



Le Cours de Physique de Karlsruhe
pour le niveau lycée

**Physique atomique,
physique nucléaire,
physique des particules**

Le Cours de Physique de Karlsruhe

Un manuel pour le niveau lycée

■ Electromagnétisme

■ Thermodynamique

■ Oscillations, ondes, données

■ Mécanique

■ Physique atomique, physique nucléaire, physique des particules

Friedrich Herrmann

Professeur à l'Institut de Technologie de Karlsruhe

Édition 2022

Auteur : Friedrich Herrmann, Co-auteur : Holger Hauptmann

Traduction de l'allemand à l'anglais : Kathrin Schilling

Traduction de l'anglais au français : Antoine Archer, Jean-François Combes, Jean-Pierre Fanton, Muriel Lelong, 2022

Figures : F. Herrmann, H. Schwarze

Figures des répartitions de densité: P. Bronner, S. Kretz

Mise en page : H. Schwarze



Sous licence Creative Commons

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>

SOMMAIRE

1 Les modèles en physique

1.1 La description d'un processus avec un modèle	5	1.3 Les limites des modèles	6
1.2 La description d'un processus au moyen d'une théorie	6		

2 Photons et électrons

2.1 Transports avec les ondes et transports avec la matière	8	2.5 Interférence et statistiques	11
2.2 Réactions photochimiques	8	2.6 La taille des photons	11
2.3 Des portions de lumière au fil du temps	9	2.7 Énergie et quantité de mouvement des photons	12
2.4 Portions de lumière dans l'espace	10	2.8 Electrons	14

3 La théorie des quanta

3.1 Les données entrent et les données sortent	16	3.3 La fonction d'onde	17
3.2 Une théorie en deux étapes	16		

4 L'atome – états stationnaires

4.1 La densité de l'électronium	18	4.4 L'énergie de l'atome en état stationnaire – le diagramme des niveaux d'énergie	25
4.2 Taille et densité de l'enveloppe atomique	20	4.5 La densité de courant de l'électronium	26
4.3 L'excitation des atomes	21	4.6 Moment cinétique et magnétisme des atomes	26

5 Transitions dans l'atome – états non stationnaires

5.1 Transitions entre états stationnaires	28	5.3 Transitions rapides et lentes	29
5.2 Le processus d'émission	29		

6 Atomes à plusieurs électrons

6.1 Orbitales des électrons dans des atomes plus gros	33	6.3 A nouveau la fonction d'onde	35
6.2 Le spin	34		

7 Spectres

7.1 L'excitation des atomes par de la lumière	36	7.4 Les spectres des gaz	39
7.2 L'excitation des atomes par des électrons	38	7.5 Pourquoi les flammes brillent-elles ?	40
7.3 Les gaz comme sources de lumière	38		

8 Matière solide

8.1 La disposition des atomes dans les gaz, les liquides et les matières solides	42	8.5 Lorsque la lumière frappe les non-métaux	46
8.2 La répartition de l'électronium dans les solides	43	8.6 Les substances solides comme sources de lumière	48
8.3 L'échelle d'énergie des substances solides	44	8.7 Comment les substances solides conduisent l'électricité	48
8.4 Quand la lumière frappe les métaux	45	8.8 Comment rendre les non-métaux conducteurs ?	

9 Diode et transistor

9.1 La diode à semi-conducteur	51	9.3 Le transistor à effet de champ	54
9.2 La diode à semi-conducteur comme redresseur, comme source de lumière et comme cellule solaire	52		

10 Physique nucléaire

10.1 La structure des noyaux atomiques	56	10.9 Rayonnement nucléaire	69
10.2 Eléments, nucléides, isotopes	58	10.10 Le taux de conversion des réactions nucléaires	71
10.3 L'excitation des noyaux	61	10.11 La demi-vie	72
10.4 L'énergie de séparation	62	10.12 Réactions nucléaires dans le soleil	73
10.5 Grandeurs conservées	63	10.13 Pourquoi il fait si chaud à l'intérieur du soleil	75
10.6 Particules et antiparticules	64	10.14 La réaction particulière du soleil sur un apport d'entropie	75
10.7 Bilan des charges	65	10.15 Pourquoi le soleil n'explose pas	76
10.8 La direction d'une réaction	66	10.16 Le réacteur nucléaire	77

– 11 Physique des particules

11.1 Rayonnement – diffusion élastique et inélastique	82	11.4 Diffusion inélastique – réactions de particules	84
11.2 Diffusion élastique – « voir » avec différents types de rayonnement	82	11.5 Les anciennes et les nouvelles particules	85
11.3 La taille des particules	84		

– 12 Principes d'organisation en physique

12.1 Le « principe du Lego »	89	12.3 Le très petit et le très grand	91
12.2 Théories	90	12.4 Les particules élémentaires et la Théorie du Tout	91

– Annexe

Table des énergies de séparation	92
----------------------------------	----

1 LES MODÈLES EN PHYSIQUE

Deux méthodes peuvent être utilisées pour décrire un phénomène physique. Soit on utilise un modèle, soit on décrit le phénomène à l'aide d'une théorie. Nous allons expliquer les deux méthodes à l'aide d'un exemple simple : un circuit électrique, Fig. 1.1a.

1.1 La description d'un processus avec un modèle

L'objet de notre analyse est un processus physique X qui n'est pas directement visible et qui est d'abord perçu comme peu clair ou abstrait. Cependant, X est similaire à un autre processus Y que tout le monde connaît. Pour comprendre le processus X et l'expliquer à quelqu'un d'autre, nous pouvons tirer parti de cette similarité.

Revenons à notre exemple de la Fig. 1.1a. Nous aimerions expliquer ce qui se passe ici à quelqu'un qui n'a absolument aucune idée des processus électriques. Nous pourrions aussi dire : imaginez que quelque chose circule dans les fils. Nous l'appelons électricité. C'est comme de l'eau qui coule dans un tuyau. L'élément de gauche, que nous appelons batterie, peut être imaginé comme une pompe qui fait circuler le courant électrique, un peu comme une pompe à eau fait circuler de l'eau. L'élément de droite est appelé « résistance ». On peut imaginer qu'elle entrave l'écoulement de l'eau, Fig. 1.1b. Il existe d'autres similarités, mais nous souhaitons arrêter la comparaison ici.

Si un processus est décrit comme nous le faisons à ce stade, nous pouvons dire qu'un *modèle* est utilisé. Le processus X à décrire est le circuit électrique de la Fig. 1.1a, le modèle Y est le circuit hydraulique de la Fig. 1.1b. Le modèle Y se comporte à bien des égards comme le système X. De nombreuses expériences faites avec Y peuvent être transférées à X.

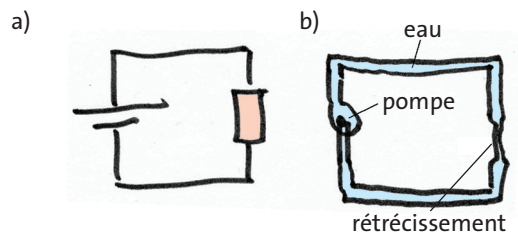


Fig. 1.1 (a) En expérimentant avec les éléments batterie, résistance, câble, etc., nous pouvons conclure que ce qui se passe ici est similaire à ce qui se passe dans le circuit hydraulique (b).

Un processus physique pour lequel nous n'avons pas d'observation directe peut être décrit au moyen d'un modèle. Le modèle est un système qui nous est familier.

Bien entendu, le système original X et le modèle Y ne sont pas équivalents à tous égards l'un à l'autre. Cela est évident si l'on compare les Fig. 1.1a et Fig. 1.1b entre elles. Cela signifie également que nous ne pouvons pas dire à partir d'un modèle s'il est faux ou juste. Un modèle est censé être pratique. Il suffit que Y et X soient équivalents par rapport aux propriétés que nous examinons. Par conséquent, le fait que les fils soient pleins alors que les tuyaux du système modèle sont creux ne constitue pas un problème. De même, cela ne nous dérange pas qu'il existe de l'électricité négative alors que la quantité d'eau du système modèle est toujours positive.

Les modèles ne sont ni bons ni mauvais, mais seulement plus ou moins pratiques.

Exercice

1. Citez d'autres exemples physiques de l'utilisation d'un modèle. Citez des exemples tirés d'autres sciences.

1.2 La description d'un processus au moyen d'une théorie

La physique nous dit que le courant électrique dans la résistance de la Fig. 1.1a est doublé si la tension de la batterie est doublée. De telles relations quantitatives sont exprimées par des formules. Elles sont donc décrites à l'aide d'outils mathématiques. Il est possible de vérifier au moyen d'expériences si une formule est correcte, c'est-à-dire si elle décrit correctement la nature. Vous pouvez tirer parti de votre utilisation habile des formules pour faire des prévisions correctes. En physique, une formule est le cas le plus simple d'une *théorie*. Toutefois, nous faisons généralement référence à une théorie pour décrire un système plus vaste de formules et d'équations dites différentielles. Dans d'autres sciences, le terme « théorie » est utilisé de manière légèrement différente.

Dans le langage courant, le mot « théorie » est souvent utilisé comme synonyme de « hypothèse », ou nous disons que quelque chose est seulement « théorique », ce qui signifie que la situation réelle est différente. Comme nous l'avons vu, le sens physique du mot « théorie » est différent. Il existe des théories physiques qui s'appliquent bien à la nature. Et il existe d'autres théories qui reflètent mal ou pas du tout la nature. Bien entendu, une théorie inappropriée ne sera plus utilisée si les gens prennent conscience de son caractère inapproprié. Enfin, il existe des théories dont l'utilité n'est pas encore connue. Un objectif important de la science est de créer de nouvelles théories et de vérifier dans quelle mesure elles décrivent bien la nature.

Une théorie décrit un processus physique de manière mathématique, c'est-à-dire au moyen d'équations.

Exercice

1. Citez des théories que vous connaissez ou dont vous avez entendu parler, aussi bien en physique que dans d'autres sciences.

1.3 Les limites des modèles

Comme nous l'avons expliqué, nous avons deux méthodes pour décrire un système physique : avec un modèle ou avec une théorie. Ces deux méthodes sont fondamentalement assez semblables. Dans les deux

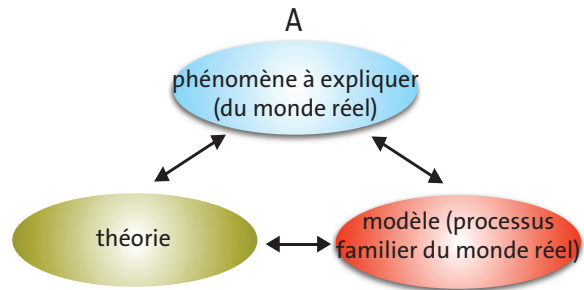


Fig. 1.2 Trois zones ont des structures similaires : A : le phénomène physique à décrire ; B : la théorie qui est utilisée pour décrire le phénomène ; C : le modèle qui est utilisé pour rendre le phénomène plausible.

cas, nous tirons parti du fait que la nature se comporte comme quelque chose que nous connaissons déjà : soit un autre système familier de la vie réelle, soit quelque chose du monde abstrait des mathématiques (Fig. 1.2).

En physique, seule la deuxième méthode permet de faire des déclarations exactes : la description mathématique et la vérification expérimentale des lois mathématiques. Cependant, dans la manière dont vous avez appris à connaître la physique jusqu'à présent, c'est la première méthode qui a dominé. Vous avez probablement eu l'impression d'avoir compris quelque chose chaque fois que vous avez vu que quelque chose était semblable à quelque chose que vous connaissiez déjà.

Malheureusement, la première méthode, c'est-à-dire la méthode du modèle, ne fonctionne pas toujours. Nous ne pouvons pas tout décrire comme « étant juste comme ça et ce que vous connaissez déjà », car parfois un phénomène physique est différent de tout ce que nous connaissons dans la vie quotidienne. Et c'est particulièrement le cas pour les sujets que nous allons aborder dans la suite.

Vous verrez que les atomes se comportent parfois d'une manière que nous ne connaissons tout simplement pas à partir des choses qui nous entourent. Cela peut même aller jusqu'à nous faire croire que les atomes auraient un comportement incohérent. Le point intéressant est que les atomes peuvent effectivement être décrits mathématiquement. Par conséquent, leur comportement ne peut pas non plus être incohérent. Seulement, il n'est pas intuitif ; nous ne connaissons aucun modèle, c'est-à-dire aucun système familier, qui se comporte comme l'atome.

Mais heureusement, cela ne signifie pas que nous devons nous passer complètement de modèles, c'est-à-dire de « les choses étant comme... ». Nous continuerons à utiliser des modèles, mais avec des restrictions.

Par exemple : nous dirons que vous pouvez imaginer que le nuage électronique d'un atome est comme une substance dont on ne peut extraire que des portions d'une quantité très spécifique. Même si vous n'avez jamais vu une telle matière, vous n'aurez aucun mal à l'imaginer.

Parfois, cela peut devenir plus difficile. Prenons un atome qui possède plus d'un électron, par exemple deux, trois ou trente. Vous devez alors imaginer le nuage électronique comme une substance située dans un espace à plus de trois dimensions. Le nuage électronique de l'atome d'hélium, par exemple, serait une substance située dans un espace à six dimensions. Nos expériences de la vie quotidienne, cependant, sont toutes liées à un espace tridimensionnel. Nous pouvons difficilement imaginer un espace à six, douze ou trente dimensions.

En résumé, dans ce qui suit, nous utiliserons également des images et des modèles, c'est-à-dire que nous dirons « c'est comme... », mais nous devons toujours garder à l'esprit de ne pas prendre les modèles trop au sérieux. La description mathématique est le seul moyen qui fonctionne et qui caractérise la physique. Le texte entre les formules ne s'applique qu'avec des réserves. Nous y ferons parfois référence dans la suite du texte pour vous le rappeler, mais nous ne le ferons pas dans chaque phrase. Vous devez donc lire les textes avec la bonne attitude dès le début. Lorsqu'on lit que « l'atome est un petit objet ayant la structure suivante... », cela signifie seulement que dans le contexte dont nous parlons actuellement, vous pouvez imaginer l'atome comme un petit corps. Mais vous devez vous attendre à ce que, plus tard, nous disions que « maintenant, les atomes se comportent très différemment des petits corps. Vous devriez plutôt les imaginer comme une onde sur un porteur d'onde imaginaire ».

Pour certains processus physiques, nous disposons d'une théorie fonctionnelle mais pas de modèle approprié. De tels processus ne nous semblent alors pas intuitifs.

Le fait qu'il n'existe pas de modèle pour certains phénomènes physiques implique également que certaines questions, qui semblent logiques, ne peuvent être posées.

Une question peut être inutile même si elle semble logique. ■

2 PHOTONS ET ÉLECTRONS

2.1 Transports avec les ondes et transports avec la matière

Nous définissons un « transport » comme un processus dans lequel quelque chose se déplace d'un endroit à un autre : l'eau du Rhin qui coule de Karlsruhe à Mannheim, la charge électrique qui circule dans un fil d'un interrupteur à une lampe, une fusée qui quitte la Terre pour se mettre en orbite, la lumière qui se déplace du soleil vers la Terre, les ondes radio qui se déplacent d'un téléphone portable à une antenne proche, le son qui se déplace d'un haut-parleur jusqu'à vos oreilles, etc.

Ces transports, ainsi que tous les autres auxquels vous pourriez penser, peuvent être divisés en deux catégories. Dans la première, de la matière se déplace dans un espace : de l'eau, des électrons, une fusée... dans le cas de l'autre catégorie, une onde se déplace à travers n'importe quel support d'onde : la lumière, le son...

Par la suite, nous allons traiter les deux types de transport à maintes reprises. Pour les analyser plus en détail, nous nous pencherons sur un exemple représentatif de chaque catégorie. Comme exemple de matière, nous utiliserons les électrons ; et comme exemple d'ondes, la lumière.

Nous comparons donc un courant d'électrons (par exemple dans le tube d'un vieux téléviseur) à un courant de lumière (provenant d'une lampe torche ou d'un laser).

Tout d'abord, les aspects communs : tous deux transportent de l'énergie. En outre, tous deux transportent de la quantité de mouvement et de l'entropie, même si cela n'est pas évident.

Mais il semble aussi y avoir des différences essentielles :

- Le faisceau d'électrons est constitué de petites portions ou de petits corps que l'on appelle des électrons. On peut aussi dire que la matière est *quantifiée*. Le faisceau lumineux, en revanche, est une onde, c'est-à-dire un processus apparemment régulier ou « continu ».
- Le faisceau lumineux permet de créer des motifs d'interférence : si deux parties du faisceau lumineux se chevauchent, à certains endroits, les ondes seront renforcées et à d'autres, elles seront atténuées, voire éliminées. Cela prouve que la lumière est un processus ondulatoire. Jusqu'à présent, nous ne le savions pas pour la matière.

D'où :

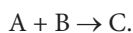
La matière est quantifiée, la lumière présente des interférences.

Il semble qu'un faisceau lumineux et un faisceau d'électrons soient deux transports complètement différents. Cette conclusion pourrait être généralisée pour les autres exemples représentatifs des ondes et de la matière. Le point intéressant de cette conclusion est qu'elle est fautive. Nous verrons que les deux caractéristiques, à savoir l'aspect semblable à des portions et la propriété d'interférence, ne sont pas valables seulement pour une classe de substance mais aussi pour l'autre : la lumière est également constituée de petites portions, et les électrons peuvent également être utilisés pour créer des motifs d'interférence.

