, la punta de flecha vectorial realiza un movimiento armónico; si está polarizada elípticamente, realiza un movimiento elíptico. Se pueden preparar muchos otros campos luminosos en los que la flecha vectorial recorre una gran variedad de trayectorias más o menos regulares, por ejemplo, las figuras de LISSAJOUS —Jules Antoine LISSAJOUS (1822–1880)—. Por último, en el caso de la luz no polarizada, la punta de flecha del vector intensidad del campo se mueve por una trayectoria irregular que no muestra ninguna periodicidad. La velocidad media de este movimiento depende de la temperatura de la luz y la longitud media de la flecha vectorial depende de la intensidad de la luz. Tanto la dirección como la magnitud del vector muestran un curso irregular. También se podría haber descrito el vector por sus componentes cartesianas y se podría afirmar que tanto la componente x como la y del vector muestran un curso irregular. En ambas formas de descripción, se tienen dos contribuciones al “desorden” del estado de la luz y, por tanto, a la entropía que transporta el haz de luz.

Y ahora, las citas.

- 1 La primera dice que los vectores del campo \vec{E} oscilan, pero no tienen preferencia por ninguna dirección. Ahora bien, una oscilación se entiende generalmente como un proceso periódico; sin embargo, con la luz blanca, la punta de flecha vectorial no realiza un movimiento periódico sino irregular.
- 2 La segunda indica que la radiación térmica es una superposición de ondas individuales. Esta afirmación va demasiado lejos. En primer lugar, habría que explicar qué se entiende por una onda individual. Se podría suponer que “onda individual” significa “onda sinusoidal”. De ser así, las ondas individuales serían simplemente las componentes de FOURIER —Jean-Baptiste Joseph FOURIER (1768–1830)— de la luz. En este caso, sin embargo, sería más acertado decir que la radiación puede descomponerse en dichos componentes, al igual que puede descomponerse de muchas otras maneras. Pero quizás no se referían a las componentes de FOURIER. La tercera cita da una pista.
- 3 “Cada uno de estos átomos emite una onda de luz...” Así que una onda de luz no es una onda sinusoidal pura, porque si proviene de un átomo, debe tener un principio y un final. Parece ser, según una opinión que también se encuentra entre muchos estudiantes, que es una entidad individualmente rastreable e identificable. Y aquí es donde probablemente entra el fotón, aunque no se mencione explícitamente: una entidad que de alguna manera representa una cola de

onda y, aunque forme parte de un haz de luz, en principio siempre conserva su identidad, es decir, su reconocibilidad. Las ilustraciones, que nunca faltan, también indican que esta idea prevalece.

A menudo se pueden encontrar imágenes que explican cómo funciona el filtro polarizador. En ellas, la luz delante del filtro se representa a veces como se muestra en la Fig. 8.7. Allí se pueden ver tres “ondas individuales”. En algunas representaciones que hemos encontrado, todas ellas tienen la misma longitud de onda y están en fase. En las ilustraciones no es posible ver su longitud total, pero ateniéndose a la parte que se muestra, la suma de las ondas parciales vuelve a dar como resultado una sola onda linealmente polarizada. La representación no transmite la idea de un campo con máximo desorden.

Origen

El problema parece tener varias causas.

- La afirmación de que la luz es una onda transversal, que todos aprendemos, se interpreta fácilmente en el sentido de que la flecha del vector intensidad de campo eléctrico realiza un movimiento oscilatorio transversal a la dirección de desplazamiento de la onda.
- La tendencia a considerar los componentes espectrales no como algo que solo surge mediante una descomposición matemática, sino como una realidad: una onda está formada por trenes de ondas, igual que un libro está formado por hojas de papel.
- Los fotones, entendidos de forma demasiado ingenua, se consideran componentes de la luz (y casi nunca componentes de las ondas de radio).
- La reticencia a considerar la luz desde un punto de vista termodinámico.

Eliminación

La luz blanca, incoherente en todos los sentidos, es algo omnipresente. No se duda en describir la distribución de la intensidad de campo incluso de dicha luz y en discutir las distintas dimensiones o tipos de desorden.

Es mejor dejar de lado las suposiciones que se puedan tener sobre la “verdadera naturaleza de la luz” y ceñirse a lo que se sabe, es decir, cómo se puede describir el concepto de polarización de la luz (incluida la ausencia de polarización) con la ayuda de la electrodinámica. Además, un poco de termodinámica no es perjudicial.

Se sugiere evitar la palabra “oscilar” en el contexto de la luz no polarizada, porque oscilar se entiende siempre como algo regular. Pero la flecha del vector de intensidad de campo se tambalea caóticamente.

8.6 Ondas electromagnéticas transversales

Tema

Los términos “onda transversal” y “onda longitudinal” se definen al principio de la teoría de las ondas: “En una onda transversal, el desplazamiento de las partes individuales del portador es transversal a la dirección de propagación. En una onda longitudinal, las partículas del portador oscilan de un lado a otro en la dirección de propagación”.

Y más tarde en el tratamiento de las ondas electromagnéticas: “La luz puede polarizarse, por lo que es una onda transversal con campos \vec{E} y \vec{B} que oscilan perpendicularmente a la dirección de propagación”.

La distribución de la intensidad del campo eléctrico y magnético en el espacio para un determinado momento suele ilustrarse con una imagen como la de la

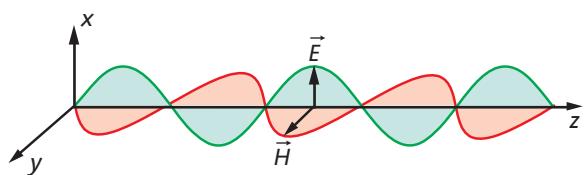


Fig. 8.8 “Instantánea” de la intensidad del campo eléctrico y magnético de una onda sinusoidal

Fig. 8.8.

Defectos

Según la definición que aprenden los estudiantes, una onda transversal es aquella en la que el portador de la onda se mueve transversalmente a la dirección de propagación de la misma. Si nos atenemos a esta definición, una onda electromagnética no sería, estrictamente hablando, una onda transversal, porque nada se mueve en una onda electromagnética.

Sin embargo, parece que el movimiento se toma demasiado en serio, al menos por parte de los estudiantes. A ello contribuye también la ilustración de la Fig. 8.8, que no falta en ningún libro: una “instantánea” del movimiento de la punta de la flecha del vector de intensidad de campo eléctrico y magnético.

El hecho de que algo no se entiende se puede comprobar al hacer un examen en la universidad. Si se pregunta por el recorrido de las líneas de campo de una onda de radio, por ejemplo dentro del espacio en el que se realiza el examen, la respuesta suele ser un esquema

Óptica ondulatoria y óptica geométrica

como el de la Fig. 8.8. Si ahora se señala que no se trata de una imagen de líneas de campo, se suele responder con perplejidad. Aparentemente, la imagen se interpreta como lo que dicen las frases de las citas, como un movimiento. Lo que dificulta la interpretación de la imagen es el hecho de que se empieza con el espacio de posiciones (con coordenadas x , y y z), pero después se introducen en él otras dos magnitudes físicas, las intensidades de los campos eléctrico y magnético. Se conoce el procedimiento de la mecánica, donde se acostumbra a dibujar vectores de fuerza en la imagen de alguna escena en el espacio de posiciones. En nuestro caso, existe la dificultad añadida de que los vectores de intensidad de campo cambian de posición en posición, pero que esta progresión se representa en función de una sola coordenada de posición, la coordenada z . Por lo tanto, la sugerencia de una oscilación en el sentido de un movimiento es grande.

Origen

Una adopción algo descuidada de la definición de ondas longitudinales y transversales de la mecánica por la electrodinámica. El hecho de que la metáfora de la oscilación se adopte de forma tan descuidada también puede tener una causa histórica. En tiempos anteriores, los estudiantes aprendían: “La luz es una onda transversal del éter”. Y eso se entendía en el sentido de la definición mecánica del término transversal.

Eliminación

Se sugiere explicar la distribución de la intensidad de campo no con una imagen como la de la Fig. 8.8, sino con una imagen de las líneas de campo en el espacio de posición, Fig. 8.9.

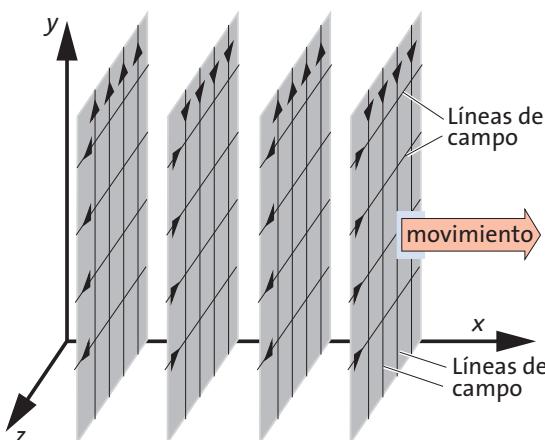


Fig. 8.9 Líneas de campo de una onda electromagnética plana que se propaga en la dirección x (instantánea)

8.7 Óptica ondulatoria y óptica geométrica

Tema

- 1 “Si la longitud de onda de la energía radiante disminuye en comparación con las dimensiones físicas del sistema óptico, los efectos de difracción se vuelven menos significativos. En el límite $\lambda \rightarrow 0$ resulta la propagación rectilínea en medios homogéneos y obtenemos el dominio idealizado de la óptica geométrica.”
- 2 “Óptica geométrica (u óptica de rayos) es el término utilizado para el caso límite de la óptica ondulatoria en el que $\lambda \rightarrow 0$ vale para la longitud de onda. En la óptica geométrica no se tiene en cuenta la naturaleza ondulatoria de la luz ni los fenómenos de difracción asociados a ella.”
- 3 “In cases where the wavelength is small compared to other length scales in a physical system, light waves can be modeled by light rays, moving on straight-line trajectories and representing the direction of a propagating light wave.”

Defectos

Si la longitud de onda es pequeña, se cumple la condición de la propagación rectilínea de la luz. Pero, es bien conocido el experimento con el espejo de FRESNEL — Augustin-Jean FRESNEL (1788–1827)—: se envía un haz expandido de luz láser sobre un espejo doble. Los dos haces parciales reflejados producen en una pantalla franjas de interferencia muy bonitas. Aunque la luz cumple la condición de que la longitud de onda es pequeña frente a las “otras escalas de longitud”, se observa un efecto de onda típico.

Para no tener que tratar con las propiedades ondulatorias de la luz, debe cumplirse una segunda condición: La luz debe ser suficientemente (temporalmente) incoherente.

Origen

La óptica geométrica se desarrolló en gran medida independientemente de la óptica ondulatoria. El objetivo era construir dispositivos ópticos que funcionaran con la luz del sol, las estrellas y las bombillas. Debido al equilibrio termodinámico de estas fuentes, la luz tiene una entropía máxima y, por lo tanto, una incoherencia máxima.

Cuando los haces de luz se cruzan o se superponen, las densidades de corriente de energía media pueden sumarse en este caso. De todos modos, no se conocen las intensidades de campo que se sumarían en la óptica ondulatoria.

Eliminación

Mencionar dos propiedades que debe tener la luz para que el tratamiento con la óptica geométrica pueda ser aplicado: la pequeña longitud de onda y la incoherencia.

8.8 La relación entre senos en la óptica

Tema

En la escuela se aprenden las reglas básicas de la óptica geométrica, entre ellas se encuentran las reglas conocidas para construir la imagen de un objeto y posiblemente también la ecuación de la lente.

En la física universitaria se vuelve a estos temas con mayor detalle: con las lentes gruesas y finas, los errores de las lentes, el principio de FERMAT —Pierre de FERMAT (1601–1665)— y el funcionamiento de los instrumentos ópticos con muchos de sus pormenores.

Una de las numerosas reglas y leyes que se encuentran en el proceso es la relación entre senos:

$$\Delta x_1 \cdot n_1 \sin \Delta \alpha_1 = \Delta x_2 \cdot n_2 \sin \Delta \alpha_2 \quad (8.1)$$

Se refiere a dos áreas de intersección 1 y 2 a través de un haz de luz. Δx es la extensión transversal del haz de luz y $\Delta \alpha$ es el intervalo angular de los rayos de luz en cada punto de la intersección. La ecuación dice que el producto de estas dos “extensiones” tiene el mismo valor para cada sección transversal del eje de un haz de luz, siempre que no haya dispersión en el camino entre la primera a la segunda sección.

Defectos

La relación entre senos se introduce en el contexto de la descripción matemática de la imagen óptica, después de tratar esta por medio de lentes finas y gruesas, luego de introducir los planos principales, y de discutir los problemas de los rayos fuera del eje, también después de tratar varias aberraciones de las lentes como el astigmatismo y la curvatura de campo y su corrección. Se deriva después de que se ha introducido una ecuación aparentemente similar, llamada por algunos “condición de tangencia”. Para el estudiante, ya algo agotado, es un detalle más de un tratamiento completamente geométrico de la imagen óptica. Lo que no sospecha es que se trata de una afirmación de un tipo completamente diferente.

De hecho, la relación entre senos no es más que la exigencia para que se cumpla la segunda ley: la entropía de la luz no debe disminuir al pasar por el dispositivo

óptico. Y si no hay ningún dispersor en la trayectoria del haz, debe permanecer constante.

Ciertamente, el estudiante no espera una afirmación de este tipo aquí, porque todo el capítulo no parecía tratar de física en absoluto, solo de geometría y de acercarse lo más posible a una imagen óptica perfecta. Tampoco se presentó una magnitud realmente física, solo distancias y ángulos, es decir, magnitudes geométricas.

Origen

¿Cómo se ha llegado a un estudio tan extenso sobre la imagen óptica y las aberraciones de las lentes?

La teoría de la imagen óptica es algo de la física aplicada. En este sentido, es comparable con la ingeniería eléctrica, la mecánica técnica, la hidrodinámica o la química.

Históricamente, la química se independizó muy pronto, le siguieron la ingeniería mecánica, la ingeniería eléctrica y la hidrodinámica. La óptica, en cambio, se quedó en la física. Pero tiene rasgos típicos de una disciplina técnica: se trataba del cálculo de sistemas de lentes. Y también tiene rasgos típicos de la era predigital: la época en que los sistemas de lentes no podían calcularse con métodos de trazado de rayos. Un objetivo como el famoso Tessar apareció, si no como una obra de arte, sí como un ingenioso invento.

Así, se dedicó un volumen entero a la óptica en obras de física experimental de varios volúmenes.

La relación entre senos solo aparecía como una de las reglas que limitaban la calidad de las imágenes ópticas.

Eliminación

La luz es especialmente adecuada para demostrar la acción de la termodinámica. En algunos aspectos es más adecuada que el tan popular gas ideal. La razón es la falta de interacción entre las partículas de luz, y con ello el hecho de tener la disipación, es decir, la generación de entropía, mejor controlada que con los gases materiales. Así, la luz puede utilizarse para explicar de forma especialmente satisfactoria que la entropía puede interpretarse como una medida del desorden.

Por brevedad, nos limitaremos aquí a la consideración de un haz de luz que emana de una superficie uniformemente luminosa y del que una parte limitada por una pupila de entrada atraviesa un dispositivo óptico. La pupila de entrada representa el límite de nuestro sistema, por así decirlo. (Por sistema se entiende la luz, no el dispositivo óptico). Compararemos la luz en diferentes superficies de intersección por el flujo luminoso. Para garantizar que siempre se tiene el mismo sistema definido por la pupila de entrada, es necesario garantizar que no se absorbe ni se emite luz en la estructura. El dispositivo óptico consiste en objetos sobre los que se

La óptica con y sin imagen

refracta y/o refleja la luz. No necesita producir una imagen óptica en absoluto, porque la validez de la relación entre senos va mucho más allá de los arreglos ópticos de la formación de imágenes.

En la ecuación (8.1): Δx es una medida para la extensión del haz de luz en la dirección x , es decir, la dirección transversal; también se puede decir para su dispersión, desenfoque, o desorden en la dirección x . Del mismo modo, $\Delta\alpha$ es una medida de la dispersión en los diferentes ángulos. El hecho de que el producto de los dos no cambie de un lugar a otro (en la dirección z) también se puede expresar de esta manera: solo se puede obtener un aumento del orden en el lugar con un aumento del desorden en el ángulo. Esto suena como si una ley de conservación estuviera en funcionamiento, y es cierto. Es una expresión del hecho de que la entropía de la luz se mantiene constante al pasar por el dispositivo óptico. Si uno de los elementos ópticos dispersara la luz, el producto aumentaría, de acuerdo con el hecho de que la entropía de la luz también aumenta.

Para establecer la conexión con la entropía, el desenfoque angular se expresa mejor mediante la dispersión del componente x del vector k :

$$\Delta k_x = n \cdot k \cdot \sin \Delta\alpha$$

(La n proviene de la ley de la refracción).

Entonces la ecuación (8.1) se convierte en

$$\Delta x_1 \cdot \Delta k_{x1} = \Delta x_2 \cdot \Delta k_{x2}$$

y se reconocen dos componentes del espacio de fase de seis dimensiones (el espacio de fase μ), o dos factores que contribuyen al volumen de luz de seis dimensiones en el espacio de fase. La entropía se calcula a partir de este volumen de espacio de fase.

8.9 La óptica con y sin imagen

Tema

Cuando se aprende la óptica geométrica, su único objetivo parece ser la realización de imágenes ópticas. Se aplica en la construcción de dispositivos ópticos como lentes, gafas, microscopios y telescopios. En cada caso, la mayor cantidad posible de luz que emana de un punto del objeto debe reunirse en un punto de la imagen.

Defectos

En una imagen óptica satisfactoria, los puntos de un objeto se “mapean” en puntos del plano de la imagen: la

mayor cantidad posible de luz que emana de un punto del objeto debe unirse en un punto de la imagen. El mayor número posible de rayos de luz que atraviesan el sistema óptico deben converger en el punto de la imagen. También se espera que la imagen no esté distorsionada, es decir, que las relaciones entre los ángulos en que aparecen los puntos de la imagen, vistos desde un punto del eje óptico, sean las mismas que las relaciones angulares en que se verían los puntos del objeto.

Si se considera el proceso que tiene lugar durante la formación de imágenes como un transporte de energía, también se puede decir: se realiza un transporte de energía con luz que tiene que cumplir una condición adicional.

Si nos fijamos ahora en los casos en que los transportes de luz se realizan en la naturaleza y en la tecnología, encontramos que los transportes en los que se busca una imagen óptica son solo un caso especial, que es importante en ciertos contextos —en concreto, cuando se trata de la transmisión de datos— pero no en otros.

Si se trata solamente de utilizar la luz para transportar la energía de un lugar a otro sin realizar una imagen óptica, se descubre que las exigencias que se deben plantear al sistema óptico no son simplemente más laxas, sino muy diferentes. Nos encontramos en el campo de la óptica sin imagen u óptica anidólica.

Esta al igual que la óptica con imágenes, pertenece a la óptica geométrica. Su objetivo es llevar la mayor cantidad de luz posible desde una fuente, generalmente una superficie luminosa, hasta un receptor, concretamente: la óptica anidólica es la adecuada cuando se trata de iluminar, es decir, de concentrar o recoger la luz.

Es una lástima que la óptica con imágenes se haya extendido tanto en las escuelas y universidades que no quede espacio para la óptica sin imágenes. Se tiene la impresión, aunque casi nunca se exprese con claridad, de que los problemas que tienen que ver con la concentración de la luz, o la iluminación, son simplemente una aplicación algo más burda de la óptica con imágenes. Se podría pensar que el mejor dispositivo para resolver el problema sería un objetivo multilente que corrigiera al máximo las aberraciones de la lente. Pero esta idea estaría muy lejos de la realidad. La nueva cuestión lleva a una óptica completamente diferente, en la que son vivientes otras leyes y reglas, y en la que una lente bien corregida es una solución muy poco adecuada.

Origen

Las temáticas de la óptica sin imagen surgieron probablemente más tarde que las de la óptica con imagen. Además, la óptica sin imágenes, como muchas otras aplicaciones técnicas de la física, se separó de esta en

una etapa temprana y se creó una disciplina especial de la “tecnología de la luz”, que con diferentes nombres se desarrolla fundamentalmente en facultades de ingeniería.

Eliminación

Se sugiere analizar un problema diferente al de la óptica de la imagen: es necesario transferir la mayor cantidad posible de luz de una superficie emisora a otra. Un dispositivo óptico típico que no es de imagen es el concentrador. En un concentrador, la luz entra por una abertura con un área A_1 y sale por otra abertura con un área A_2 , Fig. 8.10.

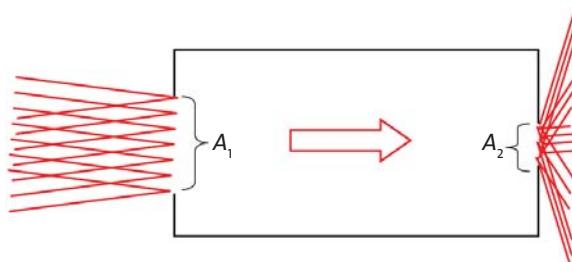


Fig. 8.10 Esquema de un concentrador

La ley más importante que es necesario observar en el diseño del concentrador es la condición del seno, también llamada relación o condición de senos de ABBE —Ernst Karl ABBE (1840–1905)—, o la 2^a ley:

$$A \cdot \sin^2 \alpha = \text{const}$$

Aquí A es el área de la sección transversal del haz de luz y α es el ángulo de apertura de la distribución de luz en cada punto de la superficie de corte. La condición del seno indica que el desorden en el lugar (es decir, el área) solo puede reducirse si el desorden angular aumenta en el proceso, ya que la entropía no puede ser destruida.

Antes de analizar cómo se construye un concentrador, se puede hacer una afirmación importante sobre el factor de concentración.

$$c = \frac{A_1}{A_2}$$

Con la condición del seno se puede escribir que:

$$c = \frac{A_1}{A_2} = \frac{\sin^2 \alpha_2}{\sin^2 \alpha_1}$$

Ahora, el ángulo de apertura α_2 a la salida del concentrador no puede superar los 90° . Por lo tanto, la concen-

tración puede alcanzar como máximo el valor:

$$c_{\max} = \frac{1}{\sin^2 \alpha_1}$$

Este breve cálculo ya contiene bastante física fundamental y al mismo tiempo plausible: cuanto menor sea el ángulo de apertura de la luz entrante, más se podrá concentrar.

Para la luz difusa, es decir, la luz con $\alpha_1 = 90^\circ$, el factor de concentración es igual a uno, es decir, no puede concentrarse.

Para el sol, con $\alpha_1 = 0,266^\circ$, resulta un factor de concentración máximo de 46 400.

Un concentrador ópticamente calculado alcanza el 96 % de la concentración máxima teóricamente posible. Sin embargo, ni siquiera merece la pena construir un concentrador de este tipo, ya que un simple embudo espejado en forma de cono ya alcanza el 92 %.

Se podría esperar que una lente corregida lograra aún más. De hecho, un objetivo, corregido o no (relación focal 1,7), solo alcanza el 10 % de esto.

De esta última afirmación se desprende que la óptica sin imagen no es simplemente una renuncia a la calidad de la imagen, sino una física completamente diferente. Se puede decir que aquí, a diferencia de la óptica de la imagen, se trata realmente de física.

8.10 La radiancia

Tema

Si se mira a través de un pequeño tubo, cuyas paredes interiores están ennegrecidas, a una pared monocromática y uniformemente iluminada, no se puede decidir a qué distancia se está de la pared, con base en lo que se ve.

Defectos

El experimento descrito lo muestra con especial claridad, pero el fenómeno también se manifiesta sin este esfuerzo experimental. Es omnipresente. También puede formularse así: el brillo percibido de un objeto no cambia con la distancia. Lo perciben nuestros ojos, pero también todas las cámaras. El ojo y la cámara son buenos instrumentos de medición para ello. Pero ¿para qué realmente? Debe ser una magnitud local, porque se “mide” en la ubicación del ojo o de la cámara, y no en la ubicación de la superficie de la que procede la luz. Se trata de una magnitud física que no se menciona en absoluto en la física escolar y que poco se encuentra en la física universitaria: la radiancia L .

El sol y las lámparas espectrales

También es difícil entender por qué no es posible concentrar la luz solar con la ayuda de lentes o espejos de tal manera que se establezca una temperatura más alta que en la superficie del sol. Las sencillas reglas de la óptica geométrica permitirían esa concentración.

Origen

El contenido de las clases de física se basa en gran medida en convenciones. Y la convención dicta que la luz se trate con las herramientas de la óptica geométrica, no se analizan preguntas sobre la distribución de la energía y la distribución de la corriente de energía.

Para el estudiante el tema se vuelve aún más antipático por el contexto en el que se encuentra, si es que se encuentra: si el estudiante ya se ha abierto camino a través de los muchos términos y definiciones de la fotometría, así como de la radiometría, probablemente hace tiempo que ha perdido la esperanza de que haya algo fundamental que entender aquí.

Eliminación

La radiancia es la densidad de flujo de energía por ángulo sólido. (Acá no interesa la dependencia de la longitud de onda. Por lo tanto, se puede suponer que se trata de luz monocromática). Es una magnitud escalar con la que se describe localmente un campo de radiación. No solo depende de la posición (x, y, z) en el campo de radiación, sino también de la dirección (θ, φ) en cada punto.

Esto parece complicado, pero no lo es. La mejor manera de entender la magnitud es ver un medidor de radiancia, véase Fig. 8.11.

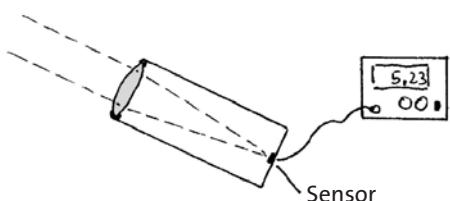


Fig. 8.11 Medidor de radiancia.

Mide la radiancia en el lugar de entrada de la lente, y la dirección del eje óptico del dispositivo.

Para obtener la distribución espacial de la radiancia, el dispositivo se desplaza en el espacio manteniendo la dirección fija. Para la dependencia angular, se gira en una posición fija en varias direcciones. (Si también se mide la dependencia de la frecuencia, se obtiene la radiancia espectral. Así se describe el campo de radiación en un espacio de fase de seis dimensiones).

Si se desplaza el aparato en la dirección de su eje óptico sin cambiar su orientación, el valor medido no cambia, o dicho de manera más general: la radiancia en la dirección de un haz de luz es la misma en cada punto de este. La luz puede pasar a través de cualquier sistema óptico de lentes y espejos, la radiancia no cambia en un rayo. Solo cuando la luz se dispersa o se absorbe cambia. (Al entrar en un material de índice de refracción n , este aumenta en n^2 , pero al salir, vuelve al valor anterior).

Una vez que se tiene la magnitud, y sobre todo se conoce esta última regla, no es difícil entender el porqué solo es posible concentrar la luz solar hasta tal punto que se alcance de nuevo la temperatura de la superficie del sol. Lo máximo que se puede conseguir es que en cada punto del plano de la imagen, la luz provenga de todo el semiespacio. Dado que la radiancia es la misma que al principio en la superficie del sol, se encuentra en la misma situación en el lugar de la imagen que directamente sobre la superficie del sol; la luz proviene de todo el semiespacio. Es como si se hubiera sostenido el receptor directamente frente al sol. En el mejor de los casos, habrá un equilibrio térmico entre la superficie del sol y el receptor.

8.11 El sol y las lámparas espectrales

Tema

Al estudiante se le enseña que existen dos tipos de fuentes luminosas que se distinguen por su funcionamiento. Pertenece a la primera clase los cuerpos incandescentes, el sol y la llama de las velas, a la segunda, las lámparas espectrales, el láser, los diodos semiconductores y ciertas llamas coloradas. Acerca del primer tipo, el estudiante aprende que los cuerpos negros y calientes emiten radiación electromagnética debido a su temperatura, la llamada radiación térmica o de cuerpo negro, cuyo espectro, descrito por la ley de PLANCK —Max PLANCK (1858–1947)—, depende solamente de la temperatura del cuerpo emitente. Se aprende también que la emisión de las fuentes de la otra clase se debe a la transición de un electrón en un átomo, una molécula o un sólido cristalino de un estado excitado en un estado de menor energía. La frecuencia se obtiene de la diferencia de energía de los dos estados implicados, cuya intensidad depende de la probabilidad de transición. La excitación se puede realizar de varias maneras: eléctricamente, por “bombeo” óptico, o térmicamente.