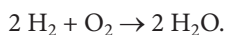
Tout comme la matière, la lumière aussi est quantifiée. Tout comme la lumière, la matière aussi présente des interférences.

2.2 Réactions photochimiques

Certaines réactions chimiques font intervenir la lumière comme réactif. Elles sont appelées *réactions photochimiques* (du mot grec « phos » qui signifie lumière). Les réactions sont décrites au moyen d'équations chimiques. Si une substance A réagit avec une substance B pour former une substance C, nous pouvons écrire



Un exemple particulier est la réaction de l'hydrogène et de l'oxygène pour donner de l'eau, c'est-à-dire



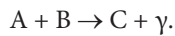
Dans ce processus, les substances hydrogène et oxygène disparaissent et de l'eau est formée.

Mais il existe aussi des réactions dans lesquelles de la lumière apparaît ou disparaît à côté d'autres substances. Nous allons en montrer quelques exemples dans ce qui suit.

Bâtons lumineux

Les bâtons lumineux sont disponibles dans les magasins d'accessoires automobiles. Un bâton lumineux se compose d'un tube en plastique transparent rempli de deux fluides A et B, qui sont d'abord séparés l'un de l'autre. Si le tube en plastique est légèrement plié, la paroi de séparation entre les deux fluides se brise. Ils vont se mélanger et commencer à réagir l'un avec l'autre. Au cours de la réaction, de la lumière se forme en plus d'un fluide C. Ainsi, un bâton lumineux est une source de lumière qui fonctionne sans pile ni prise électrique.

La lettre grecque γ (gamma) est utilisée comme symbole de la lumière dans les équations chimiques. L'équation de la réaction dans un bâton lumineux est donc la suivante

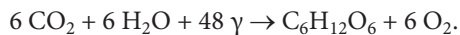


Ici, nous n'avons pas indiqué l'expression chimique des trois substances A, B et C. Ce qui compte, c'est uniquement le fait que la lumière se comporte dans ce contexte comme une substance habituelle.

Photosynthèse

La photosynthèse chez les plantes est une réaction photochimique qui est très importante pour la vie sur Terre. Dans cette réaction, les plantes produisent du glucose ($C_6H_{12}O_6$) et de l'oxygène (O_2) à partir de dioxyde de carbone (CO_2), d'eau (H_2O) et de lumière. Le glucose est utilisé par les plantes comme nutriment pour leurs cellules et comme matériau de stockage d'énergie.

La photosynthèse est une réaction complexe comportant de nombreuses étapes intermédiaires. Si l'on saute les étapes intermédiaires, c'est-à-dire si l'on ne considère que les substances initiales et finales, on peut établir l'équation chimique suivante



À partir des exemples discutés, nous pouvons conclure :

Pour décrire les réactions photochimiques, la lumière peut être traitée comme une substance.

2.3 Des portions de lumière au fil du temps

Toute substance est composée de portions minuscules, les atomes ou les molécules. Si la lumière se comporte

comme une substance ordinaire, nous pouvons nous attendre à ce qu'il existe également de minuscules portions de lumière, des sortes d'« atomes de lumière ». Dans ce qui suit, nous allons décrire une expérience qui confirme cette hypothèse.

Les « atomes » de lumière ne peuvent pas être perçus à l'œil nu, tout comme les atomes d'autres subs-

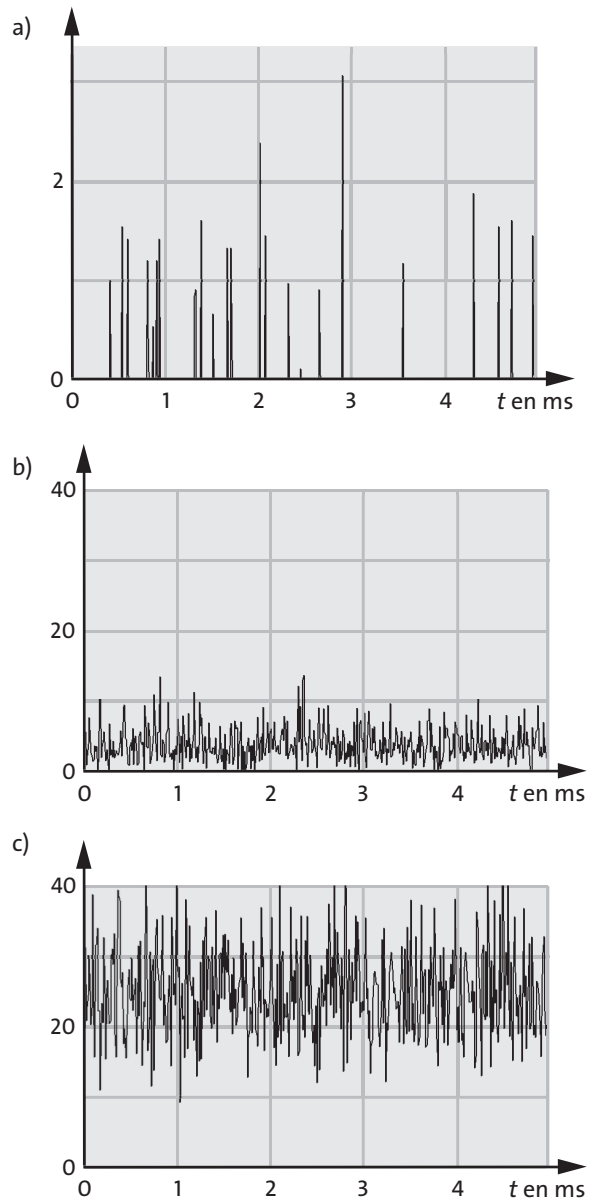


Fig. 2.1 La lumière arrive par touches consécutives irrégulières. Dans l'image supérieure (a), l'intensité lumineuse est très faible ; dans l'image centrale (b), elle est légèrement plus élevée et dans l'image inférieure (c), elle est encore plus élevée.

Portions de lumière dans l'espace

tances. Ce dont nous avons besoin, c'est d'un instrument très sensible de mesure de la lumière, appelé *photomultiplicateur*. Lorsque le capteur du photomultiplicateur est exposé à la lumière, il réagit à la lumière incidente, c'est-à-dire que la lumière est absorbée. Nous pouvons lire sur un dispositif indicateur la quantité absorbée par le photomultiplicateur par unité de temps.

Nous souhaitons analyser la lumière d'une ampoule ordinaire. Si nous laissons cette lumière tomber directement sur le photomultiplicateur, ce dernier sera immédiatement détruit. Ce serait comme peser un éléphant avec un pèse-lettres. Nous devons plutôt atténuer la lumière de l'ampoule avant qu'elle ne tombe sur le photomultiplicateur : au moyen d'un filtre gris neutre qui n'est traversé que par une très petite quantité de lumière.

L'ampoule est reliée à une alimentation électrique réglable. Nous augmentons alors lentement le courant électrique afin que la lampe commence à briller légèrement. Elle émet juste assez de lumière pour être visible par nos yeux. Bien que le photomultiplicateur soit situé derrière le filtre gris, il réagit déjà à la lumière de l'ampoule qui brille légèrement : l'écran du photomultiplicateur commence à réagir.

La Fig. 2.1a montre comment l'afficheur réagit pendant une période de 5 ms.

De manière surprenante, la déviation de l'écran n'est pas constante dans le temps, mais des coups ou des impulsions se produisent à des intervalles de temps irréguliers. Entre les coups, la déviation est nulle. L'ampoule n'est donc pas allumée en permanence, mais elle envoie de petites portions de lumière à des intervalles irréguliers mais très courts. Ces portions de lumière sont appelés *photons*. Si l'intensité de la lumière augmente, les impulsions photoniques se produiront dans des intervalles de temps de plus en plus courts et, finalement, le compteur ne sera plus en mesure de les détecter individuellement. Bien entendu, nous ne pourrions pas non plus les distinguer avec nos yeux.

La lumière est émise et absorbée par portions, appelées photons.

2.4 Portions de lumière dans l'espace

Dans un appareil photo numérique, l'image est créée sur la *puce CCD*. Cette puce est constituée d'un champ de plusieurs millions de capteurs sensibles à la

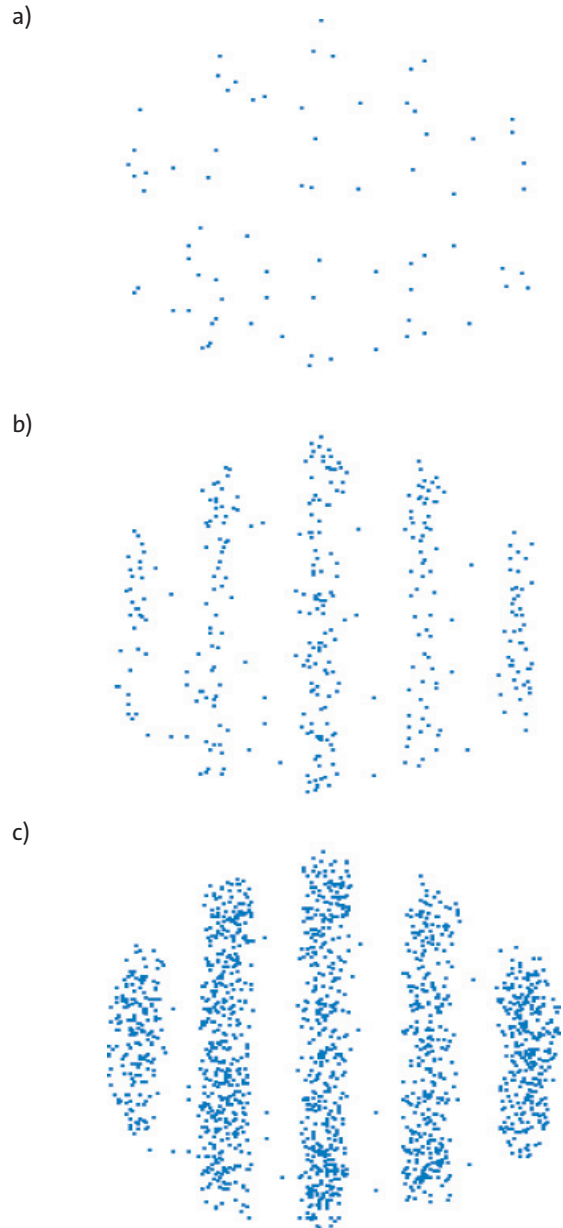


Fig. 2.2 Un motif d'interférence se forme avec un temps d'exposition croissant à la lumière.

lumière, les pixels. Si une lumière de très faible intensité tombe sur la puce de sorte que les photons arrivent sur la puce de manière bien séparée comme lors de l'expérience précédente, on va faire une observation remarquable : un photon ne sera enregistré que par un seul pixel, c'est-à-dire que le photon sera absorbé par un seul pixel et ne s'étalera pas sur plusieurs pixels.

Un photon n'est absorbé que par un seul pixel d'une puce CCD.

2.5 Interférence et statistiques

Plus tôt, vous avez pris connaissance d'une expérience dans laquelle une lumière laser arrive sur deux fentes adjacentes dans un obstacle. La lumière est « diffractée » au niveau des fentes, de sorte que les ondes lumineuses se croisent derrière les fentes. Si une feuille de papier est placée sur le chemin de la lumière derrière les fentes, nous verrons une figure d'interférence : une succession de bandes claires et sombres. Si l'une des fentes est maintenue fermée, la figure d'interférence disparaît.

Nous aimerions maintenant remplacer le papier par un appareil photo numérique. La puce CCD enregistre également la figure d'interférence. Auparavant, nous avons interprété ce phénomène comme suit : au niveau des bandes sombres, les ondes lumineuses s'éteignent mutuellement ; au niveau des bandes claires, elles s'intensifient mutuellement. Cependant, nous voyons ici que cela ne peut pas être aussi simple.

Un photon est absorbé par un pixel. Par conséquent, un seul photon ne peut certainement pas produire un motif d'interférence, même s'il fait partie de deux faisceaux laser qui se croisent. Il ne fait que contribuer à la figure d'interférence globale. Le motif d'interférence ne peut se former que si de nombreux photons tombent sur la puce. Ils se répartissent *statistiquement*, c'est-à-dire de manière à ce que la figure d'interférence soit formée comme un résultat global. La Fig. 2.2 montre comment la figure d'interférence se forme progressivement ($a \rightarrow b \rightarrow c$).

Un seul photon ne peut pas créer un motif d'interférence sur une puce CCD. Les photons se répartissent statistiquement sur les pixels, ce qui crée un motif d'interférence.

2.6 La taille des photons

La question de la taille des photons est l'une des questions pour lesquelles nous vous avons mis en garde : c'est une question à laquelle il n'y a pas de réponse physique claire, c'est-à-dire une question « inutile ». Pourtant, les photons se comportent dans certaines circonstances comme s'ils avaient une taille et une

forme bien définies. Et c'est ce que nous pouvons tirer des expériences décrites précédemment.

Nous commencerons par l'appareil photo numérique. Comme un photon est absorbé par un seul pixel, il doit être très petit, c'est-à-dire pas plus grand qu'un pixel. La longueur d'un côté d'un pixel d'une puce CCD est d'environ $5 \mu\text{m}$. Par conséquent, nous concluons qu'un photon a un diamètre – transversal à sa direction de mouvement – qui est inférieur à $5 \mu\text{m}$.

$$d < 5 \mu\text{m}.$$

Nous examinons maintenant l'expérience d'interférence. L'image d'interférence est formée progressivement par les photons qui tombent sur la puce CCD un par un. Cela signifie que chaque photon « doit savoir » avec quel pixel il réagit, au moins sur une moyenne statistique. Mais cela signifie que chaque photon est passé par les deux trous des obstacles, car l'interférence ne peut se produire que si une onde passe par les deux trous. Ou en d'autres termes : transversalement à sa direction de déplacement, un photon doit être au moins aussi grand que l'espace entre les deux trous des obstacles, ce qui représente environ 1 mm , soit

$$d > 1 \text{ mm}.$$

Comment concilier ces deux affirmations ? Bien sûr, elles ne peuvent pas s'appliquer en même temps. Aucun objet ne peut être en même temps plus petit que $5 \mu\text{m}$ et plus grand que 1 mm . Nous en concluons que le photon peut changer de taille et aussi de forme. Nous pouvons imaginer qu'il rétrécit d'un facteur au moins 200 ($1 \text{ mm} / 5 \mu\text{m} = 200$) pendant le processus d'absorption.

Par conséquent, nous disposons déjà d'un procédé pour déterminer le diamètre des photons. Nous augmentons constamment la distance entre les interstices des obstacles. À un moment donné, la figure d'interférence disparaît. Nous savons que l'espace entre les trous aura alors dépassé le diamètre des photons.

La longueur des photons peut également être déterminée de manière similaire. En résumé :

Les photons n'ont pas une forme uniforme.

La forme et la taille dépendent de la source lumineuse mais changent encore en chemin après avoir quitté la source lumineuse.

Par exemple, les photons du laser de l'équipement scolaire ont une longueur d'environ 10 cm et le même diamètre que le faisceau laser lui-même, c'est-à-dire

Énergie et quantité de mouvement des photons

environ 5 mm. Leur forme et leur taille sont donc similaires à celles d'un crayon. Il existe des lasers dont les photons sont beaucoup plus longs. Certains lasers émettent des photons de plusieurs kilomètres de long.

Les photons de la lumière solaire sont beaucoup plus courts. Leur longueur a approximativement la même valeur que leur longueur d'onde, c'est-à-dire environ 600 nm. Leur diamètre est d'environ 0,06 mm (mais seulement si la lumière du soleil n'est pas dispersée par des nuages ou du brouillard – sinon, il sera encore plus petit). Cela correspond approximativement à 100 fois la longueur. Par conséquent, les photons de la lumière solaire ont une forme similaire à celle des crêpes.

Vous avez peut-être remarqué que ce que nous avons appelé ici longueur et diamètre des photons est équivalent à la longueur de cohérence et à la largeur de cohérence de la lumière.

Exercice

- Comment la longueur d'un photon peut-elle être déterminée expérimentalement ?

2.7 Énergie et quantité de mouvement des photons

Comme la lumière transporte de l'énergie, chaque photon transporte également de l'énergie. La quantité d'énergie transportée n'est toutefois pas la même pour tous les photons. Elle est liée à la fréquence de la lumière correspondante d'une manière simple :

$$E_{\text{photon}} \sim f.$$

Le facteur de proportionnalité est appelé *constante de Planck* h (du nom de Max Planck qui a découvert les photons). Elle a la valeur suivante

$$h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}.$$

D'où,

$$E_{\text{photon}} = h \cdot f. \quad (2.1)$$

Cette équation peut être utilisée pour calculer l'énergie des photons si la fréquence est connue.

Cependant, dans de nombreux cas, la longueur d'onde de la lumière est connue mais pas sa fréquence.

Dans ces cas, la fréquence est d'abord calculée à l'aide de la longueur d'onde. Rappelons la relation entre la longueur d'onde λ , la fréquence f et la vitesse c :

$$c = \lambda \cdot f.$$

ce qui conduit à :

$$f = \frac{c}{\lambda}.$$

Une fréquence élevée signifie une petite longueur d'onde et inversement. Nous insérons l'expression dans l'équation (2.1) et obtenons

$$E_{\text{photon}} = \frac{h \cdot c}{\lambda}.$$

D'où : plus la longueur d'onde de la lumière est grande, plus l'énergie de ses photons est faible.