Defectos

Los dos tipos de fuentes de luz se describen en dos niveles conceptuales diferentes: el primero con argumentos termodinámicos, y el segundo por medio de la física atómica, dejando la equívoca impresión que la emisión de una lámpara incandescente no tiene nada que ver con la física atómica, y la emisión de una llama de gas nada que ver con la termodinámica.

En realidad en ambos tipos de fuentes de luz un sistema excitado pasa a un estado de menor energía, y en ambos casos la intensidad está determinada por las leyes de la termodinámica.

El utilizar dos paradigmas distintos para la explicación se comprende si el interés se centra solamente en los espectros, ya que el espectro del cuerpo negro se obtiene por medio de argumentos de la física estadística, y el mecanismo microscópico de la emisión no tiene ninguna influencia en el mismo. Por el contrario, la termodinámica no dice gran cosa sobre la forma del espectro de una lámpara espectral.

Sin embargo, si no se dice cuál es la relación entre los dos métodos de explicación de la misma fenomenología, solamente se podrá obtener que los estudiantes no hagan lo que en principio los maestros desean que hagan, es decir, hacer preguntas cuando algo no se comprenda.

Una de dichas preguntas podría ser: ¿Por qué la luz del sol no tiene un espectro de líneas como una lámpara espectral? Se sabe que el sol se compone esencialmente de hidrógeno y helio, y normalmente esos gases no emiten luz con un espectro de cuerpo negro.

Origen

Las teorías o explicaciones de la radiación del cuerpo negro y de los espectros de líneas surgieron independientemente y han conservado esa “independencia” en la enseñanza hasta el día de hoy.

Eliminación

Cada cuerpo con una temperatura diferente de cero emite radiación electromagnética; si el cuerpo tiene emisividad $e(f) = 1$ para todas las frecuencias (los valores de e se sitúan entre 0 y 1), entonces la *densidad de corriente de energía* de la radiación en el intervalo de frecuencia df está dada por la ley de PLANCK:

$$dj_E = \frac{2\pi h}{c^2} \frac{f^3}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1} df \quad (8.2)$$

Por otra parte, la emisividad de un cuerpo para todas las frecuencias es igual al coeficiente de absorción: $e(f) = a(f)$, de tal forma que si e es igual a uno para todas las

frecuencias f , entonces también lo es a , y el cuerpo se considera completamente opaco, es decir, negro [1].

Esto es fácil de comprender: Si un cuerpo puede emitir luz de cierta frecuencia, debe existir una transición electrónica (atómica) permitida correspondiente a esa energía, y por consiguiente, también debe poder absorber la luz de dicha frecuencia.

Si $e(f) = a(f)$, pero no es igual a uno para todas las frecuencias, la ley de PLANCK se escribe de la siguiente forma:

$$dj_E = e(f) \cdot \frac{2\pi h}{c^2} \frac{f^3}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1} df \quad (8.3)$$

Ya que en un cuerpo no negro e es igual o menor que uno, para todas las frecuencias, la densidad de corriente energética por intervalo de frecuencia es igual o menor que la del espectro del cuerpo negro. Un ejemplo de un espectro de emisión que se sitúa debajo del espectro del cuerpo negro es el de la luz de una llama como la del metano, o una llama de gas sobre la cual se deja caer un poco de sal de cocina.

El hecho de que los espectros de los cuerpos incandescentes se dejen describir termodinámicamente, no quiere decir que el mecanismo microscópico de emisión sea fundamentalmente distinto del de una lámpara espectral. Cada fotón que sale de un cuerpo incandescente es generado en una transición en los átomos, así por ejemplo, los fotones en el rango visible en una transición electrónica, los fotones de la radiación infrarroja lejana en transiciones de oscilación y rotación. Ya que en los sólidos a menudo se encuentran transiciones de todas las energías, el caso particular del espectro del cuerpo negro se observa frecuentemente en ellos, sin embargo, no todos los cuerpos sólidos emiten radiación según el espectro de PLANCK. Esto se puede ver fácilmente en un sencillo experimento con la llama de un mechero Bunsen al calentar dos trozos de dos materiales distintos, el uno al lado del otro, por ejemplo en un lado hierro y en otro cuarzo o zafiro o sencillamente un guijarro blanco. Mientras el hierro emite una luz viva, el cuarzo, el zafiro o el guijarro casi no emiten en el intervalo visible.

El sol es un tipo de radiador térmico particularmente interesante, por una parte se sabe que se compone prácticamente solo de hidrógeno y helio, y se podría suponer que su espectro es idéntico al de una lámpara espectral de hidrógeno-helio. Por otro lado se sabe que el espectro del sol es un espectro continuo, bastante similar al espectro del cuerpo negro. ¿Cómo se pueden conciliar estas dos situaciones? La solución se encuentra en el factor $e(f) = a(f)$ de la ecuación (8.3), para un gas excitado térmicamente en un experimento de laborato-

Fotones y fonones

rio este factor es casi cero para casi todas las frecuencias, emite y absorbe solamente para algunas frecuencias en el ultra violeta (UV), es decir, es casi completamente transparente. El espectro de emisión es muy distinto del espectro de PLANCK. Ahora, es conocido que el coeficiente de absorción y por consiguiente también la emisividad de un cuerpo es mayor cuanto mayor sea su espesor. Si la luz entra en un cuerpo y el cuerpo es suficientemente grueso, la luz encontrará finalmente una transición apropiada, siendo evidente que la distancia a recorrer antes de ser absorbida depende de la frecuencia de la luz. Para el sol, en el caso menos favorable, pueden ser algunos centenares de kilómetros, lo cual comparado con la dimensión de una lámparapectral es muchísimo, pero comparado con el diámetro del sol es muy poco. Una capa de materia solar de 10 cm de espesor (tomada en la fotosfera) es completamente transparente, prácticamente no absorbe y no emite en la dirección orthogonal a la capa. El espectro de la luz emitida será idéntico al de una lámpara spectral [2], si aumenta el espesor de la capa también la absorción aumentará, y por consiguiente la emisión. Al aumentar el espesor de la capa el gas empieza a emitir en las regiones entre las líneas espectrales y finalmente una capa de 1000 km de espesor, que absorbiera toda la luz, emitiría como un cuerpo negro a 6 000 K.

Pero ¿cuáles son las transiciones responsables para esta absorción y emisión? Considerando que el “gas solar” consta solamente de hidrógeno y helio, y no teniendo en cuenta la leve ionización, en el recorrido de unos 100 kilómetros se obtendrá absorción completa de todas las frecuencias debido al ensanchamiento de las líneas espectrales de la parte visible del espectro. Pero existen otros mecanismos de absorción: el gas se encuentra ligeramente ionizado y los electrones libres absorben. Además, la materia solar contiene otros elementos en baja concentración cuya absorción se sitúa en la parte visible del espectro. Ya que es posible considerar que las distancias recorridas por la luz en el sol son arbitrariamente largas, no hace falta discutir sobre cuál mecanismo es responsable de la absorción, si solamente nos interesa el espectro.

Es similar a lo que ocurre con el conocido experimento del cartón en el cual hay un agujero. El agujero parece negro, cualquiera sean las características de las paredes interiores del cartón: reflectantes, negras, blancas, amarillas, azules, etc. El mecanismo de absorción ya no tiene importancia para el aspecto del agujero.

Referencias

- [1] P. Würfel, *Physik der Solarzellen*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1995, S. 63

[2] M. Vollmer, *Hot gases: Transition from line spectra to incandescent radiation*, Am. J. Phys. 73 (2005), p.215–223

8.12 Fotones y fonones

Tema

En libros escolares para secundaria generalmente se introducen los fotones, bien como las partículas constituyentes de la luz, o como porciones energéticas intercambiadas en el proceso de emisión o absorción; los fonones por el contrario, en general no son mencionados, razón por la cual los estudiantes universitarios de Física tienen una idea bastante concreta sobre los fotones, y una bastante pobre o ninguna acerca de los fonones.

Defectos

Entre los fotones y los fonones existe una marcada analogía, las teorías clásicas de la luz y del sonido tienen mucho en común, así como las teorías cuánticas correspondientes [1, 2].

La analogía se manifiesta en varios efectos, un ejemplo es la conducción térmica con unas y otras partículas; los portadores “térmicos” en un material que es conductor eléctrico son los electrones, en el que no lo es son los fonones. El proceso es de carácter difusivo, es decir, los fonones son permanentemente producidos y absorbidos. De manera muy similar ocurre el transporte térmico (transporte del calor) en el sol —el cual parte de la zona de reacción nuclear hacia el exterior—, siendo también un proceso difusivo; en este caso los fotones son responsables del transporte, y son ellos los generados y absorbidos.

Origen

Los fonones se introducen en la Física al desarrollar el tratamiento cuántico de las vibraciones de la red cristalina, es decir, su aparición es reciente; los fotones, por el contrario, como partículas componentes de la luz, tienen una tradición de muchos años. Además, en “favor” de estos últimos, figura la existencia de radiaciones cuyos fotones se pueden registrar fácilmente: rayos X y gamma.

Una de las razones para no dar la importancia que corresponde a los fonones puede ser la costumbre de introducirlos como “cuasipartículas”, denominación que generalmente se emplea para partículas que deben parte de sus propiedades a su entorno local. Si se procede así consecuentemente, no existiría ninguna partícula “normal”, todas serían cuasipartículas. Justamente se esta

aprendiendo que todas las partículas “normales” deben su masa a la interacción con el campo de HIGGS.

Eliminación

Se sugiere lo siguiente:

- Tener menos “reservas” contra los fonones, ya que son partículas no más difíciles de entender que los fotones.
- Asumir una actitud menos “irreflexiva” frente a los fotones.
- Mesurar el empleo del prefijo *cuasi*, que en general no explica concretamente nada, y sí genera dificultades para el estudiante.

Referencias

[1] N. W. Ashcroft a. N. D. Mermin, *Solid State Physics*, Holt, Rinehart and Winston, Inc., Orlando, 1976, p.453: „En esta teoría [de la electrodinámica cuántica] son las energías permitidas de una oscilación natural del campo de radiación en una cavidad

$$\left(n + \frac{1}{2}\right) \hbar \omega$$

dado, donde ω es la frecuencia angular de la oscilación natural. Sin embargo, es una costumbre general no hablar del número cuántico de excitación n del modo, sino del número n de fotones. Exactamente de la misma manera uno no dice [con un cuerpo sólido] que la oscilación natural... esta en el n -ésimo estado excitado, pero uno dice que hay n fonones en el cristal”.

[2] H. Vogel, *Gerthsen-Kneser-Vogel, Physik*, Springer-Verlag, Berlin, 1977, p.598:

“Al igual que la oscilación de una sola partícula, una oscilación reticular con la frecuencia angular ω solo puede tener valores de energía que difieran en un múltiplo integral. Por lo tanto por ejemplo también emite una onda de luz a la cuadrícula solo múltiplos enteros de este valor o los absorbe de él. Se interpreta esto con el mismo derecho que en el caso del campo de ondas electromagnéticas por la existencia de cuantos de sonido o fonones con la energía $\hbar \omega$ ”.

8.13 La forma de los fotones

Tema

Interesa saber cómo se habla de los fotones y qué ideas se transmiten sobre su tamaño y forma.

He aquí algunos ejemplos:

“A photon (from Ancient Greek φῶς, φωτός (phôs, phôtós) ‘light’) is an elementary particle that is a quantum

of the electromagnetic field, including electromagnetic radiation such as light and radio waves, and the force carrier for the electromagnetic force. Photons are massless, so they always move at the speed of light in vacuum, 299 792 458 m/s (or about 186,282 mi/s). The photon belongs to the class of bosons.” (Wikipedia en inglés).

“Los fotones (del griego φῶς phôs ‘luz’; singular ‘el fotón’, con énfasis en la primera sílaba), también cuantos de luz o partículas de luz, son, dicho de forma gráfica, los ‘paquetes’ de energía que componen la radiación electromagnética.

Físicamente, el fotón se considera una partícula de intercambio. Según la electrodinámica cuántica, como mediador de la interacción electromagnética, pertenece a los bosones gauge y es, por tanto, una partícula elemental. El fotón no tiene masa, sino energía y momentum —ambos proporcionales a su frecuencia—, así como momentum angular.” (Wikipedia en alemán).

“En la interacción entre la luz y la materia, la energía se transfiere siempre en pequeñas porciones. Estas porciones se llaman cuantos de luz o fotones.”

“Estas porciones de energía se llaman fotones. Decimos: La energía de la luz es cuantificada.

Resumen: La energía de la radiación electromagnética con frecuencia f es efectiva en cuantos $W = h \cdot f$, llamados fotones. La energía de la luz se cuantifica.” (Citas de dos libros escolares).

Defectos

Antes de entrar en el tema propiamente dicho, es decir, en cómo hablar de los fotones, veamos brevemente una cuestión más simple: qué es y qué no es un fotón.

Lo que se entiende por fotón en física queda claro de la primera cita de Wikipedia: es una partícula elemental, es el cuanto del campo electromagnético, es la partícula que media la interacción electromagnética. Según el uso común en física, no es una porción de energía, aunque eso digan los dos libros de texto citados, y aunque la versión alemana de Wikipedia lo presente así como ilustración. Ya que, si alguien afirma que un fotón es una porción de energía, surge inmediatamente la pregunta del porqué no se lo llama porción de momentum o de momentum angular, y por qué un electrón no debería ser una porción de energía.

Se puede entender que los autores de libros de texto quieran evitar algunas preguntas incómodas, como: ¿dónde está el fotón? ¿qué tamaño tiene? ¿qué camino sigue? Pero optar por una porción de energía no es una solución.

Ahora, sobre el tamaño y la forma, nada se menciona al respecto en ninguna de las citas. ¿Será porque se ha planteado mal la pregunta? Se sabe que existen preguntas

El condensador óptico

tas mal planteadas, como, por ejemplo, ¿qué color tiene un electrón? ¿La pregunta sobre la forma de los fotones será de este tipo?

Si así fuera, no se permitiría narrar muchas de las cosas que se suelen contar despreocupadamente de los fotones.

Cuando se dice que el fotón ha pasado por una rendija con una determinada probabilidad y por la otra con la misma probabilidad, se supone que la anchura del fotón es menor que la de las rendijas. Si se dice que los fotones dentro del sol viajan como máximo un milímetro antes de ser absorbidos, se supone que son más cortos que 1 mm. ¿Por qué no se lo dice claramente? ¿Será que la idea detrás de esto es que el fotón sea puntiforme? Por supuesto, que no se quiere decir eso. Porque si la energía del fotón es h veces f , entonces debe tener una frecuencia y también una longitud de onda, y como se da un único valor para la frecuencia, el fotón debería ser infinitamente largo. Así que parece que se está en un aprieto.

El problema es que si no se dice nada concreto al respecto, los alumnos se formarán su propia idea. ¿Es eso lo que se quiere y espera?

Todo físico sabe, por supuesto, la razón por la que no se quiere responder a la pregunta. El fotón es una partícula, una entidad del mundo real que existe pero que no es “localizable”, o quizás solo a veces y solo un poco, y que a veces tiene que compartir su identidad con otra partícula.

Estos conceptos en general no parecen ser inaceptables para algunos. Compárese, por ejemplo, lo que se dice a veces del alma, que existe de algún modo en el espacio, que está solo débilmente localizada y que su trayectoria no está bien definida. Pero preferimos no dejarnos guiar por esas fantasías. Al fin y al cabo, se tiene una teoría coherente que predice qué resultados darán las mediciones y con qué probabilidades. Y no se trata de otra cosa que de encontrar un lenguaje que permita transmitir el contenido de esta teoría a otra persona con la mayor claridad posible. Para ello, hay que tener en cuenta lo que se percibe como descriptivo o vívido. Algo es vívido cuando se puede afirmar que es como otra cosa ya conocida.

Así que es necesario analizar lo que dice la teoría sobre los fotones y buscar las formas y el grado en que se comportan como algo que ya se conoce.

Por supuesto, se dirá: ¡Ese es precisamente el problema! Simplemente no hay nada que se comporte de forma tan extraña como los fotones. Para los fotones, no existe un “es como...” (aparte de las “almas”).

Sin embargo, al parecer aquí se capitula demasiado pronto.

Por cierto, se tiene la impresión de no tener los mismos problemas con el electrón, y desde luego no con el protón. Pero esto se debe simplemente a que la variedad

de fenómenos en los que estas partículas se comportan como pequeños individuos con una trayectoria y forma bien definidas es más amplia.

Origen

El origen de la afirmación común de que los fotones son porciones de energía es una comprensión errónea de la relación entre magnitud física y sistema físico.

El origen de la reticencia con una afirmación sobre la forma de los fotones podría ser que el tema está dominado por los físicos teóricos, entre los que la necesidad de un lenguaje vívido, que en particular tienen los profesores en la escuela, no es muy pronunciada.

Eliminación

Electrón, protón, neutrón, positrón, fotón, fonón, excitón, polarón, polaritón, magnón, solitón, skyrmion, etc. son denominaciones para sistemas físicos que suelen tratarse como objetos individuales.

Esto funciona bien, sobre todo si se limita a ciertos estados de estas entidades, y especialmente para partículas con una gran masa en reposo.

Se sugiere, al menos para las lecciones en la escuela, dar un poco más de lucidez al fotón, identificando su tamaño y su forma con su área de coherencia. Por lo tanto, tiene una extensión en la dirección longitudinal y transversal. Y esto es diferente según el estado de la luz, es decir, según cómo se haya producido y qué se le haya hecho después. Si la longitud de coherencia (es decir, la “coherencia temporal”) es muy grande, el momentum de los fotones así como su longitud de onda tienen un valor con poca incertidumbre. Una gran anchura de coherencia significa que las componentes transversales del momentum son pequeñas; se tienen frentes de onda amplios, lo que es importante para los experimentos de interferencia en la doble rendija.

8.14 El condensador óptico

Tema

Al explicar el funcionamiento de equipos de proyección y retroproyección, se encuentran frases como las siguientes: “El condensador hace que toda la superficie de la diapositiva quede uniformemente iluminada.”

Defectos

En un retro-proyector, el llamado condensador (óptico) es en general una lente de FRESNEL —Augustin FRESNEL (1788–1827)— que se encuentra inmediatamente debajo de la transparencia. Debido a su posición el conden-

sador no puede aumentar el flujo luminoso a través de la transparencia, ni puede cambiar la distribución de la luz en la misma.

Origen

La óptica geométrica tal como se enseña tradicionalmente en secundaria se concentra demasiado en la discusión y formación de las imágenes ópticas, descuidando en general el estudio de la distribución de la luz.

Eliminación

Debe decirse que el condensador óptico cambia la dirección de la luz de tal manera que toda la luz que atraviesa la transparencia pasa después a través del objetivo.

8.15 Luz monocromática

Tema

La luz que puede representarse mediante una onda sinusoidal se denomina monocromática. Se puede caracterizar por una sola longitud de onda o frecuencia.

Aquí el artículo correspondiente de una enciclopedia científica: “Monocromo”, “monocromático”, “monocolor”. Luz monocromática, luz homogénea, luz de una sola longitud de onda, es decir, luz monocolor que no se puede descomponer en colores espectrales”.

Lo que se entiende por color se explica en otra parte de la misma enciclopedia: “El color, la sensación visual que normalmente provoca la radiación de la luz en el ojo”.

Defectos

Cuando se habla de luz monocromática en el contexto de la física, se puede suponer que se entiende lo que se quiere decir. Sin embargo, la designación es inapropiada y alguien que esté familiarizado con la colorimetría debe sentirse incómodo con ella. Porque el término “monocromo” significa algo diferente en la colorimetría, y en el lenguaje coloquial. La luz compuesta por varios componentes espectralmente puros evoca en el ojo una sola sensación de color, es decir, es monocroma en el sentido de la colorimetría. Un vestido o un papel pintado, por ejemplo, pueden ser multicolores. En cambio, la luz multicolor no existe en este sentido.

En general, muchos (infinitamente muchos) espectros pertenecen a una determinada sensación de color, pero solo una única sensación de color pertenece a un espectro. Así que existen muchos más espectros diferentes que colores. También se puede decir que el espacio espectral es pluridimensional (tiene tantas dimensiones

como longitudes de onda se puedan distinguir), mientras que el espacio de color es tridimensional. Por tanto, las afirmaciones sobre el color de la luz no son adecuadas para caracterizar un espectro. La excepción a la regla son los colores espectrales, que corresponden a ondas sinusoidales puras.

Origen

Las leyes de la colorimetría o leyes de GRASSMANN —Hermann Günther GRASSMANN (1809–1877)— se conocen desde hace más de 150 años, por lo que son un tema antiguo. Sin embargo, al principio, la física no estaba especialmente interesada en ellas. Otra cosa son las leyes de la óptica geométrica, que no faltan en ningún libro de física, ya que son necesarias para construir instrumentos ópticos. En cambio, la colorimetría solo adquirió importancia técnica con la llegada de la impresión a color y, sobre todo, de la televisión a color. Para esa época el rumbo ya estaba marcado.

Eliminación

En lugar de monocromática, se podría llamar a la luz monoenergética si se quiere hacer referencia a los fotones. Si no, se puede hablar de luz espectralmente pura o simplemente de ondas sinusoidales.

8.16 Colores primarios y el espacio de color

Tema

En colorimetría se introduce el concepto de color primario, diciendo por ejemplo que: “La luz tiene tres colores primarios: rojo, verde y azul; combinando dichos colores primarios en diversas intensidades es posible obtener todos los colores visibles. Los colores secundarios de la luz son cian (azul cielo), magenta y amarillo, y son resultado de la combinación de diferentes pares de colores primarios en iguales intensidades.” A veces se llama colores primarios aditivos a los colores rojo, verde y azul, y colores primarios sustractivos a los colores cian, magenta y amarillo.

Defectos

Aquí se expresa de manera algo complicada un hecho que se puede describir más sencillamente: el espacio de color es “tridimensional”, es decir, se necesitan y bastan tres números para caracterizar una impresión de color. Este hecho es notable porque, primero, la mayoría de la gente no lo conoce, segundo, es fácil de comprender siempre y cuando se introduzca un sistema de coorde-

Blanco y negro y el azul del cielo

nadas apropiadas y, tercero, permite caracterizar de un modo muy sencillo un color, para lo cual se requería antes términos bastante complicados o un nombre propio particular (como en los colores que se emplean en la moda). Del hecho de que el espacio de color sea tridimensional se puede deducir que es posible elegir tres colores básicos o primarios, tal como se eligen los vectores básicos de un espacio vectorial. Sin embargo, los colores básicos no tienen necesariamente que ser rojo, verde y azul. Pueden ser tres colores cualesquiera, siendo la única condición que no se encuentren ubicados en una línea recta en el espacio de color. Es posible también escoger una base que no esté caracterizada por tres “impresiones” de color sino por otras características tales como, por ejemplo: tonalidad, saturación y brillo.

Describir el hecho de que el espacio de color es tridimensional de la forma como se hace en el Tema de este artículo, recuerda otro problema analizado antes [1]. Allí se menciona que existen dos tipos de polos magnéticos, atribuyéndoles nombres distintos: norte y sur, dando así la impresión de que se trata de dos calidades distintas. Es más claro decir que hay una magnitud “carga magnética” que puede tener valores positivos y negativos, es decir, un valor en una escala unidimensional. Tampoco es apropiado introducir tres colores primarios como tres calidades distintas en lugar de decir que se trata de tres puntos en un espacio tridimensional.

Origen

La teoría del color tiene un largo historial, en el cual profesionales de las más diversas procedencias han contribuido con sus juicios y “prejuicios”, no solamente científicos (físicos, fisiólogos, biólogos, etc.) sino también artistas e inclusive personas del mundo de la moda. Por lo cual el número de opiniones y métodos de descripción es muy grande.

Eliminación

Se recomienda iniciar la teoría del color introduciendo el concepto de espacio de color tridimensional, sin discutir al comienzo la métrica. Se puede proponer a los alumnos ordenar cierto número de objetos de diversos colores, marcadores por ejemplo, ellos comprobarán que es imposible ordenarlos en una sola fila, es decir, en una escala unidimensional. Tampoco bastan dos dimensiones, pero puede hacerse en tres dimensiones. Es posible caracterizar estas tres dimensiones empleando la tonalidad, la saturación y el brillo. Solo después de lo anterior, se analiza que también es posible caracterizar los puntos del espacio de color por medio de otra base.

Referencias

[1] Véase 6.3 *Dos tipos de carga eléctrica*, p.189

8.17 Blanco y negro y el azul del cielo

Tema

El color del cielo, el azul, parece ser un tema importante. Título en un libro para secundaria:

¿Por qué el cielo es azul?

Título en otro libro para secundaria:

Dispersión de la luz: el azul del cielo y el rojo de la tarde.

Título en un libro universitario:

¿Por qué el cielo es azul?

De ningún otro sistema o ente se discute el color con tanto detalle.

Defectos

Cuando se pregunta por qué se trata el tema, se sugieren en primer lugar dos respuestas:

- 1 Porque se quiere explicar los colores de las cosas que nos rodean. Esto es competencia de la física.
- 2 Porque se quiere tratar la dispersión de RAYLEIGH —John William Strutt, Lord RAYLEIGH (1842–1919)—, y el azul del cielo es un ejemplo que todo el mundo conoce.

Ni una ni otra respuesta parece convincente.

Respuesta 1: con el mismo argumento habría que ocuparse de los otros colores, o al menos de los más importantes, por ejemplo, ¿por qué es blanca la pared, la nieve, o la nube?, ¿o por qué todo lo que es negro, es negro?, ¿por qué el oro es amarillo o dorado? Pero esto no se hace. Probablemente se piensa que no hay nada especial que decir, el blanco es blanco porque no se absorbe nada, el negro porque se absorbe todo y el amarillo porque se absorbe el azul. A propósito, si se habla del azul, ¿por qué solamente el azul del cielo y no también el del mar?

Respuesta 2: si la dispersión de RAYLEIGH se considera importante, tanto que debe figurar en un libro de texto, ¿por qué no se abordan otros procesos de dispersión, en primer lugar la dispersión desde objetos blancos, como una hoja de papel o una pared blanca? ¿O se considera demasiado trivial? Además, ¿por qué no se discute en los mismos textos la dispersión RAMAN —Chandrasekhara Venkata RAMAN (1888–1970)— o la BRILLOUIN —Léon Nicolas BRILLOUIN (1889–1969)—?

Una observación con respecto a la explicación de la dispersión RAYLEIGH. Se habla del papel de las vibraciones de las moléculas, de cómo actúan estas como pequeñas antenas hertzianas; pero, por desgracia, solo en este contexto. Se habla de las excitaciones atómicas en el contexto de la física atómica, podrían entonces surgir las siguientes preguntas: ¿se excitan aquí los electrones de las moléculas?, ¿en qué tipo de estados? Y si así fuera, no se entendería el porqué la onda emitida está acoplada en fase con la onda incidente. ¿O la física cuántica ya no se aplica en este caso y la molécula se comporta como una antena dipolar clásica? Pero eso no es todo. Los autores son lo suficientemente conscientes como para explicar que la luz dispersada debería anularse debido a la interferencia, pero que no lo hace porque existen fluctuaciones de densidad del aire. No es que estas afirmaciones sean incorrectas. Pero si las ondas que se supone se dispersan interfieren entre sí, ¿no habría sido conveniente problematizar este efecto en el momentum en que realmente se produce, es decir, siempre que la luz atraviesa un cuerpo transparente —líquido o sólido— y no solamente cuando ya esto no ocurre?

Origen

¿Será que solo se quiere expresar: ¡Mira, la física no es tan árida como siempre pensaste! Si alguna vez piensas escribir un poema sobre la belleza del cielo azul, deberías consultar primero tu libro de física para saber de qué estás hablando.

Eliminación

La interacción de la luz con la materia puede dividirse en varias categorías: absorción, refracción, reflexión y dispersión. En general, todos estos procesos tienen lugar simultáneamente y además dependen de la longitud de onda. La materia es complicada y, por tanto, estos procesos también son complicados y diversos. Sin embargo, entre ellos existen casos particularmente sencillos, y se debía discutir preferentemente sobre estos. En particular, el origen de los colores blanco y negro; su tratamiento en clase se presta porque son fenómenos universales.

El blanco del cielo nublado, de la nieve, de la pared blanca, del papel, de la leche, de las hojas de la margarita, de una camiseta o de una sábana siempre se produce de la misma manera, a través de muchos y repetidos procesos de refracción (en los que no se absorbe prácticamente nada), toda la luz que incide sobre una superficie acaba saliendo de nuevo. Se trata de un fenómeno interesante, ya que es de esperar que no todos los rayos de luz consigan volver a la superficie. El proceso se llama dispersión, sin determinantes como RAYLEIGH,

MIE, RAMAN, BRILLOUIN, COMPTON, RUTHERFORD o THOMSON.

El proceso por el que se crea el negro es igualmente universal. El negro de una pared pintada de negro, de un coche pintado de negro, del hollín de una estufa, de las letras impresas se produce a través de sustancias que reflejan cuando están forman una superficie lisa. Sin embargo, la reflexión no funciona sin absorción (lo contrario de la refracción). Esto se puede ver claramente si se colocan dos espejos enfrentados que se “miran” entre ellos en ángulo, la luz que se refleja varias veces se vuelve cada vez más débil. Si se tritura un material del tipo mencionado, la luz que interactúa con él se comporta inicialmente de forma similar a los cuerpos blancos, es decir, se refleja de un lado a otro de manera desordenada en zigzag. Sin embargo, con cada reflejo pierde intensidad, de modo que muere en el material.

Así que no es necesario utilizar ninguna interpretación molecular o atómica para los colores blanco y negro. A propósito, el negro más negro se obtiene haciendo un pequeño agujero en una caja de cartón, este será negro, aunque las paredes interiores de la caja sean blancas.

9 FÍSICA DEL ESTADO SÓLIDO

9.1 Corrientes de difusión y de deriva

Tema

Se dice que en la unión semiconductor p-n —sin corriente— un gradiente del potencial eléctrico causa una “corriente de deriva” (o de arrastre), la cual esta compensada por una “corriente de difusión”. Esta última fluye en dirección opuesta a la anterior y es resultado del gradiente de concentración de los portadores de carga.

Defectos

Si en un material conductor se presenta un gradiente del potencial eléctrico, y si el potencial químico de los portadores de carga tiene el mismo valor en todas partes, se tiene una corriente de portadores de carga, los cuales son “impulsados” por el gradiente del potencial eléctrico. Por otra parte, cuando el potencial eléctrico es el mismo en todas partes también se puede presentar una corriente de los portadores de carga, si existe un gradiente del potencial químico, debido por ejemplo a un gradiente de concentración. En este caso los portadores de carga son “impulsados” por el gradiente del potencial químico. Esto quiere decir que hay dos modos de “impulsar” a las partículas: un gradiente del potencial eléctrico que actúa sobre la carga eléctrica de las partículas, y el gradiente del potencial químico que lo hace sobre la cantidad de sustancia.

En general, ambos gradientes son diferentes de cero, de modo que resulta un arrastre neto que se describe por medio del potencial electroquímico η , el cual es esencialmente la suma del potencial eléctrico φ y del potencial químico μ :

$$\eta = \mu + z \cdot F \cdot \varphi.$$

La densidad de la corriente eléctrica se representa por:

$$\vec{j} = -\frac{\sigma}{z \cdot F} \text{grad } \eta.$$

donde σ es la conductividad eléctrica, z el número atómico de los portadores y F la constante de FARADAY.

En el caso de la unión p-n sin corriente los dos “tipos” de arrastre actúan en direcciones opuestas y se compensan, situación que se ha llamado “equilibrio electroquímico”.

Ahora, en lugar de decir que una corriente de partículas puede ser causada de dos maneras, y por tanto que la corriente corresponde al gradiente potencial resultante, esto es al gradiente del potencial electroquímico, a menudo se dice que el gradiente del potencial eléctrico causa una “corriente de deriva” y el del potencial químico una “corriente de difusión”, y que las dos corrientes se superponen en una corriente total. En el caso del equilibrio electroquímico se tendrían dos corrientes de la misma intensidad y de direcciones opuestas.

El problema es que cada corriente tomada separadamente debería producir entropía, y por consiguiente calor, pero se sabe que la corriente total (en el caso de la compensación exacta) no es disipativa, es decir, no hay producción de entropía. Además, ¿cómo se podría representar este hecho a nivel microscópico? ¿Se tendría que pensar que existen algunas partículas que “responden” al gradiente eléctrico y otras al gradiente químico? Y si se elige un portador arbitrariamente, ¿qué criterios permitirían determinar a cuál corriente corresponde?, ¿a la corriente de deriva o a la de difusión?

Lo inapropiado de la descripción referida se resalta al compararla con una situación análoga en la cual nadie pensaría realizar semejante “descomposición”. El aire de la atmósfera también está “sometido” a dos gradientes: el gradiente del potencial gravitacional, que “empuja” las partículas hacia abajo, y el gradiente de presión (vinculado con el gradiente del potencial químico), que las empuja hacia arriba. Mientras el aire se encuentra en “reposo” (con temperatura uniforme), ambos arrastres son iguales y opuestos de modo que se compensan mutuamente. ¿Porqué en ese caso no se habla de una “corriente de arrastre” hacia abajo y una “corriente de difusión” hacia arriba?

Origen

Probablemente existan varias causas, o la “mezcla” de estas:

- 1 El “potencial químico” —herramienta sencilla y muy útil— es casi desconocido como medida de “arrastre”, a pesar de haber sido introducido en la Física hace más de cien años.
- 2 No se toma en serio la magnitud física “potencial electroquímico”.

Eliminación

Existen dos “tipos” de arrastre para los portadores de carga: uno eléctrico que actúa sobre la carga y otro químico que actúa sobre la cantidad de sustancia. Ya que carga y cantidad de sustancia están fijamente “acoplados” los dos potenciales pueden ser representados en uno solo: el potencial electroquímico; el gradiente de este último es responsable de la corriente de las partículas.

9.2 El diodo semiconductor como rectificador

Tema

A veces se sostiene que en el efecto rectificador es responsable la zona situada a ambos lados del área de contacto de las regiones n y p, empobrecida en portadores de carga, generalmente llamada zona de agotamiento.

- 1 “En un diodo semiconductor se forma una zona de alta resistencia en ambos lados de la unión, por difusión y recombinación simultánea...”
- 2 “La zona de transición se hace más grande. Con polarización inversa no hay circulación de corriente.”
- 3 “... al conectar el diodo en polarización inversa la zona de agotamiento se hace más larga y así la resistencia aumenta.”
- 4 “La unión p-n en principio no permite el establecimiento de una corriente eléctrica entre sus terminales puesto que la zona de agotamiento no es conductora.”

Citas, como estas o similares son frecuentes en diferentes textos escolares.

Defectos

Efectivamente, la zona de agotamiento cambia su espesor con la tensión aplicada, de modo que la conclusión parece lógica y posible. Sin embargo, dicha conclusión es inequívoca solamente si los portadores de carga conservan su identidad a lo largo del camino recorrido; se

hace errónea cuando los portadores de carga participan en una reacción, lo cual ocurre en el caso de la unión p-n. En polarización directa los electrones reaccionan con los huecos para formar fotones y fonones. En polarización inversa esta reacción ocurre en la dirección opuesta, pero la tasa de conversión es mucho menor, ya que a temperaturas normales solo pocos fotones y fonones están presentes. Es precisamente esta asimetría en la tasa de conversión la que causa la asimetría de la resistencia. No hay que olvidar que la zona de agotamiento tiene un espesor de 1/1000 de la zona de difusión, es decir, de la región que es responsable del efecto rectificador.

Origen

Possiblemente el origen de los problemas planteados sea la tradicional “aversión” del físico hacia la química, lo cual lo induce al inútil intento de explicar los fenómenos que ocurren en la unión p-n únicamente por medio de la ley de OHM —Georg Simon OHM (1789–1854)— y de la electrostática, es decir, de herramientas típicas de la electricidad. En realidad la explicación del funcionamiento del diodo, así como del transistor p-n-p ó n-p-n, no puede ser completa sin herramientas de la Química [1]. Se obtiene una explicación más adecuada si se utiliza el gradiente del potencial químico como fuerza motriz, algo equivalente al gradiente del potencial eléctrico.

Eliminación

Se puede explicar el funcionamiento del diodo semiconductor así: en polarización directa los electrones se mueven de la región n y huecos de la p hacia la unión p-n, y allí interactúan formando fotones y fonones; el diodo deja pasar la corriente. Los diodos LED están optimizados de tal manera que se forman muchos fotones y pocos fonones. En polarización inversa los portadores de carga deberían moverse desde la unión hacia afuera (hacia las regiones n y p), pero dado que no hay suministro de nuevos electrones y huecos desde la unión, no hay portadores de carga que puedan realizar dicho movimiento. El diodo no deja pasar la corriente eléctrica y no hay emisión de luz. Siendo un poco más precisos se observará que existe una débil corriente, la corriente inversa, causada por los electrones y huecos creados en muy pequeña cantidad por la radiación ambiental.

Referencias

- [1] F. Herrmann a. P. Würfel, *The semiconductor diode as a rectifier, a light source, and a solar cell: A simple explanation*, Am. J. Phys., 74, 2006. p.591–594.

El diodo semiconductor como célula fotoeléctrica

9.3 El diodo semiconductor como célula fotoeléctrica

Tema

Una explicación típica del funcionamiento de la célula fotoeléctrica es: “cuando la luz de longitud de onda apropiada es dirigida hacia la unión, se crean pares hueco-electrón que se desplazan a través de la unión debido al campo generado en la región deprimida.”

Defectos

Esta explicación parece posible. La corriente eléctrica generada por el fotodiode necesita una “fuerza motriz”, y en Física se conoce tal fuerza: la del campo eléctrico o gradiente del potencial eléctrico. En la unión p-n existe un gradiente de potencial eléctrico, y además al parecer tiene la dirección correcta, por lo cual se concluye que dicho gradiente es el responsable de la corriente.

Sin embargo, un gradiente de potencial eléctrico no puede ser la causa de una corriente eléctrica estacionaria. Esto se puede entender “siguiendo” a un portador de carga (que se asume positivo) en su camino cerrado por el circuito eléctrico; se observa que respecto al potencial se debe “subir” tanto como “bajar”. Ya que en la resistencia de carga al exterior del fotodiode se “baja la colina” de potencial, en el fotodiode (como en cualquier otra célula), se debe subir la “montaña”. Una fuente de energía eléctrica se reconoce precisamente por el hecho de que el potencial en el borne donde “entra” la carga (positiva) es inferior al potencial del borne donde “sale” la carga. Lo anterior no se afecta por el hecho de que en la célula puedan existir segmentos del camino donde el potencial disminuye, ya que es normal que en un circuito eléctrico el potencial tenga “saltos” siempre que varíe el material del conductor, aún cuando se trate de un circuito sin batería. Cuando se realiza el giro completo en un circuito cualquiera, dichos saltos hacen que el potencial aumente exactamente tanto como disminuya, y en general no se deben tener en cuenta.

Origen

Posiblemente es el intento desesperado de explicar un fenómeno con las herramientas familiares y elementales de la electricidad, pero las mismas leyes de la electricidad muestran que tal explicación debe ser errónea.

Eliminación

La fuerza motriz para un portador de carga eléctrica puede pero no necesariamente ser un gradiente de potencial eléctrico. Al igual que en una célula electroquímica, en el fotodiode, los portadores de carga son impulsados por el gradiente de potencial químico.

9.4 El efecto fotoeléctrico

Tema

En cursos universitarios (y a veces en secundaria) se estudia el efecto fotoeléctrico para mostrar la naturaleza cuántica de la luz; se realiza un experimento que permite medir además, con buena precisión y de manera sencilla, la constante de PLANCK —Max PLANCK (1858–1947)—.

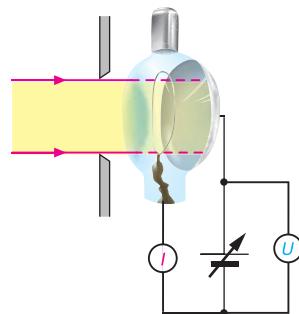


Fig. 9.1 Esquema del experimento del efecto fotoeléctrico. La tensión eléctrica se regula de tal manera que la photocorriente sea cero.

La Fig. 9.1 muestra esquemáticamente dicho experimento. Se ilumina el cátodo, hecho de un material con bajo trabajo de extracción (también conocido como función trabajo), generalmente un metal alcalino, y se regula la tensión eléctrica de tal modo que la corriente fotoeléctrica sea igual a cero. Para interpretar los resultados del experimento se emplea la ecuación de EINSTEIN —Albert EINSTEIN (1879–1955)— que, en simbología actual, se expresa como:

$$E_c = h \cdot f - \Phi_C. \quad (9.1)$$

donde E_c es la energía cinética máxima, h la constante de PLANCK, f la frecuencia de la luz incidente y Φ_C la función de trabajo del cátodo.

Ya que los photoelectrones extraídos pierden parte de su energía en el interior del cátodo, la ecuación se refiere a aquellos electrones que no pierden energía antes de salir de este, se pretende que

$$E_c = e \cdot U_{\max}. \quad (9.2)$$

Donde e es la carga elemental, U_{\max} es la tensión eléctrica necesaria para que la photocorriente sea cero (también se conoce como potencial de frenado), ver por ejemplo [1, 2, 3 y 4]. El experimento se realiza con luz de diversas longitudes de onda, y se grafica $e \cdot U_{\max}$ en función de f , obteniendo una recta cuya pendiente es igual a h :

$$e \cdot U_{\max} = h \cdot f - \Phi_C. \quad (9.3)$$

El punto en que la recta corta el eje de las abscisas corresponde a la función trabajo de los electrones del material del cátodo.

Defectos

La ecuación (9.2) no es correcta. La tensión U_{\max} que se mide en el experimento no corresponde a la energía cinética de la ecuación (9.1), por consiguiente la ecuación (9.3) tampoco es correcta.

Lo anterior puede entenderse más fácilmente por medio de un modelo, Fig. 9.2a, en el cual se consideran dos recipientes diferentes I y D (izquierdo y derecho) con agua. La distancia entre el nivel del agua y el borde del recipiente izquierdo h_I , es menor que h_D , la altura desde el nivel del agua en el recipiente derecho, hasta su borde, siendo Δh la diferencia entre los dos niveles de agua.

Para pasar cierta cantidad de agua de masa m del recipiente I al D, en el caso ilustrado se observa que la

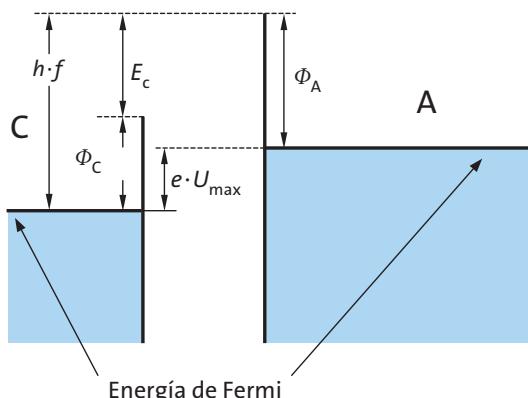
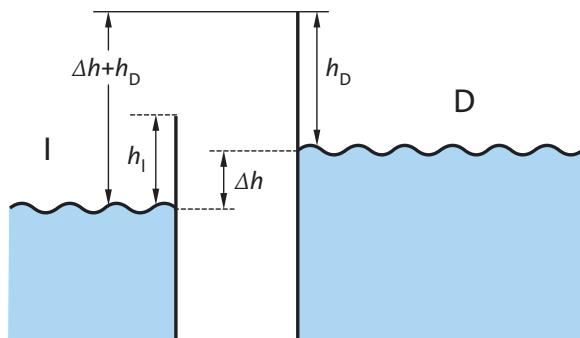


Fig. 9.2 (a) Modelo de agua. Se debe transferir cierta cantidad de agua del recipiente de la izquierda al de la derecha. b) Efecto fotoeléctrico. Se debe transferir un electrón desde el cátodo C al ánodo A.

energía mínima requerida se obtiene a partir de las diferencias de altura entre el nivel del agua en I y el borde de D, siendo la energía mínima de trasvase igual a:

$$E_{\min} = m \cdot g \cdot (\Delta h + h_D). \quad (9.4)$$

La altura del borde h_I no juega ningún papel en este caso.

La analogía con el efecto fotoeléctrico es sencilla; en la Fig. 9.2b se representa a la izquierda el cátodo C y a la derecha el ánodo A, la dirección vertical corresponde a la energía del electrón considerado.

Los niveles del agua en la Fig. 9.2a corresponden en la Fig. 9.2b a las energías de FERMI —Enrico FERMI (1901–1954)— (también llamados potenciales electro-químicos) de los electrones en el cátodo y ánodo, respectivamente. A la distancia entre el nivel del agua y el borde de los recipientes corresponden las funciones de trabajo para el cátodo y el ánodo (Φ_C y Φ_A) respectivamente. La energía mínima de transvase de agua corresponde a la energía $h \cdot f$, que el fotón debe poseer para poder transferir un electrón del cátodo al ánodo, la cual se puede expresar de dos formas:

$$h \cdot f = e \cdot U_{\max} + \Phi_A \quad (9.5)$$

$$h \cdot f = E_c + \Phi_C \quad (9.6)$$

De la ecuación (9.5) se obtiene que

$$e \cdot U_{\max} = h \cdot f - \Phi_A,$$

que es el análogo de la ecuación (9.4), y de la ecuación (9.6) se tiene que

$$E_c = h \cdot f - \Phi_C;$$

las rectas correspondientes a las dos últimas ecuaciones están representadas en la Fig. 9.3. Para poder extraer electrones del cátodo (para que $E_c > 0$), $h \cdot f$ tiene que ser mayor que la función de trabajo del cátodo, o bien

$$f > \frac{\Phi_C}{h}.$$

La recta de la Fig. 9.3b se obtiene a partir de la Fig. 9.3a por un desplazamiento en la dirección del eje vertical de $\Phi_A - \Phi_C$. Esta diferencia de las funciones trabajo corresponde a la diferencia de potencial (o tensión Volta) U_V , ya que:

$$e \cdot U_V = \Phi_A - \Phi_C \quad (9.7)$$

El efecto fotoeléctrico

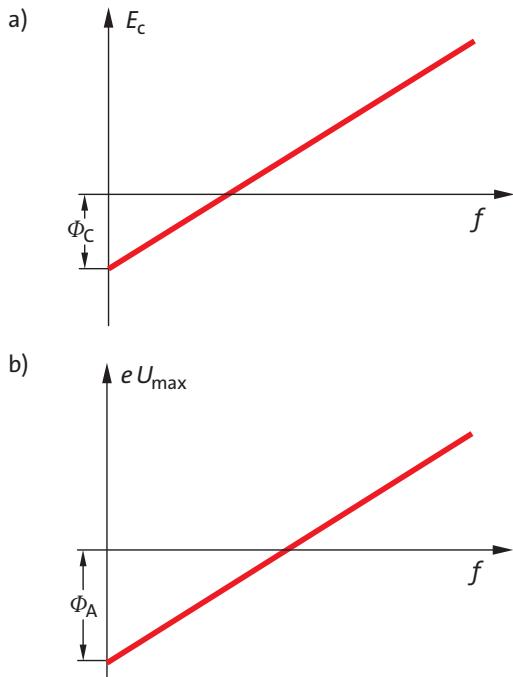


Fig. 9.3 a) Energía cinética en función de la frecuencia. El punto de corte con el eje de las ordenadas es la función trabajo del cátodo. b) Potencial de frenado en función de la frecuencia. El punto de corte con el eje de las ordenadas es la función trabajo del ánodo.

En la mayoría de libros consultados, se representa eU_{\max} en función de la frecuencia, como en la Fig. 9.3b, sin embargo, los ejes se denominan como en la Fig. 9.3a. Se encuentran representaciones correctas como en el texto de SHPOLSKI [5]. Aun cuando se acepten los argumentos expuestos, se podrían presentar dudas por el hecho de que el experimento (tal como se realiza especialmente en educación media) suministra en buena aproximación la función trabajo del material catódico y no del anódico, que es mucho mayor a los 2 eV que corresponde al valor aproximado medido experimentalmente. La explicación consiste en que una pequeña cantidad del material del cátodo se evapora y se condensa en el ánodo; varios de los actuales fabricantes de células fotoeléctricas informan sobre este fenómeno. Efectivamente, basta un pequeño recubrimiento esporádico del ánodo con material del cátodo, para permitir que los electrones entren en el ánodo.

Origen

El artículo de Albert EINSTEIN (1879–1955) de 1905 sobre el efecto fotoeléctrico, no versa sobre un trabajo experimental, en esa época no se habían realizado mediciones exactas al respecto. Para EINSTEIN lo importante

era la interpretación del hecho de que la energía cinética de los electrones es independiente de la intensidad de la luz incidente, y que el número de electrones emitidos es proporcional a dicha intensidad [6].

En los decenios siguientes el efecto ha sido medido con gran esmero y precisión por varios investigadores; los trabajos más representativos fueron realizados por MILLIKAN —Robert MILLIKAN (1868–1953)— [7, 8] y LUKIRSKI —Piotr LUKIRSKI (1894–1954)— y PRILEZHAEV —Nikolai PRILEZHAEV (1877–1944)— [9]. La Fig. 9.4, extraída del trabajo de estos últimos, muestra la energía cinética E_c de los electrones liberados en función de la frecuencia de la luz incidente. El punto de corte con el eje de ordenadas (no visible en la figura) corresponde a la función trabajo del cátodo. Si como ordenada se coloca solamente U_{\max} , entonces el punto de corte corresponde a la función trabajo del ánodo. Según la ecuación (9.1) el punto de corte con el eje de ordenadas es, sin contar el factor e , igual a la función de trabajo del material catódico. Para obtener la energía cinética los autores del mencionado trabajo, sumaron la diferencia de potencial de contacto (tensión Volta) y la tensión U_{\max} que habían medido. La diferencia de potencial de contacto la obtuvieron, como ya antes lo había hecho Millikan, por una medición independiente.

Como ya se dijo, en muchos libros se encuentra una figura similar, donde se coloca en el eje de ordenadas eU_{\max} (o U_{\max}) y se pretende que esta sea la energía cinética. Incluso en [2] se ha reproducido textualmente la figura del trabajo [9], identificando el eje de ordenadas con U_{\max} , sin hacer ningún análisis, ni comentario. ¿Cómo pudo producirse tal error de “transcripción”? Es plausible el hecho de identificar el potencial de frenado con la energía cinética máxima de los electrones; quien no sea experto en efectos de contacto puede clasificarlos

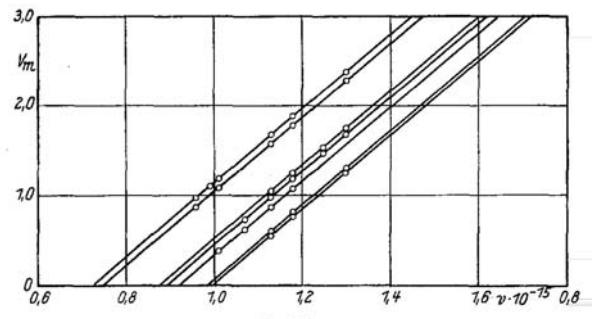


Fig. 10.
Die Geraden entsprechen den Metallen (von links gerechnet):
Al, Zn, Sn, Ni, Cd, Cu, Pt.

Fig. 9.4 Resultados originales presentados en el trabajo de LUKIRSKI y PRILEZHAEV [9]. En el eje de ordenadas: $V_m = U_{\max} + U_V$, en el de abscisas: la frecuencia de la luz incidente.

como perturbaciones que en un primer enfoque pueden ser despreciados, sin embargo en ese caso se debió prescindir por completo de dar una interpretación al punto de corte con el eje de ordenadas, ya que lo que se llama función de trabajo entra en la misma categoría de los efectos que se ha decidido despreciar, ver ecuación (9.7).

Eliminación

Se sugiere considerar tres posibilidades, especialmente para el nivel de secundaria:

- Explicar el efecto correctamente, por ejemplo utilizando el modelo con el agua.
 - Prescindir de la interpretación del punto de corte con el eje de las ordenadas.
 - Renunciar por completo a realizar este experimento.
- Para un físico en los años 1910 o 1920 dicho experimento era importante, era algo así como un *experimentum crucis*. Sin embargo, hoy día no es necesario que los estudiantes adquieran sus conocimientos en las mismas condiciones difíciles de sus antecesores, hoy se conoce el “final” de esta historia, se conocen muchos experimentos que se pueden interpretar correctamente solo si se admite que la luz está cuantizada. Se conoce la ecuación de SCHRÖDINGER —Erwin SCHRÖDINGER (1887–1961)—, y se pueden “poner en evidencia” fotones individuales con experimentos de bajo costo. Para un estudiante de educación media se pueden organizar diferentes actividades que permitan abordar los elementos conceptuales que “suplan” el trabajo realizado con el efecto fotoeléctrico, y así lograr que su formación general no se vea afectada por no haber realizado el mencionado experimento.

Referencias

- [1] Gerthsen, Kneser u. Vogel, *Physik*, Springer-Verlag, Berlin, 1977, p.308
- [2] K. Stierstadt, *Physik der Materie*, VCH, Weinheim, 1989, p.489
- [3] E. H. Wichmann, *Quantum Physics*, Berkeley Physics Course, Volume 4, McGraw-Hill, New York, 1971, p.28–31. Existe versión en castellano: E. Wichmann, *Física Cuántica*. Barcelona: Reverté, 1986. p.31–35.
- [4] A. Zajac y E. Hecht, *Óptica*, Massachusetts: Fondo Educativo Interamericano, 1977. p.473–476.
- [5] E. W. Schpolski, *Atomphysik*, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1972, p.315–320: “Zweitens verschiebt sich die Kurve auch, wie in allen ähnlich gelagerten Fällen, aufgrund des Kontaktpotenzials, das einer genauen Messung nur schwer zugänglich ist. Dies sowie eine Reihe anderer experimenteller Schwierigkeiten und Fehlerquellen führten dazu, dass die Ein-

stein’sche Gleichung zunächst nicht einwandfrei bestätigt werden konnte. Erst MILLIKAN gelang es dann, nach verschiedenen Vorarbeiten, in deren Verlauf Widersprüche aufgedeckt und überwunden wurden, den lange angestrebten experimentellen Beweis zu erbringen und h genau zu bestimmen.”

[6] A. Einstein, *Über einen die Verwandlung des Lichts betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*, Annalen der Physik 322, Nr. 6, 1905, S. 132–148. Existe versión en castellano: A. Einstein, *Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz*. En: Einstein. Barcelona: Crítica, 2005. p.381–398.

[7] R. A. Millikan, Einstein’s Photoelectric Equation and Contact Electromotive Force, Phys. Rev 7, 1916, p.18–32

[8] R. A. Millikan: *A Direct Photoelectric Determination of Planck’s “h”*, Phys. Rev 7, 1916, p.355–388

[9] P. Lukirskey, S. Priležeav, *Über den normalen Photoeffekt*, Zeitschrift für Physik 49, 1928, p.236–258: „Werden auf der Ordinatenachse die bei Bestrahlung mit Licht von verschiedener Frequenz für ein bestimmtes Metall erhaltenen $V_2 + K$, auf der Abszissenachse die Frequenzen v aufgetragen, so erhalten wir eine Gerade, deren Tangente gleich h/e ist. Bei bekannten e finden wir daraus den Zahlenwert von h .“ (V_2 steht bei LUKIRSKI für U_{\max} , K für die Kontaktspannung.)

9.5 Determinación de la constante de PLANCK por medio de diodos luminosos

Tema

Con frecuencia se realiza un experimento de bajo costo con el cual se determina la constante de PLANCK —Max PLANCK (1858–1947)— por medio de varios diodos emisores de luz, o luminosos (LED, por sus siglas en inglés). En dicho experimento se aumenta la tensión eléctrica aplicada al LED hasta que el diodo empieza a emitir; se dice que la tensión umbral U_0 correspondiente (a veces llamada barrera de potencial) multiplicada por la carga elemental, es igual al ancho energético de la banda prohibida (Gap), y por consiguiente a la energía de los fotones emitidos. El experimento se realiza con varios LED susceptibles de emitir luz de varias longitudes de onda.