Nous calculons l'énergie des photons de la « lumière rouge » ($\lambda = 8 \cdot 10^{-7} \text{ m}$):

$$E_{\text{rouge}} = \frac{h \cdot c}{\lambda_{\text{rouge}}} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{8 \cdot 10^{-7} \text{ m}} \\ \approx 2,5 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

et de la « lumière bleue » ($\lambda = 4 \cdot 10^{-7} \text{ m}$):

$$E_{\text{bleu}} = \frac{h \cdot c}{\lambda_{\text{bleu}}} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{4 \cdot 10^{-7} \text{ m}} \\ \approx 5,0 \cdot 10^{-19} \text{ J}.$$

Ces énergies sont extrêmement faibles par rapport aux quantités d'énergie auxquelles nous avons affaire dans la vie quotidienne. Cependant, dans des conditions d'éclairage habituelles, beaucoup plus de photons sont impliqués. Par exemple, une lampe torche en crée environ 10^{15} par seconde. La lumière du soleil qui frappe un mètre carré de la surface de la Terre est constituée de 10^{21} photons.

La quantité de mouvement transportée par un photon est également liée à la longueur d'onde de manière simple :

$$p_{\text{photon}} = \frac{h}{\lambda}.$$

La quantité de mouvement d'un photon de lumière rouge est donc de

$$p_{\text{rouge}} = \frac{h}{\lambda_{\text{rouge}}} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{8 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 8,25 \cdot 10^{-28} \text{ Hy}.$$

La quantité de mouvement d'un photon de lumière bleue est deux fois plus élevée :

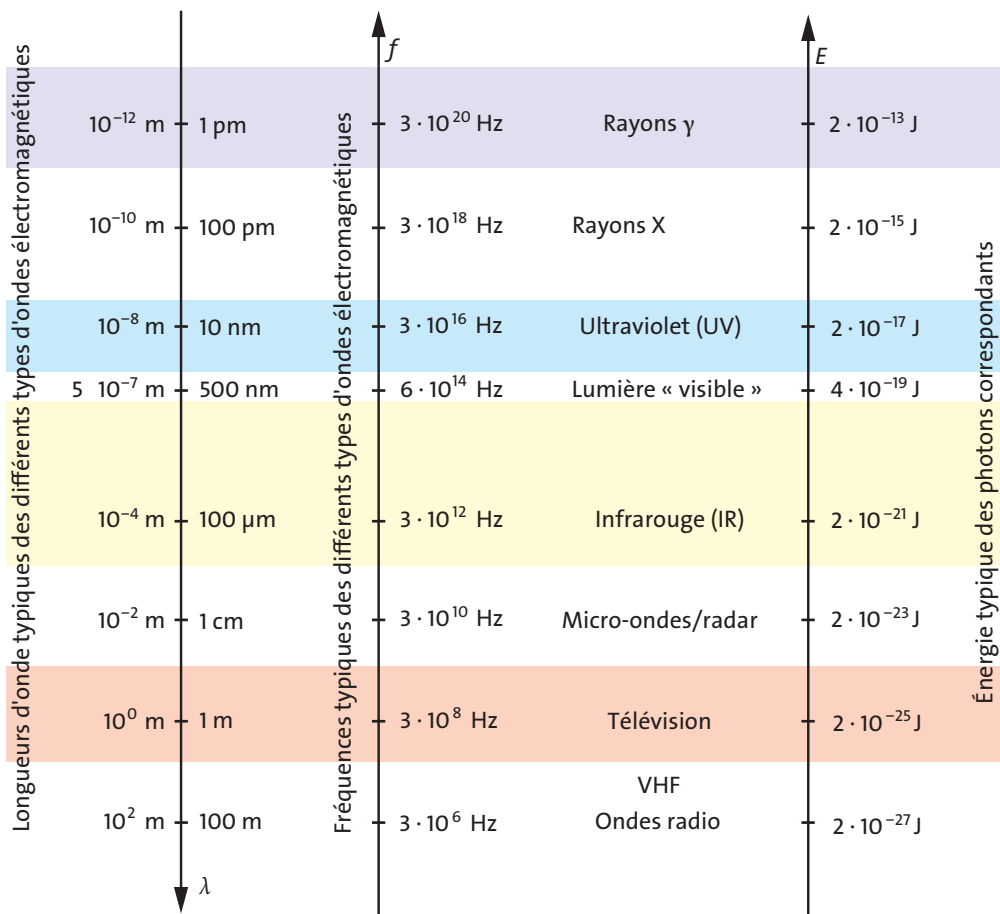


Fig. 2.3 Les différents types d'ondes électromagnétiques avec leurs longueurs d'onde, leurs fréquences et l'énergie des photons associés.

$$p_{\text{bleu}} = 16,5 \cdot 10^{-28} \text{ Hy.}$$

Par conséquent, par exemple, un courant de quantité de mouvement de $3 \cdot 10^8$ Huygens par seconde (= 300 millions de newton) s'écoule dans la Terre avec la lumière du soleil qui frappe la Terre. Ainsi, la lumière du soleil pousse contre la Terre, tout comme un jet d'eau qui frappe une balle et la repousse.

Nous pouvons observer la pression de la lumière solaire sur les queues des comètes qui pointent toujours vers l'extérieur du soleil. Les particules de poussière dont la queue est constituée sont poussées loin du soleil par la lumière.

Jusqu'à présent, nous n'avons parlé que de la lumière visible et de la lumière UV. Cependant, ce qui s'applique à ces deux types de lumière s'applique de la même manière à tous les autres types de lumière, c'est-

à-dire aux ondes radio et TV, aux micro-ondes, à la lumière infrarouge, aux rayons X et aux rayons gamma : tous ces rayonnements ne se comportent pas seulement comme des ondes, mais ils sont également quantifiés, c'est-à-dire qu'ils sont constitués de photons, et les relations entre la fréquence des ondes et l'énergie et la quantité de mouvement des photons sont aussi les mêmes que pour la lumière visible. La Fig. 2.3 donne un aperçu des différents types d'ondes électromagnétiques avec leurs longueurs d'onde et leurs fréquences ainsi que l'énergie des photons associés.

Le rayonnement γ a la longueur d'onde la plus courte et la fréquence la plus élevée. Par conséquent, les photons du rayonnement γ sont les plus énergétiques. Les ondes radio, en revanche, ont une grande longueur d'onde et une faible fréquence. Un photon radio a donc très peu d'énergie.

Electrons

Remarquez que les valeurs d'énergie entre les types consécutifs de photons de la figure diffèrent le plus souvent d'un facteur 100.

Ce qui suit s'applique aux photons des ondes électromagnétiques de fréquence f et de longueur d'onde λ :

$$E_{\text{photon}} = h \cdot f \quad \text{et} \quad p_{\text{photon}} = \frac{h}{\lambda}.$$

Exercices

- Calculez l'énergie et la quantité de mouvement d'un photon de la station radio SWR-3 (fréquence de SWR-3 : 98,4 MHz).
 - Calculez l'énergie et la quantité de mouvement des photons des rayons X d'une longueur d'onde de 150 pm.
 - Comparez les valeurs calculées en a) et b) avec les valeurs de l'énergie et de la quantité de mouvement d'un photon de lumière visible.
- Une balle est soulevée par le jet d'eau d'une fontaine. Pourquoi la balle ne tombe-t-elle pas bien qu'un courant de quantité de mouvement provenant du champ gravitationnel de la Terre s'écoule dans la balle ?
 - Une petite bille est soulevée par un faisceau lumineux dirigé vers le haut. Pourquoi la bille ne tombe-t-elle pas bien qu'un courant de quantité de mouvement provenant du champ gravitationnel de la Terre soit censé circuler dans la bille ?
 - Combien de photons devront frapper la bille de l'exercice b) par seconde si le courant de quantité de mouvement du champ gravitationnel dans la bille est de $7 \cdot 10^{-11}$ N ? (Longueur d'onde de la lumière : 800 nm).

2.8 Electrons

Nous rappelons une fois de plus notre point de départ : nous savions que la lumière est un phénomène composé d'ondes, c'est-à-dire qu'il existe des effets d'interférence. Et nous savions qu'un électron est une petite

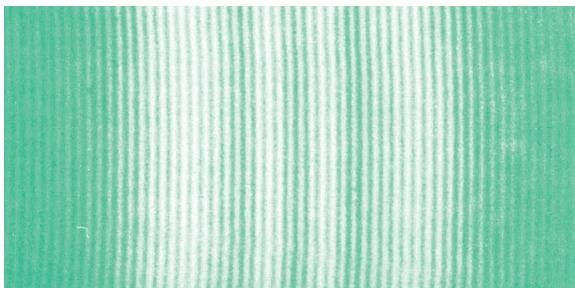


Fig. 2.4 Image d'interférence créée à l'aide d'un faisceau d'électrons.

portion de matière, par exemple dans un faisceau d'électrons. Or, nous venons de nous convaincre que cette distinction n'est pas applicable à la lumière : la lumière est également constituée de petites portions, c'est-à-dire de photons. Maintenant, vous ne serez certainement plus surpris que les électrons peuvent également être décrits comme un processus ondulatoire et qu'une image d'interférence peut également être produite avec un faisceau d'électrons.

Tout d'abord, le résultat expérimental : un faisceau d'électrons peut être utilisé pour réaliser une expérience d'interférence très similaire à l'expérience d'interférence avec la lumière. Elle est seulement un peu plus difficile sur le plan technique. Un faisceau d'électrons est divisé en deux faisceaux partiels dont la différence de direction est minime. Ensuite, les faisceaux partiels sont fusionnés suivant un angle aigu. Si un écran sensible aux électrons est placé dans la zone d'intersection des faisceaux, on obtient une image d'interférence, Fig. 2.4.

Nous pouvons conclure de telles expériences que les équations suivantes s'appliquent également aux électrons :

$$\begin{aligned} E &= h \cdot f \\ p &= \frac{h}{\lambda}. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Ici, E est l'énergie totale des électrons (c'est-à-dire pas seulement l'énergie cinétique), p la quantité de mouvement, f la fréquence et λ la longueur d'onde de l'onde électronique.

Une telle onde est appelée *onde de matière*, car des motifs d'interférence peuvent être produits non seulement avec des électrons, mais aussi avec des faisceaux de neutrons, de protons, d'atomes entiers et même de molécules.

Nous souhaitons calculer la longueur d'onde d'un faisceau d'électrons dans un tube de télévision. La tension d'accélération U dans un tel tube est d'environ 20 kV.

L'énergie cinétique des électrons est la suivante

$$E_{\text{cin}} = e \cdot U.$$

Ici, e est la charge élémentaire. L'énergie cinétique est liée à la quantité de mouvement comme suit

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

Par conséquent, nous pouvons écrire la quantité de mouvement :

$$p = \sqrt{2mE_{\text{cin}}}.$$

Si nous insérons $e \cdot U$ pour l'énergie cinétique, nous obtenons

$$p = \sqrt{2m \cdot e \cdot U}.$$

Au moyen de l'équation (2.2) nous obtenons pour la longueur d'onde de l'onde de matière :

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m \cdot e \cdot U}}.$$

La masse de l'électron est

$$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}.$$

Aussi,

$$h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

et

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}.$$

Pour les électrons qui ont été accélérés avec 20 kV, nous obtenons donc :

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{\sqrt{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 2 \cdot 10^4 \text{ V}}} \\ &= 0,86 \cdot 10^{-11} \text{ m}. \end{aligned}$$

Ce qui suit s'applique aux électrons ayant l'énergie E et la quantité de mouvement p :

$$E_{\text{électron}} = h \cdot f \quad \text{et} \quad p_{\text{électron}} = \frac{h}{\lambda}.$$

3 LA THÉORIE DES QUANTA

3.1 Les données entrent et les données sortent

Nous avons déjà vu ce que les physiciens entendent par théorie : les équations et les énoncés mathématiques permettant de décrire un phénomène physique. L'utilisation d'une théorie est simple en principe. Nous insérons des données connues et nous obtenons des données que nous aimerions connaître. Les processus de calcul intermédiaires peuvent être très compliqués. La Fig. 3.1 illustre la théorie comme un moulin à café.

De nombreux problèmes peuvent être résolus à l'aide d'une théorie :

- Nous insérons les valeurs de certaines grandeurs physiques et calculons les valeurs d'autres grandeurs, par exemple : nous insérons le courant électrique et la résistance et la théorie fournit la tension électrique. (Ici, la théorie est la loi d'Ohm).
- Nous insérons les valeurs de certaines grandeurs et la théorie fournit les valeurs de ces mêmes grandeurs à un instant ultérieur. Exemple : nous insérons les coordonnées de position et de vitesse d'une sonde spatiale au moment présent et nous obtenons les coordonnées de la sonde spatiale à un instant futur.
- Nous insérons les valeurs de certaines grandeurs et la théorie fournit les valeurs de ces mêmes grandeurs à un instant antérieur. Par exemple, nous insérons les coordonnées de l'emplacement et de la vitesse des étoiles à l'instant présent et nous découvrons qu'il y a eu un big bang il y a 15 milliards d'années. Nous calculons donc un résultat qui se situe dans le passé.

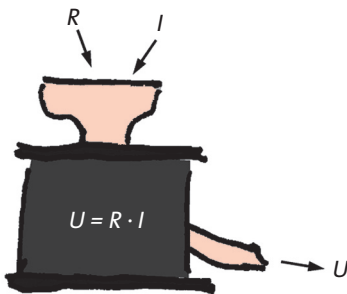


Fig. 3.1 La théorie comme un moulin mathématique : on insère des nombres et on obtient d'autres nombres.

Théorie : système d'équations et d'énoncés.

On insère des données connues et on obtient les données souhaitées.

3.2 Une théorie en deux étapes

La théorie qui permet de décrire le comportement des atomes, électrons, photons et d'autres systèmes est la théorie des quanta (encore appelée théorie quantique ou physique quantique). Elle n'est pas excessivement compliquée, mais les mathématiques que vous avez apprises ne sont pas encore suffisantes pour la comprendre. C'est pourquoi nous ne souhaitons aborder qu'une caractéristique structurelle générale de cette théorie.

Concrètement, nous nous penchons sur un problème particulier : l'atome d'hydrogène ou, plus précisément, l'enveloppe (ou nuage) électronique de l'atome d'hydrogène. Les données que nous introduisons dans la théorie comprennent :

- Des données concernant les caractéristiques du noyau. Nous savons que, pour nos besoins, le noyau peut être considéré comme une particule chargée ponctuelle. Le potentiel électrique dans l'environnement d'une telle particule nous est connu.
- Les données qui caractérisent l'électron, c'est-à-dire sa masse et sa charge électrique.

Le calcul de la théorie des quanta qui conduit des données initiales aux données finales peut maintenant être

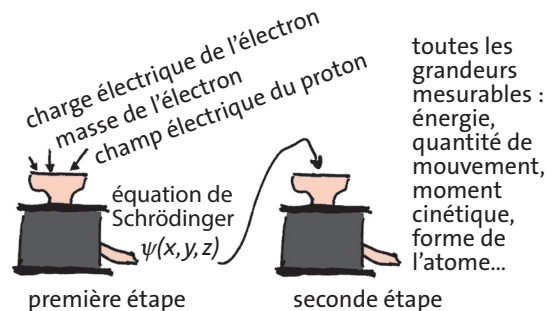


Fig. 3.2 Le moulin mathématique de la mécanique quantique se divise en deux moulins partiels. Le premier fournit la fonction d'onde basée sur la description du problème, le second calcule des nombres vérifiables à partir de la fonction d'onde.

divisé en deux parties qui sont illustrées par deux moulins, Fig. 3.2.

Les données initiales sont insérées dans le moulin n°1. Comme résultat intermédiaire, le moulin n°1 fournit une fonction

$$\psi(x, y, z),$$

appelée *fonction psi* ou *fonction d'onde*. ψ est une fonction des coordonnées de position. Ensuite, la fonction d'onde est insérée dans le moulin n°2 qui ne fournira qu'après les nombres qui nous intéressent réellement et que nous pouvons prouver expérimentalement.

La première étape, c'est-à-dire le calcul de la fonction d'onde, est la plus complexe. Par conséquent, des processus de calcul compliqués doivent être appliqués. Une *équation différentielle*, appelée *équation de Schrödinger*, doit être résolue. C'est pourquoi les physiciens disent également qu'ils ont « résolu le problème » dès qu'ils ont calculé la fonction d'onde correspondante. La deuxième étape n'est plus un gros problème. Tout ce qui est nécessaire peut être obtenu à partir de la fonction d'onde relativement rapidement et facilement : la forme de l'enveloppe électronique de l'atome, l'énergie de l'électron, la quantité de mouvement, le moment cinétique, le magnétisme... Cependant, certains aspects de ce que nous aurions pu vouloir obtenir ne sont pas fournis. Et cela signifie : celui qui les demande pose une question erronée ou inutile.

La théorie des quanta résout un problème en deux étapes :

- le calcul de la fonction d'onde à partir des données insérées ;
- le calcul des données souhaitées à partir de la fonction d'onde.

3.3 La fonction d'onde

La fonction d'onde a comme variables indépendantes x , y et z . Leur valeur dépend donc de la position. Nous avons déjà vu de telles fonctions précédemment. Nous avons décrit les champs électriques et magnétiques avec les intensités de champ dont les variables indépendantes étaient également les coordonnées de position. Par conséquent, la fonction d'onde est comparable à une intensité de champ.

Nous aimerions pousser un peu plus loin la comparaison entre la fonction d'onde de l'électron et les intensités de champ du champ électromagnétique.