Defectos

No existe una tensión umbral para la cual el diodo empiece a emitir. El flujo luminoso es proporcional a la intensidad de la corriente eléctrica que atraviesa el diodo,

Determinación de la constante de Planck por medio de diodos luminosos

la corriente eléctrica I en función de la tensión U entre los bornes del diodo se describe, en buena aproximación, por medio de la ecuación:

$$I = I_S \cdot \exp\left(\frac{eU}{\eta kT}\right) = I_S \cdot \exp\left(\frac{U}{U_T}\right) \quad (9.8)$$

Donde I_S es la corriente inversa de saturación, la cual depende de la temperatura y de la energía E_g de la banda prohibida, k es la constante de BOLTZMANN —Ludwig BOLTZMANN (1844–1906)—, T la temperatura absoluta, e la carga elemental, y η es el llamado factor de idealidad, su valor se ubica entre 1 y 2: se toma igual a 1 si todos los pares electrón-hueco recombinan radiativamente. Para lo que se expondrá a continuación, su valor no tiene importancia ya que es el mismo para todos los diodos utilizados. Teniendo en cuenta que:

$$I_S = A \cdot \exp\left(\frac{E_g}{\eta kT}\right),$$

donde A es el área de la superficie de contacto p-n, se puede ver que aparte de

$$U_T = \frac{\eta kT}{e},$$

no existe una tensión eléctrica que caracterice la función de la ecuación (9.8), y que U_T no tiene nada que ver con la energía de la banda prohibida [1, 2]. Además no existe una tensión para la cual el diodo empiece a emitir, ya que emite siempre, aunque su emisión depende de la tensión. A una tensión $U = 0$ V, emite radiación térmica. Al aumentar la tensión la intensidad aumenta exponencialmente, mientras el espectro no cambia. Puede sorprender que el diodo emita fotones con energías iguales a la energía de la banda prohibida, a pesar de ser la energía suministrada a los pares electrón-hueco eU —que recombinan— inferior a dicha energía. En efecto, al aplicar tensiones bajas el diodo se enfriá, y se comporta como un elemento PELTIER —Jean PELTIER (1785–1845)—. El hecho de que no se observe dicho enfriamiento se debe al calor de disipación que “solapa” el efecto.

El método que generalmente se emplea para determinar U_0 se basa en una equivocación. En la Fig. 9.5 se muestra tres veces la misma función exponencial, la diferencia entre las tres curvas es ocasionada por haber tomado una escala diferente en el eje de las ordenadas para cada curva. Cada vez que se cambia la escala del eje de la corriente en un factor de 100, el gráfico se desplaza

$$\frac{kT}{e} \ln 10^2 = 0,119 \text{ V}$$

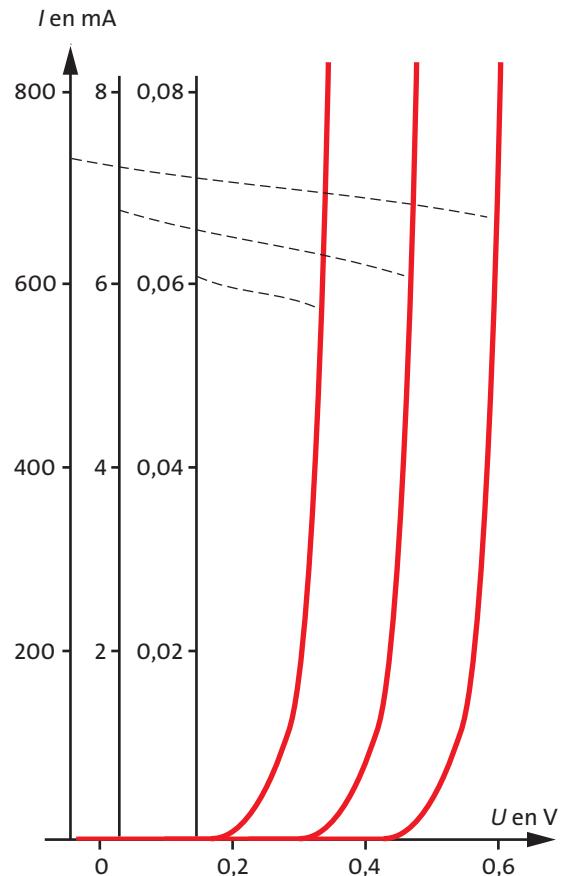


Fig. 9.5 Característica de un mismo diodo con varias escalas del eje de la corriente. Las curvas se “transforman” por un desplazamiento en la dirección del eje U .

en dirección del eje de las abscisas, siempre y cuando $\eta = 1$. La “tensión umbral” U_0 aparente que se obtiene cambió en el mismo valor.

Origen

El experimento ha sido introducido en la física escolar y universitaria como una versión de bajo costo para la medición de la constante de PLANCK. La interpretación errónea es plausible, sin embargo, se ha debido notar el error, ya que es obvio que no se puede definir una tensión umbral para una función exponencial.

Eliminación

El procedimiento para determinar la constante de PLANCK funciona siempre y cuando se comparan las características corriente-tensión de varios (por lo menos dos) diodos que emitan en diferentes regiones espectrales, ver Fig. 9.6; es un requisito que el área A de contacto p-n sea igual para todos los diodos empleados. Entonces, las características se diferencian en el siguiente factor:

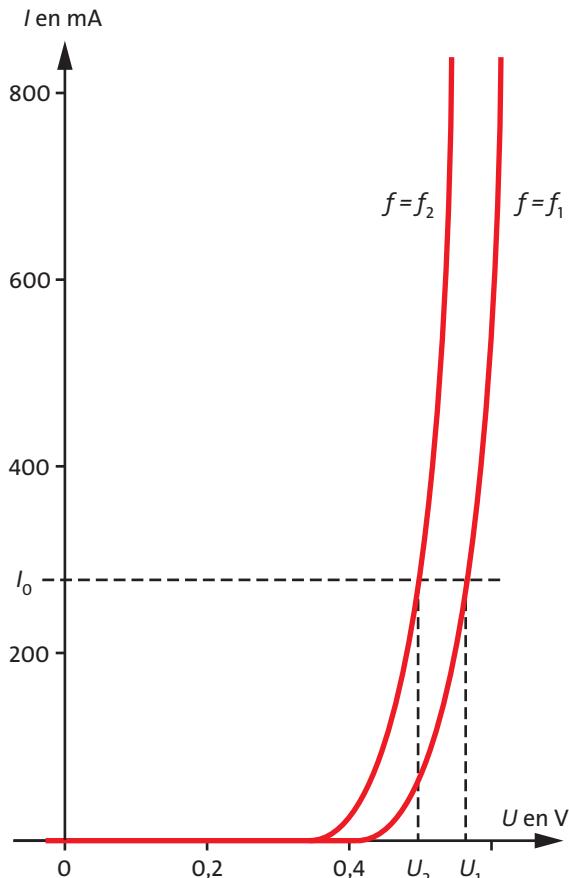


Fig. 9.6 Características de dos diodos, que emiten a distintas frecuencias. Las curvas se transforman una en otra con el desplazamiento en la dirección del eje U .

$$\exp\left(-\frac{E_g}{\eta kT}\right)$$

La banda prohibida E_g está relacionada con la frecuencia (promedio) de la luz emitida multiplicada por la constante de PLANCK:

$$E_g = h \cdot f,$$

por consiguiente, la distancia horizontal entre las curvas (dos en el caso de dos diodos, mostrado en la Fig. 9.6) debe ser:

$$(E_{g1} - E_{g2})/e.$$

Luego de tener las curvas se escoge un valor cualquiera de la corriente eléctrica I_0 , y se toman los valores correspondientes de la tensión U_1 y U_2 , obteniendo que:

$$U_1 - U_2 = \frac{E_{g1} - E_{g2}}{e}$$

o bien

$$e(U_1 - U_2) = E_{g1} - E_{g2} = h(f_1 - f_2).$$

De lo cual resulta que:

$$h = \frac{e(U_1 - U_2)}{f_1 - f_2}$$

Es de notar que no son válidos

$$eU_1 = hf_1$$

y

$$eU_2 = hf_2$$

separadamente.

Al graficar $e \cdot U_i$ en función de la frecuencia f de la luz emitida, se obtiene una recta cuya pendiente es igual a la constante de PLANCK, Fig. 9.7.

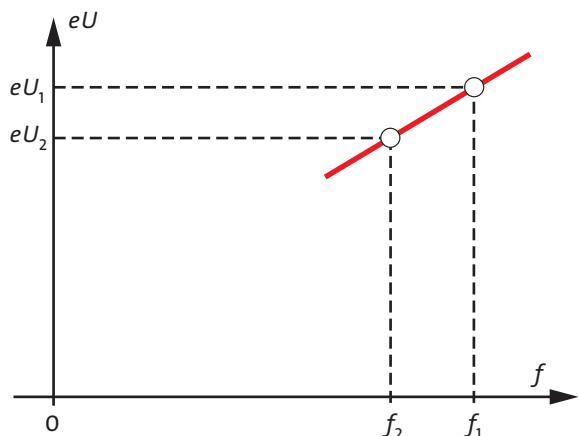


Fig. 9.7 Para los dos diodos se grafica la tensión correspondiente a la corriente I_0 , multiplicada por e , en función de la frecuencia de la luz emitida. La pendiente de la recta que une los dos puntos es igual a la constante de PLANCK.

La recta puede o no pasar por el origen, eso depende de la elección casual de la intensidad de corriente I_0 , para la cual se han tomado los valores de la tensión.

En lugar de tomar los valores de la tensión para una corriente eléctrica escogida, a veces se emplea otro procedimiento: se escoge la tensión para la cual el diodo empieza a ser visible, y teniendo en cuenta que se compara "automáticamente" la luminosidad observada con la del ambiente, dicha tensión se puede determinar con bastante precisión, y es lo suficientemente característica para el valor de la corriente, que es el mismo para todos

Determinación de la constante de Planck por medio de diodos luminosos

los diodos. El hecho de que la recta obtenida de esta manera pase aproximadamente por el origen, como ocurre a menudo, es casualidad.

Referencias

- [1] F. Herrmann u. D. Schätzle, *Question # 53. Measuring Planck's constant by means of an LED*, Am. J. Phys. 64, 1996, p.1448
- [2] R. Morehouse, *Answer to Question # 53. Measuring Planck's constant by means of an LED*, Am. J. Phys. 66, 1998, p.12

10 ASTROFÍSICA

10.1 El diagrama de HERTZSPRUNG-RUSSEL

Tema

El diagrama de HERTZSPRUNG-RUSSELL —Ejnar HERTZSPRUNG (1873–1967) y Henry Norris RUSSELL (1877–1957)— se encuentra en muchos libros de texto. Un punto en este diagrama representa una estrella. La clase espectral o la temperatura de la superficie de la estrella se representa en el eje de abscisas y la luminosidad en el eje de ordenadas.

Defectos

1. La designación de los ejes

La variable del eje de ordenadas se llama luminosidad. Ahora la luminosidad no es otra cosa que el flujo de energía. Entonces, ¿por qué una nueva palabra? Además, hay suficientes “fuerzas” en la física incluso sin la luminosidad [1, 2].

La variable de la abscisa suele llamarse clase espectral. Se tiene la impresión de que no es una variable, y si lo es, no es una que pueda asumir un continuo de valores. De hecho, los espectros de las estrellas son muy complejos. Por un lado, coinciden bastante bien con el espectro de un radiador planckiano. Por otro, tienen tanto líneas de absorción como de emisión. La necesidad de poner orden en la gran diversidad de espectros ha dado lugar a las clases espetrales, cuyo número y complejidad han aumentado con el tiempo. Sin embargo, cada espectro también puede caracterizarse por un único valor numérico: la temperatura de la radiación del cuerpo negro que más se acerca al espectro de la estrella.

Sin duda, sería más claro para los estudiantes etiquetar los ejes del diagrama de HERTZSPRUNG-RUSSELL como “flujo de energía” y “temperatura”.

2. La elección de las variables

Sin embargo, lo más preocupante es la elección de las variables: flujo de energía y temperatura. Por supuesto, las dos variables están correlacionadas. Pero ¿qué es lo que realmente se quiere expresar? Normalmente, en física tratamos con relaciones funcionales, no correlativas. O gráficamente hablando: con líneas y no con nubes de puntos.

Las correlaciones con sus llamados diagramas de dispersión son más empleadas por sociólogos, pedagogos y economistas.

De hecho, también se pueden trazar líneas en el sistema de coordenadas del diagrama HERTZSPRUNG-RUSSELL que describan una relación funcional: si, para la historia de una sola estrella desde su formación hasta su final, se traza el flujo de energía emitido en función de su temperatura superficial. Su aspecto depende esencialmente de su masa. Así que tendríamos un gráfico de funciones con la masa como parámetro. En el diagrama HERTZSPRUNG-RUSSELL, en cambio, la masa aparece como una variable aleatoria.

Pero si se representa el flujo de energía de una estrella en función de la temperatura de la superficie, también se ve inmediatamente lo que se está haciendo mal en realidad. El mensaje que queremos dar a nuestros alumnos es muy diferente: cada estrella pasa por una evolución. Cuando discutimos la evolución estelar en clase, nos preguntamos por las funciones del tiempo, y si queremos mirar dentro de la estrella, también de la posición (en términos de distancia desde el centro de la estrella). Así, por ejemplo: cómo depende del tiempo la temperatura en la superficie de la estrella (es decir, en un lugar fijo r), o también: cómo depende del tiempo el flujo total de energía hacia el exterior.

Origen

Ya en la época helenística se hizo una clasificación de las estrellas. El inicio de la física de los astros, es decir, la astrofísica, se remonta más bien al siglo 18. Se descubrió que las estrellas no estaban en reposo, como se había supuesto anteriormente, y hacia mediados del siglo 19 fue posible medir las distancias de las estrellas más cercanas a nosotros y determinar así la luminosidad absoluta de ellas. Y por último, se descubrió la correlación entre la luminosidad absoluta y el espectro de las estrellas. La cuestión de la fuente de energía estaba vinculada a la idea de que las estrellas sufren una evolución, pero al principio no se pudo responder a esta pregunta. La correlación expresada en el diagrama de HERZSPRUNG-RUSSELL era uno de los pocos fenómenos observables de la época. Sin embargo, desde el punto de vista actual, se clasificaría esta correlación en la categoría de “datos bru-

Fotones en el sol

tos”, porque lo que realmente interesa físicamente es la evolución temporal de una sola estrella.

Una de las razones de la persistencia del diagrama de HERTZSPRUNG-RUSSELL es sin duda que tiene su propio nombre. Si tiene un nombre, debe ser importante, y HERTZSPRUNG y RUSSELL deben haber sido investigadores importantes. Así que no hay duda: el diagrama de HERTZSPRUNG-RUSSELL es parte de la cultura general. ¿No es así? Pero ¿qué sabemos de los otros numerosos investigadores que hicieron importantes contribuciones en esta fase inicial de la astrofísica? ¿Quién descubrió el movimiento de las estrellas? ¿Quién midió por primera vez la distancia a una estrella? Y por último, probablemente la pregunta más importante en este contexto: ¿Quién tuvo la idea de que la fuente de energía de las estrellas debe ser una reacción nuclear?

De nuevo un ejemplo típico del tema general de esta serie de artículos. Debido a las circunstancias históricas, en un principio se creó un diagrama de dispersión engorroso y confuso; solo una década más tarde pudo interpretarse y, de hecho, podría haberse sustituido por una representación más adecuada, pero la representación original ha sobrevivido.

Eliminación

Discutir la evolución estelar de una estrella típica parecida al sol que termina como una enana blanca; también para una que termina como una estrella de neutrones y otra que termina como un agujero negro. Para esto no es necesario el diagrama de HERTZSPRUNG-RUSSELL.

Referencias

- [1] Véase 1.11 *Nombres compuestos de magnitudes físicas*, p.21
- [2] Véase 3.30 *Transmisión de la fuerza, de un par de fuerzas y de la potencia*, p.91

10.2 Fotones en el sol

Tema

“Un fotón, es decir, una ‘partícula de luz’ creada durante los procesos de fusión en el núcleo del sol, viaja a la velocidad de la luz, es decir, a 300 000 km/s, pero solo hasta que encuentra una partícula y es dispersada por ella en otra dirección. En el interior del Sol, la materia está extraordinariamente densificada, por lo que un fotón no puede viajar muy lejos en una dirección sin ser desviado, a menudo solo fracciones de milímetro. Hacia el exterior, esta distancia se alarga progresivamente. Para calcular el tiempo que tarda un fotón en llegar a la su-

perficie a través de la dispersión aleatoria desde el interior del Sol, hay que hacer algunas suposiciones sobre la estructura del Sol, por ejemplo, sobre su perfil de densidad exacto. Así llegamos a valores que se sitúan entre 10 000 y 170 000 años.”

“You can calculate how long it would take one photon to ‘diffuse’ by scattering through the core to the bottom of the convection zone, and this has been done (it’s about 170 000 years).”

Defectos

La cita se aferra al fotón, a la partícula de luz, al pequeño cuerpo o la cola de onda que zigzaguea o se tambalea por la escena. Incluso con el electrón, la idea de que este es un pequeño ente provoca algunas dificultades de comprensión. Es necesario hacer afirmaciones adicionales incomprensibles (“los electrones son indistinguibles”) para poder mantener el lenguaje que se utiliza (y por tanto la idea del modelo). Con el fotón es aún peor. La frase de EINSTEIN —Albert EINSTEIN (1879–1955)— es famosa y conocida, pero aparentemente no se toma en serio y más bien se descarta como un *bon mot* del gran maestro [1]. Obsérvese que su afirmación no data de los primeros tiempos de los fotones. La electrodinámica cuántica había surgido hacía tiempo.

Pero ¿cuál es el problema de las citas (que son muy típicas)? Que no solo sugieren, sino que dicen inequívocamente que un fotón viaja desde la zona de reacción en el interior del sol hasta la superficie. Cuando se dice “un fotón”, según el consenso general sobre el significado de la frase, esto significa que el fotón que comienza su viaje es el mismo fotón, el mismo ente, que llega cerca de la superficie del sol después de 100 000 años. Ninguna de las precauciones y reservas de los científicos cuánticos ha llegado a la gente.

Se quisiera que el fotón fuera un ser pequeño, y por ello se lo convierte en uno.

Las frases deberían hacer dudar, aunque solo sea porque el número de fotones que llegan a la superficie del sol es unas 3 000 veces mayor que los que inician el viaje.

A propósito, a nadie parece ocurrírsele la idea de describir la conducción del calor en una varilla de cobre de manera análoga: habría que decir, entonces, que un fonón que viaja a la velocidad del sonido tarda un minuto en atravesar el conductor térmico de 30 cm de longitud.

Origen

El efecto fotoeléctrico parece demostrar que la luz está formada por partículas, y una partícula se entiende como un ente o individuo. Esta forma de ver las cosas es seductoramente atractiva. Todas las advertencias, las de

Einstein y las de los libros de electrodinámica cuántica, parecen caer en saco roto.

Todavía arrastramos los grilletes de la cosmovisión mecanicista que tan bien nos sirvió hasta finales del siglo 19. Los muertos que vos matáis gozan de buena salud.

En una forma algo más general, se encuentra ese punto de vista como una actitud que los teóricos de la ciencia llaman reduccionismo. Se cree que la descripción del mundo se simplifica, o que se entiende mejor cómo el buen Dios hizo el mundo, si se describen los fenómenos perceptibles por átomos, los átomos por protones, neutrones, electrones, etc., los protones y neutrones por quarks, etc., *ad infinitum*.

De vez en cuando, se afirma que esto es solo un modelo, el modelo de partículas, pero probablemente sea solo una forma de hablar. Porque si se estuviera convencido de que es solo un modelo, se hablaría de otra manera de los fotones. Un modelo siempre significa: “Es como...” Por ejemplo, como un pequeño cuerpo. De hecho, hay situaciones, procesos, estados en los que la radiación se comporta como corpúsculos, aunque no sean demasiado frecuentes.

La idea de que el mundo está formado por pequeños entes parece tranquilizadora: esta en lo pequeño como en lo grande, es decir, como en el mundo de la experiencia humana cotidiana.

También parece que más de un físico ha perdido la comprensión de lo que se puede esperar de un estudiante, de alguien que quiere aprender la física. Parece que se da por sentado que los entes que zigzaguean por ahí son lo único aceptable para explicar el mundo físico. Sin embargo, en realidad, la persona no adoctrinada no tiene el problema que supone el físico. No tiene ningún problema en hablar de una nube que se mueve en el cielo, y le parece natural que, si se sigue el movimiento de la nube el tiempo suficiente, la nube original ya no exista, y en su lugar se ha formado otra. No tiene ningún problema con el concepto de ente e indistinguibilidad. Solo está persuadido de ello por una cierta tradición doctrinal.

Eliminación

Para describir el transporte de energía en el Sol, no es necesario utilizar la electrodinámica cuántica. Pero al menos se debe mencionar que existen y se producen procesos de absorción y emisión, para que no surja la idea de que los entes se abren paso por si mismos. Se debe señalar que el mismo proceso tiene lugar en la troposfera y contribuye al enfriamiento de la Tierra, solo que aplicado al infrarrojo.

También es necesario señalar que la conducción térmica normal es de un tipo muy similar, solo que con

fonones en lugar de fotones. Al hacerlo, se aprenden dos cosas a la vez: algo sobre los fotones y algo sobre los fonones.

Sin embargo, para muchos propósitos, bastaría con decir que una alteración de la temperatura en el interior del sol tarda 100 000 años en tener efecto en la superficie de este. O, con más precisión que el transporte de energía se produce con la radiación electromagnética. Se explica que se trata de una radiación que está casi en equilibrio termodinámico, es decir, una radiación de cuerpo negro; que su temperatura disminuye desde el interior hacia el exterior; que el gradiente de temperatura es muy pequeño, pero que es el que provoca la corriente; que el transporte es disipativo; que en el camino la entropía aumenta en un factor de 3 000 (igual a la relación de las temperaturas).

Si se quiere expresarlo absolutamente en fotones, se puede decir que estos se absorben y se emiten otros nuevos, etc. Pero no hay que hacerse muchas ilusiones. Decir que se mueven de un átomo a otro ya es una temeridad.

También se puede hacer un pequeño comentario de carácter epistemológico, explicando lo que es una teoría: una descripción matemática del mundo. Y que una teoría no es errónea ni correcta, sino solo más o menos adecuada para un propósito determinado.

Referencias

- [1] Albert EINSTEIN escribió en una carta a su amigo Michele BESSO en 1951: “Todos los 50 años de cavilaciones conscientes no me han acercado a la respuesta a la pregunta ¿Qué son los cuantos de luz? Hoy en día, todo patán cree que lo sabe, pero se equivoca...”

10.3 Cómo funciona el Sol

Tema

Luminosidad, potencia radiante, fotosfera, líneas de Fraunhofer, rotación diferencial, granulación, cromosfera, corona, llamaradas, viento solar, actividad solar, manchas solares, protuberancias, erupciones cromosféricas, neutrinos electrónicos, neutrinos muónicos, y neutrinos tauónicos, percloroetileno, el ciclo CNO, el ciclo protón-protón, el ciclo BETHE-WEIZSÄCKER, la región central, la región de transferencia radiativa, la zona de convección de hidrógeno y otras cosas y fenómenos se introducen y discuten en los libros de texto sobre la física del Sol. Pero no solo allí, también se encuentran en libros escolares, aunque se esté buscando otra cosa.

Enanas blancas – primera parte: ¿Equilibrio de presión o de fuerza?

Defectos

Se cuentan demasiadas cosas sin mayor importancia, al mismo tiempo, demasiado poco sobre el real funcionamiento del Sol.

A la hora de elegir el contenido de las clases, se recomienda tener en cuenta el siguiente criterio: ¿qué se espera que los alumnos sigan sabiendo después de que hayan olvidado el 50 %, o el 90 %, o incluso el 99 % de lo que se ha tratado en clase? Cuando se haya considerado esto, también se tendrá una respuesta a la siguiente pregunta: ¿qué se puede decir sobre un tema si no se puede dedicarle más de una o dos lecciones?

Por ejemplo: ¿realmente se espera que los alumnos sean capaces de recitar los ciclos de BETHE-WEIZSÄCKER y CNO?, ¿o acaso necesitan conocer al menos los dos nombres de las reacciones? Una comparación con la química es útil, a nadie se le ocurriría descomponer la combustión de hidrocarburos (como el octano o el benzene) en una secuencia de x reacciones intermedias.

Igualmente se observa que se describen o analizan fenómenos relacionados con el Sol que también ocurren en la Tierra, sin que sean siquiera mencionados. Por ejemplo, se informa de los detalles del magnetismo solar, pero no se dice ni una palabra sobre el funcionamiento de la geodinamo. El transporte de energía en el Sol hacia el exterior se describe en el interior por difusión de fotones, en el exterior por convección. Los mismos fenómenos podrían discutirse con la atmósfera terrestre, lo cual sería un tema más “cercano” y posiblemente más interesante para los estudiantes.

Se genera la impresión de que aquello que las editoriales venden como libro de texto de física es más bien un libro de referencia. También se plantea la pregunta: ¿sabe cada uno de los 10 o 15 autores todo lo que han escrito los otros 9 o 14? ¿No es sospechoso que los libros de texto de física (al igual que los de química) tengan muchos más autores que, por ejemplo, los de español, francés o inglés?

En general se abordan o enuncian muchas cosas sobre el Sol, pero a su vez demasiado poco de utilidad para el estudiante. He aquí dos preguntas que, sin duda, podría plantearse alguien que esté algo interesado en el tema:

Si en el Sol se produce la misma reacción que en una bomba de hidrógeno, ¿por qué este no explota?

Si el Sol consta esencialmente de hidrógeno y helio, ¿por qué su espectro no es un espectro de líneas de helio-hidrógeno?

Origen

Como suele ocurrir con una materia insuficientemente elementarizada, todo lo que se ha acumulado en la lite-

ratura técnica a lo largo del tiempo se vuelca en el aula. Por supuesto, el descubrimiento de los ciclos de reacción nuclear fue importante. Demostró que la idea del origen nuclear de la energía era correcta. Eso fue un gran problema en su momento, es decir, hace unos 100 años. Pero ahora que es conocido, bastaría con decir que es la conversión del hidrógeno en helio lo que proporciona la energía.

Eliminación

Este no es el lugar para describir un plan de estudios. En su lugar, solo una sugerencia de temas interesantes, más o menos en orden de importancia.

- Algunos datos acerca del Sol, incluida la densidad de masa en función del radio (el 90 % de la masa del Sol se encuentra a la mitad de la distancia del centro).
- La energía proviene de una reacción de hidrógeno a helio (solo la reacción neta).
- El Sol se hace más grande y frío (es decir, no se calienta) cuando se añade calor. Esto significa que hay una retroalimentación negativa, por lo que la reacción nuclear se produce muy lentamente y de forma muy estable. (Se está discutiendo la causa de esta retroalimentación negativa).
- El transporte de energía en el interior es conductor (las partículas portadoras son fotones), en el exterior convectivo. El interior es análogo a una estratificación estable de la atmósfera terrestre, donde el transporte de energía hacia el exterior se produce de forma difusiva con fotones infrarrojos. El exterior corresponde a una estratificación inestable de la atmósfera.
- Toda la materia se vuelve opaca si la capa es lo suficientemente gruesa (discutir la causa). En la zona exterior del Sol, esta capa tiene un grosor de unos 500 km, lo cual es muy poco comparado con el diámetro. Por eso el Sol tiene un borde nítido visto desde la Tierra y por eso irradia como un cuerpo negro.

10.4 Enanas blancas – primera parte: ¿Equilibrio de presión o de fuerza?

Tema

- 1 “El movimiento clásico de las partículas no es suficiente para mantener el equilibrio con la gravitación.”
- 2 “En una estrella de la secuencia principal, la energía térmica $E_{\text{cin}} = (3/2)kT$ de los núcleos despojados de todos los electrones crea una presión que puede resistir a la presión gravitacional.”

- 3 “Aquí la presión p generada por el gas de electrones degenerados —para la que vale $p = dE/dV$ — equilibra la presión gravitacional.”
- 4 “Los electrones encerrados ejercen una fuerza hacia el exterior que equilibra la fuerza gravitacional.”

Defectos

Probablemente todos sabemos lo que se quiere decir. Pero las cosas se complican cuando se intenta conciliar las afirmaciones con lo que se recuerda de las clases de mecánica. Vamos a examinar una cita tras otra.

¿El movimiento mantiene el equilibrio de la gravedad? En los equilibrios, ya sean térmicos, mecánicos o químicos, los valores de una magnitud física se igualan siempre en dos subsistemas: dos temperaturas, dos fuerzas...

Pero aquí, ¿cuál magnitud tiene el mismo valor dos veces?

Además, el movimiento es un proceso, la gravedad más bien un fenómeno. ¿Cómo pueden mantener el equilibrio? ¿O quiere el término gravedad significar la fuerza de la gravedad? Entonces, ¿cuál es el cuerpo sobre el que actúa?

En cuanto a la segunda cita: ¿La energía térmica genera una presión? Así que una magnitud física genera otra. ¿Acaso la velocidad puede generar una temperatura, o la energía puede generar momentum? Y va más allá: la presión así generada resiste la presión gravitacional. ¿Cómo puede ser? ¿Es igual en magnitud, o tal vez el negativo de la presión gravitacional? Pero, de todos modos, ¿qué se entiende por presión gravitacional?

En la tercera cita, la presión generada por el gas de electrones degenerados (¡Uy! ¿El gas genera su propia presión? ¿El aire también genera presión atmosférica? ¿Acaso también genera su propia temperatura? Bueno, probablemente se quería decir simplemente: la presión del gas de electrones degenerados) mantiene la presión gravitacional en equilibrio. Sí, parece que se quiere decir eso, no equilibrio de fuerzas, sino equilibrio de presiones.

En la cuarta cita se aprende que, de hecho, son fuerzas que se equilibraron entre sí. Pero la situación tampoco es sencilla: los electrones ejercen una fuerza hacia el exterior, es decir, ¿cada electrón ejerce una fuerza hacia el exterior? ¿Es cierto? Hacia afuera significa: hacia la derecha y hacia la izquierda, hacia arriba y hacia abajo, hacia delante y hacia atrás. No es una fuerza, sino al menos seis. La fuerza gravitacional parece más clara; de alguna manera viene del interior de la estrella y tira del electrón hacia abajo. La pregunta sigue siendo cómo las seis fuerzas del electrón hacen frente a esto.

¿Qué hacen los destinatarios de estos textos? Muy sencillo, si es necesario (en el examen), simplemente re-

pitén lo que no entienden. En cualquier caso, han aceptado el hecho de que no entienden la física.

Origen

La mecánica es difícil. Al parecer, no solo para los alumnos.

Eliminación

En cuanto al equilibrio de la presión: se puede considerar un cilindro cerrado (Fig. 10.1) en el que un pistón puede moverse hacia delante y hacia atrás. Si no se sujetaba el pistón, este se ajustaría por sí mismo para que la presión sea la misma de ambos lados. Se establece un equilibrio de presión entre la derecha y la izquierda.

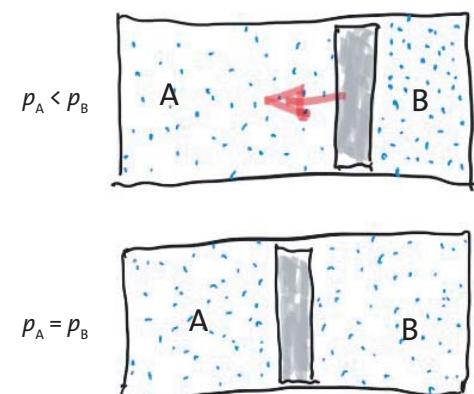


Fig. 10.1 Entre el subsistema A y el subsistema B se establece un equilibrio de presión.

Si se quiere argumentar con el equilibrio de la presión, al menos eso deben saber los alumnos. Pero entonces viene el problema: ¿cuáles son los dos contenedores cuyos volúmenes pueden cambiar? Por lo tanto, es mejor no argumentar con el equilibrio de la presión.

Y respecto al equilibrio de fuerzas: existe equilibrio de fuerzas cuando sobre un cuerpo actúan dos (o más) fuerzas cuya sumatoria es cero. En nuestro caso, se podrían considerar las fuerzas sobre una porción de sustancia en una pequeña región del espacio. Una de ellas es la fuerza de peso (fuerza gravitacional), la otra se calcula a partir de la diferencia de presión entre la parte superior y la inferior de la porción de materia, conocida desde hace tiempo por los estudiantes como fuerza de flotación. Esto quizás podría haberse recordado.

¿Cómo sería la eliminación? Se puede hacer correctamente, pero hay que sopesar si vale la pena el esfuerzo. Finalmente, se podría haber hecho la misma consideración para el interior de la tierra, pero por supuesto no se hace.

10.5 Enanas blancas – segunda parte: Rituales de explicación

Tema

Cuando un libro de texto quiere decir algo, pero no mucho, sobre el tema de la “enana blanca”, se encuentra algo así:

“Si la masa de la estrella no es superior a dos masas solares, se formará una enana blanca con un radio de unos 10^7 m. Una mayor compresión por la gravitación se ve contrarrestada por el hecho de que el principio de Pauli prohíbe a los protones, electrones y neutrones que tengan un estado cuántico idéntico en el mismo lugar y al mismo tiempo. Las partículas (en este caso, principalmente los electrones) se verían obligadas a asumir estados de mayor energía. Esta circunstancia impide una mayor compresión. Se habla de materia degenerada.”

Algunos libros de texto lo hacen con más detalle, por ejemplo, en media página utilizando, entre otros, los siguientes conceptos:

- Pozo de potencial.
- Cuantificación de la energía.
- Distribución de BOLTZMANN.
- Gas degenerado de electrones.
- Fermiones.
- Principio de PAULI.
- Orientación del espín.

Defectos

- 1 En cualquier caso, el objetivo parece ser explicar por qué la enana blanca no colapsa. Ahora bien, la razón por la que no lo hace es la misma por la que la Tierra no se derrumba o por la que la materia sólida y líquida, es decir, condensada, presenta cierta dureza. Sin embargo, no se suele decir ni una palabra sobre el hecho de que también en este caso solo la mecánica cuántica proporciona la explicación. Así, queda la impresión de que la enana blanca es algo raro, insólito, difícil de comprender, no se puede entender sin la mecánica cuántica; la física que actúa allí no es la misma que la de la Tierra.
- 2 De hecho, la enana blanca tiene una interesante propiedad en la que se diferencia muy claramente de los objetos de nuestra experiencia terrestre, pero que parece no merecer ningún comentario ni justificación: si se le añade materia, no se hace más grande, sino más pequeña. Esto tiene menos que ver con la física cuántica que con la gravitación clásica.

Origen

La descripción de los libros de texto esta tomada de la literatura técnica o de un libro de física universitario. Allí es necesario el esfuerzo, porque el objetivo es calcular el límite de CHANDRASEKHAR —Subrahmanyan CHANDRASEKHAR (1910–1995)—. Para ello, se necesitan dos componentes: la ecuación de estado y la ley de la gravitación. Ambas conducen a una ecuación diferencial, la ecuación de LANE-EMDEN —Jonathan Homer LANE (1819–1880) y Jacob Robert EMDEN (1862–1940)—, que no es fácil de resolver. Ahora bien, la ecuación de estado, que en realidad es bastante sencilla porque no incluye la temperatura y, por tanto, solo describe la relación entre la presión y la densidad de masa, no puede medirse directamente, porque eso requeriría presiones que no se pueden alcanzar en ningún laboratorio. Así que hay que calcularlo, y eso requiere el esfuerzo citado.

Sin embargo, las parafernalias de la mecánica cuántica se plantean en las clases escolares, aunque allí no se calcula ni se enuncia la ecuación de estado.

Es un ejemplo de cómo la física escolar toma algo de la física de los especialistas, perdiendo de vista la cuestión del objetivo del aprendizaje. Sin hacer la pregunta: ¿Qué temas y contenidos queremos considerar en la educación general? El resultado es algo que podría describirse acertadamente como un ritual de aprendizaje.

Eliminación

En primer lugar, se debe explicar que los cuerpos sólidos o líquidos se pueden comprimir como se quiera, si se ejerce una presión suficientemente alta, un hecho que no es realmente sorprendente. Cuando un cuerpo celeste compacto se hace cada vez más pesado, surgen presiones suficientemente elevadas. Esto ocurre con algunas enanas blancas, reciben gradualmente materia de una estrella compañera con la que forman un sistema binario.

Nuestra experiencia normal es que, si se vierte más arena encima de un cúmulo, este se hace más alto. La enana blanca se comporta de forma diferente, cuando se añade materia, esta se acerca al centro. En este proceso la intensidad del campo gravitacional, y por tanto la fuerza gravitacional, aumenta, tanto que la estrella se contrae. Esto no puede ocurrir con el cúmulo de arena, porque la fuerza de gravitación proviene prácticamente solo de la Tierra. El montón de arena y su tamaño no juegan un papel importante, porque es pequeño en comparación con la Tierra.

La Fig. 10.2 muestra cómo el radio de una enana blanca disminuye con el aumento de la masa y cómo la estrella acaba colapsando. El colapso termina cuando los núcleos atómicos se tocan.

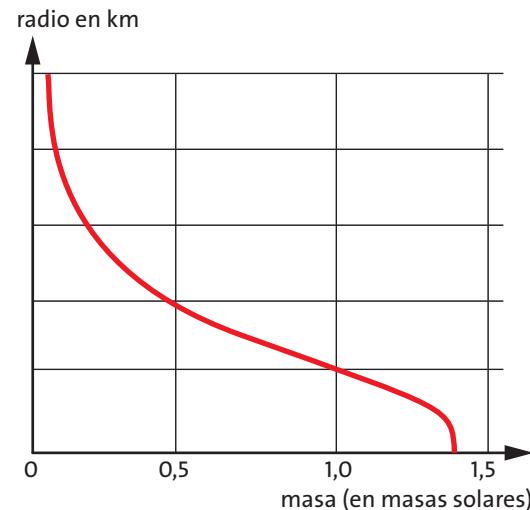


Fig. 10.2 Radio de una enana blanca en función de su masa

También se puede plantear así: cuando la estrella del tipo solar se convierte en una enana blanca, los átomos se condensan. Cuando la enana blanca se convierte en una estrella de neutrones, la materia nuclear se condensa. La materia nuclear es mucho más dura que la de la enana blanca (y de la Tierra).

Igualmente se puede mencionar que el comportamiento está determinado en detalle por la ecuación de estado $\rho(p)$, es decir, una extensión de la ley de Hooke —Robert Hooke (1635–1703)—. Pero todo esto, por favor, sin PAULI, FERMI y compañía.

11 FÍSICA ATÓMICA, NUCLEAR Y CUÁNTICA

11.1 Imágenes del átomo

Tema

El tema es una imagen conocida no solo por todos los físicos, la cual no se quiere mostrar ahora por razones que quedarán claras en un momento. Es la imagen de un átomo: el núcleo, como pequeña estructura redonda, esta rodeado de varias elipses —las órbitas de los electrones— en las que a veces se ven otras pequeñas estructuras redondas, los propios electrones.

Defectos

Se dice que una imagen vale más que mil palabras. Es más fácil de recordar que la descripción verbal o matemática de un objeto. Las imágenes son herramientas muy importantes en general y para los profesores en particular. Sin embargo, al ser tan fáciles de recordar, las imágenes también pueden obstaculizar el proceso de aprendizaje. Lo hacen cuando tergiversan algo, o lo representan de forma diferente a la intención inicial. Son imágenes que no se han elegido directamente, pero que pululan en el mundo y se multiplican constantemente. Pueden ser tan intrusivas que nadie puede escapar de ellas, e incluso aquellos que conocen su efecto indeseable sucumben a su poder de sugestión. Un ejemplo es la mencionada imagen del átomo, que, como se sabe, corresponde al modelo atómico de BOHR —Niels Henrik David BOHR (1885–1962)—. Se puede encontrar en libros y revistas de divulgación científica, o fundido en bronce como logotipo en el portal principal de una empresa, se reproduce en millones de ejemplares de sellos de correos y billetes de banco, y también se encuentra con sorprendente frecuencia en las revistas de física.

El reproche a esta representación del átomo es que, desde que existe la física cuántica, ya no se corresponde con la idea actual que se tiene del mismo. Al fin y al cabo, una parte nada desdenable de la enseñanza en la escuela y la universidad se dedica a mostrar cuáles son los puntos débiles de esta imagen y por qué es necesario sustituirla por otra. Sin embargo, a estas alturas ya está tan arraigada en la mente de los estudiantes que los es-

fuerzos por sustituirla solo tienen un éxito limitado. De hecho, para muchos estudiantes y alumnos, lo único que se les queda grabado después de un tiempo es el modelo planetario del átomo de BOHR.

Origen

La imagen se creó con la introducción del modelo atómico por RUTHERFORD —Ernest RUTHERFORD (1871–1937)— y BOHR. Pero al cabo de menos de 20 años, es decir, cuando SCHRÖDINGER —Erwin Rudolf Josef Alexander SCHRÖDINGER (1887–1961)—, HEISENBERG —Werner Karl HEISENBERG (1901–1976)—, BORN —Max BORN (1882–1970)— y JORDAN —Ernest Pasqual JORDAN (1902–1980)— formularon la mecánica cuántica, dicha imagen ya era obsoleta.

Ahora bien, el primer modelo exitoso siempre tiene una ventaja sobre los modelos posteriores. Lo que viene después siempre tiene que ver con el desplazamiento del predecesor. Pero eso rara vez ha funcionado en la física.

Eliminación

El modelo atómico de BOHR y las imágenes que lo acompañan son un tema de gran interés en la historia de la física. Sin embargo, en las clases de física son contraproducentes. Solo se puede intentar contrarrestar la imagen de cuerpos volando en trayectorias elípticas con contraimágenes aún más lindas y sugerentes, como las coloridas imágenes de la distribución de psi al cuadrado.

11.2 Las capas electrónicas

Tema

Para explicar ciertas propiedades de los átomos, como por ejemplo la periodicidad de los radios atómicos o de la energía de ionización con el número atómico, se emplea en general un modelo según el cual la nube electrónica está constituida de capas. Para corroborar la existencia de dichas capas a menudo se representa $r^2 \cdot \rho(r)$,

es decir, la densidad electrónica $\rho(r)$ multiplicada por el cuadrado de r , en función de la distancia r al núcleo.

A veces se concluye que: “La probabilidad de encontrar al electrón en la región del núcleo es extremadamente pequeña.”

Defectos

Mientras que la densidad electrónica disminuye desde el núcleo hacia afuera, Fig. 11.1a, la función $r^2 \cdot \rho(r)$, representada en muchos libros de texto, es cero para $r = 0$, aumenta con r y, luego de pasar por uno o varios máximos, tiende a cero como se aprecia en la Fig. 11.1b.

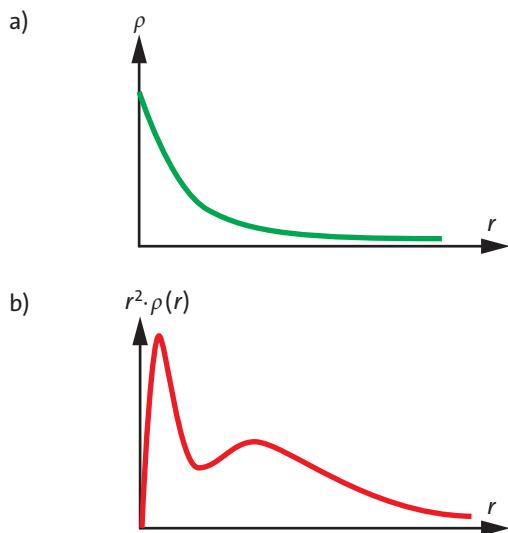


Fig. 11.1 (a) Densidad electrónica; (b) gráfica de la función $r^2 \cdot \rho(r)$.

Lo que está representado en la Fig. 11.1b no es la densidad espacial normal, es decir, la probabilidad de encontrar el electrón en un elemento dado de volumen dividido por dicho volumen, sino la probabilidad de encontrar el electrón en un intervalo dr , dividido por dr , es decir, en un cascarón esférico por unidad de espesor de dicho cascarón. En algunos textos se informa al lector del “truco” empleado, en otros no, pero de todas formas es inevitable que se confunda esta función con la densidad misma. La experiencia con estudiantes de Física muestra que con frecuencia esta imagen se graba en su mente y que se toma la función de la Fig. 11.1b como la propia densidad electrónica. En particular se memoriza que la densidad electrónica en la posición del núcleo es cero y que existen regiones en forma de capas en las cuales la densidad es particularmente alta.

El siguiente ejemplo muestra cómo con una representación del tipo de la Fig. 11.1b se puede “engaños” al

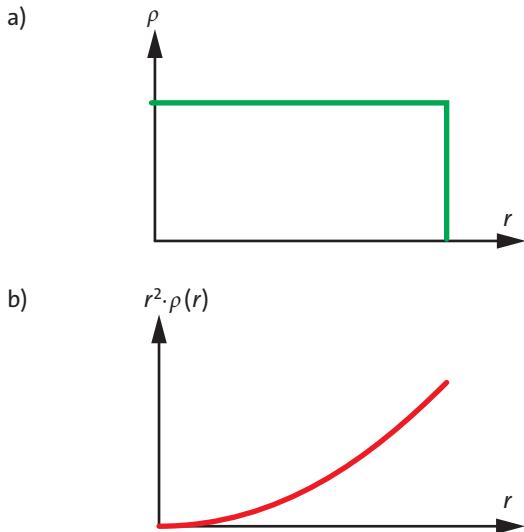


Fig. 11.2 (a) Densidad para una esfera, (b) función $r^2 \cdot \rho(r)$ para una esfera.

estudiante. Las Fig. 11.2a y Fig. 11.2b representan la distribución de la densidad de una esfera homogénea y maciza de cualquier material con respecto a su radio; en la Fig. 11.2a se observa la densidad de masa $\rho(r)$ y en la Fig. 11.2b la función $r^2 \cdot \rho(r)$. No hay duda que la Fig. 11.2a muestra más claramente que la densidad de la esfera es constante.

La afirmación de que es mucho menos probable encontrar al electrón en la región del núcleo, siendo su volumen el de un cascarón esférico de espesor dr y pequeña área, que más al exterior, lo cual correspondería a un volumen de igual espesor pero con una superficie mucho mayor, es análoga a la siguiente: es más probable encontrar un ganador de lotería en la región andina que en la ciudad de Cartagena.

Origen

Es posible que algunos físicos no estuvieran completamente satisfechos con un modelo (de capas) que explicaba muchos fenómenos; querían que las capas electrónicas se reflejaran en la distribución espacial de la densidad. Además probablemente les molestaba que la probabilidad pudiera tener un máximo donde se encuentra el núcleo.

Eliminación

Dado que la representación de la función $r^2 \cdot \rho(r)$ no conduce a una mejor comprensión, y puede generar ideas erróneas, se recomienda emplear solamente la representación de $\rho(r)$.

11.3 El átomo vacío

Tema

Del hecho de que el núcleo del átomo es pequeño y pesado en comparación con la capa electrónica se deduce que la mayor parte del átomo está vacío. Se supone, aun sin decirlo explícitamente, que los electrones son puntiformes. Del volumen total del átomo solamente una mínima parte está ocupada por materia. Con cierta frecuencia se dice que: “Un átomo está constituido en su mayor parte por espacio vacío.”

Defectos

- Se puede sustentar dicha opinión, pero haciendo claridad de que su validez depende del modelo utilizado. Es correcta si se representa al electrón como un pequeño ente con la extraña propiedad de que se mueve sin tener una trayectoria, para lo cual se introdujo la interpretación probabilística de encontrar al electrón en un elemento de volumen determinado. Sin embargo, es posible emplear un modelo muy diferente: el electrón ocupa el mismo espacio que ocupa su función de onda, con dicho modelo el electrón del átomo de hidrógeno es tan grande como el mismo átomo. En esta interpretación el átomo no está vacío en su mayor parte, sino lleno de una sustancia de muy baja densidad.
- Si la elección es por el modelo del electrón puntiforme, sería consecuente aplicar el mismo modelo al núcleo, que como se sabe está constituido por protones y neutrones, los cuales están formados por quarks. Se tendría que considerar a los quarks como puntiformes con el mismo derecho que los electrones y otros leptones. Pero ello significaría que no solamente la mayor parte del átomo estaría “vacía”, sino su totalidad. Esto conllevaría al absurdo de que no solamente el átomo estaría vacío, sino el mundo entero. Por lo tanto la utilidad de dicho modelo es bastante discutible, y además se desfigura por completo la idea inicial del mismo.

Origen

La idea que sustentaba dicha afirmación era que la capa electrónica estaba conformada por cuerpecitos puntiformes, mientras que el núcleo era materia compacta. Ese era el modo de ver las cosas antes de que se conociera la existencia de los quarks.

Eliminación

Lo que se quería expresar originalmente era un hecho bastante sencillo: que la masa del núcleo es mucho mayor que la de la capa electrónica, lo cual se puede afir-

mar sin necesidad de mencionar el problemático espacio vacío. No se debe olvidar que la capa electrónica se encuentra en “desventaja” solamente si se compara su masa con la del núcleo, pero la masa es solo una de varias magnitudes extensivas. La carga eléctrica de la capa electrónica —por ejemplo— ya no es pequeña comparada con la del núcleo, las dos cargas son de magnitudes iguales; el momentum angular de la capa y del núcleo también tienen valores comparables. Y si se compara el momentum magnético, entonces “prima” la capa electrónica, ya que su momentum magnético puede ser mucho mayor que el del núcleo.

11.4 Partículas indistinguibles

Tema

Al introducir las leyes de la estadística cuántica se enfatiza que las partículas son idénticas e indistinguibles, por medio de afirmaciones como las siguientes:

- 1 “Dos partículas son consideradas idénticas, si el resultado de la medición de cualquier magnitud u observable del sistema queda invariable respecto a un intercambio de las mismas. Se dice también que las partículas son indistinguibles.”
- 2 “Dos partículas son idénticas si todas sus propiedades internas (masa, espín, carga, etc.) son exactamente iguales. No existe un experimento, con el cual se las puede distinguir. Por consiguiente, todos los electrones del universo son idénticos, así como todos los protones o todos los átomos de hidrógeno.”

Defectos

Estas afirmaciones dejan al estudiante en una situación ambigua, sin saber si se trata de una trivialidad o de una particularidad del mundo cuántico, que en general es muy difícil comprender. El hecho que dicho tipo de proposiciones sean de difícil asimilación probablemente tiene dos causas.

- Es fácil distinguir las dos partículas de las cuales se dice que son indistinguibles. Supongamos dos electrones, el uno en la posición \vec{r}_i (a la izquierda) y el otro en la posición \vec{r}_d (a la derecha). Es claro que en casi todos los aspectos son iguales: la misma masa, la misma carga eléctrica, el mismo espín, el mismo estado de excitación, y cualquier otra de sus propiedades (se dice que coinciden en sus propiedades internas), pero queda una característica en la cual se distinguen: la posición. Uno se encuentra en la posición \vec{r}_i , y el otro en \vec{r}_d . Entonces, se los puede distinguir.

En realidad, en Física estadística no se trata de la “indistinguibilidad” de *partículas*, sino de *estados*. Consideremos nuevamente los dos electrones en un estado, en el cual uno de ellos se encuentra en la posición \vec{r}_i y otro en \vec{r}_d . Ahora si se desplaza la partícula de la izquierda a la posición \vec{r}_d y la de la derecha a la posición \vec{r}_i , el nuevo estado así obtenido no es distinguible del anterior, es idéntico, y esto también ocurre en el lenguaje común. Pero en ambos casos es posible distinguir las dos partículas: la una está a la izquierda, y la otra a la derecha.

La situación podría aclararse con un ejemplo similar como el siguiente: con un programa de dibujo (como Illustrator, por ejemplo) se generan en la pantalla del computador dos círculos del mismo radio y del mismo color, Fig. 11.3a). Luego, por medio del ratón, se desplazan los círculos en la pantalla, Fig. 11.3b), y finalmente se “restituye” el antiguo dibujo, Fig. 11.3c). En la operación se han intercambiado los dos círculos. El dibujo finalmente obtenido, Fig. 11.3c), es indistinguible del di-

bijo inicial, Fig. 11.3a), sin embargo en los dibujos inicial y final es posible distinguir los dos círculos. Se distinguen por su posición.

- Pero, ¿es posible que al intercambiar dos partículas resulte el mismo estado inicial? ¿No es posible notar de alguna manera que al generar el estado final se han intercambiado las partículas? No se tendría este problema si no se hubiera adquirido, luego de muchos años de trabajo con la mecánica clásica, la costumbre de considerar una partícula como un pequeño ser, el cual, aparte de los valores de sus magnitudes físicas esta caracterizado por algo más que se podría denominar su “esencia”. En la mecánica cuántica, no se “desecha” esta costumbre tan rápido como sería debido, sino que se trata de “mantenerla” por medio del lenguaje que se cuida y “preserva”.

Es interesante notar que se tiene dicho problema cuando de los electrones se trata, pero no del todo al intercambiar dos huecos en un semiconductor. Los huecos no se representan como “individuos” en la forma como se hace con los electrones. Parece que ellos son más similares a los círculos en la pantalla que los electrones.

Origen

La mecánica clásica tiene que ver con cuerpos individuales. El concepto de individuo encaja con un sistema si este tiene ciertas propiedades invariables por medio de las cuales se lo puede reconocer en otros instantes y en otros ambientes. En un ambiente cotidiano dichas propiedades son sobre todo la forma y la distribución material en que figuran. Sin embargo, si los parámetros que caracterizan el sistema son cada vez menos, y si finalmente quedan solamente la masa, el momentum, el momentum angular y la posición, el concepto de individuo se “desfigura”, pudiendo afirmarse que dicho concepto tiene su justificación y es inequívoco “asintóticamente” cuando el sistema tiene un gran número de grados de libertad. Resumiendo, se puede decir que el concepto de partícula individual no es válido, no tiene aplicación ni sentido como concepto básico de la mecánica cuántica.

Eliminación

En el lenguaje común no existe ningún problema en hablar de cosas o entes que no son individuos en el sentido de la mecánica clásica. Ejemplos son una nube, o la llama de una vela; la nube después de transcurrir cinco minutos, ¿sigue siendo la misma de antes?, o la llama, ¿sigue siendo la misma después de cinco segundos? A estas preguntas generalmente se responde con un “en-

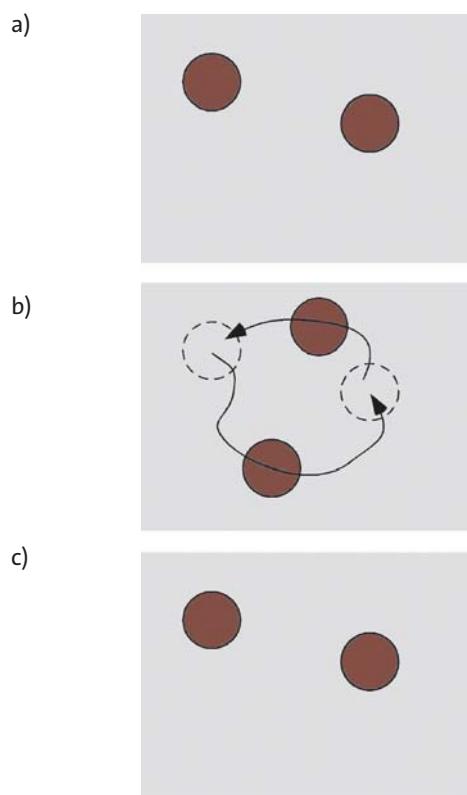


Fig. 11.3 Los círculos oscuros de una pantalla se mueven con el ratón de forma que el círculo que inicialmente está a la izquierda va a la derecha y el de la derecha va a la izquierda.

Uno y otro electrón

cogimiento de hombros". Sencillamente no se tiene un problema particular con dichos objetos.

Sería un gran avance si se cambiara el lenguaje en la mecánica cuántica, y con este el modelo que está en la base del lenguaje. Así se podría introducir el electrón como una porción indivisible de cierta sustancia. La porción está caracterizada por su masa, su carga eléctrica y su momentum angular. Si tenemos una porción a la derecha y una a la izquierda, y se las intercambia, entonces no resulta difícil comprender que el sistema total no ha cambiado en el proceso. Así la idea de considerar una "esencia" no es necesaria.

una partícula y el electrón 2 es la otra, aunque no se pueda decir exactamente dónde están las partículas. A continuación, se expresa que son indistinguibles, lo que ciertamente no es fácil de entender. Pero una vez que se ha aceptado, se tienen dos electrones 1 y 2 (indistinguibles), pero sin embargo un electrón es 1 y el otro es 2.

Ahora el problema: poco después se vuelve a hablar de varios electrones. Esta vez se llaman a y b, o 3d, 4f, etc. Pero se puede no haber notado que los electrones 1 y 2 no son idénticos a los electrones 3d y 4f. En ambos casos se trata del mismo átomo en el mismo estado.

Seguramente, se puede ver lo que ha pasado, cuál es la relación entre 1 y 2, y a y b, en las matemáticas que se encuentran entre ambos. Sin embargo, esta relación no se refleja en el lenguaje utilizado.

De hecho, nos encontramos en una situación similar a la de dos péndulos acoplados. Llamémoslos oscilador 1 y oscilador 2. Entonces se describe la solución con dos oscilaciones normales a y b. Aquí, sin embargo, a nadie se le ocurriría llamar a las dos oscilaciones normales oscilador a y oscilador b.