Les intensités de champ électrique et magnétique contiennent tout ce que nous pouvons savoir sur un champ électromagnétique. Les valeurs d'autres grandeurs physiques peuvent être calculées à partir de ces valeurs : énergie, courant d'énergie, quantité de mouvement et courant de quantité de mouvement. Plus tôt, vous avez appris à calculer la densité d'énergie d'un champ électrique :

$$\rho_E(x, y, z) = \frac{\epsilon_0}{2} |\vec{E}(x, y, z)|^2.$$

Cette expression nous indique comment l'énergie est distribuée dans l'espace. Ainsi, elle nous indique également comment la substance du champ est distribuée.

Les choses sont très similaires pour la fonction d'onde. Elle contient également tout ce que nous pouvons savoir sur la matière qu'elle décrit. Les valeurs d'autres grandeurs physiques peuvent être calculées à partir d'elle. C'est ce qu'illustre le deuxième moulin de la Fig. 3.2.

Dans un premier temps, nous allons examiner un exemple très simple du fonctionnement du moulin 2 : le calcul du carré de la fonction d'onde.

$$\rho(x, y, z) = \psi^2(x, y, z)$$

Le résultat est une fonction de x , y et z . Contrairement à la fonction d'onde elle-même, il ne peut prendre que des valeurs positives (ou être égal à zéro). En le multipliant par la masse m de l'électron

$$\rho_m = m \cdot \rho = m \cdot \psi^2,$$

nous obtenons une densité de masse. Nous pouvons interpréter ce résultat comme suit : l'électron est un élément d'une substance. Nous appelons cette substance *électronium*. La quantité ρ_m représente la densité de masse (ou encore la masse volumique) de l'électronium. En multipliant ρ_m par $-e$, c'est-à-dire la charge élémentaire négative

$$\rho_Q = -e \cdot \rho = -e \cdot \psi^2,$$

nous obtenons la densité de charge de l'électronium.

Ces considérations sont assez abstraites. Dans la section suivante, nous verrons à quoi ressemble la distribution de masse et/ou de charge de l'électronium dans des cas particuliers.

Le carré de la fonction d'onde est une mesure de la densité de masse et de la densité de charge de l'électronium. ■

4 L'ATOME – ÉTATS STATIONNAIRES

4.1 La densité de l'électronium

Un atome se compose d'un petit noyau lourd et d'un nuage électronique, appelé aussi enveloppe électronique, relativement grand et léger. Le diamètre du noyau est d'environ un 50 000^{ème} du diamètre atomique, c'est-à-dire du diamètre du nuage électronique. La masse du noyau est d'environ 99,9 % de la masse totale de l'atome. Le noyau et le nuage électronique sont chargés électriquement : le noyau positivement et le nuage électronique négativement. Les charges du noyau et celle du nuage électronique sont égales en valeur absolue. Cela signifie que l'atome dans son ensemble est électriquement neutre, c'est-à-dire que sa charge totale est nulle.

Les atomes sont constitués d'un petit noyau lourd chargé positivement et d'une grande enveloppe légère chargée négativement.

L'enveloppe de l'atome est constituée d'électronium. Nous avons vu que sa densité est décrite par le carré de la fonction d'onde.

Si un atome est laissé seul, c'est-à-dire s'il n'est en aucune façon perturbé de l'extérieur, la distribution d'électronium est presque à symétrie sphérique (et même pour certains types d'atomes, exactement à symétrie sphérique). La densité est maximale à proximité immédiate du noyau. A mesure que l'on s'éloigne du noyau, elle décroît d'abord rapidement puis plus lentement. L'atome n'a donc pas de surface frontière nette ; voir Fig. 4.1.

Un ballon gonflé a une forme définie. L'on peut changer cette forme en appuyant sur le ballon. Si on le relâche, il revient à son état d'origine.

L'atome se comporte de manière similaire. Il ne doit y avoir rien à proximité qui puisse déformer l'atome : pas d'autres atomes, ni de champs électriques ou magnétiques. Ce n'est que lorsque ces conditions sont remplies qu'un atome a sa forme sphérique naturelle.

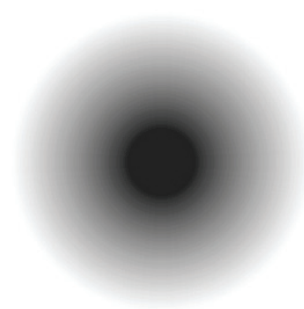


Fig. 4.1 Atome dans l'état fondamental. Le niveau de gris représente la densité de masse et la densité de charge du nuage électronique.

La condition pour laquelle aucun autre atome ne se trouve à proximité est remplie dans le cas de substances gazeuses, car les atomes individuels sont éloignés les uns des autres. Dans ce qui suit, nous considérerons de tels atomes libres. Dans le cas des liquides et des solides, les atomes sont proches les uns des autres. Nous traiterons de la forme des atomes dans ces substances dans un chapitre ultérieur.

L'électronium de l'atome présente une certaine ressemblance avec l'atmosphère terrestre : la densité de l'air dépend aussi de la position et elle diminue à mesure que l'on s'éloigne de la surface de la Terre. De plus, aucune frontière nette ne peut définir là où l'atmosphère s'arrête.

Pour attribuer un rayon à l'atome, on prend arbitrairement la distance du noyau à laquelle la densité d'électronium n'est que de 10 % de la valeur maximale. Les rayons des différents types d'atomes sont différents. Une valeur typique est de 10^{-10} m.

L'enveloppe de l'atome est constituée d'électronium. L'électronium est réparti de façon sphérique et symétrique autour du noyau. Sa densité diminue de l'intérieur vers l'extérieur de l'atome.

Une propriété surprenante de l'atome se révèle lorsqu'on essaie d'extraire de l'électronium de l'enveloppe. Pour le moment, nous ne nous intéressons pas à comment cela peut être réalisé. Imaginons simplement que l'atome est si gros que nous pouvons le manipuler avec nos mains. Donc, mentalement, nous pénétrons dans l'atome pour libérer une portion d'électronium. Nous récupérons une certaine quantité d'électronium, la plaçons quelque part, et répétons l'opération : nous en sortons une deuxième portion. Nous sommes alors surpris de constater que cette portion est exactement de la même taille que la première. Nous répétons à nouveau le processus, et encore une fois la portion d'électronium est de la même taille que les deux précédentes. Nous réalisons maintenant un effort plus grand pour voir si nous ne pouvons pas en tirer un peu plus. Nous accroissons notre force et ce faisant nous avons recueilli davantage d'électronium. Cette fois en effet, on double exactement les portions obtenues auparavant. Par un effort encore accru, on obtient un résultat triple, quadruple... mais jamais entre les deux. Essayons maintenant d'extraire une petite quantité d'électronium de l'atome. Cela est impossible. Nous obtenons, soit une des portions que nous avons déjà, soit rien du tout.

Autrement dit, l'on ne peut obtenir que des portions d'électronium d'une taille très spécifique, des *portions élémentaires* pour ainsi dire, de l'atome – ou des multiples de celle-ci. Une telle portion d'électronium est juste ce que nous avons auparavant appelé un *électron*. De telles portions élémentaires sont généralement appelées aussi *particules*.

Voici le profil de l'électron : il a une masse d'environ 10^{-30} kg, une charge électrique de moins $1,6 \cdot 10^{-19}$ C, et se comporte comme un petit aimant permanent d'une puissance très particulière.

Un électron est un constituant élémentaire de l'électronium. Les constituants élémentaires sont également appelés particules.

Comme l'enveloppe électronique de l'atome, le noyau atomique est également constitué d'une certaine substance. Contrairement à la densité de l'électronium dans l'enveloppe, la densité de cette matière centrale à l'intérieur du noyau est approximativement la même partout, comme la densité de l'acier dans une bille d'acier massive.

De la même manière, pour le noyau, seules certaines portions peuvent être extraites. En effet, il existe deux sortes de portions légèrement différentes, dont vous connaissez probablement les noms : les *protons* et les *neutrons*.

	masse	charge électrique	magnétisme
électron	$0,9 \cdot 10^{-30}$ kg	$-1,6 \cdot 10^{-19}$ C	fort
proton	$1700 \cdot 10^{-30}$ kg	$+1,6 \cdot 10^{-19}$ C	faible
neutron	$1700 \cdot 10^{-30}$ kg	0 C	faible

Tab.4.1 Propriétés de l'électron, du proton et du neutron

Les protons et les neutrons ont une masse beaucoup plus grande que celle des électrons. Ils sont environ 1800 fois plus lourds. La charge électrique du proton a la même valeur que celle de l'électron, mais de signe opposé, c'est-à-dire $+1,6 \cdot 10^{-19}$ C. Le neutron n'est pas chargé. Les protons et les neutrons sont également magnétiques, mais beaucoup plus faiblement que les électrons. Les valeurs des grandeurs caractérisant les électrons, les protons, et les neutrons, sont résumées dans le Tab.4.1.

Le noyau de chaque atome contient des protons chargés positivement; l'enveloppe est constituée d'électrons chargés négativement. Cependant, les atomes dans leur ensemble ne sont pas chargés. Puisque la charge des électrons et des protons est opposée et égale, nous pouvons conclure que le nombre d'électrons dans l'enveloppe d'un atome doit être égal au nombre de protons dans le noyau de l'atome.

Le nombre de protons dans le noyau est le critère de distinction des différents types d'atomes : les atomes d'hydrogène ont un proton dans le noyau, les atomes d'hélium deux, les atomes de lithium trois, etc. Dans le tableau périodique des éléments, les atomes sont rangés en fonction du nombre de protons dans le noyau, le *numéro atomique*.

Les noyaux des atomes contiennent un nombre de protons qui est spécifique pour chaque type d'atome.

Les électrons, les protons et les neutrons sont également magnétiques. Cependant, nous savons par ailleurs que pratiquement toutes les substances présentes dans notre environnement sont amagnétiques. Et même le fer n'est magnétique que dans des cas particuliers (les clous en fer, par exemple, ne le sont généralement pas).

La raison en est que les effets des aimants peuvent se compenser réciproquement. Dans environ un quart de tous les types d'atomes – comprenant tous les atomes de gaz rares – les effets magnétiques des électrons dans les atomes s'annulent. (Les effets magnétiques des protons et des neutrons sont si faibles qu'ils n'apportent aucune contribution appréciable au magnétisme de la

Taille et densité de l'enveloppe atomique

matière.) De tels atomes sont donc non magnétiques, et par conséquent aussi les substances qui sont constituées de tels atomes.

Dans les trois quarts restants des types d'atomes, les atomes individuels sont magnétiques. Néanmoins, les substances constituées de ces atomes sont, pour la plupart, non magnétiques : les atomes se combinent pour former des molécules, et compenser ainsi leurs effets magnétiques. L'hydrogène, par exemple, dont les atomes n'ont qu'un seul électron dans leur enveloppe, et sont donc magnétiques, n'existe que sous forme moléculaire dans la nature, c'est-à-dire qu'il est constitué de molécules H_2 . Cependant, les effets magnétiques des deux électrons de chaque molécule s'annulent, de sorte que la molécule dans son ensemble est non magnétique.

Les molécules, dans lesquelles les effets magnétiques des atomes impliqués ne se compensent pas, se combinent souvent pour former des groupes de molécules plus grands et non magnétiques, de sorte que les effets magnétiques de ces groupes se compensent et ne peuvent donc être perçus de l'extérieur. Ce n'est que dans des cas exceptionnels, à savoir lorsque des atomes ou des molécules magnétiques dans des matériaux sont disposés de telle manière que leurs effets magnétiques ne se compensent pas, que le matériau devient magnétisé. De tels matériaux sont très rares dans la nature ; mais ils peuvent être produits artificiellement. Les aimants permanents sont faits de tels matériaux.

Les effets magnétiques des électrons peuvent se compenser :

- à l'intérieur de l'enveloppe électronique de l'atome,
- à l'intérieur d'une molécule,
- à l'intérieur de groupes de molécules.

Exercice

1. Si l'on agrandit un atome pour qu'il ait la taille de la Terre (le diamètre de la Terre est d'environ 12 000 km), quel serait le diamètre du noyau ?

4.2 Taille et densité de l'enveloppe atomique

La quantité d'électronium dans l'enveloppe d'un atome augmente à mesure que le nombre de protons augmente. Par exemple, l'enveloppe d'un atome de mercure (numéro atomique 80) contient quatre-vingt fois plus d'électronium que l'enveloppe d'un atome d'hydrogène. On s'attend à ce que les atomes de mercure soient beaucoup plus gros que les atomes d'hydrogène. En fait, cependant, les atomes d'hydrogène et de mercure ont presque la même taille.

Cela signifie que la densité de l'électronium dans l'atome de mercure doit être beaucoup plus élevée que dans l'atome d'hydrogène.

Construisons progressivement, par la pensée, les atomes des divers éléments chimiques à partir de protons, de neutrons et d'électrons, et demandons-nous comment la taille et la densité des atomes changent. (Les neutrons n'ayant aucune influence sur la taille des atomes, nous n'en reparlerons pas ici.) Commençons par l'atome d'hydrogène, qui est constitué d'un proton comme noyau et d'une portion élémentaire d'électronium dans son enveloppe.

Nous augmentons le nombre de protons de un et obtenons un ion hélium chargé positivement. Maintenant que deux protons chargés positivement attirent

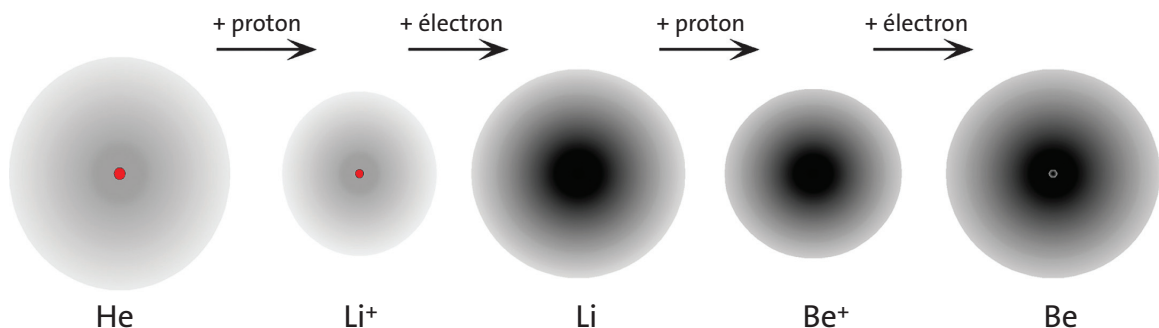


Fig. 4.2 On construit des atomes lourds en ajoutant alternativement un proton et un électron. (Des neutrons sont également ajoutés, mais ceux-ci n'ont aucune influence sur la taille des atomes ou des ions.)

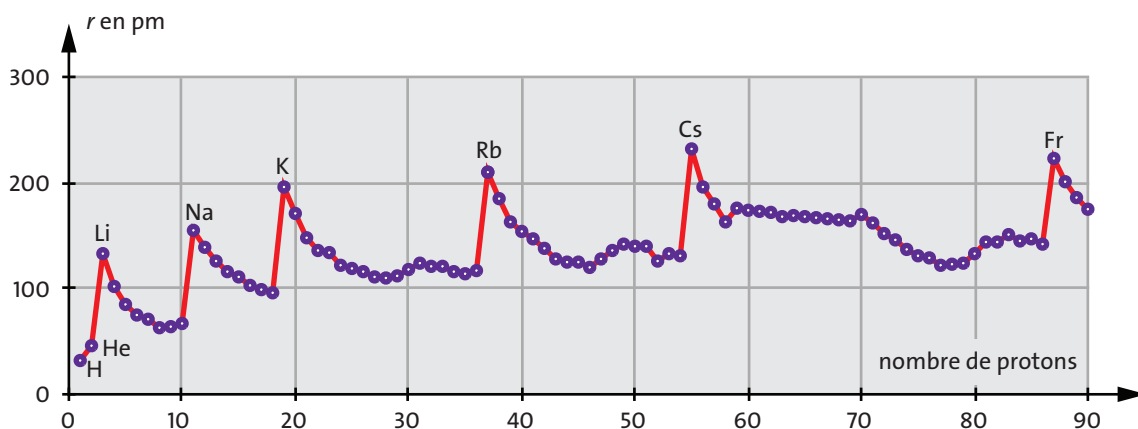


Fig. 4.3 Les rayons des différents atomes.

l'électronium chargé négativement, l'électronium se rapproche du noyau. L'ion hélium est donc plus petit que l'atome d'hydrogène. Cela signifie que la densité de l'électronium est plus grande dans l'ion hélium.

Ensuite, pour arriver à l'atome d'hélium, ajoutons un électron. En faisant cela, l'enveloppe redevient plus grande, comme un ballon dans lequel de l'air supplémentaire est insufflé. Les deux portions d'électronium dans l'atome d'hélium occupent plus d'espace que la portion unique dans l'ion hélium ; l'atome d'hélium est donc plus grand que l'ion.

L'ajout d'un autre proton donne un ion lithium chargé positivement (Fig. 4.2), et à nouveau l'électronium rétrécit dans ce processus. Compléter à nouveau l'enveloppe de l'atome de lithium a le même effet qu'avec l'hélium : l'enveloppe à trois électrons prend plus de place ; l'atome de lithium est plus gros que l'ion lithium.

Dans ce processus de construction d'atomes pas à pas, nous observons deux tendances opposées : l'ajout d'un proton entraîne une réduction de la taille de l'enveloppe, tandis que l'ajout d'un électron entraîne une augmentation de la taille.