Origen

El lenguaje es el del modelo atómico de BOHR —Niels Henrik David BOHR (1885–1962)—: allí, un electrón es un pequeño cuerpo que “circula” alrededor del núcleo. Ni la llamada indistinguibilidad de las partículas ni el principio de Pauli se ajustan a esta idea. Pero ya el lenguaje estaba ahí, la idea del electrón como un pequeño cuerpo individual había echado raíces en nuestras mentes. Así que fue necesario aceptar las discrepancias que solo resultan de los modelos transportados por el lenguaje.

Por cierto, la idea del electrón como individuo no es mala en todos los casos, dependiendo del estado en que se encuentre, puede llegar a ser asintóticamente buena.

Defectos

En este contexto, se ve que se trata de un electrón en el estado a y otro en el estado b (es decir, de un electrón s y un electrón p).

Esto resulta familiar, se lee así o parecido en el capítulo sobre átomos multielectrónicos de un libro de física o química. Pero aquí hay una incoherencia, y el texto la pasa elegantemente por alto.

El problema siempre surge cuando se habla de un electrón en un sistema multielectrónico, es decir, un electrón 1, un electrón 2, un electrón 2s, un electrón 3p o un electrón 4f.

El lenguaje utilizado es el que se emplea normalmente cuando se habla de una entidad individual bien definida. Y todo el que lee las afirmaciones correspondientes sobre el electrón las interpreta así: el electrón 1 es

Eliminación

Es difícil. O bien habría que utilizar un lenguaje que solo represente la parte matemática, que no se base en un modelo y que, por tanto, no sea descriptivo.

O un lenguaje que se base en un modelo que se ajuste algo mejor que el modelo de BOHR. Sería el lenguaje del fluido electrónico, la materia electrónica o el *electronium*, por ejemplo. Según esto, un electrón no es un individuo, sino una porción específica de una “sustancia”: una porción de la masa m_e y la carga e .

Por supuesto, este modelo tampoco es siempre útil, no contempla la interferencia. Pero la ventaja es que incluye el hecho de que un electrón tiene una determinada carga y una determinada masa y no requiere una explicación incomprensible, realmente irracional, de que los electrones son indistinguibles.

11.6 Reglas de selección y transiciones prohibidas

Tema

Para la comprensión del átomo, el término regla de selección parece ser importante. Lo que se quiere decir con ello puede verse en la siguiente formulación típica: “Las frecuencias de todas las líneas de un espectro pueden representarse como diferencias de unos pocos términos espectrales que se combinan entre sí. Sin embargo, no todas las combinaciones de términos aparecen como líneas espectrales, existen ciertas prohibiciones de transición o reglas de selección cuyo verdadero significado solo lo revela la mecánica cuántica”.

Al estudiar la mecánica cuántica se aprende entonces el “verdadero significado”, puede ocurrir que el elemento de la matriz para una transición del dipolar eléctrico se haga cero porque las funciones de onda implicadas tienen cierta simetría.

Defectos

La regla de selección $\Delta l = \pm 1$ establece que el momentum angular del átomo debe cambiar en \hbar durante una transición que involucre a un fotón. La explicación es sencilla, los fotones tienen un momentum angular de magnitud \hbar . La regla de selección $\Delta l = \pm 1$ es, pues, una expresión de la conservación del momentum angular.

En lugar de tener en cuenta la conservación del momentum angular desde el principio, se crea la expectativa de que ciertas transiciones podrían tener lugar porque se tiene en cuenta la ley de conservación de la energía. El hecho de que no se produzcan realmente se contempla mediante una regla adicional, inicialmente incomprensible. La validez de dicha regla se demuestra después mediante el cálculo de los elementos matriciales de la mecánica cuántica, es decir, con una herramienta que podría considerarse inapropiada. El hecho de que no sea más que la expresión de otra ley de conservación solo se nota marginalmente, si es que se nota.

Sin embargo, en el fondo, no es de esperar que un proceso imaginario pueda tener lugar simplemente porque se siga el teorema de la conservación de la energía. Si así fuera, podrían producirse los mayores “milagros”, inclusive sin entrar en el ámbito de la mecánica cuántica.

Origen

El laborioso proceso de elaboración de la mecánica cuántica ha dejado su huella en todas partes. La fuente más importante para los descubrimientos de la física atómica y cuántica fue la espectroscopia. Las reglas que permitían poner orden en el aparente caos de las líneas espectrales se conocían antes de que existiera la mecánica cuántica. Por ello, muchos términos y métodos de la espectroscopia anterior a la mecánica cuántica se han incorporado a esta y a la física atómica.

Esto también explica por qué se dice que un proceso está prohibido y otro permitido, lo que no es habitual en la física. Basándose en las reglas de la espectroscopia, se esperaba poder combinar todos los niveles de energía en el diagrama de términos. Si se hubiera sabido de inmediato que la causa era la conservación del momentum angular, no se habría hablado de prohibición. Al fin y al cabo, en física clásica no es costumbre considerar primero un proceso imposible y luego declarar que está prohibido. Un proceso tiene lugar porque obedece a las leyes de la naturaleza, no porque evite alguna prohibición.

Eliminación

Se sugiere mencionar desde el principio que el número cuántico l es una medida del momentum angular del átomo en unidades de \hbar . Como el fotón tiene un momentum angular de \hbar , el momentum angular del átomo debe cambiar en \hbar cuando se absorbe o emite un fotón. El término regla de selección y la referencia a las “prohibiciones” resultan superfluos.

11.7 Degeneración

Tema

“En mecánica cuántica, se denomina degeneración al hecho de que un mismo nivel de energía (autovalor del operador hamiltoniano) posea más de un estado asociado (autofunción del operador hamiltoniano con el mismo autovalor).”

“Un gas de partículas que se comporta como se ha descrito se denomina gas degenerado o de FERMI.”

Defectos

La mayoría de estudiantes tienen y han tenido problemas con el término degeneración. ¿Se refieren las dos citas a lo mismo y no se ha entendido? Claro que los estudiantes pueden repetir las definiciones textualmente en el examen.

Otra observación: el término “degenerado” no es ciertamente una expresión feliz.

Degenerado es algo que no es como debería ser o como uno quisiera que fuera. Pero ¿por qué los estados son degenerados si dos autovalores son iguales por razones de simetría? Lo mismo sucede con el gas de FERMI. ¿Por qué el gas ideal debe ser el estandar de todas las cosas? Hay gases de FERMI por todas partes. Un estu-

El concepto de trayectoria en la mecánica cuántica

diente espera ciertamente algo más desviado de lo normal para que tenga ese nombre.

Y por último, ¿es necesario introducir dos términos técnicos para una misma cosa? ¿Gas de FERMI y gas degenerado? Se estima que para poder participar en discusiones físicas es necesario conocer cerca de 3 000 términos, si se utilizan dos nombres para cada concepto, esto se convierte en un vocabulario de 6 000 palabras que habría que aprender.

Origen

El progreso de la Física es un proceso evolutivo, en el cual no existe previsión (o casi no la hay), especialmente en el desarrollo de su jerga. Y no existe ninguna institución que garantice que el lenguaje sea coherente o que se deseche lo superfluo, o por decirlo más claramente, que se haga un tamizaje o “limpieza” periódica del lenguaje especialmente del científico-técnico.

Eliminación

Como mínimo, se debe procurar que los alumnos sean conscientes de que se utiliza la palabra en dos sentidos diferentes en la misma clase.

Es de reconocer que, en la versión alemana de Wikipedia, bajo la palabra clave “materia degenerada” se encuentra la siguiente frase: *“El término degeneración tiene aquí un significado diferente al de los niveles de energía degenerados.”*

Pero quizás también se puede decidir prescindir de al menos uno de los dos usos. (Esto es lo que hace TIPLER: solo existe un gas de electrones de FERMI).

Por supuesto, se conoce el argumento de que es necesario capacitar a los alumnos para que comprendan otros textos. Ciertamente, ese puede ser uno de los objetivos de aprendizaje de un curso. Pero más importante es que los alumnos comprendan la materia, y para esto, la proliferación de palabras técnicas es un serio obstáculo. Una de las consecuencias es la notoria impopularidad de la física como asignatura en la escuela y en algunas carreras universitarias.

11.8 El concepto de trayectoria en la mecánica cuántica

Tema

“El concepto de trayectoria de una partícula en mecánica cuántica carece de sentido ...”, o “El concepto de trayectoria o de órbitas no tiene sentido en el microcosmos...”, son formulaciones ampliamente conocidas.

Defectos

¿Qué quieren decir exactamente dichas afirmaciones? ¿Insinúan que el concepto de trayectoria tiene sentido en todas las demás ramas de la Física? Pero, ¿qué sentido tiene dicho concepto en termodinámica, o en óptica geométrica? ¿Qué sentido tiene en la óptica ondulatoria? Y ¿qué sentido tiene en la vida cotidiana? ¿Quién o qué se espera que tenga una trayectoria? ¿Qué trayectoria tiene una nube, o una cantidad de dinero al hacer una transferencia, o los datos que se transmiten en la Internet? Se ve que el concepto de trayectoria “carece de sentido” (o podría tener “muchos sentidos”) no solo excepcionalmente sino muy a menudo.

Pero entonces, ¿por qué es tan destacable que dicho concepto pierda sentido en mecánica cuántica? Tal situación se origina al introducir generalizadamente un modelo inapropiado —el de los cuerpos individuales y puntiformes—, lo cual genera que posteriormente se deban remediar las consecuencias de dicho procedimiento, es decir, no es un problema físico, es un problema puramente “interno” de coherencia de los modelos empleados.

Al analizar un estado propio de la energía, por ejemplo, el estado fundamental del átomo de hidrógeno, ni la teoría, ni el experimento indican que el electrón sea puntiforme, ni tampoco hacen referencia a algún movimiento. Si no se hubiera “enmarcado” a los estudiantes en la existencia de los “puntitos” pululando, no sería necesario el posterior análisis de veracidad de la trayectoria de tales “partículas”.

Origen

El modelo según el cual se atribuyen los procesos físicos al movimiento y a la interacción mutua de pequeñas partículas que se pueden seguir individualmente, fue altamente exitoso hasta finales del siglo 19. Es normal no desechar, sin alguna razón importante, una herramienta que ha sido tan útil; sin embargo entrando el siglo 20 se ha intentado aplicar dicho modelo en casos donde no es apropiado. Se ha descontextualizado y tergiversado tanto que ha perdido su fuerza y agudeza, dando como resultado una inadecuada interpretación de las probabilidades, inaceptable para el sentido común.

Aun conociendo los problemas, los físicos contribuimos continuamente a perpetuar un modelo que no funciona. Son raros los exámenes de física cuántica en los cuales no se pregunta por el modelo de BOHR —Niels Henrik David BOHR (1885–962)—; y aún cuando el estudiante no sepa mucho, en general conoce dicho modelo, del cual se ha mostrado en el mismo curso que no permite explicar los fenómenos más

elementales. En muchas ocasiones se “sugiere” a los estudiantes exactamente lo que en realidad se quiere evitar.

¡Cuán a menudo se escucha la afirmación de que los electrones se mueven o circulan alrededor del núcleo! A pesar de que casi nunca este tipo de afirmaciones se encuentren en un libro de mecánica cuántica, los estudiantes escuchan la afirmación equivocada más a menudo que la correcta.

Eliminación

Se recomienda remitirse siempre a los resultados comprobados teórica y experimentalmente, y utilizar modelos que no causen conflictos cognitivos.

1 El hecho de que sea compleja. Sin embargo, existen otras magnitudes complejas en Física, que se estudian y analizan de diferentes maneras, pero sin la advertencia que se trata de una magnitud sin “significado físico”.

2 La aseveración que el módulo (o cuadrado) de la función psi (ψ) se manifiesta en la densidad electrónica, que es medible, pero que su fase es arbitraria y no medible.

Pero ello no es correcto. La fase se manifiesta en la densidad de corriente (llamada corriente de probabilidad), y esta sí se puede medir. Para sistemas de una partícula la función de onda está determinada inequívocamente (es decir, con su fase) por la densidad y la densidad de corriente.

Si se afirma que la magnitud no es directamente medible, tendría que precisarse primero qué se entiende por “medir directamente”. A menudo se hace referencia a la medición de la intensidad del campo eléctrico, sin embargo medir esta magnitud por medio de una carga de prueba no se puede calificar de medición directa. Al emplear una carga no hay que olvidar que se modifica el campo original de tal manera que éste ya no es el mismo.

Origen

La interpretación de probabilidades de BORN —Max BORN (1882–1970)— impide tener una idea sencilla de la función de onda.

Eliminación

La afirmación de que la función de onda no sea medible directamente no tiene sentido mientras no se explique qué se entiende por una medición directa. Si se realiza dicha explicación se sugiere no escoger la función de onda como primer ejemplo. Probablemente el deseo de hacerlo desaparezca si se recurre a otra interpretación que no sea la de BORN, por ejemplo la de MADELUNG —Erwin MADELUNG (1881–1972)—, según la cual el cuadrado de la función de onda es una medida para la densidad de masa y de carga eléctrica de una nube electrónica continua.

Referencias

[1] E. Jones y R. Childers, *Física contemporánea*, México: McGraw-Hill, 2001, p.894.

[2] I. Prigogine, *El fin de las certidumbres*, Santiago de Chile: Editorial Andres Bello, 1997. p.51–52.

[3] Función de onda. [en línea]. En:

<https://www.nucleares.unam.mx/~vieyra/node18.html> [consultado el 18 de octubre de 2022].

Defectos

En las clases de física (y en sus textos) se emiten afirmaciones que al estudiante le parecen particularmente trascendentales, generalmente son afirmaciones que tocan los fundamentos de la ciencia, que son algo inesperadas, pero también algo incomprensibles de modo que no se sabe para qué puedan servir. Un ejemplo es la afirmación de que la función de onda no es una magnitud observable, o que es una magnitud que no tiene significado físico.

A pesar de que esto se menciona solo “de paso”, dicha aseveración se graba en la mente de muchos estudiantes.

¿Por qué la función de onda no sería observable? Se encuentran dos tipos de justificación para dicha afirmación:

11.10 Orbitales atómicos

Tema

Es posible encontrar varias definiciones para el concepto de orbital:

- 1 “Estas regiones del espacio se denominan en lengua inglesa «orbitals» y a partir de ahora se les llamará orbitales. Por tanto, el electrón «ocupa» un orbital y no se mueve en ninguna órbita definida” [1].
- 2 “La región en el espacio en la cual hay una alta probabilidad de hallar un electrón es un orbital atómico.” [2].”
- 3 “Un orbital atómico es una determinada solución particular, espacial e independiente del tiempo a la ecuación de SCHRÖDINGER para el caso de un electrón sometido a un potencial coulombiano.” [3].”
- 4 “En 1927, Erwin SCHRODINGER, establece una ecuación matemática que al ser resuelta permite obtener una función de onda ψ^2 (psi cuadrado) llamada orbital. [...]. Esta función es llamada densidad electrónica e indica la probabilidad de encontrar un electrón cerca del núcleo.” [4].”

Defectos

Lo fundamental del significado del término orbital en cada una de las citas anteriores se puede extractar y expresar de la siguiente forma:

- 1 Región de presencia del electrón;
- 2 Región de alta probabilidad de presencia del electrón;
- 3 Función de onda $\psi(x, y, z)$;
- 4 Función de onda al cuadrado $|\psi(x, y, z)|^2$.

Es posible encontrar ejemplos para cada una de las cuatro concepciones asignadas al término orbital, tanto en textos de colegio como de universidad, en libros y artículos de física y química, en enciclopedias científicas y en la Internet. Algunos autores mencionan que la palabra se puede emplear con distintos significados, y varias de las afirmaciones hechas siguen siendo correctas al cambiar un significado por otro.

¿Es eso un defecto? Al referirse al lenguaje común, la respuesta sería “no”. En lenguaje no-científico es normal que una palabra se pueda emplear con varios significados, además las palabras pueden tener un significado distinto según el contexto o el autor.

En matemáticas tal “ambigüedad” no es común, como tampoco deseable, allí se definen los conceptos básicos de manera concreta y se emplean en el sentido estricto y específico de la definición. En un contexto matemático el significado de las palabras está bien definido y es vinculante para cada autor.

Se puede decir que otras disciplinas científicas, en cuanto a exigencia de rigor lingüístico concierne, se sitúan entre el lenguaje de la matemática y el lenguaje común, por ejemplo la Física y la Química. Normalmente en ellas se reconoce fácilmente si una palabra aparece como término técnico, es decir, con un significado bien determinado, o como término del lenguaje común; se diferencia entre un término con significado bien definido y comúnmente aceptado, y términos comunes y generales.

La palabra “orbital” pertenece claramente a la categoría de los términos técnicos, su concepto se introduce generalmente por medio de una definición, y se espera que siempre sea empleado significando lo que la definición implica. Pero como lo muestran las citas mencionadas, eso no es así.

Es particularmente inapropiado emplear en un mismo texto el término mencionado con distintos significados.

Origen

El término orbital se ideó como sustituto para el concepto de órbita y, por consiguiente, en un comienzo con dicha palabra no se quería definir una función; sin embargo, las citas 3 y 4 sugieren precisamente eso. Como se sabe, una función es un concepto matemático creado por el hombre. Con el vocablo orbital se buscó crear una palabra para algo cuya existencia es independiente de que se describa matemáticamente o no (la órbita), pero al parecer fue cómodo transferir el nombre del fenómeno a la función que lo describe; proceso este que se observa en Física una y otra vez, y que siempre ocasiona problemas de comprensión. He aquí otros ejemplos: la palabra “campo” significaba inicialmente un ente realmente existente, pero fue tomada por los teóricos para significar una función, es decir, un objeto matemático. El “bit” mutó de la unidad de medición de la cantidad de datos al nombre para un sistema de dos estados. La resistencia se transformó de una magnitud física al nombre de un elemento de un circuito eléctrico.

Eliminación

No es fácil proponer una solución a la situación presentada, ya que cada una de las diversas interpretaciones goza de una larga difusión. Lo menos que se puede exigir es que en un mismo texto el término orbital sea empleado de manera unificada y coherente.

No se perdería nada al desistir completamente de las interpretaciones correspondientes a las citas 3 y 4. En lugar de hablar del orbital 2s se hablaría de la función de onda o de la distribución de la probabilidad en el estado 2s. El término orbital es imprescindible solamente para

expresar lo que se quería decir inicialmente con dicha palabra (cita 1). En ese sentido es razonable afirmar que un orbital está ocupado o no, así como se puede decir —en el problema clásico de KEPLER— si existe o no un cuerpo en una determinada órbita.

La cita 2 tampoco es muy apropiada; algunos autores incluso indican porcentajes, manifestando que el orbital es la región en la cual se encuentra el 90 % o el 95 % de la probabilidad total: “—Los electrones no describen órbitas definidas, sino que se distribuyen en una determinada zona llamada orbital.— En esta región la probabilidad de encontrar al electrón es muy alta (95%)” [5]. Según esta definición, la afirmación de que un orbital está ocupado nunca es correcta.

Se sugiere, entonces, emplear el término orbital solamente en el sentido de la primera cita.

Referencias

- [1] H. Beyer y W. Walter, *Manual de química orgánica*, Barcelona: Editorial Reverté, 1987. p.19.
- [2] Diccionario de Física (Colección Llave de la Ciencia), *Orbital*, Bogotá: Editorial Norma, 1984. p.165–166.
- [3] Orbital atómico. [en línea]. En: https://es.wikipedia.org/wiki/Orbital_atómico [consultado el 26 de agosto de 2011].
- [4] C. Donoso, *Teoría Mecanocuántica*, [en línea]. En: <https://www.scribd.com/doc/22633644/teoria-mecanocuantica> [consultado el 26 de agosto de 2022].
- [5] Estructura atómica. [en línea]. En: <https://www.scribd.com/doc/20953445/estructura-atmica3498> [consultado el 26 de agosto de 2022].

11.11 Fuerzas de enlace

Tema

La cohesión entre el sol y los planetas, de los iones en un cristal de sal, de las moléculas en un líquido, de los átomos en una molécula, de los nucleones en un núcleo atómico, entre otros, se atribuye a la acción de fuerzas de atracción, de cohesión o de enlace de diversa índole. Los sólidos deben la estabilidad de su forma y su “mojabilidad”, los líquidos la constancia de su volumen y su tensión superficial, los vapores su “tendencia” a condensar, y los átomos su capa electrónica, a las fuerzas de atracción atómica y molecular.

Defectos

Al existir solamente fuerzas de atracción, los cuerpos atraídos serían acelerados unos hacia otros. Si se quiere

evitar conflictos con las leyes de la mecánica se debe justificar el porqué esto no ocurre en los casos arriba mencionados. Si los cuerpos o las partículas quedan en reposo se debe concluir que no existe dicha fuerza o, si se habla de una fuerza de atracción, entonces debe existir en cada instante, o en el promedio temporal, una fuerza igual y opuesta. Para la comprensión del fenómeno, esta última no es menos importante que la fuerza de atracción. En el caso de los planetas se tiene la solución del problema: la fuerza promedio ejercida por el sol es cero. Pero, ¿qué mantiene a distancia los átomos en un cristal o en una molécula? Ya que se trata de partículas materiales, cada partícula excluye a las demás del espacio que ocupa y parece superfluo especificar fuerzas, porque este “principio de exclusión” lo explica todo. La pregunta se hace ineludible cuando se discute la estructura interna del átomo. Uno de los primeros modelos del átomo fue el que representaba el sistema solar con sus planetas, y parecía razonable admitir que la compensación de las fuerzas de atracción tenía la misma explicación en el átomo que en el sistema solar. Sin embargo, dicha explicación no es correcta en el caso del átomo debido a que los estados inicialmente considerados en él son estados estacionarios que no contemplan la existencia de movimiento.

Origen

Es conocido de la vida cotidiana que un objeto ocupa un espacio, allí donde éste no puede haber otro cuerpo. Esto hace que resulte justificado tratar en mecánica cuerpos macizos, barras, ruedas, rodillos o placas como cuerpos rígidos, y los líquidos como incompresibles. La propiedad de ocupar cierta porción de espacio aparece como una propiedad fundamental de la materia. Aunque los gases no tienen dicha propiedad, se formula la misma idea para las moléculas que los componen.

Eliminación

Lo que se observa como elasticidad de los cuerpos macroscópicos es consecuencia de una propiedad similar de los átomos que constituyen dichos cuerpos. También un átomo es compresible y reacciona a una “densificación” con una fuerza de repulsión. Considerada sin prejuicio, la nube electrónica se asemeja a un “ente” elástico, que se contrae al aumentar la carga eléctrica del núcleo, pero también se resiste vigorosamente a un acercamiento mayor. Se podría aducir para dicho comportamiento el principio de incertidumbre de HEISENBERG —Werner Karl HEISENBERG (1901–1976)—, o el principio de exclusión de PAULI —Wolfgang Ernst PAULI (1900–1958)—, pero esto no aporta mucho, ya que en el presente contexto los dos principios no explican el hecho mejor que la mera descripción. No existe ninguna

Reacciones nucleares y radiactividad

razón para omitir estas fuerzas que intervienen en los fenómenos.

11.12 Reacciones nucleares y radiactividad

Tema

Descripción de transformaciones de núcleos atómicos y de procedimientos de medición de radiaciones nucleares.

Se dice que las sustancias radiactivas pueden emitir tres clases de radiación: las radiaciones α , β y γ . Se distinguen varias clases de transformaciones de núcleos: la desintegración, la fisión, la fusión, etc.

Defectos

Los defectos de esta manera de descripción se evidencian al comparar las transformaciones nucleares con las reacciones químicas, ya que en general no se aprovecha la similitud existente entre la química “normal” y la química nuclear como sería posible. Basándose en dicha analogía se puede simplificar considerablemente la física nuclear y así facilitar el proceso de aprendizaje.

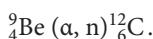
En física nuclear se introducen, con nombres diferentes, conceptos que ya existían en la Química. Lo que en Química es una reacción monomolecular se llama en Física desintegración nuclear o fisión espontánea; la reacción autocatalítica de la Química se conoce en física nuclear como reacción en cadena. La tasa de reacción en Química se mide en mol por segundo, en física nuclear la misma magnitud se llama actividad y se mide en Becquerel Bq, en honor a Antoine Henri BECQUEREL (1852–1908). Cabría esperar que la relación entre estas dos unidades fuera:

$$1 \text{ mol/s} = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ Bq}$$

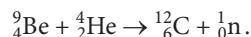
pero no es así, la relación se define como

$$1 \text{ mol/s} = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ Bq} \cdot \text{mol}.$$

Las ecuaciones que describen reacciones se presentan de manera diferente en Química y en física nuclear, por ejemplo se escribe:



para la transformación de los nucleidos ${}^9_4\text{Be}$ y ${}^4_2\text{He}$ en ${}^{12}_6\text{C}$ y ${}^1_0\text{n}$ (neutrones); según el modo de escribir de los químicos se tendría:



En general no es conveniente escribir reacciones de la capa electrónica y del núcleo de manera distinta, pero además, la versión nuclear de la ecuación tiene otro inconveniente, introduce una asimetría tanto entre los dos reactantes ${}^9_4\text{Be}$ y ${}^4_2\text{He}$, como entre los productos ${}^{12}_6\text{C}$ y ${}^1_0\text{n}$. Que la masa del ${}^4_2\text{He}$ sea menor que la del ${}^9_4\text{Be}$, o que la del ${}^1_0\text{n}$ sea menor que la del ${}^{12}_6\text{C}$, no justifica la descripción asimétrica en la ecuación de reacción. Adicionalmente, dicho modo de escribir la reacción se limita al caso que existan exactamente dos reactantes y dos productos.

Al estudiar física nuclear es necesario aprender un gran número de tecnicismos, se hacen muchas distinciones de casos innecesarios e insignificantes. Así, por ejemplo, se insiste en la distinción entre radiactividad natural y artificial, es decir, entre procesos de decaimiento de nucleidos encontrados en la naturaleza y nucleidos producidos artificialmente. En principio, en Química se podría hacer la misma distinción entre sustancias naturales y artificiales, y sus correspondientes desintegraciones, pero no se hace ya que dicha diferenciación no corresponde a ninguna característica esencial.

También parece superfluo dar un nombre suplementario a ciertos productos de un decaimiento: radiación α , radiación β y radiación γ . Además dichos nombres sugieren una relación de “parentesco” entre las sustancias correspondientes, lo cual puede confundir y desorientar al estudiante; quedando además “oculta” la relación entre los procesos γ y las reacciones fotoquímicas.

Origen

El hecho de que existan tantos tecnicismos, y que la enseñanza de la física nuclear este dominada por el análisis de la llamada radiación nuclear, empleando demasiado tiempo en el estudio de aparatos de medición, es fácil de comprender. En un comienzo y por mucho tiempo las únicas transformaciones de núcleos conocidas eran los procesos de radiactividad y el único indicio del proceso era la radiación. Dicho proceso se percibía solamente porque uno de los productos de la reacción era mucho más ligero que el otro y por consiguiente se “llevaba” casi toda la energía desprendida en el mismo, es decir, se observaba la radiación, pero no se conocía su naturaleza. Nada más natural que dar primero un nombre a la radiación recién descubierta. Hay que añadir que en esa época las radiaciones eran un tema de moda; varias veces el descubrimiento de una nueva radiación condujo al otorgamiento de uno de los premios NOBEL, llamados así en honor a Alfred Bernhard NOBEL (1833–1896).

Solo más tarde se descubriría que la transformación de los núcleos tiene mucho en común con la transformación de la capa electrónica.

Procesos con tasas de reacción como las conocidas actualmente en Química fueron descubiertos o realizados décadas más tarde. El hecho de que el sol funcione gracias a reacciones nucleares fue comprendido solamente alrededor de 1920, y el primer reactor nuclear empezó a funcionar en 1942.

Eliminación

La eliminación no es fácil. Requiere una reestructuración extensa de la física nuclear. Al hacer esto es recomendable orientarse hacia la formulación desarrollada en Química.

11.13 El cuanto y la cuantificación

Tema

La teoría cuántica, como su nombre indica, es una teoría sobre los cuantos. Pero ¿qué son los cuantos?, ¿qué es un cuanto? Acá solo se analizará el uso de la palabra. He aquí algunos ejemplos:

- 1 “En física, se entiende por cuanto... un objeto que se genera por un cambio de estado en un sistema con valores discretos de una magnitud física. Las magnitudes cuantificadas se describen en el marco de la mecánica cuántica y los subcampos de la física teórica inspirados en ella, como la electrodinámica cuántica. Los cuantos solo aparecen en determinadas porciones de esta magnitud física, por lo que son la cuantificación de estas magnitudes.”
- 2 “Un fonón es la excitación elemental (cuanto) del campo elástico.”
- 3 “In physics, a quantum [...] is the minimum amount of any physical entity (physical property) involved in an interaction. The fundamental notion that a physical property can be ‘quantized’ is referred to as ‘the hypothesis of quantization’. This means that the magnitude of the physical property can take on only discrete values consisting of integer multiples of one quantum. For example, a photon is a single quantum of light (or of any other form of electromagnetic radiation).”
- 4 “Cuantos: Las partículas obtenidas de la representación complementaria de los campos de ondas. En particular, se entiende por ello los cuantos de luz, las partículas que deben asignarse al campo electromagnéti-

nético. Según la teoría cuántica de los campos, cada campo tiene sus cuantos; así, los mesones pertenecen al campo nuclear y los electrones al campo de la materia que provoca las fuerzas químicas.”

Defectos

¿Cuál es el significado de una palabra? ¿Qué concepto designa? Eso se decide únicamente por la manera en que esta se utiliza. Lo cual significa, especialmente en el contexto del lenguaje coloquial, que una palabra puede tener varios o incluso muchos significados.

En física, y especialmente con una palabra que se presenta como un término técnico, se desearía que el significado fuera inequívoco; que la palabra caracterizara inequívocamente un concepto. Sin embargo, a menudo no es así tampoco en la física. El significado se desprende entonces (ojalá) del contexto.

Una palabra especialmente apabullante en este contexto es el término cuanto y sus derivados cuantificar y cuantización. Existen innumerables combinaciones de palabras con el pequeño término cuanto: estado cuántico, fenómeno cuántico, propiedad cuántica, hipótesis cuántica, tunelado cuántico, objeto cuántico, número cuántico, estadística cuántica, interferencia cuántica. Con la llegada de la cocomputación cuántica, se ha producido una verdadera “inflación” en el uso del término cuántico.

Algunos comentarios sobre las citas transcritas al comienzo:

- 1 Segundo esto, un cuanto es a veces un objeto, a veces una porción de una magnitud física; aparte de la afirmación de que los cuantos son la cuantificación de una magnitud, es decir, más bien un proceso.
- 2 Un cuanto es una excitación.
- 3 Un cuanto es la cantidad mínima de una entidad física o de una propiedad física. Pero una partícula, concretamente el fotón, también puede ser un cuanto.
- 4 Los electrones y los mesones también son cuantos.

Aparentemente, se trata de un término genérico, pero ¿para qué? Para varias clases de conceptos, por un lado, para las partículas y, por otro, para las porciones elementales de ciertas magnitudes físicas.

Sin embargo, basados en estas afirmaciones no es posible formular una definición, dado que:

- No se suele llamar cuanto a cada partícula elemental;
- No existe una porción elemental universal para la energía, pero se quiere hablar de cuantos de energía en relación con el oscilador armónico, por ejemplo; además, existe una porción elemental para la entropía, a saber k_B , pero no se suele decir que la entropía esté cuantificada.

El cuanto y la cuantificación

Origen

El uso del lenguaje en este campo no fue del todo claro desde el principio. En su famoso artículo de 1905, EINSTEIN —Albert EINSTEIN (1879–1955)— utilizó los términos cuanto de energía y cuanto de luz. Todavía no estaba claro que aquí se trataba de dos cosas diferentes, una relacionada con los valores de una magnitud física y otra con lo que más tarde se llamó partícula. Sin embargo, debería haberse aclarado más tarde, poco a poco, a medida que se descubrían más y más partículas “elementales” y más y más magnitudes resultaban estar pionadas. Pero como ya se ha visto, esta diferenciación no se produjo.

Eliminación

No existe una institución que determine claramente cómo deben utilizarse las palabras, (Claro que están las “Academias de la lengua” y una de sus funciones debe ser el uso adecuado del lenguaje) ni siquiera los llamados términos técnicos. Tampoco se desea dar recomendaciones sobre el uso de dichos términos a los físicos especializados, solo se hacen unas sugerencias dirigidas a los profesores de la escuela y la universidad.

Una primera sugerencia sería no utilizar el término cuanto como nombre de partículas, dicho nombre no simplifica nada, tampoco explica nada. Por lo tanto, no denominar a las partículas de la luz cuantos de luz, sino fotones. Y los fotones son partículas y no cuantos de energía (al igual que no son cuantos de momentum o de momentum angular).

La segunda recomendación sería no utilizar tampoco el término para las porciones elementales de las magnitudes físicas.

Lo que sí parece útil es el verbo cuantizar.

Así, el hecho de que los valores de ciertas magnitudes físicas (en un sistema cerrado) sean múltiplos enteros de un valor elemental puede expresarse de forma breve y clara: la carga eléctrica, el momentum angular, el flujo magnético... están cuantizados. Sin embargo, si se utiliza la palabra de esta manera, también habría que decir que la cantidad de sustancia está cuantizada. El cuanto elemental

$$\tau = 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ mol}$$

no es otra cosa que el recíproco de la constante de AVOGADRO —Lorenzo Romano Amedeo Carlo AVOGADRO (1776–1856)—. El hecho de que no se suela hablar así es probablemente debido a que esta cuantización fue descubierta mucho antes de la aparición de la teoría cuántica.

Hablar de la cuantización de la energía sería entonces poco acertado; al igual que otras magnitudes, la energía

de un sistema determinado suele adoptar valores discretos. Pero ¿debe llamarse cuantización?

Por supuesto, también se puede prescindir de dicha palabra en este contexto. No se perdería mucho y quizás se ganaría algo de claridad.

Sin embargo, en vista del triunfo de los cuantos, tales recomendaciones son poco realistas. Pero tal vez se pueda dar al menos el siguiente consejo: moderación y la mayor claridad posible en el uso de la palabra.

12 QUÍMICA

12.1 Procesos físicos y procesos químicos

Tema

Citas como la siguiente son típicas en diversos libros o artículos de Química:

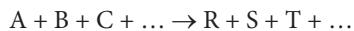
- “En los cambios físicos, las sustancias mantienen su naturaleza y sus propiedades esenciales, es decir, siguen siendo las mismas sustancias. En los cambios químicos, las sustancias iniciales se transforman en otras distintas, que tienen propiedades diferentes.”

Defectos

- 1 Se establece un límite o frontera entre la Física y la Química en un “lugar” inapropiado: entre la “reacción química” y la transición de fase.

Pero precisamente estos dos procesos se encuentran tan relacionados que sería más conveniente resaltar sus similitudes que sus diferencias; ambas clases de procesos se pueden describir con los mismos métodos y el mismo sistema conceptual.

Una reacción química se puede escribir simbólicamente así:



Una transición de fase es un caso particular en el cual a ambos lados de la flecha de reacción existe solamente una sustancia, en símbolos:



Sin embargo, este hecho no conlleva ninguna particularidad en el tratamiento matemático ni conceptual del problema, la fuerza “motriz” para ambas clases de procesos es la diferencia de los potenciales químicos

de los reactantes y los productos. Los valores de los potenciales químicos se obtienen de las mismas tablas, sin importar si se está interesado en una transición de fase, es decir, un “cambio físico” o en una “reacción química”. De igual forma al establecer el balance calórico se emplea el mismo procedimiento y los respectivos valores también se obtienen de las mismas tablas; en ambos casos es posible distinguir entre procesos exotérmicos y endotérmicos, los dos se pueden realizar de manera reversible o irreversible.

- 2 Al definir o diferenciar las dos clases de cambios, tal como se hace en las citas referenciadas, de todas formas se presentan inconvenientes. El criterio para que un proceso sea considerado químico sería el hecho de que se forma una nueva sustancia, pero ¿qué es una nueva sustancia? ¿Es un proceso de disolución, un cambio físico o químico? ¿Sería químico si es por medio de hidratación y físico sin ella? ¿Son el NaCl gaseoso, disuelto (líquido) o cristalino sustancias diferentes? ¿Qué podría decirse sobre los muchos procesos que ocurren en un sólido, como la reacción entre una vacancia y un átomo intersticial en una red cristalina, o la reacción entre electrones y huecos para fotones?

Origen

Al inicio de la presentación de cualquier rama científica, esta plenamente justificado explicar de qué se trata esta, pero es llamativo que dicha pretensión se encuentre particularmente acentuada en la Química cuando se trata de “diferenciarse” de la Física; en la gran mayoría de textos de Física no se encuentran tendencias análogas de “delimitación” respecto a la Química. Tampoco se observa este anhelo entre la Física y la Electrotécnica por ejemplo, ni del lado de la Física ni del de la Electrotécnica.

Eliminación

En lugar de insistir en las diferencias entre transiciones de fase y las “verdaderas” reacciones químicas, es mejor tratar ambos tipos de reacciones como casos particulares de la misma clase de procesos, a la cual pertenecen muchos otros: la reacción entre electrones y huecos, entre sustancias materiales y la luz, entre vacancias cristalinas y átomos intersticiales, entre núcleos atómicos, entre otros.

ca explicación a este caso acudiendo a la química, la fisicoquímica o la termodinámica, tampoco se consigue mucho, ya que el término “energía química” generalmente no forma parte de su léxico común. En su lugar se utiliza una u otra función energética, que depende de condiciones marginales. Parece que no existe una “energía química” que esté almacenada en las sustancias.

Origen

Los ingenieros consideran un motor de combustión no como una máquina química sino térmica, por lo cual no plantean evaluar la energía química, sino el calor suministrado. Desde este punto de vista parece que la “potencia calorífica” es una magnitud apropiada y la “transferencia” del método de análisis a la pila de combustible resulta razonable. En este contexto no se discuten reacciones endotérmicas, ya que no son interesantes desde un punto de vista técnico, de tal forma que es fácil pasar por alto las dificultades mencionadas.

Eliminación

La energía química pertenece a la misma categoría de conceptos que las demás “formas” de energía. El concepto puede ser útil cuando se trata de una orientación global o aproximada, pero se vuelve “obsoleto” cuando se intenta tratarlo con más rigor. En la “jerga” científica puede ser aprovechable, para la realización de cálculos es superfluo y para los procesos de comprensión y aprendizaje es una “carga” innecesaria.

12.2 Energía química

Tema

La capacidad personal de realizar trabajo se obtiene por medio de la energía química de los alimentos. La energía de los combustibles fósiles satisface la mayoría de las demandas energéticas. Esta energía se origina en la luz del sol, esta almacenada en forma química en las sustancias orgánicas que son producidas por fotosíntesis, y puede ser transformada en calor o trabajo, o directamente en energía eléctrica mediante una pila de combustible.

Defectos

Afirmaciones como las antes mencionadas son familiares, y de uso y aceptación comunes. Sin embargo, se generan serias dificultades al intentar cuantificarlas; si se quiere indicar el rendimiento de una pila de combustible o de un motor diésel, se requiere de números concretos. Con respecto a los motores, es de particular interés la energía que entra en el motor W_e , y que debería ser energía química. Los ingenieros dicen que $W_e = m_c \cdot H_u$, donde m_c es la masa del combustible y H_u su “potencia calorífica”, de modo que W_e no es otra cosa que el calor entregado por la combustión, es decir, el calor entregado por la reacción química que se está aprovechando. De igual manera se pueden analizar las pilas de combustible.

Hoy día se sabe que es posible utilizar cualquier reacción química que ocurra espontáneamente para hacer funcionar una pila de combustible, inclusive una reacción endotérmica. En este caso W_e sería negativa de modo que la pila suministra energía química y eléctrica al mismo tiempo, la energía necesaria para este doble efecto se obtiene del ambiente. A pesar de esta “doble” energía el rendimiento resulta ser negativo, ya que $W_e < 0$. Además, existe el problema de que la energía química supuestamente ganada en el proceso y que está almacenada en los productos de la reacción no sirve para nada, porque no es posible invertir la reacción. Si se bus-

12.3 Cantidad de sustancia y número de partículas

Tema

Para caracterizar la cantidad de una sustancia, los químicos prefieren una magnitud diferente a los físicos, los primeros la “cantidad de sustancia” n , los segundos el número de partículas N .

Defectos

En Química la magnitud n se considera fundamental, no solamente para la definición de la composición de las sustancias sino en general para la comprensión del comportamiento de estas. Muchas leyes y reglas adquieren una forma particularmente sencilla si se emplea dicha magnitud (leyes estequiométricas, ley de los gases, ley de acción de las masas, regla de DULONG y PETIT, regla de PICTET y TROUTON, entre otras).

Sin embargo, al lado del número de partículas N la cantidad de sustancia n parece un poco superflua, ni si-

quiera parece ser una “auténtica” magnitud, cuyos valores se determinen en un proceso de medición; figura más bien como un “simple” valor numérico. En ese contexto la constante de Avogadro N_A sirve solamente como unidad de recuento, algo así como por ejemplo la “docena”. Los valores de n y N se diferencian en el factor N_A , de manera que todas las magnitudes derivadas de n también se pueden considerar como derivadas de N . Los valores de las magnitudes derivadas de N variarían en un factor entero de N_A , mayor o menor que las derivadas de n , lo cual las hace un poco más difíciles de manejar, sin embargo este argumento puede convencer a quien tiene que operar frecuentemente con dichos valores, pero no al físico que acostumbra pensar en categorías más generales.

Empleando N en lugar de n se pierde algo más que la “manejabilidad” de los valores, lo cual se aprecia al comparar n con otras magnitudes, por ejemplo la carga eléctrica Q . Se podría reemplazar la carga en todas las ecuaciones por un número entero, el “número de cargas” $z = Q/e$, sin perder ningún resultado de la electrodinámica; por ejemplo, para la ley de COULOMB se tendría que:

$$F = \frac{z_1 \cdot z_2}{4\pi\epsilon_0^* r^2}$$

siendo ϵ en el vacío, igual a

$$\epsilon^* = \frac{\epsilon_0^*}{e^2} = \frac{8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}}{(1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C})^2} = 3,45 \cdot 10^{26} \text{ J}^{-1} \text{ m}^{-1}$$

Asimismo sería necesario replantear todas las unidades eléctricas, remplazándolas por otras (amperio $\rightarrow s^{-1}$, voltio $\rightarrow J$, ohmio $\rightarrow J \cdot s$, faradio $\rightarrow J^{-1}$, henrio $\rightarrow J \cdot s^2$, etc.), mientras los valores numéricos cambiarían en una potencia entera de $1,602 \cdot 10^{-19}$. En Bogotá, por ejemplo, la tensión en la red eléctrica sería $1,76 \cdot 10^{-17} \text{ J}$, y una lámpara de 100 W estaría atravesada por una corriente de $5,67 \cdot 10^{18} \text{ s}^{-1}$. Se nota que no solamente serían inmanejables los valores en situaciones comunes para la tensión, la corriente y la resistencia, sino que se podría confundir sus unidades con las de frecuencia o energía. Si para los estudiantes ya es difícil distinguir entre tensión y corriente eléctrica, siendo diferentes sus unidades, con este método se presentaría la dificultad adicional de distinguir entre tensión y potencia, y además ¿qué idea se puede formar de la unidad Js para la resistencia?

Dificultades muy similares se presentan cuando se pasa por alto la magnitud n , es decir, la cantidad de sustancia. Dejan de percibirse las analogías con otros campos de la Física, lo cual favorece la tendencia a introducir conceptos particulares. Lo que podría, en general, ser una parte de la Física convencional se ha transfor-

mado en una disciplina especial, la Física estadística, que emplea métodos y maneras de pensar completamente nuevos; las representaciones allí formuladas se han separado a tal punto del resto de la Física que una unificación resulta casi imposible. Cada vez es menor la posibilidad de tratar los fotones en un cuerpo negro, los fonones en un sólido, los electrones en la banda de conducción, los huecos en la de valencia, la distribución de velocidades de MAXWELL, la energía de FERMI, la condensación de BOSE-EINSTEIN, la ley de BOLTZMANN, etc., con los mismos métodos y conceptos con los cuales el químico describe el comportamiento macroscópico de las sustancias.

Origen

Mientras fue posible considerar la masa m de una porción de sustancia como proporcional a la cantidad de la misma, parecía natural tomarla —ya que es fácil medirla— como medida de cantidades de sustancia de toda índole. Una pregunta que permanentemente se hace en Química referente a cuándo dos porciones de sustancia deben considerarse como iguales, generalmente no se hace en Física. En Física, la cantidad de sustancia se consideraba como “descendiente innecesario” de la masa, que no merecía figurar dentro de un sistema de magnitudes físicas. Además, en la teoría mecánica del calor en la cual se consideran los átomos como pequeños cuerpos sujetos a las leyes de la mecánica, o en la estadística cuántica donde se analizan distribuciones de partículas sobre estados cuánticos, el número de partículas N parece un concepto más natural, comparado con la cantidad de sustancia n .

Eliminación

Aunque en Física generalmente no se estudian transformaciones propiamente químicas, se suelen considerar otros procesos de transformación de sustancias como la evaporación, fundición, ebullición, difusión, dispersión, entre otros. Asimismo conjuntos de electrones, huecos, defectos cristalinos, fotones, fonones, partículas α , etc. pueden ser tratados como “sustancias”. Para los fenómenos correspondientes la cantidad de sustancia n desempeña un papel semejante al de la carga Q en la electrodinámica, es decir, representa una magnitud básica de la cual se derivan otras magnitudes. Estas se pueden agrupar en un sistema conceptual que tendría muchas similitudes con otras partes de la Física. Renunciar a la magnitud n es tan inconveniente como sería renunciar a la carga eléctrica Q . Se recomienda introducir n de la misma manera como se introduce la longitud, la duración o la masa, es decir, por definición directa y no a través del número de partículas N .

12.4 La constante de AVOGADRO

Tema

El número de partículas de una sustancia, contenidas en 1 mol, se llama constante de AVOGADRO —Amedeo AVOGADRO (1776–1856)— N_A , es decir,

$$N_A = N/n,$$

donde N es el número de partículas en una porción de sustancia, y n la cantidad de sustancia.

Defectos

Una magnitud G que solo puede tomar valores discretos se llama cuantizada y el entero g que permite determinar dichos valores se denomina número cuántico. Hay magnitudes cuyos valores no son solo discretos, sino también equidistantes, es decir, múltiplos enteros de un cuanto universal γ :

$$G = \gamma \cdot g.$$

Entre los ejemplos de magnitudes cuantizadas figuran: la carga eléctrica Q , la acción H , el momentum angular L y el flujo magnético Φ ; para la energía no existe un cuanto universal. La cuantización de la carga eléctrica,

$$Q = z \cdot e,$$

donde z es el número cuántico de la carga y e el cuanto universal de la misma, fue descubierta en el siglo 19 al estudiar soluciones de electrolitos. A comienzos del siglo 20 fue posible interpretar diversos resultados de la física atómica y la termodinámica mediante la hipótesis de que en un movimiento circular los valores de H son, para cada grado de libertad, múltiplos enteros de una constante \hbar , llamada constante de PLANCK —Max PLANCK (1858–1947)—. Una consecuencia de la cuantización de H es que el momentum angular de una partícula en una órbita está cuantizado, o más exactamente, cualquier componente cartesiano del momentum angular. Se tiene que $L_z = l \cdot \hbar$, con $\hbar = h/(2\pi)$, como cuanto universal del momentum angular, siendo l el número cuántico correspondiente. El flujo magnético Φ a través de un área limitada por un circuito superconductor cerrado está cuantizado, donde su cuanto universal es $\Phi_0 = h/2e$. Se puede decir que el superconductor encierra el flujo magnético.

Respecto a la estructura de su escala de valores, la cantidad de sustancia entra en la misma categoría que las magnitudes Q , H , L y Φ . Para una porción dada de sustancia en un recipiente cerrado, la magnitud n puede

admitir solamente valores discretos, es decir, valores que son un múltiplo entero N de una cantidad mínima τ . En otros términos: n está cuantizado con un cuanto universal $\tau = N_A^{-1}$, de donde $n = N \cdot \tau$.

Sin embargo, se suele utilizar el recíproco N_A de τ , es decir, $n = N \cdot N_A^{-1}$, ocultando así la simetría conceptual que facilitaría el aprendizaje y el desarrollo de cálculos. Pero no existe ninguna razón, salvo la histórica, para un trato particular con n . Lo extraño de esta manera de proceder se vería más claramente al aplicarla en otros casos: la carga eléctrica por ejemplo. En lugar de e se emplearía su recíproco $Z_M = e^{-1}$, creándose una constante universal, que podría llamarse “constante de Millikan”, la cual se definiría como el número de las mínimas porciones en las cuales se puede descomponer la unidad 1 coulomb, es decir el número de cargas elementales por coulomb. Dicho de otra manera: $Z_M = z/Q$ donde z es el número de cargas elementales y Q la carga eléctrica del objeto considerado.

Origen

Dado que la masa y la cantidad de materia se consideraban idénticas, no existía ninguna razón para distinguir entre los dos conceptos e introducir unidades de medición diferentes. El concepto de cantidad de sustancia, introducido por los químicos, les pareció a los físicos superfluo durante mucho tiempo, contribuyendo a dicha apreciación el trato poco “estricto” que aquellos dieron al mencionado concepto, el cual utilizaban en muchas variantes, como átomo-gramo, molécula-gramo, equivalente-gramo, mol, etc. Inicialmente se consideró la unidad, que hoy se llama uniformemente mol, como una unidad de masa específica para cada sustancia, algo tan inapropiado como una unidad de longitud que dependa del objeto a medir.

En la teoría mecánica del calor y en la Física estadística el número de partículas N aparece como concepto primario y la cantidad de sustancia n aparece solo como un medio cómodo pero prescindible para describir un número muy grande. Todas estas circunstancias han contribuido a impedir un desarrollo similar al de la carga eléctrica. Como consecuencia en Física, la magnitud n desempeña solamente un rol secundario y su cuanto elemental τ se presenta, por medio de su recíproco, constante de Avogadro, como una ayuda para efectuar cálculos.

Eliminación

Es obvia la ventaja de representar estructuras similares por ecuaciones análogas. Sin embargo, el beneficio se aprecia solamente en un contexto más amplio, y no en un detalle como el discutido anteriormente. De todos modos utilizar τ en lugar de N_A sería un paso en la di-

rección correcta, que permite además al estudiante familiarizarse con el concepto de cuantización.

12.5 El potencial químico

Tema

El concepto expresado en el título no figura en los libros escolares o universitarios de Física general. Lo conoce solamente el teórico y solo se encuentra en la termodinámica o la Física estadística como componente de un cálculo complicado y abstracto.

Defectos

A pesar de su reputación, el potencial químico μ es una magnitud sencilla, más sencilla que las magnitudes vectoriales fuerza o aceleración de la mecánica. Para definirlo cuantitativamente bastan algunas pocas indicaciones que se pueden exemplificar en situaciones cotidianas. Al definirlo como sigue, faltaría solamente el origen de la escala y la unidad:

- a) A cada sustancia B se puede atribuir una magnitud μ_B , llamada potencial químico, que expresa su tendencia a transformarse, es decir, a:
 - reaccionar con otras sustancias,
 - cambiar de fase o estado de agregación,
 - cambiar su distribución en el espacio.
- b) μ_B depende de las características del medio en el cual se encuentra B (es decir, de las otras sustancias en una mezcla, de su proporción en la misma, del estado de agregación, de la temperatura, la presión, las intensidades de los campos, etc.), pero no depende de la naturaleza de la sustancia con la cual reacciona B, ni de la sustancia resultante de la reacción.
- c) Una reacción ocurre espontáneamente, si la tendencia de transformación es más alta en el estado inicial que en el final. Esto significa que:
 - Habrá reacción: $B' + B'' + \dots \rightarrow D' + D'' + \dots$, si $\mu_{B'} + \mu_{B''} + \dots > \mu_{D'} + \mu_{D''} + \dots$,
 - Habrá transformación $B(\alpha) \rightarrow B(\beta)$, si $\mu_\alpha > \mu_\beta$,
 - Habrá redistribución espacial: $B(\text{posición 1}) \rightarrow B(\text{posición 2})$, si $\mu_1 > \mu_2$.

Más figurativamente se puede decir que cada sustancia tiene cierta tendencia a transformarse de:

- una sustancia más activa a una más pasiva,
- un estado excitado a un estado más relajado,
- un lugar más animado a un lugar más tranquilo.

En una primera aproximación se puede considerar μ_B constante, es decir, independiente de la temperatura y la

presión, así como en mecánica se considera constante la longitud de una cuerda o palanca. Siendo así posible describir muchos procesos físicos de la misma manera como se hace con las reacciones químicas:

- la ionización de un átomo: $B \rightarrow B^+ + e^-$,
- la desintegración alfa: ${}^A_Z B \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} B + \alpha$,
- la emisión de un fotón: $B^* \rightarrow B + \gamma$,
- la emisión inducida: $B^* + \gamma \rightarrow B + 2\gamma$,
- la adsorción en una superficie: $\square + B \rightarrow [\square]$,
- la formación de un defecto cristalino: $[\square] \rightarrow \square + B$, etc.

El empleo del potencial químico es considerablemente más provechoso cuando se analiza su dependencia de la temperatura, la presión y la concentración, pudiéndose obtener resultados útiles al emplear aproximaciones lineales para dichas dependencias. Por medio de μ se pueden analizar y estudiar de manera unificada fenómenos tales como: ósmosis, difusión, capas de transición en semiconductores, formación de huecos en la banda de conducción, sedimentación en centrífugas, circulación de líquidos en tubos, estratificación de la atmósfera, emisión termoelectrónica, distribución de velocidades de las partículas en un gas, emisión láser, fotosíntesis, pilas de combustible, reacciones nucleares, y naturalmente todas las reacciones químicas. Se presenta entonces un “vacío” en la Física, que puede tratar de remediar con métodos relativamente sencillos [1].

Origen

Quien conoce las ventajas y posibilidades de la magnitud μ se pregunta cómo es posible que haya quedado completamente al margen del interés de los físicos; existen varias razones para ello. Un primer “error” puede atribuirse a Josiah Willard GIBBS (1839–1903), creador del concepto en 1876, al publicar sus trabajos en una revista de difícil acceso y además en un lenguaje de no fácil comprensión para los destinatarios principales en esa época, los químicos. Las físicas que hoy son llamadas molecular, atómica, nuclear y del estado sólido, en las cuales se encuentran la mayoría de las aplicaciones mencionadas, todavía no existían, de modo que los físicos no se sentían involucrados con el tema. El adjetivo “químico”, en el nombre de la magnitud, contribuía a la convicción de que no se trataba de un concepto para físicos. Además, GIBBS introdujo μ en la llamada termodinámica clásica, una teoría que los físicos respetaban pero al mismo tiempo evitaban por su dificultad conceptual. Por lo anterior, el tratado de GIBBS fue conocido demasiado tarde, cuando ya existían diversos conceptos sustitutivos.

La fuerza motriz de los flujos de sustancias: ¿densidad numérica de las partículas o potencial químico?

Eliminación

Una falla de este tipo no es fácil de remediar, sobre todo si existen varias formas sustitutivas que han “reemplazado” a la magnitud μ . Ensayos en la educación media han mostrado que es posible llenar este “vacío”. No es posible explicar cómo hacerlo en pocas palabras, pero lo que sí se puede hacer rápidamente es abandonar el prejuicio de que el potencial químico es un concepto difícil, e interesante solo para los químicos. Para ampliación al respecto se puede consultar el volumen 3 del Curso de Física de Karlsruhe (CFK) en:

[https://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/
download/thermodynamics_senior-high.pdf](https://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/download/thermodynamics_senior-high.pdf)

Referencias

- [1] G. Job a. F. Herrmann, *Chemical potential – a quantity in search of recognition*, Eur. J. Phys. 27, 2006. p.353–371.

12.6 La fuerza motriz de los flujos de sustancias: ¿densidad numérica de las partículas o potencial químico?

Tema

En Física y Química nos encontramos con corrientes de magnitudes físicas de todo tipo: corrientes eléctricas (corrientes de carga eléctrica), corrientes de masa y volumen, y también corrientes de sustancia, o mejor, corrientes de cantidad de sustancia, porque la cantidad que fluye aquí es la cantidad de sustancia n . Toda corriente puede verse afectada por una “resistencia”, se dice entonces que es disipativa. En este caso, necesita un “empuje”. En el caso eléctrico un gradiente del potencial eléctrico, en el caso del flujo de masa un gradiente del potencial gravitacional, un flujo de calor necesita un gradiente de temperatura. En el caso de la cantidad de sustancia, se introduce el gradiente de la densidad numérica de las partículas como variable motriz. El transporte propiamente dicho se denomina entonces difusión. Se dice que una sustancia difunde desde lugares de mayor a menor densidad numérica de partículas.