Sur la Fig. 4.3, les rayons des atomes sont tracés en fonction du nombre de protons. Nous pouvons voir que parfois la tendance à la réduction prévaut, et par-

fois la tendance à l'augmentation. Cependant, le rayon de la plupart des atomes ne s'écarte pas beaucoup de la valeur typique d'un peu plus de 10^{-10} mètres. Les plus gros atomes sont environ deux fois plus gros, les plus petits deux fois moins gros.

Le rayon de la plupart des atomes ne s'écarte que légèrement de 10^{-10} mètres. En revanche, il existe de très grandes différences dans la densité du nuage électronique dans l'enveloppe des atomes.

Exercice

1. Calculez approximativement la densité moyenne du nuage électronique dans l'atome d'hydrogène et dans l'atome de plomb. Estimer la densité des noyaux atomiques. Comparez avec la densité de la matière normale. Utilisez uniquement les données de ce document.

4.3 L'excitation des atomes

Un atome qui n'est pas perturbé a sa forme « naturelle », (presque) sphérique. On dit qu'il est à l'état *fondamental*.

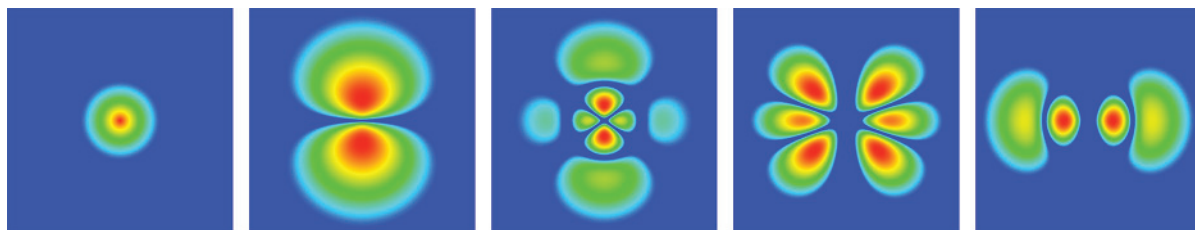


Fig. 4.4 Densité d'électronium de l'atome d'hydrogène dans différents états stationnaires.

Mais un atome peut aussi être déformé. Pour ce faire, vous devez lui fournir de l'énergie, par exemple en lui lançant un électron ou un photon. En général, l'atome reprend immédiatement après sa forme naturelle d'origine, de la même manière qu'une balle de tennis se déforme au contact d'une raquette pendant une courte période, mais reprend rapidement sa forme d'origine.

Cependant, il existe des déformations que l'atome conserve plus longtemps. L'atome est alors dit *excité*, ou dans un *état d'excitation*.

La Fig. 4.4 montre la densité $\rho = \psi^2$ pour certains états de l'atome d'hydrogène : à gauche dans l'état fondamental, à droite dans différents états excités. La densité est représentée dans un plan de coupe passant par le centre de l'atome. Rouge signifie haute densité, bleu signifie faible densité. La fonction est symétrique en rotation pour tous les états. L'axe de rotation va de haut en bas sur la figure.

La Fig. 4.5 montre l'atome dans l'un de ces états dans une représentation dans laquelle la forme tridimensionnelle est rendue visible.

L'état fondamental et les états excités sont appelés *états stationnaires* de l'atome. Pourquoi stationnaire ? Lorsque l'atome est dans un tel état, la densité d'électronium ne change pas avec le temps.

Cependant, un atome peut aussi être forcé dans une autre forme irrégulière. Mais dans un tel état, l'électronium réalise des oscillations rapides. La charge oscillante entraîne l'émission d'une onde électromagnétique. L'atome perd de ce fait de l'énergie. En raison de ces oscillations, de tels états sont dits *non stationnaires*. Ils nous occuperont plus tard. Pour le moment, nous ne nous intéressons qu'aux états stationnaires.

Etat stationnaire d'un atome :

la distribution d'électronium est constante dans le temps.

État non stationnaire d'un atome :

la distribution d'électronium réalise des oscillations rapides.

Encore quelques mots sur la manière de s'exprimer. Lorsqu'un électron est dans l'un des états stationnaires, on dit également que l'électron occupe une *orbitale* particulière. L'orbitale est donc la place définie par la fonction d'onde correspondante qui peut être occupée par l'électronium. Cela détermine la quantité d'électronium à chaque emplacement (si l'orbitale est occupée).

L'orbitale peut être comparée à une salle de cinéma ou de théâtre. Lorsque la salle est pleinement occupée,

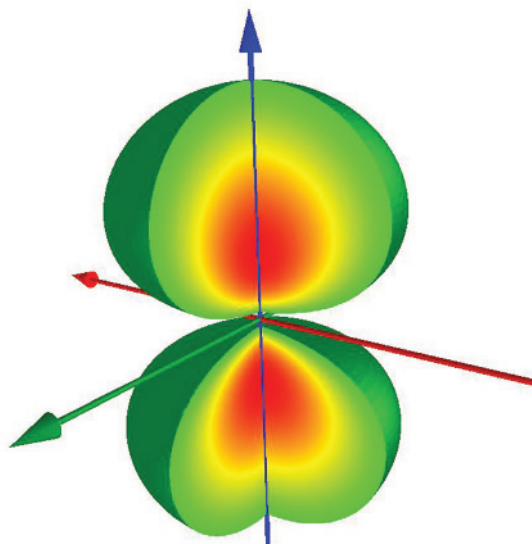


Fig. 4.5 Atome d'hydrogène dans un état excité en représentation 3D (correspondant à la deuxième image en partant de la gauche de la Fig. 4.4).

les personnes sont réparties de manière bien précise dans la salle. Mais elles n'ont pas besoin d'être également serrées partout. Dans la loge royale d'un théâtre, elles sont moins rapprochées que dans la zone des sièges bon marché.

Lorsqu'un électron se trouve dans un état stationnaire, on dit qu'il occupe une *orbitale* définie.

Nous pouvons maintenant également expliquer plus précisément le type de résultats que fournit le moulin de la partie gauche de la Fig. 3.2. Nous avons dit plus haut qu'à sa sortie apparaît la fonction d'onde. Ce n'est pas tout à fait exact, car l'équation de Schrödinger, c'est-à-dire le calcul du moulin n°1, délivre toute une série de fonctions d'onde : les fonctions d'onde de tous les états stationnaires. En fait, il existe même un nombre infini de fonctions d'onde et donc d'états stationnaires pour un atome.

De nombreux phénomènes et propriétés des atomes peuvent être expliqués à l'aide de la fonction d'onde. Pour ce faire, il convient d'abord de mettre un peu d'ordre dans le grand nombre de fonctions d'onde, ou orbitales. Une possibilité serait de simplement les numéroter consécutivement. Cependant, la liste correspondante serait encore très confuse. Il y a un meilleur moyen : une fonction d'onde ou une orbitale peut être caractérisée par trois caractéristiques et l'on peut utiliser un nombre pour décrire l'intensité de chacune de ces caractéristiques.

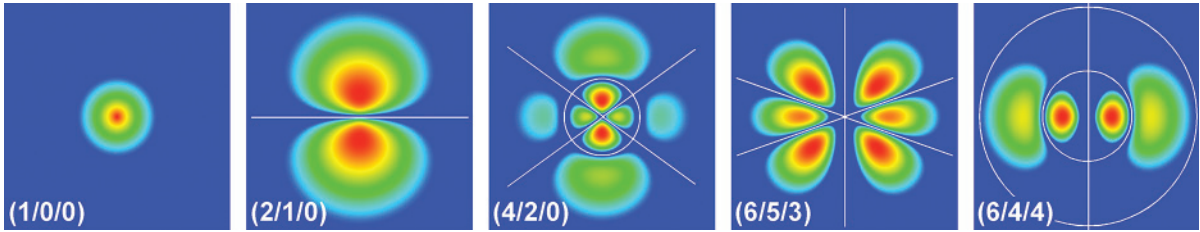


Fig. 4.6 Surfaces nodales pour les états de la Fig. 4.4. Les lignes blanches représentent en coupe les surfaces pour lesquelles la densité d'électronium est nulle (ces surfaces sont appelées « surfaces nodales »).

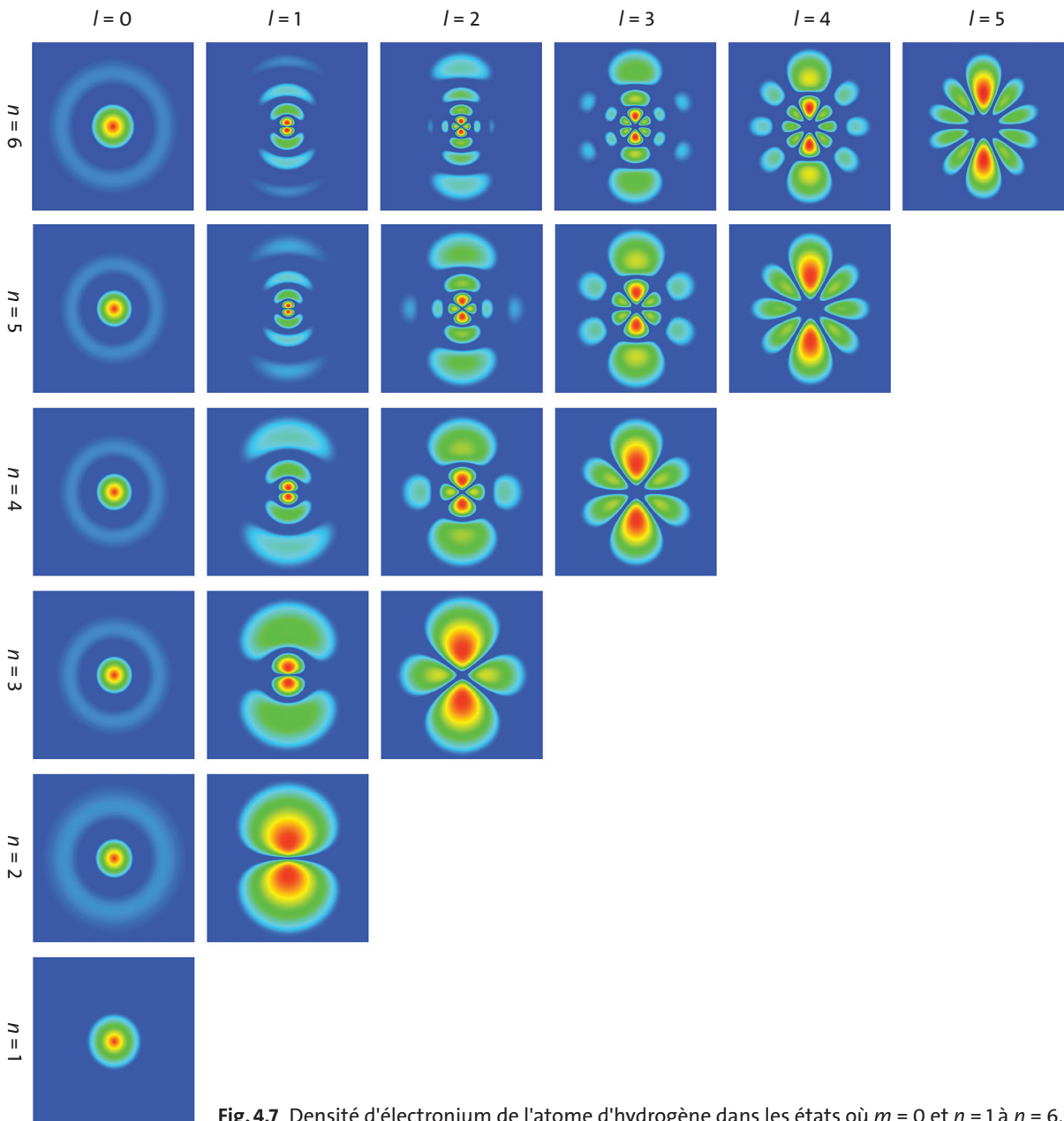


Fig. 4.7 Densité d'électronium de l'atome d'hydrogène dans les états où $m = 0$ et $n = 1$ à $n = 6$.

L'excitation des atomes

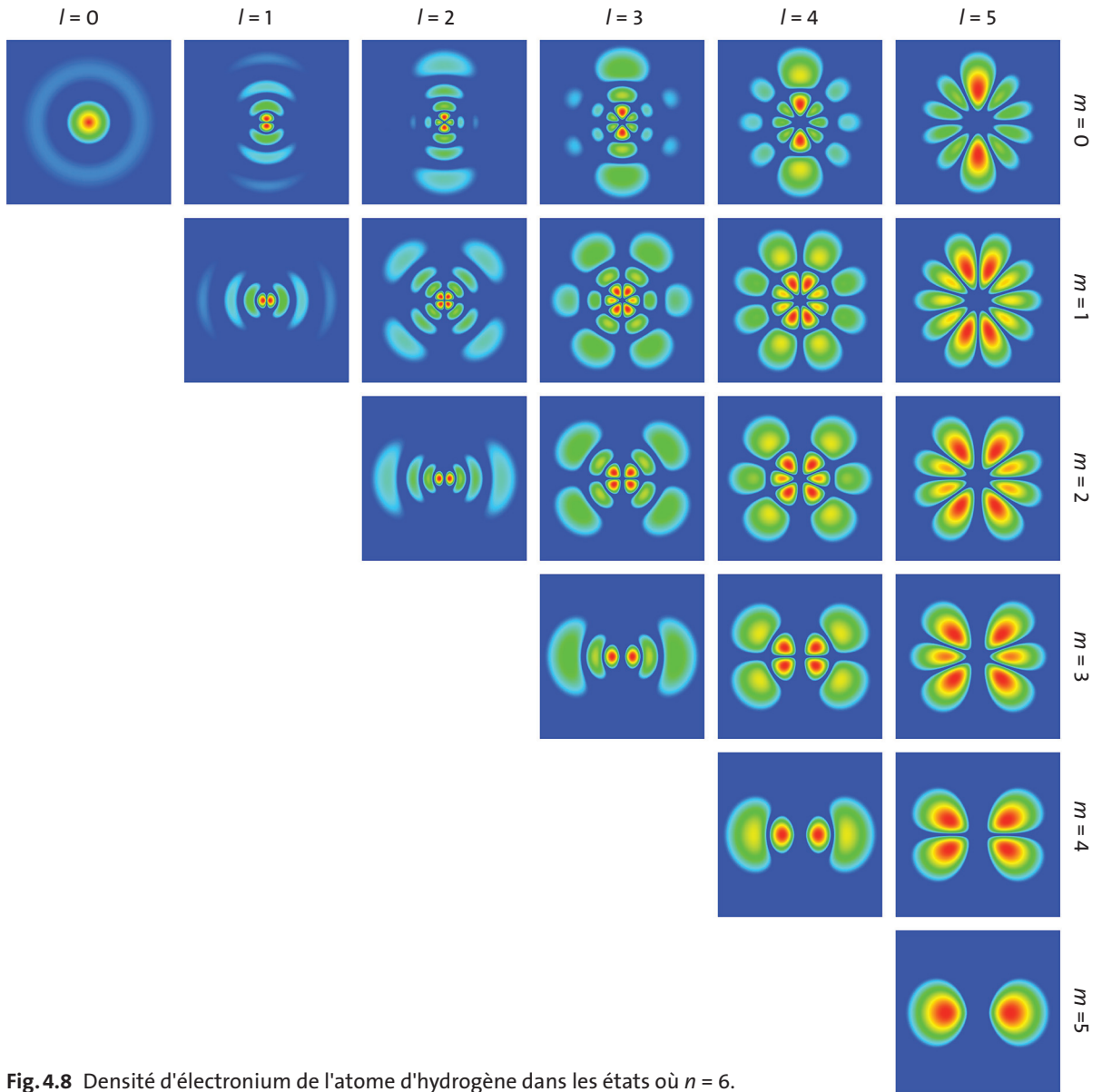


Fig. 4.8 Densité d'électronium de l'atome d'hydrogène dans les états où $n = 6$.

Un exemple simple montre comment la procédure fonctionne. Dans une grande usine de vêtements, les pantalons produits doivent être caractérisés : une étiquette doit indiquer de quel type de pantalon il s'agit. Les pantalons sont produits en 12 couleurs différentes (notée « c »), à partir de 4 types d'étoffe (notés « e ») et en 5 tailles différentes (notées « t »). Il existe donc $12 \cdot 4 \cdot 5 = 240$ types de pantalons différents. Vous pourriez en quelque sorte les numéroté de 1 à 240. Cependant, une autre méthode est plus pratique. Chacune des trois propriétés est numérotée indivi-

duellement : les couleurs vont de $c=1$ à $c=12$, les types d'étoffe de $e=1$ à $e=4$ et les tailles de $t=1$ à $t=5$. Maintenant chaque type de pantalon peut être décrit avec 3 chiffres plus petits, par exemple $c=9$, $e=2$, $t=3$.

Les fonctions d'onde des états stationnaires peuvent être caractérisées de la même manière. Même si nous ne sommes pas encore capables de nommer les trois caractéristiques par lesquelles elles sont classées, nous souhaitons déjà souligner que les fonctions d'onde peuvent également être classées à l'aide de trois

nombres. Ces nombres sont appelés *nombres quantiques* et sont désignés par les symboles n , l et m .

Les nombres quantiques peuvent prendre les valeurs suivantes :

- $n = 1, 2, \dots, \infty$
- $l = 0, 1, \dots, n - 1$
- $m = -l, -(l - 1), -(l - 2), \dots, -1, 0, 1, \dots, l - 2, l - 1, l$

La plage de valeurs pour l dépend de la valeur de n , et la plage de valeurs pour m dépend de la valeur de l . Plus n est grand, plus le nombre quantique l peut prendre des valeurs différentes, et plus l est grand, plus il y a de valeurs de m différentes. Pour l'état fondamental, nous avons : $n = 1$, $l = 0$ et $m = 0$.