Defectos

En primer lugar, una trivialidad: la magnitud física de cuya densidad se trata aquí es la cantidad de sustancia. La cual es una magnitud básica del sistema internacio-

nal de unidades (SI). Si, en su lugar, se utiliza la densidad del número de partículas, es como si se utilizara la densidad del número de cargas elementales en lugar de la densidad de la carga eléctrica. Al igual que a veces puede ser interesante observar los electrones que pululan, en el caso de la difusión a veces puede ser práctico observar las partículas que pululan. Sin embargo, para la mayoría de las cuestiones prácticas, se hace bien y es más adecuado operar con la cantidad de densidad de carga o densidad de masa. La frase relacionada con la difusión se expresaría mejor así: la sustancia difunde de la densidad de la cantidad de sustancia alta a la baja.

Ahora vamos al tema en sí.

La formulación cuantitativa del enunciado es la 1^a Ley de FICK —Adolf Eugen Fick (1829–1901)—, que en notación moderna es:

$$\vec{j}_n = -D \cdot \text{grad } \rho_n \quad (12.1)$$

Donde: ρ_n es la densidad de la cantidad de sustancia y la densidad de corriente correspondiente. El factor D antes del gradiente es la constante de difusión. Para los gases ideales es independiente de la densidad de la cantidad de sustancia.

En esta descripción de la difusión, el gradiente de la densidad de la cantidad de sustancia aparece como la causa o la fuerza motriz del flujo de masa.

Se puede ver que la ecuación pertenece a una serie de varias otras ecuaciones que juegan todos un papel importante en la termodinámica de los procesos irreversibles. Describen corrientes de magnitudes físicas para las que es necesario superar una resistencia, las llamadas corrientes disipativas, es decir, corrientes con generación de entropía.

Un ejemplo bien conocido es la expresión de la densidad de corriente eléctrica \vec{j}_Q :

$$\vec{j}_Q = -\sigma \cdot \text{grad } \varphi \quad (12.2)$$

Aquí φ es el potencial eléctrico, y σ la conductividad eléctrica.

La ecuación (12.1) indica que el flujo de la cantidad de sustancia va de la densidad de la cantidad de sustancia alta a la baja, pero la ecuación (12.2) no implica necesariamente que la corriente eléctrica fluya de la densidad de carga alta a la baja. A veces puede ser así, pero no siempre.

En cuanto al flujo de cantidad de sustancia, la cantidad de sustancia es útil como medida de la fuerza motriz en ciertos casos, a saber: cuando el sistema en el que se produce el flujo es homogéneo (aparte de la inhomogeneidad de la densidad de la cantidad de sustancia) y

cuento la sustancia que difunde sigue la ecuación general de los gases. En general, sin embargo, la medida adecuada de la fuerza motriz, que también es formalmente análoga a los otros casos, es el potencial químico μ .

En lugar de la ecuación (12.1) se tiene entonces:

$$\vec{j}_n = -K \cdot \text{grad } \mu \quad (12.3)$$

En esta forma, la ecuación es siempre válida, es decir, no solo para los gases ideales y los sistemas homogéneos (siempre que, por supuesto, no exista ninguna otra fuerza motriz, es decir, que no se consideren flujos acoplados).

En el caso de un gas ideal

$$\mu = \mu_0 + RT \ln \frac{\rho_n}{\rho_{n0}}$$

y el factor K en la ecuación (12.3) es proporcional a la densidad de la cantidad de sustancia:

$$K = \frac{D \rho_n}{RT}$$

Pero si D es independiente de la densidad de la cantidad de sustancia, ¿no es la ecuación (12.1), al menos para los gases ideales, la más sencilla, la más elegante? La más sencilla, sí, pero no la más elegante.

Porque si se interpreta la ecuación como es razonable, es decir, que el gradiente representa la fuerza motriz de la corriente, la ecuación (12.1) implica una conclusión que no encaja en el contexto: para una fuerza motriz determinada, cabe esperar que la corriente sea proporcional a la densidad de la "magnitud que fluye". En el caso eléctrico (y también en el térmico) es así. Se sabe que la conductividad eléctrica de la ecuación (12.2) es proporcional a la densidad de carga de los portadores de carga en movimiento.

Origen

La primera ley de FICK, la ecuación (12.1), se publicó en 1855, es decir, antes de que GIBBS —Josiah Willard GIBBS (1839–1903)— introdujera el potencial químico en 1873. Se puede ver aquí, como en muchos otros lugares del edificio de la enseñanza de la física, que, una vez introducido un concepto, no es dable realizar cambios en el contenido de su enseñanza; pertenece a un "canon".

Eliminación

Se sugiere introducir el potencial químico, una magnitud descriptiva y universalmente útil. Entonces, la ley de Fick puede escribirse por medio de la ecuación (12.3) y, por tanto, tiene un alto grado de concordancia con la ley eléctrica correspondiente.

12.7 La fuerza motriz de los flujos de sustancias: flujos de sustancias a través de interfas

Tema

Los flujos o transportes de sustancias son procesos omnipresentes. La difusión es una clase particular de estos transportes. Rara vez se menciona en los libros de texto escolares de Física, a veces solo en relación con el diodo semiconductor. En los libros de texto de Química, se discute ampliamente.

- 1 Se aprende, por ejemplo, que: **La difusión es la mezcla independiente de dos sustancias.** Esta mezcla se produce por el constante movimiento aleatorio de las partículas de las sustancias.
- 2 O también: **Una sustancia difunde desde lugares de alta densidad numérica de partículas a lugares de menor densidad numérica.**

Defectos

Es una lástima que los transportes de sustancias se traten con tanta ligereza, sobre todo en las clases de Física. Que una sustancia (o sus partículas) pase de alta a baja concentración por sí misma solo se aplica al caso especial de los sistemas homogéneos. De hecho, también puede ocurrir lo contrario.



Fig. 12.1 El yodo pasa del agua al éter, siguiendo el gradiente del potencial químico, pero en contra del gradiente de concentración.

Un experimento sencillo que muestra un transporte de sustancia de baja a alta concentración ("densidad de número de partículas") es el siguiente (Fig. 12.1): se disuelve un poco de yodo en agua, obteniendo una solución de color marrón. Ahora se añade un poco de éter, el cual es incoloro. Si se agitan energicamente los dos líquidos y se espera un poco, estos se vuelven a separar y forman la misma estratificación que antes, es decir, el éter arriba y el agua abajo, pero con una diferencia: ahora el éter es de color marrón oscuro y el agua ma-

El equilibrio químico

rrón claro. La mayor parte del yodo esta ahora disuelto en el éter. Al principio el fenómeno ha ido a favor del gradiente de concentración del agua al éter, pero luego en su contra. En el estado final, el potencial químico es el mismo en el éter y en el agua, aunque la concentración en el éter sea mayor.

Se puede ver que el factor decisivo para el transporte de una sustancia no es el gradiente de concentración, sino el gradiente del potencial químico. Los gradientes de concentración y los gradientes del potencial químico pueden estar correlacionados en casos especiales, pero solo en casos especiales.

Conocer esta regla, que no es complicada, abre la posibilidad de explicar muchos fenómenos que de otro modo solo pueden ser enunciados.

- ¿Cómo los peces pueden respirar por las branquias? ¿Cómo es que en el agua hay oxígeno? ¿Qué hace allí en primer lugar? ¿No es consumido gradualmente por los peces? Existe el equilibrio químico entre el oxígeno del agua y el del aire: el potencial químico del oxígeno del agua es igual al del aire. Cuando los peces consumen un poco, entra nuevo oxígeno del aire. Así que siempre hay oxígeno en el agua, los peces no tienen que preocuparse.
- ¿Por qué el oxígeno de los pulmones pasa del aire a la sangre? Porque su potencial químico en el aire ($-3,88 \text{ kJ/mol}$) es mayor que en la sangre que entra en los pulmones a través de las arterias pulmonares ($-7,30 \text{ kJ/mol}$). Esto aumenta el potencial de la sangre de manera que es $-5,03 \text{ kJ/mol}$ cuando sale a las venas pulmonares.
- Se abre una botella que contenga agua mineral con gas pero que solo esté llena hasta la mitad, se sopla el CO_2 que está por encima del agua, se vuelve a cerrar la botella y se agita. Cuando se vuelve a abrir, se produce una efervescencia porque se ha acumulado una sobrepresión debido a que el CO_2 ha escapado del agua al espacio gaseoso. La concentración en la fase gaseosa es mayor que en la fase líquida. ¿Cuál fue la fuerza motriz de este transporte de sustancia? De nuevo, la diferencia del potencial químico.

La ventaja del potencial químico radica en que no solo describe la difusión dentro de las fases homogéneas, sino también el transporte de sustancias bajo condiciones arbitrarias. Y no solo eso: la dirección en la que procede una reacción química también está determinada por el potencial químico, la misma magnitud que es responsable de la difusión, de toda transición de fase y de todo transporte de sustancias a través de interfasas.

Origen

1 El potencial químico es una de las magnitudes más simples que existen. Sin embargo, ha tenido un destino difícil. En Química, porque allí uno se ha enamorado de los potenciales termodinámicos no descriptivos, es decir, de las transformadas de LEGENDRE —Adrien-Marie LEGENDRE (1752–1833)— de la función $U(n,V,S)$. Mientras que la energía en función de las magnitudes extensivas sigue siendo una función bastante viva, las demás, es decir, H, F, G y algunas otras, son tan poco intuitivas que solo se puede confiar en ellas a ciegas, es decir, se deja la solución del problema a las matemáticas y se espera que el resultado sea correcto.

2 El hecho de que el potencial químico no guste a los físicos puede tener otra razón: tiene un nombre poco adecuado. ¿Por qué un físico debería utilizar una magnitud con ese nombre?

Eliminación

Dicho de forma un tanto coloquial: al igual que se introduce el potencial eléctrico como energía por carga o la temperatura absoluta como energía por entropía, también se puede introducir el potencial químico como energía por cantidad de sustancia. Encaja perfectamente con las ideas utilizadas en otros campos.

12.8 El equilibrio químico

Tema

Se dice que el equilibrio químico debe entenderse como un equilibrio típicamente dinámico. “En una reacción química [...] la totalidad de los reactivos no se convierten en los productos. Después de un tiempo [...], las reacciones opuestas, pueden alcanzar iguales velocidades de reacción, creando un equilibrio dinámico en el que la relación entre los reactivos y productos será fija. Esto se llama equilibrio químico.” [1].

Defectos

Al considerar dos sistemas parciales A y B, existen varios tipos de equilibrio, tantos como magnitudes extensivas que puedan ser intercambiadas entre A y B, los cuales en general pueden darse en forma completamente independiente. No hay que considerar la energía ya que al intercambiar una magnitud cualquiera, la energía está siempre asociada al intercambio como segunda magnitud extensiva. A cada magnitud extensiva X le corresponde una magnitud intensiva ξ . Si dos sistemas A y B pueden intercambiar la magnitud extensiva X , este intercambio llega a su

término en cuanto las dos magnitudes intensivas correspondientes ξ_A y ξ_B han alcanzado el mismo valor, es decir, cuando $\xi_A = \xi_B$. Entonces los dos sistemas están en equilibrio respecto al intercambio de la magnitud X .

Hay que notar que no existe un equilibrio de por sí, sino solamente en referencia a una u otra magnitud extensiva, existen varios “tipos” de equilibrio. Dos sistemas capaces de intercambiar entropía se encuentran en “equilibrio térmico” si las temperaturas de los sistemas parciales son iguales, es decir, si $T_A = T_B$. Dos sistemas que pueden intercambiar carga eléctrica están en “equilibrio eléctrico” cuando $\varphi_A = \varphi_B$, es decir, cuando sus potenciales eléctricos son iguales. Dos cuerpos que pueden intercambiar momentum en un proceso de fricción lo hacen hasta que sus velocidades sean iguales $v_A = v_B$, presentándose “equilibrio de velocidad”. Si en una reacción química las cantidades de las sustancias A(1), A(2), A(3),... cambian a costa de las cantidades de B(1), B(2), B(3),..., entonces las sustancias de un lado de la ecuación de reacción están en “equilibrio químico” con las del otro lado de la misma, cuando la suma de los potenciales químicos de las sustancias A(i) es igual a la suma de los potenciales químicos de las sustancias B(j), es decir, cuando $\sum \mu_{A(i)} = \sum \mu_{B(j)}$.

Si se analiza el equilibrio químico de manera más amplia, tal como se acaba de hacer, se ve que el énfasis que se pone en el hecho de que se trate de un equilibrio dinámico es inadecuado. Se puede establecer una comparación con el equilibrio eléctrico, concretamente con un trozo de alambre de cobre, el cual se ha “descompuesto” mentalmente en dos mitades A y B. Obviamente, estos subsistemas se encuentran en equilibrio eléctrico, y se sabe que es costumbre decir que no existe corriente eléctrica entre las dos partes del alambre. Sin embargo, al describir el estado de este de manera análoga como en Química se describe el equilibrio químico, entonces no debería decirse que no existe corriente, ya que se presenta un movimiento permanente de electrones en ambas direcciones: de A a B, y de B a A. Por un alambre de cobre con una sección transversal de 1 mm^2 , a temperatura normal, “circula” una corriente eléctrica de 10^8 A de A a B, y obviamente una corriente del mismo valor de B a A. Del mismo modo no debería decirse que el aire está en reposo en el caso denominado “viento en calma”, sino que existe una corriente de masa de unos $100 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ hacia la derecha y una del mismo valor hacia la izquierda, y además una hacia arriba, otra hacia abajo, y hacia delante y atrás, es decir, en cualquier dirección arbitraria que se elija y otra igual en dirección contraria. Lo propio sería válido para el equilibrio térmico donde corrientes de fonones fluyen en ambas direcciones, o para el equilibrio de velocidades donde se presenta un transporte mi-

croscópico permanente de momentum en cualquier dirección elegida y otra igual en dirección contraria.

Entonces, puede decirse que el equilibrio químico no se distingue en este sentido de los demás equilibrios, en los cuales no se insiste en que sean “dinámicos”. Además, cuando se dice que el equilibrio químico es el resultado de dos reacciones opuestas se generan fácilmente conclusiones equivocadas. Al describir el estado sin corriente en el alambre de cobre como dos corrientes eléctricas opuestas, ¿no debería calentarse el alambre? Del mismo modo se podría preguntar el porqué las dos reacciones químicas opuestas no son disipativas.

Obviamente estos problemas son creados al mezclar argumentos de dos niveles diferentes de descripción, la microscópica y la macroscópica.

Origen

La descripción sencilla y eficaz de reacciones químicas por medio del potencial químico no ha prevalecido. Distinto de lo ocurrido en Física donde es claro describir un transporte de calor como resultado de un gradiente de temperatura o una corriente eléctrica como consecuencia de una diferencia de potencial eléctrico. La interpretación microscópica se hace más tarde en el marco de la Física atómica o del estado sólido. En Química se suele empezar con la “intrincada” cinética molecular, en la cual las magnitudes sencillas y apropiadas de la termodinámica sufren una interpretación bastante complicada.

Eliminación

Decir que al llegar al equilibrio químico la reacción ha finalizado. Esto no impide mencionar más adelante, en una descripción más sofisticada, el ir y venir incesante de la reacción, procediendo de manera similar como se hace al describir una corriente eléctrica. En un curso avanzado de Física del estado sólido se describe el estado sin corriente con la simetría de las superficies de FERMI, es decir, como resultado de corrientes que se compensan.

Referencias

- [1] Equilibrio químico. [en línea]. En: https://es.wikipedia.org/wiki/Equilibrio_químico. [consultado el 29 abril de 2022].

12.9 Celdas electroquímicas

Tema

A parte de los generadores eléctricos, las celdas electroquímicas son las fuentes más importantes de energía

Celdas electroquímicas

eléctrica, y como es conocido, históricamente fueron las primeras fuentes desarrolladas por el hombre para producir dicha energía. Entonces no debería existir duda de que su funcionamiento tiene que ser un tema de la enseñanza escolar.

Defectos

El tema mencionado no está presente en las clases de Física, ¿por qué? El profesor de Física podría opinar que: “No hay gran cosa que comprender, se trata solo de memorizar las reacciones que se producen en los electrodos para los diversos tipos de celdas, lo cual es tema típico para una clase de Química.”

La impresión que se obtiene al consultar ciertos libros escolares de Química parece dar razón a dicha opinión. Allí se abruma con tantos detalles y términos técnicos, que ni siquiera se nota que no se responde a la pregunta básica e inicial sobre el funcionamiento de la celda. La magnitud que permite explicar todas las celdas de manera común, sin entrar en detalles particulares, es decir, el potencial químico, no se menciona ni en las clases de Física, ni en las de Química.

El tema no es solo de Química, pertenece también a la Física, ya que se puede explicar con métodos típicos y propios de esta ciencia, prescindiendo de los detalles propios de las reacciones químicas, que no revisten mayor importancia para la explicación.

Es oportuno hacer una comparación con el trato que se da a otra clase de fuentes de energía eléctrica. Por ejemplo, cuando se estudian los generadores eléctricos, generalmente se analizan sus principios fundamentales por medio de un sencillo “experimento modelo”, pudiendo describir y explicar a partir de las leyes el efecto básico que se aprovecha en todos los generadores. Luego, si el tiempo lo permite, a lo sumo se esbozan algunas realizaciones y aplicaciones técnicas. Del mismo modo se debería proceder con las celdas electroquímicas, es decir, estudiar el principio general en primer plano.

Origen

Radica en el hecho de no emplear el potencial químico. La relación fundamental de GIBBS —Josiah Willard GIBBS (1839–1903)—:

$$dE = T dS - p dV + \vec{v} d\vec{p} + \mu dn + \varphi dQ,$$

muestra cuáles son las magnitudes necesarias para describir cuantitativamente transportes y transferencias de energía: las magnitudes termodinámicas temperatura T , entropía S , presión p y volumen V , las mecánicas velocidad \vec{v} y momentum \vec{p} , las “químicas”

potencial químico μ y cantidad de sustancia n , y las eléctricas potencial eléctrico φ y carga eléctrica Q . Pero ocurre que dos de dichas magnitudes no se utilizan, como si existiera un tabú hacia ellas: la entropía y el potencial químico. El precio que se paga por ello es alto: o bien es necesario emplear construcciones sustitutivas complicadas —caso de la entalpía como medida del calor (en lugar de la entropía), o la degradación de la energía (en lugar de la producción de entropía)—, o sencillamente se elimina el tema, como en el caso del principio de funcionamiento de la celda electroquímica.

Eliminación

Empleando el potencial químico μ se puede explicar la celda electroquímica analizando dos sustancias A y B, las cuales pueden reaccionar de modo que se produzca una tercera C:



Dicha reacción es impulsada por la diferencia de los potenciales químicos:

$$\Delta\mu = (\mu_A + \mu_B) - \mu_C,$$

cuyos valores se pueden encontrar en tablas.

Si reacciona una cantidad de sustancia n , entonces la energía “sobrante” será

$$\Delta E = \Delta\mu \cdot n,$$

la cual es entregada por las conexiones eléctricas de la celda. ¿Cómo funciona esta?

Si las sustancias iniciales A y B están separadas en el espacio, no pueden reaccionar, se dice entonces que la reacción tiene una resistencia infinita. Algo similar a la carencia de corriente eléctrica entre dos cuerpos que se encuentran a diferentes potenciales eléctricos, mientras no exista un conductor eléctrico entre ambos.

Si A es un gas y se conectan con un tubo los recipientes que contienen a A y B, entonces A fluye hacia B, y la reacción puede tener lugar. Sin embargo, toda la energía que se pudiera sacar del proceso se utiliza para la producción de calor, es decir, se “malgasta”. También es posible realizar otro tipo de conexiones, como la representada en la Fig. 12.2, en la cual A y B están conectadas por dos conductores en lugar de uno.

Uno de ellos, podría ser una solución salina —el llamado electrolito—, permeable o conductor solamente para iones A^+ y no para electrones e^- , el otro, un alam-

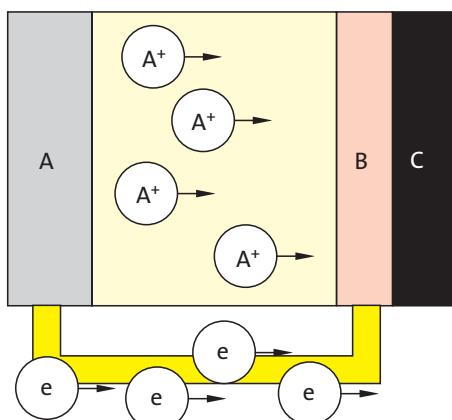


Fig. 12.2 Los iones A^+ suben la “colina” eléctrica y bajan la química.

bre de cobre por ejemplo, conductor para electrones y no para iones A^+ . Ahora, A puede alcanzar B “disociándose” en A^+ y e^- , en cuyo caso A^+ pasa a B por el primer conductor y e^- por el segundo. Llegados a B, A^+ y e^- “recombinan” y reaccionan con B de modo que se produce C. Pero también en este caso toda la energía se malgasta, sin embargo, se puede utilizar la corriente de e^- para “impulsar” algo, siendo posible así aprovechar la energía en lugar de “malgastarla”. En principio algo similar se podría hacer con los iones A^+ en lugar de los electrones, pero ello resultaría técnicamente más difícil.

La energía sacada del proceso se puede expresar por medio de $\Delta\varphi$ y Q, de la siguiente forma: $\Delta E = \Delta\varphi \cdot Q$, teniendo entonces que

$$\Delta\varphi \cdot Q = \Delta\mu \cdot n.$$

Ya que $Q = z \cdot F \cdot n$, donde z es un número entero pequeño, que depende del tipo de reacción, y F la constante de FARADAY —Michael FARADAY (1791–1867)—, es fácil obtener la diferencia de potencial eléctrico de la celda:

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta\mu}{z \cdot F}.$$

Resumiendo, se puede describir el funcionamiento de la celda diciendo que dentro de ella la carga eléctrica debe subir la “colina” del potencial eléctrico, es decir, ir en contra de su flujo natural. Para hacerlo, los portadores de carga necesitan otra “fuerza motriz”, que en la celda electroquímica es la diferencia del potencial químico. Por consiguiente, en la celda los portadores de carga suben la colina del potencial eléctrico y bajan la del potencial químico.

12.10 Electrolitos y semiconductores dopados

Tema

Nos enseñan que un electrolito es una sustancia que se descompone cuando una corriente eléctrica fluye a través de ella.

- “Un electrolito es una sustancia que se ioniza al menos parcialmente, conduciendo así la corriente eléctrica, y se descompone en el proceso.”
- “Las soluciones que, como el ácido clorhídrico, conducen la electricidad y se descomponen así, se llaman electrolitos.”
- “Hay líquidos conductores y no conductores, es decir, disociados y no disociados. Los conductores se llaman electrolitos. Se descomponen por la corriente que los atraviesa.”

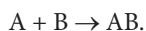
Defectos

Al realizar la descomposición electrolítica de una sustancia, que esta presente como solución o como fundido, fluye una corriente eléctrica a través de la sustancia. La sustancia se llama electrolito y el nombre tiene sentido en este caso ($\lambdaύσις$ lysis “solución, disolución, terminación”).

Por otra parte, es inadecuado llamar electrolito al medio entre los electrodos de una celda galvánica, apelando al hecho de que la sustancia se descompone, porque aquí no se pretende descomponer una sustancia. Su papel es más bien el de un “conductor selectivo”: debe ser conductor para ciertos iones, y no debe serlo para los electrones. Esta desafortunada denominación es probablemente una de las razones por las que casi ningún estudiante de física entiende el funcionamiento de la celda galvánica.

Aquí en pocas palabras cómo funciona la celda galvánica:

Se utiliza el gradiente del potencial químico de una reacción con dos reactivos A y B para producir una diferencia de potencial eléctrico. Se escribe la reacción



La celda está construida de tal manera que la reacción no puede tener lugar al principio porque las sustancias A y B están separadas espacialmente entre sí. A puede llegar a B, pero solo dividiéndose en iones A^+ positivos y electrones.



y A^+ y e^- llegan a B por vías distintas. Los iones A^+ van hacia B a través del conductor de iones (el “electrolito”).

Contenidos en la enseñanza de la Química

Los electrones van hacia B a través de la parte exterior del circuito, es decir, normalmente a través de un cable de cobre. El consumidor de energía eléctrica se encuentra en este conductor exterior.

Así que lo que importa es que la sustancia llamada electrolito sea conductora para los iones A^+ y no conductora para los electrones.

El mismo mecanismo se aprovecha en las celdas solares: una parte del semiconductor es conductor solo para los electrones, pero no para los huecos, la otra solo para los huecos pero no para los electrones. Los electrones y huecos generados por la luz en alta concentración (con alto potencial químico) tienen tendencia a abandonar el lugar de su generación. Debido a la conductividad selectiva, los electrones solo pueden escapar a través del conductor n, los huecos solo a través del conductor p. También aquí se aprovecha la conductividad selectiva de dos sustancias. Aunque el papel que desempeñan los materiales n y p es el mismo que el de la celda galvánica, aquí no se habla de electrolitos.

Origen

Al igual que otras especialidades, la electroquímica ha desarrollado una jerga que es útil para los expertos, pero que puede provocar dificultades cuando los principiantes aprenden la materia.

Eliminación

Introducir la sustancia entre los electrodos como conductora para los iones y no conductora para los electrones, al igual que el alambre de cobre de la parte exterior del circuito es conductor para los electrones y no conductor para los iones. En consecuencia, se caracteriza un semiconductor n como una sustancia que es conductora para los electrones y aislante para los huecos y el conductor p es conductor para los huecos y aislante para los electrones. La electrólisis no se menciona en este contexto, y es mejor evitar el término electrolito.

12.11 Contenidos en la enseñanza de la Química

Tema

En las clases de Química se introducen los términos reacción ácido-base y reacción redox.

Defectos

En una reacción ácido-base un protón cambia de posición, en una reacción redox lo hace el electrón. Los hechos son simples y se pueden explicar fácilmente; sin

embargo, en este contexto se introducen toda una serie de términos técnicos que hacen que el tema parezca más complejo de lo que es. A continuación, una selección de un libro de texto para la escuela secundaria:

Donantes de protones, aceptores de protones, ácido de BRÖNSTED, base de BRÖNSTED, protolisis, par ácido-base, anfolito, reacción de transferencia de electrones, oxidación, reducción, agente reductor, agente oxidante, donante de electrones, aceptor de electrones, principio donante-aceptor, par redox, número de oxidación.

Se ve que la concentración de términos técnicos es muy alta.

Origen

Normalmente, en estos artículos se critica el estado de la enseñanza de la Física, y se hace desde la experiencia en la docencia de esta. En el proceso se ha mostrado que la física es una asignatura escolar especialmente conservadora, en contraste con la imagen que se presenta al mundo exterior: los físicos son de mente abierta, siempre en busca de nuevos territorios, de una “nueva física”, “más allá” de la vieja física. Pero se ve que los físicos solo están abiertos a lo nuevo en las llamadas “fronteras del conocimiento”. En cambio, lo antiguo, la tierra conquistada, se defiende contra el cambio. Una vez alcanzado el conocimiento se ritualiza, se convierte en dogma, y su observancia es vigilada por las instituciones que se consideran responsables. Esto es algo que ya conocemos de otros ámbitos de la sociedad.

Estos escritos se han concentrado en la Física, pues es lo que mejor conocemos, pero siempre con la sospecha de que la situación no era mejor en la Química. Una pista fue la observación de MERZYN [1] respecto a que el número de términos técnicos, al igual que en la Física, es mayor que el número de palabras de vocabulario que los estudiantes aprenden en las clases de lenguas extranjeras.

Así que pedimos a los colegas químicos nos perdonen por esta intromisión; no somos químicos, pero a veces un poco de distancia resulta bastante útil. Los invitamos a que echen un vistazo a la Física con la misma distancia, estamos seguros de que también podemos aprender algo de ustedes.

Tenemos la impresión de que el “conservadurismo” está especialmente acentuado en la enseñanza de la Física y la Química, mucho más, por ejemplo, que en la enseñanza de lenguas extranjeras. Tal vez la educación religiosa pueda rivalizar en esto con la Física y la Química.

Eliminación

Sugerimos que en el comité del plan de estudios se incluya a un no especialista. Si usted es autor de un libro

de texto, se recomienda que entregue el manuscrito a un familiar o amigo no especialista en el tema, para que lo lea antes de ser enviado a la editorial.

Referencias

- [1] G. Merzyn, *Fachbestimmte Lernwege zur Förderung der Sprachkompetenz* [en línea]
https://www.schulentwicklung.nrw.de/cms/upload/sprachsensibler_FU/Fachbestimmte_Lernwege_zur_Foerderung_der_Sprachkompetenz_Naturwissenschaften_Mercyn.pdf
[consultado el 29 abril de 2022].