Sur la Fig. 4.6 les nombres quantiques sont donnés pour chaque orbitale représentée. Donc $(2/1/0)$ signifie que $n = 2$, $l = 1$ et $m = 0$.

Vous apprendrez progressivement quelles caractéristiques sont exprimées par les trois nombres quantiques. Tout d'abord, vous pouvez déjà voir qu'ils doivent avoir une relation avec la forme des orbitales. La Fig. 4.7 montre toutes les orbitales pour $n = 1$ à $n = 6$, où $m = 0$.

L'image de l'état fondamental est en bas à gauche. Dans tous les états (sauf dans l'état fondamental), il existe des surfaces sur lesquelles la densité d'électronium est égale à zéro, à savoir des surfaces sphériques, des surfaces coniques et des plans. (Dans la coupe bidimensionnelle, les surfaces sphériques apparaissent sous forme de cercles, et les surfaces coniques sous forme de lignes droites.) Ces surfaces sont appelées surfaces nodales. Sur la Fig. 4.6, les surfaces nodales des orbitales de la Fig. 4.4 sont dessinées.

Vous voyez maintenant que les nombres quantiques sont en relation avec les surfaces nodales. Dans la Fig. 4.7, le nombre de surfaces nodales sphériques augmente de bas en haut, et le nombre de surfaces coniques de gauche à droite. (Dans la colonne de gauche, vous ne pouvez pas voir que le nombre de surfaces nodales sphériques augmente, car la densité d'électronium à l'extérieur est si faible que le codage couleur utilisé n'est plus adapté.)

La Fig. 4.8 montre une autre sélection d'orbitales : ici $n = 6$ pour toutes les images. Les orbitales représentées diffèrent par la valeur de l et par la valeur de m . Là encore, une observation systématique peut être faite : le nombre de surfaces nodales augmente avec la diminution de la valeur de m .

Les états stationnaires sont numérotés à l'aide des trois nombres quantiques n , l , et m .

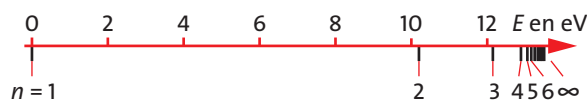


Fig. 4.9 Énergie de l'atome d'hydrogène dans ses états stationnaires.

4.4 L'énergie de l'atome en état stationnaire – le diagramme des niveaux d'énergie

Lorsqu'un atome entre dans un état excité, il stocke l'énergie qui a été utilisée pour changer de forme. Sur la Fig. 4.9, les valeurs d'énergie des différents états stationnaires de l'atome d'hydrogène sont reportées sur l'axe des énergies. Nous appelons cette représentation *l'échelle d'énergie*. L'énergie d'un état stationnaire ne dépend que du nombre quantique n . Dans des états qui ne diffèrent que par l ou m , l'atome a la même énergie.

Comme unité de mesure pour l'énergie, l'eV (électron-volt) a été utilisé en tant qu'unité habituelle en physique et en chimie nucléaires : il s'agit de l'énergie qu'une particule de charge élémentaire e absorbe lorsqu'elle traverse une différence de potentiel de 1 volt. D'où :

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J.}$$

L'énergie a la valeur la plus faible lorsque l'atome est à l'état fondamental. Les valeurs d'énergie dans les états excités sont plus élevées de la quantité absorbée lors de l'excitation. Nous ne tenons pas compte du fait qu'un atome peut également être mis en mouvement, et donc que son énergie peut être volontairement modifiée. On considère ici les atomes au repos.

La figure montre que les distances entre les valeurs d'énergie adjacentes deviennent de plus en plus petites à mesure que l'énergie augmente. L'énergie la plus élevée relevée correspond à l'ionisation de l'atome : lorsque l'énergie de l'atome dépasse cette valeur, l'électron se détache de l'atome. Dans le cas de l'atome d'hydrogène, il ne reste qu'un seul proton.

Un atome au repos ne peut stocker qu'une quantité d'énergie bien précise. L'énergie de l'atome ne dépend que du nombre quantique n , mais pas de l ni de m .

4.5 La densité de courant de l'électronium

Nous avons vu que la densité d'électronium peut être calculée à partir de la fonction d'onde.

Avec un effort supplémentaire, le moulin n°2 de la Fig. 3.2 peut permettre de calculer une autre fonction intéressante: la *densité de courant de l'électronium*, noté $\vec{j}_m(x, y, z)$.

La grandeur $\vec{j}_m(x, y, z)$ ne dépend pas seulement de la fonction d'onde $\psi(x, y, z)$ elle-même, mais aussi de la dérivée de $\psi(x, y, z)$ par rapport à x , y , et z . Nous ne sommes pas intéressés ici par l'apparence exacte de la formule, mais seulement par ce qui peut être compris avec \vec{j} . Si \vec{j} est multiplié par la masse m de l'électron, on obtient la densité de courant de masse de l'électronium :

$$\vec{j}_m(x, y, z) = m \cdot \vec{j}(x, y, z).$$

Si on multiplie par la charge $-e$ de l'électron, on obtient la densité de courant électrique :

$$\vec{j}_Q(x, y, z) = -e \cdot \vec{j}(x, y, z).$$

Pour mémoire :

$$\begin{aligned} & \text{densité de courant de masse} \\ &= \frac{\text{courant de masse (ou débit massique)}}{\text{surface traversée}} \end{aligned}$$

et

$$\begin{aligned} & \text{densité de courant électrique} \\ &= \frac{\text{courant électrique (ou intensité)}}{\text{surface traversée}} \end{aligned}$$

Voilà pour la nouvelle quantité \vec{j} et comment la calculer. Mais que donne concrètement le calcul, et que peut-on obtenir au moyen de \vec{j} ?

4.6 Moment cinétique et magnétisme des atomes

Si l'on calcule \vec{j} pour différents états de l'électron, on fait quelques observations frappantes :

- pour les états avec $m = 0$, \vec{j} est égal à zéro en tout point (x, y, z) .
- pour les états avec $m \neq 0$, \vec{j} n'est pas égal à zéro. L'électronium circule en lignes circulaires autour d'un axe qui passe par le noyau, Fig. 4.10.

Sur la Fig. 4.8, $m = 0$ pour la ligne d'image supérieure, l'électronium ne circule pas. Dans les autres images, il forme un courant. Pour deux états où m ne diffère que par le signe, la distribution de densité d'électronium est la même, mais les sens d'écoulement sont opposés.

Dans les états avec $m \neq 0$, l'électronium forme un courant avec des lignes d'écoulement circulaires. Un signe différent +/- de m signifie un sens d'écoulement différent.

Du fait que l'électronium circule, l'atome se comporte comme une toupie en rotation et il a un moment cinétique. Ce moment cinétique peut être calculé (avec le moulin n°2), ce qui conduit à un autre résultat intéressant. Sa valeur est un multiple entier de $h/2\pi$. Elle vaut

$$L = m \cdot h/2\pi.$$

Ce résultat peut surprendre, mais il correspond fondamentalement au même comportement que nous connaissons déjà pour la charge électrique. La charge électrique elle aussi n'existe seulement qu'en multiples entiers d'une valeur particulière. Nous avons dit alors qu'elle était quantifiée. Nous voyons donc que le moment cinétique est également quantifié. Nous comprenons maintenant aussi la signification physique du nombre quantique m : il nous indique le moment cinétique de l'atome.

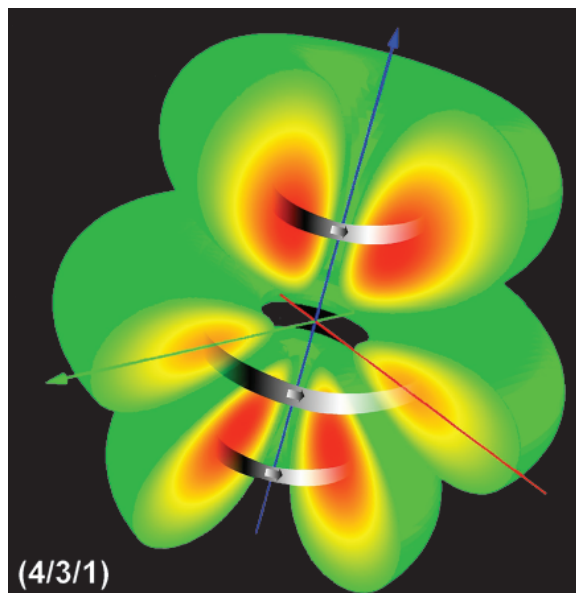


Fig. 4.10 L'écoulement d'électronium est indiqué par des flèches.

Ce moment cinétique, qui est lié à l'écoulement d'électrons autour du noyau, est aussi appelé *moment cinétique orbital*, pour le distinguer d'un autre moment cinétique, dont nous parlerons plus tard.

Dans les états avec $m \neq 0$, l'atome a un moment cinétique. La valeur de ce moment cinétique orbital est un multiple entier de $h/2\pi$. Le moment cinétique est quantifié.

De plus, le fait que l'électronium circule signifie qu'un courant électrique circulaire est présent. Un courant électrique est entouré d'un champ magnétique. Le champ d'un courant circulaire est similaire au champ d'un petit aimant cylindrique.

Dans les états avec $m \neq 0$, l'atome est magnétique. ■

5 TRANSITIONS DANS L'ATOME – ÉTATS NON STATIONNAIRES

5.1 Transitions entre états stationnaires

Un état excité stationnaire est une situation précaire. On peut le comparer avec l'état de la balle sur la Fig. 5.1.

Le centre de gravité de la balle est exactement au-dessus du point haut de la surface. La balle est en équilibre instable. Normalement, il n'y aurait aucune raison pour qu'elle roule vers le bas. Cependant, la moindre perturbation suffit à la faire sortir de sa position d'équilibre. Lorsque cela se produit, elle descend dans un état où le champ gravitationnel a moins d'énergie. Il en est de même pour un atome dans un état excité : la moindre perturbation suffit à déclencher une transition vers un état de moindre énergie. Ce faisant, il libère l'énergie correspondante, généralement sous la forme d'émission d'un photon. L'énergie est alors emportée par le photon.

On suppose que l'atome passe de l'état i à l'état k . Les énergies de l'atome dans les deux états sont E_i et E_k . Le photon doit alors avoir l'énergie

$$E = E_i - E_k.$$

Puisque $E = h \cdot f$ pour le photon, nous avons :

$$f = \frac{E_i - E_k}{h}.$$

Avec notre moulin n°2 de la Fig. 3.2, on peut également calculer ce que fait l'électron pendant que la transition a lieu. Comme il s'agit d'un passage de l'état i à l'état k , alors il faut rentrer dans le moulin la fonction d'onde de l'état initial ψ_i et celle de l'état final ψ_k . A partir de là, la fonction d'onde $\psi_{i \rightarrow k}$ est calculée qui décrit l'atome pendant la transition. Ici encore, nous nous intéressons à la densité d'électronium et laissons le moulin n°2 calculer le carré

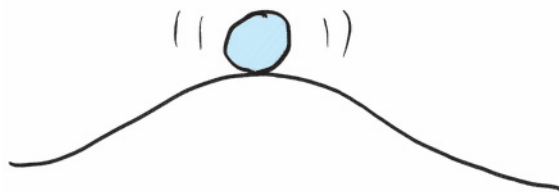


Fig. 5.1 L'état d'un atome excité peut être comparé à l'état d'équilibre instable de la balle.

$$\rho_{i \rightarrow k} = (\psi_{i \rightarrow k})^2$$

de la fonction d'onde de transition. Le résultat est intéressant : la densité d'électronium $\rho_{i \rightarrow k}$ dépend non seulement des coordonnées de l'espace, mais aussi du temps. Lorsque la transition commence, la distribution de densité décrite $\rho_{i \rightarrow k}$ se met à osciller. La Fig. 5.2 montre trois moments de ce processus. La séquence d'images de la Fig. 5.2a se rapporte au début du processus ; la transition n'est pas très avancée. Sur la Fig. 5.2b, la transition est à peu près à mi-chemin. Juste avant que l'état fondamental ne soit atteint, cela ressemble à ce que montre la Fig. 5.2c.

On voit beaucoup mieux le déroulement de la transition dans une animation, voir par exemple : www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/Atom/Start.html.

Deux tendances peuvent être mises en évidence dans le mouvement de l'électronium :

- l'électronium effectue un mouvement d'oscillation rapide. On peut le voir dans chacune des trois séquences d'images de la Fig. 5.2.
- la forme globale de l'électronium passe lentement de celle de l'état initial à celle de l'état final. On peut le voir lorsque l'on compare les trois séquences d'images.

Une transition typique dure environ 10^{-8} s. Pendant ce temps, l'électron effectue environ 10^7 oscillations. Bien sûr, l'on ne peut pas montrer dix millions d'oscillations dans une animation. Certaines astuces ont donc dû être utilisées dans la production des vidéos : on fait comme si environ 15 oscillations seulement avaient lieu pendant toute la transition.

Les états que traverse l'atome pendant la transition sont appelés états *non stationnaires*.

5.2 Le processus d'émission

L'« animation » de la Fig. 5.2 montre $\rho = \psi^2$ en fonction de l'espace et du temps. On a en outre

$$\rho_Q = e \cdot \rho.$$

Les images nous disent aussi que la densité de charge de l'électron oscille de haut en bas. Cela signifie que l'atome se comporte comme une antenne. Dans une antenne pour ondes radio, la charge électrique oscille en va-et-vient. Cela crée un champ électrique et un champ magnétique.

Les deux champs évoluent rapidement, ce qui crée une onde électromagnétique. Une antenne dans la-

quelle la charge électrique oscille en va-et-vient est également appelée *antenne dipôle*, Fig. 5.3a.

Comme la charge électrique dans l'atome oscille rapidement de haut en bas, l'atome se comporte comme une antenne dipôle : il émet une onde électromagnétique, et libère ainsi de l'énergie. Nous comprenons maintenant deux choses :

- au fur et à mesure que l'atome émet de l'énergie lors du processus d'oscillation, il passe progressivement à l'état d'énergie basse.
- la fréquence d'oscillation de l'électronium est égale à la fréquence de la lumière émise.

Lors de la transition d'un atome d'un état d'énergie supérieure à un état d'énergie inférieure, la charge électrique de l'électronium oscille. L'atome agit comme une antenne. La fréquence d'oscillation est égale à la fréquence de la lumière émise.

5.3 Transitions rapides et lentes

Une transition typique dure environ 10^{-8} s, mais il y a aussi des transitions plus lentes, et il y en a qui sont si lentes qu'on peut pratiquement dire qu'il n'y a pas de

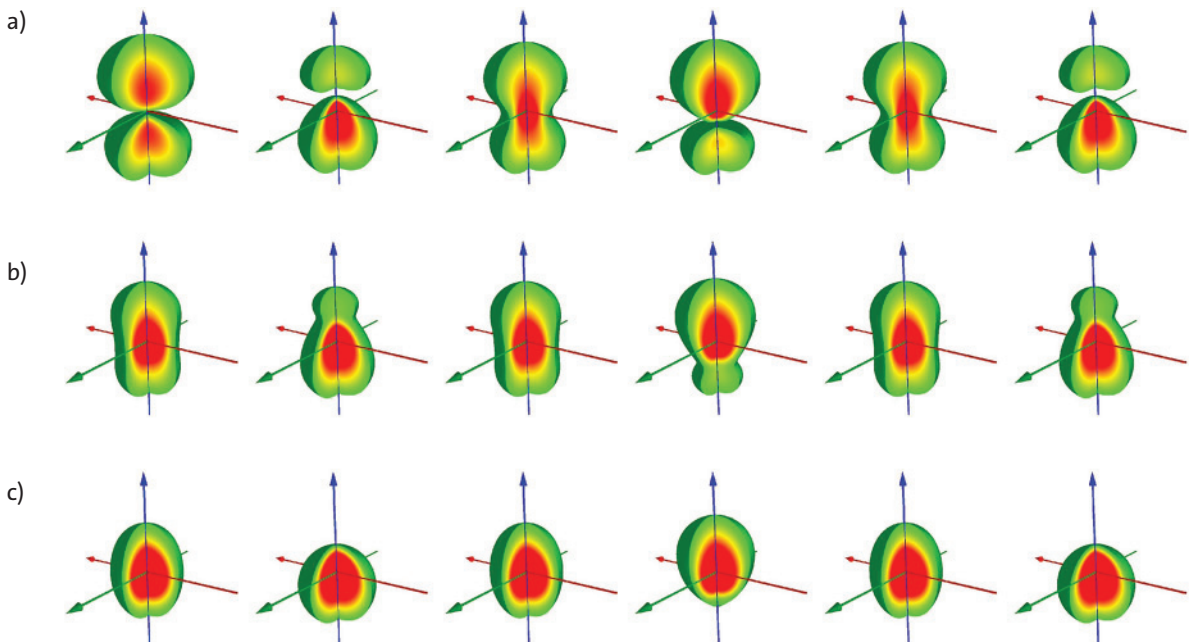
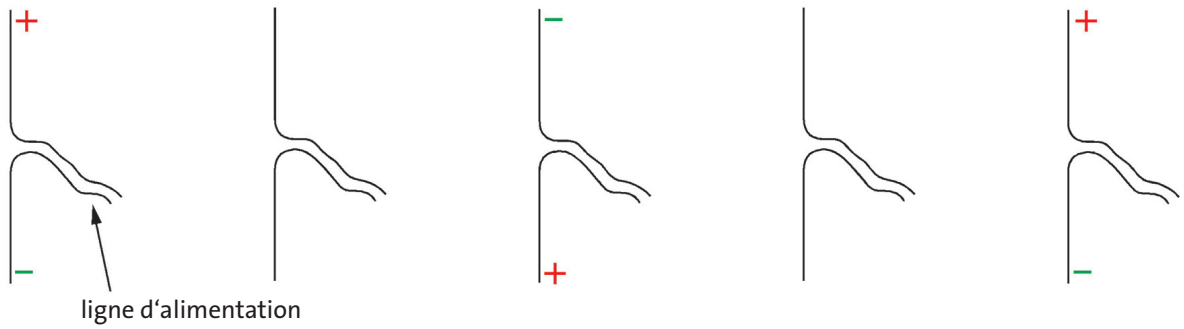


Fig. 5.2 Passage de l'état stationnaire (2/1/0) à l'état fondamental (1/0/0). L'électron oscille de haut en bas. (a) début, (b) milieu, (c) fin de transition.

Transitions entre états stationnaires

a)



b)

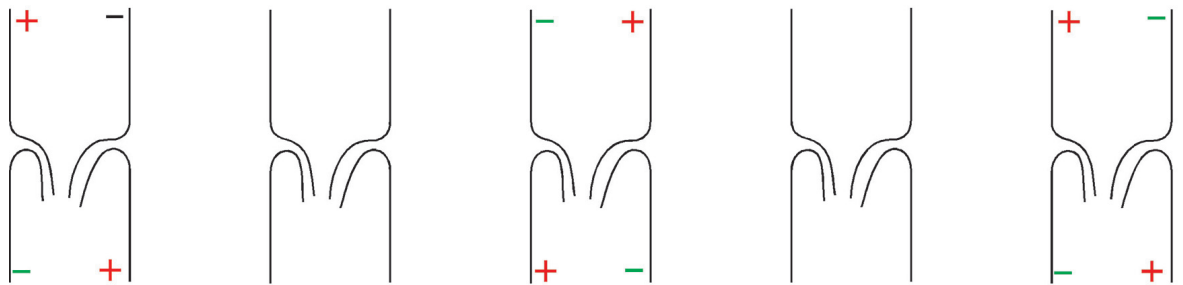


Fig. 5.3 (a) Dans une antenne dipôle, la charge électrique oscille de haut en bas (b) Une antenne quadripolaire se compose de deux antennes dipôles qui oscillent dans des directions opposées.

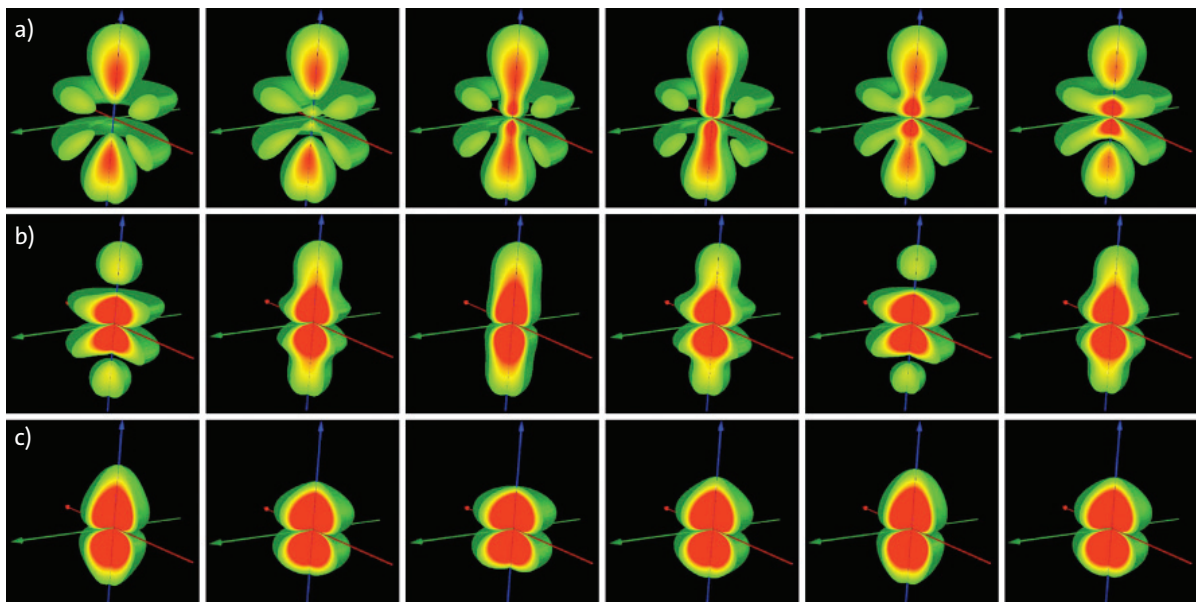


Fig. 5.4 Transition quadripolaire $(4/3/0) \rightarrow (2/1/0)$. Les moitiés supérieure et inférieure de l'électronium oscillent en sens opposés.

transition du tout. Vous pourrez comprendre pourquoi certaines transitions sont si lentes si vous regardez les vidéos correspondantes. La Fig. 5.4 montre une transition très lente. La distribution des charges oscille également ici. Cependant, le mouvement n'est pas simplement un mouvement en va-et-vient. Il ne correspond pas à l'oscillation d'une antenne dipôle mais ressemble à celle d'une *antenne quadripolaire*.

Une antenne quadripolaire est obtenue en plaçant deux antennes dipôles oscillant dans des directions opposées, proches l'une de l'autre, ou l'une au-dessus de l'autre, Fig. 5.3b. On comprend qu'une telle antenne n'émette que faiblement : le champ que l'une génère est presque totalement compensé par le champ de l'autre. Sur la Fig. 5.4, la moitié supérieure du nuage électronique oscille dans une direction opposée à celle de la moitié inférieure. Il n'est donc pas surprenant que l'atome n'émette que faiblement lors d'une telle transition. Comme l'atome rayonne faiblement, il lui faut aussi beaucoup de temps pour se débarrasser de l'énergie associée à la transition.

Enfin, il existe des transitions où l'électron rayonne encore moins qu'une antenne quadripolaire.

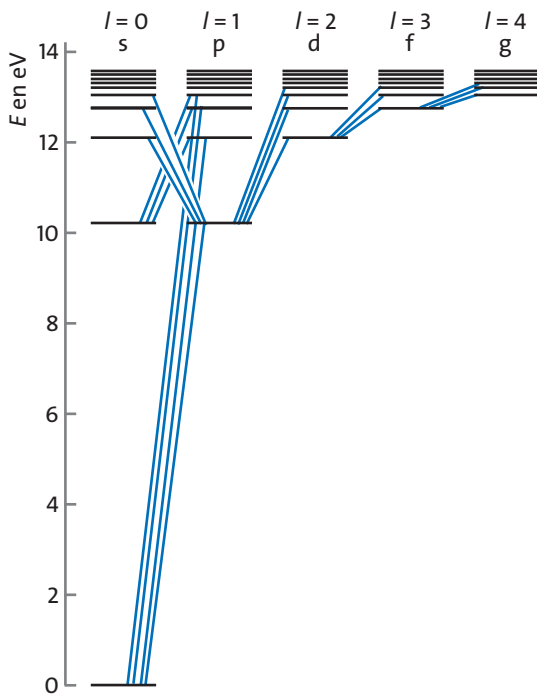


Fig. 5.5 Quelques-unes des transitions autorisées (transitions dipolaires) de l'atome d'hydrogène.

Pour des transitions différentes, l'atome rayonne avec une intensité différente.

La Fig. 5.5 montre à nouveau l'échelle d'énergie de l'atome d'hydrogène, mais d'une manière particulière.

Pour les états avec un nombre quantique l différent, les échelles d'énergie ont été dessinées séparément les unes à côté des autres. Les *transitions dipolaires* sont également représentées, c'est-à-dire les transitions pour lesquelles l'atome rayonne fortement.

On voit que le nombre quantique l change de 1 lors de ces transitions. On dit que pour les transitions dipolaires $\Delta l = \pm 1$.

La Fig. 5.6 montre des « transitions », pour lesquelles $\Delta l = 0$ ou $\Delta l = \pm 2$, qui ne se produisent pas, ou presque jamais.

Pour les transitions rapides $\Delta l = \pm 1$. Les autres transitions sont très lentes ou n'ont pas lieu du tout.

Lorsque les spectres d'émission des atomes ont été découverts, la théorie quantique n'existait pas encore. Il

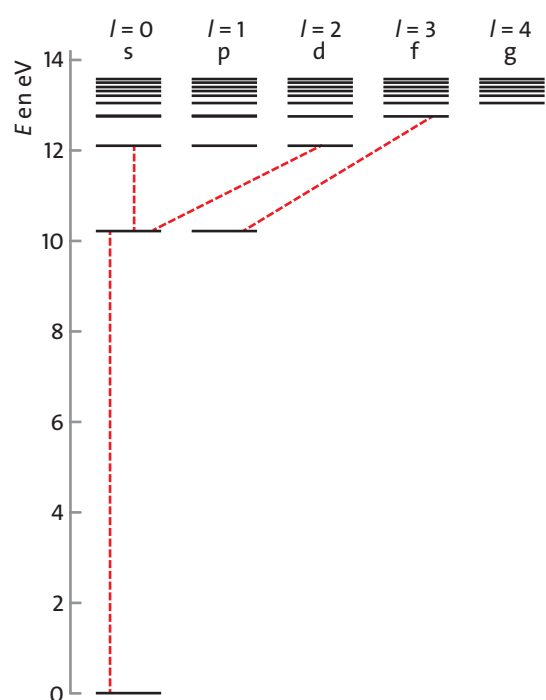


Fig. 5.6 Les transitions telles que celles représentées en pointillés n'ont pas lieu, ou sont si faibles qu'elles ne peuvent pas être observées.

Transitions rapides et lentes

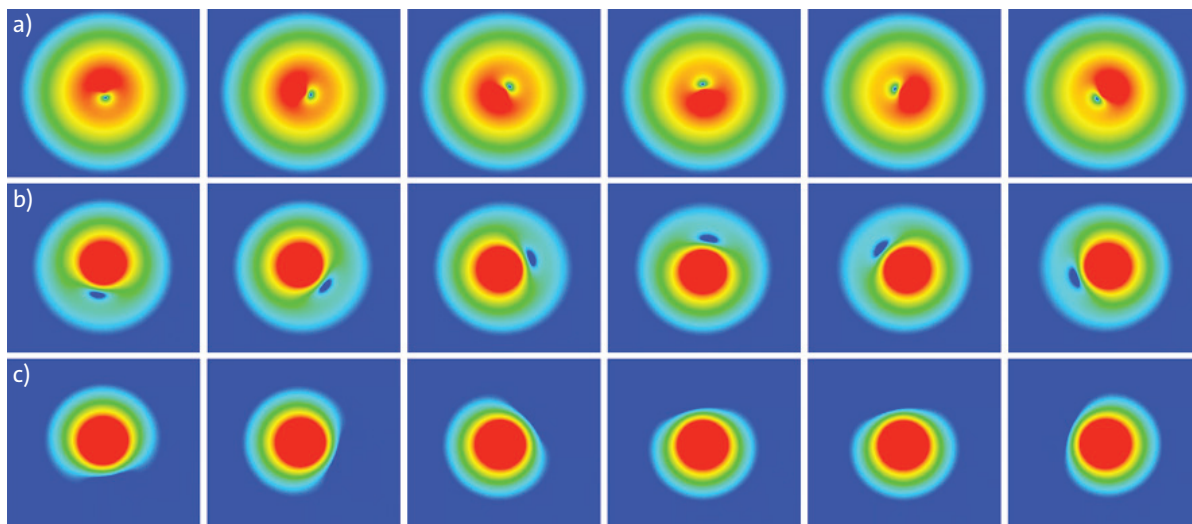


Fig. 5.7 Transition $(2/1/1) \rightarrow (1/0/0)$. L'électron oscille circulairement : (a) début, (b) milieu, (c) fin de la transition.

avait été noté que certaines transitions ne se produisaient pas, mais on ne savait pas pourquoi. Donc au début on disait simplement qu'elles étaient *interdites*. Celles qui ont lieu sont appelées *transitions autorisées*. Ces désignations ont survécu jusqu'à nos jours.

Une transition intéressante est illustrée à la Fig. 5.7. Ici, l'électronium exécute un mouvement circulaire. En conséquence, la lumière émise est polarisée circulairement : le pic du vecteur d'intensité du champ électrique en un point fixe du champ d'onde ne se déplace pas en va-et-vient comme nous le voyons habituellement, mais tourne autour de la direction de déplacement de l'onde. ■

6 ATOMES À PLUSIEURS ÉLECTRONS

6.1 Orbitales des électrons dans des atomes plus gros

Nous avons envisagé – par la pensée – comment on peut progressivement construire de grands atomes à partir d'atomes plus petits : en ajoutant un proton dans le noyau puis un électron dans l'enveloppe. Nous pouvons décrire plus en détail ce processus d'assemblage d'un atome plus gros, maintenant que nous avons vu à quoi ressemblait la forme des orbitales des électrons. Une méthode assez simple émerge.

Chacun des électrons d'un atome doit être dans un état stationnaire, sinon l'atome rayonnerait, dégageant de l'énergie – jusqu'à ce que tous les électrons soient dans des états stationnaires. On voit donc que chacun des électrons d'un atome doit occuper une des orbitales que nous avons observées au chapitre précédent. Cependant, il y a quelques particularités.

Nous commençons avec l'atome d'hydrogène dans l'état fondamental.

L'électron occupe une orbitale à symétrie sphérique (1/0/0). Nous amenons maintenant mentalement un deuxième proton dans le noyau (ainsi que deux neutrons, mais ceux-ci ne nous intéressent pas pour le moment). Dans ce processus, l'orbitale de notre électron se rétrécit tout en conservant sa forme à symétrie sphérique. Nous ajoutons ensuite un deuxième électron, qui occupe à nouveau une orbitale (1/0/0). Les orbitales des deux électrons ont la même forme et sont décrites par la même distribution de densité. Cependant, les nouvelles orbitales sont redevenues légèrement plus grandes.

Jusqu'à présent, rien d'étonnant ne s'est produit, ou du moins à ce qu'il semble.

Cela ne devient surprenant que lorsque nous ajoutons une troisième portion d'électronium (et un troisième proton), de sorte à obtenir un atome de lithium. Cet électron n'occupe plus l'orbitale (1/0/0) de l'état fondamental, mais occupe une orbitale (2/0/0), qui est toujours à symétrie sphérique, mais diffère significativement de l'orbitale (1/0/0). C'est comme s'il n'y avait plus de place dans l'orbitale de l'état fondamental (1/0/0). Et en effet, c'est une règle très générale :

Une orbitale ne peut être occupée que par deux électrons.

Nous ajoutons un quatrième électron (et un quatrième proton) pour obtenir un atome de béryllium. Le quatrième électron occupe la même orbitale que le troisième, à savoir l'orbitale (2/0/0). Les quatre atomes – hydrogène, hélium, lithium et béryllium – sont à symétrie sphérique.

Ce n'est que lorsque nous construisons le cinquième atome, l'atome de bore, qu'apparaît une orbitale qui n'est plus à symétrie sphérique : une orbitale (2/1/0). L'atome de bore n'est donc plus à symétrie sphérique. Cependant, l'écart par rapport à la forme sphérique est faible, car les quatre premières orbitales occupées ont toutes une symétrie sphérique.

C'est ainsi que nous pouvons continuer avec la construction d'atomes, en ajoutant une portion d'électronium l'une après l'autre. Chacune de ces portions occupe une orbitale spécifique dans l'atome, ou en d'autres termes : elle adopte une certaine forme. Les orbitales occupées s'emboîtent alors comme les pièces d'un puzzle.

Lorsque de nouvelles orbitales sont occupées, des distributions qui sont exactement à symétrie sphérique peuvent alors émerger à plusieurs reprises.

Nous voulons illustrer cela en utilisant un modèle très simplifié, Fig. 6.1 Les trois pièces A, B et C du puzzle s'emboîtent de telle sorte, qu'elles forment globalement un anneau noir. Cependant, les pièces n'ont pas d'arêtes vives comme les pièces d'un puzzle normal. Cela signifie que l'on doit les placer de manière à ce qu'elles se chevauchent un peu. Ici, le gris rencontre le gris, de telle sorte qu'ensemble ils donnent le noir.

Il en est de même pour les orbitales des électrons. Lorsqu'elles se chevauchent, les densités d'électronium s'ajoutent et un « puzzle » achevé apparaît lors de l'ajout de nouvelles orbitales (« pièces de puzzle »).

L'ajout d'un autre électron démarre un nouveau puzzle. Le nouvel électron n'est que faiblement lié. Il peut facilement être séparé de l'atome.

En ajoutant plus d'électrons, ce puzzle sera complété et le prochain atome stable sera atteint. Et ainsi de suite.

Le spin

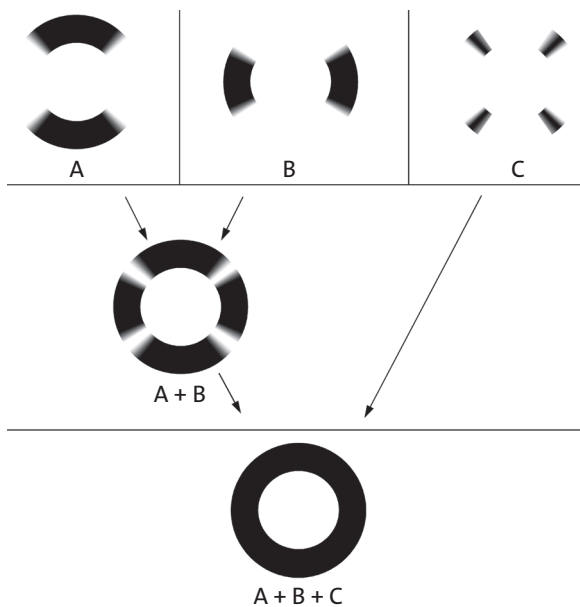


Fig. 6.1 Puzzle aux bords flous. Les trois parties A, B et C réunies donnent un anneau noir. Ainsi nous avons la règle suivante : gris + gris = noir, et également : gris clair + gris foncé = noir, etc...

On peut aussi dire que les orbitales, qui font partie de l'un de ces puzzles terminés, prises ensemble forment une *enveloppe*. De plus, on peut grossièrement imaginer que l'enveloppe d'électronium est constituée de plusieurs sous-enveloppes ou couches : une couche après l'autre. Le *modèle d'enveloppe* fournit une représentation approximative. Mais il ne faut pas oublier que les sous-enveloppes (dans le sens radial) n'ont pas d'arête vive. Tout comme les orbitales qui appartiennent à une même sous-enveloppe, elles se chevauchent.

La Fig. 6.2 montre comment une enveloppe se forme à partir de 5 orbitales.

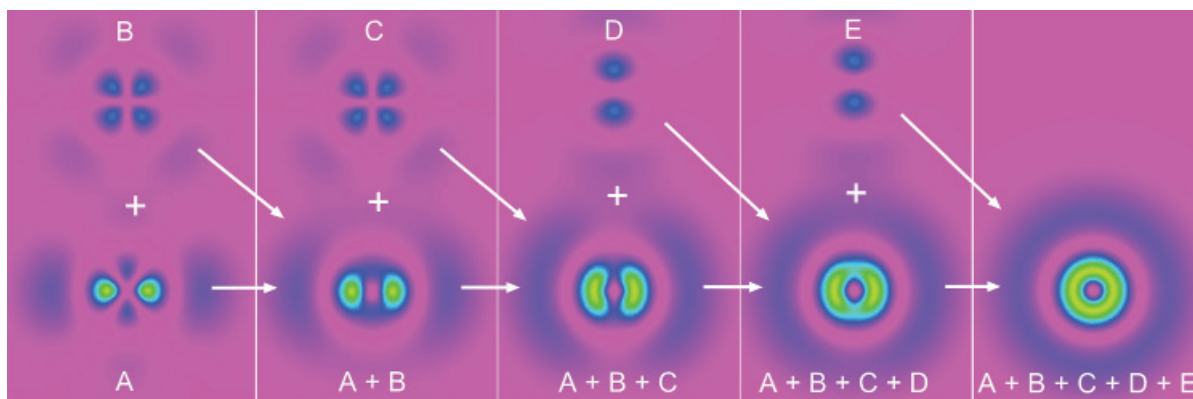


Fig. 6.2 Structure d'une enveloppe d'orbitales A, B, C, D et E. Les orbitales B et C se ressemblent sur l'image, mais elles diffèrent dans la direction du courant : de même les orbitales D et E. Le nuage électronique complet – à droite – est à symétrie sphérique.

Les atomes avec une sous-couche pleine sont particulièrement stables. Pour extraire un électron, c'est-à-dire une portion élémentaire d'électronium, d'un atome aussi stable, une quantité d'énergie importante est nécessaire. Ces atomes stables à symétrie sphérique comprennent les atomes des gaz nobles : hélium, néon, argon, krypton, xénon et radon.

La structure en couche de l'enveloppe atomique est la raison pour laquelle – au moins approximativement – les propriétés des atomes se répètent périodiquement en fonction du nombre d'électrons. Et c'est pourquoi il est logique d'organiser les atomes dans le *tableau périodique des éléments*.

6.2 Le spin

La règle que nous venons d'apprendre semble avoir un défaut. D'une part, elle dit que les électrons d'un atome doivent occuper des orbitales différentes et donc doivent être décrits par des fonctions d'onde différentes. On peut aussi dire qu'ils doivent être dans des *états* différents. D'autre part, la nature ne semble pas prendre cette règle très au sérieux : une orbitale définie peut être occupée par deux électrons et non par seulement un. Nous allons voir maintenant que l'état d'un électron n'est pas uniquement caractérisé par son orbitale.

C'est parce que la fonction d'onde contient une autre variable en plus de x, y, z : le *spin*. Le mot provient de l'anglais « spin », qui signifie tourner, tourner.

La variable de spin, notée s , de la fonction d'onde ne peut avoir que deux valeurs. La signification physique de la grandeur s est assez simple en première approche. Elle nous dit que l'électron a un moment cinétique, en

plus du moment cinétique orbital que nous avons mentionné plus tôt et qui est lié à l'écoulement d'électrons autour du noyau. Le moment cinétique de spin ne peut prendre que l'une des deux valeurs suivantes, à savoir $+h/4\pi$ et $-h/4\pi$. Les valeurs diffèrent d'un seul quantum de moment cinétique, $h/2\pi$.

Mais comment peut-on se représenter le moment cinétique de spin ? A quel mouvement de rotation se rattache-t-il ?

L'électronium semble avoir une autre possibilité de rotation que l'écoulement circulaire autour du noyau. Vous pouvez l'imaginer comme une sorte de rotation intrinsèque, d'auto-rotation, en chaque point de l'électronium, Fig. 6.3. Mais attention ! Cette image représente un modèle – mais pas particulièrement bon. Si cela n'a pas de sens pour vous, vous pouvez être rassuré par le fait que vous êtes en bonne compagnie. Même des physiciens professionnels ont des problèmes pour une interprétation claire du spin.

Que nous apporte maintenant le spin ? Revenons à notre ancien problème : nous voulons construire progressivement un atome en ajoutant un électron à la fois à la couche atomique (et le nombre correspondant de protons au noyau). Les deux électrons de l'atome d'hélium, occupant tous deux une orbitale (1/0/0), ne sont pas dans le même état, ils ont des spins différents. Il en est de même pour tous les atomes supérieurs. Alors que nous avons initialement conclu qu'une orbitale pouvait être occupée par deux électrons, nous pouvons maintenant dire que tous les électrons doivent être dans des états différents. Dans ce contexte, un état est caractérisé par l'orbitale et par le spin.

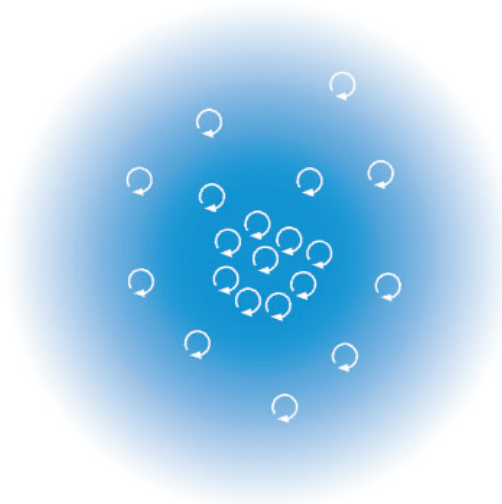


Fig. 6.3 Un modèle, plutôt médiocre, pour un mouvement de rotation lié au moment cinétique de spin : l'électronium forme de très nombreux petits tourbillons.

Les électrons d'un atome se trouvent dans des états différents. Deux électrons occupant la même orbitale ont des spins différents.

6.3 A nouveau la fonction d'onde

Nous avons décrit la structure des atomes comportant plusieurs électrons en indiquant quelles orbitales sont occupées. Cela nous donne un bon aperçu général. Mais la procédure n'est pas très précise, car lorsqu'une nouvelle orbitale est occupée, les anciennes sont déformées, et même celle nouvellement occupée n'a pas exactement la même forme que les orbitales d'hydrogène.

Si vous êtes intéressé par l'apparence exacte de l'enveloppe électronique, vous devez à nouveau faire confiance à la théorie, c'est-à-dire à notre moulin mathématique.

Cependant, le travail que notre moulin doit exécuter est beaucoup plus difficile maintenant. Considérons l'atome d'hélium, c'est-à-dire le deuxième atome le plus simple après l'atome d'hydrogène. Les fonctions d'onde fournies par le moulin n°1 ont maintenant la forme suivante :

$$\psi_i(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2).$$

L'indice i est là pour énumérer les différentes fonctions car, comme pour l'atome d'hydrogène, on obtient plusieurs voire beaucoup de résultats correspondant aux différents états stationnaires de l'atome.

Mais que peut-on se représenter au moyen d'une telle fonction ? Elle n'attribue pas une valeur à un point de l'espace, mais à deux points de l'espace. Nous choisissons les valeurs de six variables indépendantes et obtenons alors une valeur de la fonction. Cela peut être exprimé mathématiquement comme suit : pour chaque point dans un espace à six dimensions, il existe une valeur de la fonction d'onde. Avec l'atome de lithium, l'espace est à neuf dimensions, avec le bore à douze dimensions, avec l'oxygène à 24 dimensions, avec le plomb à 246 dimensions, etc. Il est difficile de se faire une idée claire de ces fonctions. Heureusement, cependant, notre moulin n°2 n'a aucune difficulté à traiter ces fonctions, et il nous donne à nouveau des résultats que nous pouvons bien comprendre : il donne la densité d'électronium, la densité de courant, les valeurs d'énergie, de quantité de mouvement, de moment cinétique, etc. ■

7 SPECTRES

7.1 L'excitation des atomes par de la lumière

Pour exciter un atome avec un photon, l'énergie du photon doit être exactement égale à l'énergie dont l'atome a besoin pour passer de l'état fondamental à l'état excité. Si le photon a moins d'énergie, l'atome ne peut pas être excité car l'énergie n'est pas suffisante. En revanche, si le photon a plus d'énergie, l'excitation ne sera pas possible non plus.

Nous allons décrire une expérience particulière, en prenant des atomes de sodium comme atomes à exciter. Avec le sodium, l'observation de ce qui se passe fonctionne particulièrement bien. Dans des conditions normales, le sodium est une substance solide. Il peut cependant être transformé en vapeur de sodium en le chauffant.

Nous obtenons les photons avec une lampe qui crée un faisceau de lumière blanche, c'est-à-dire un mélange de lumière avec des longueurs d'onde de 400 nm à 800 nm. Cela signifie que nous disposons d'un mélange de photons de différentes énergies.

Le faisceau lumineux de la lampe est envoyé sur le gaz de sodium, Fig. 7.1. La plus grande partie des photons a une énergie qui ne correspond à aucune excitation. Les photons passent à travers les atomes du gaz sans être perturbés. Seule une très petite fraction des photons a une énergie appropriée, et seuls ces photons sont absorbés par les atomes. Les atomes passent alors dans un état excité.

Après avoir traversé le gaz, les photons absorbés manquent dans le faisceau lumineux. Cependant, comme cela n'est vrai que pour une très petite partie de la lumière, on ne peut rien voir dans un premier temps. C'est pourquoi nous analysons davantage la lumière après son passage à travers le gaz de sodium : nous effectuons une décomposition spectrale.

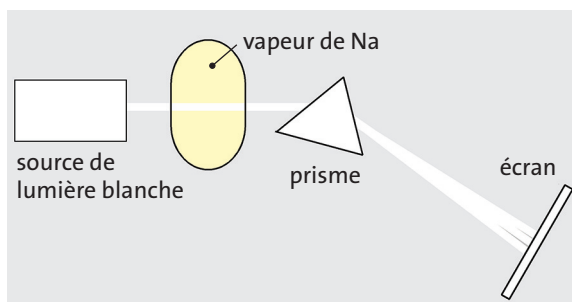


Fig. 7.1 La lumière d'une ampoule à incandescence passe à travers du gaz de sodium et est ensuite décomposée spectralement.

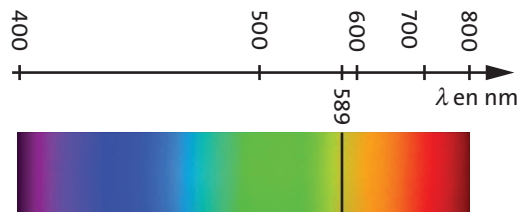


Fig. 7.2 La lumière de la longueur d'onde 589 nm est absente du spectre.

On dirige un mince faisceau de la lumière qui a traversé le gaz de sodium sur un prisme. Après le prisme, un écran blanc est placé à une plus grande distance. La lumière, qui est alors triée par longueur d'onde, impacte cet écran. Comme la lumière de différentes longueurs d'onde apparaît à nos yeux comme des effets de couleur différents, nous voyons les couleurs de l'arc-en-ciel sur l'écran.

Cependant, en regardant de plus près, nous constatons que l'écran reste sombre à une position définie dans la gamme correspondant à la lumière jaune, Fig. 7.2 : la lumière dont les photons ont été absorbés

par les atomes de sodium est manquante. Nous pouvons déterminer la longueur d'onde de la lumière manquante à l'aide d'un spectromètre : $\lambda = 589 \text{ nm}$.

A partir de là, on peut calculer l'énergie des photons absorbés :

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{589 \cdot 10^{-9} \text{ m}} \approx 0,3 \cdot 10^{-18} \text{ J}$$

C'est également la différence d'énergie entre l'état fondamental et l'état excité le plus bas des atomes de sodium.

Les photons d'énergie $E = 0,3 \cdot 10^{-18} \text{ J}$ ne sont pas les seuls à être absorbés par les atomes de sodium. Les atomes de sodium peuvent également être amenés dans de nombreux autres états excités. C'est pourquoi

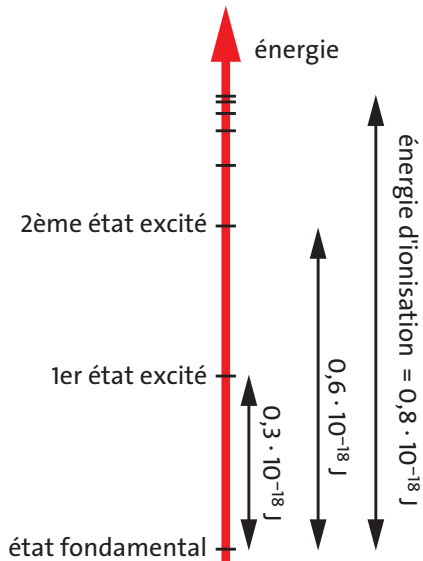


Fig. 7.3 Energies des états excités de l'atome de sodium.

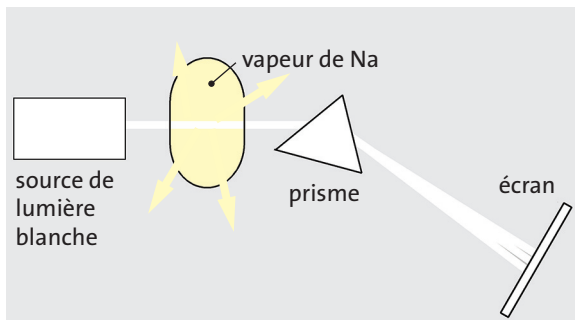


Fig. 7.4 Le sodium excité rayonne dans toutes les directions.

d'autres types de photons peuvent également être absorbés. Les énergies de ces photons sont plus élevées que celles des photons analysés précédemment et leurs longueurs d'onde sont plus courtes.

Ainsi, les atomes de sodium absorbent par exemple des photons d'une énergie de $0,6 \cdot 10^{-18} \text{ J}$, Fig. 7.3. Cela correspond à une longueur d'onde de 330 nm , c'est-à-dire à de la lumière ultraviolette.

En résumé :

Les photons ayant une énergie adaptée peuvent exciter les atomes. Les photons sont alors absorbés dans ce processus.

Nous avons vu que la plupart des photons de la lumière visible ne sont pas absorbés par les atomes de sodium. Il en va de même pour toutes les autres substances gazeuses. Leurs atomes et/ou molécules n'absorbent que très peu ou pas du tout de photons visibles. Cela explique une caractéristique des gaz que vous connaissez bien :

Les gaz sont transparents.

Un photon est émis lorsqu'un atome de sodium excité retourne à l'état fondamental. Dans l'expérience que nous venons de décrire, nous pouvons constater que c'est effectivement le cas. En observant de plus près le récipient en verre rempli de gaz de sodium pénétré par le faisceau lumineux, nous pouvons voir une lumière légèrement jaunâtre. Une analyse avec le spectromètre montre qu'elle a la même longueur d'onde que la lumière qui manque sur l'écran. Ainsi, les atomes de sodium libèrent l'énergie qu'ils ont obtenue lors de l'absorption d'un photon, en générant un photon équivalent.

Cependant, l'émission ne se produit pas seulement dans la direction du mouvement des photons absorbés, mais dans toutes les directions, Fig. 7.4. C'est pourquoi les photons qui correspondent à l'excitation manquent presque complètement dans le faisceau qui ressort.

Exercices

- Des atomes de sodium peuvent être amenés de l'état fondamental au troisième état excité au moyen d'une lumière de longueur d'onde $\lambda = 285 \text{ nm}$. Calculez la différence d'énergie entre l'état fondamental et le troisième état excité.
- Quelle est la longueur d'onde maximale que peut avoir la lumière qui doit être utilisée pour ioniser les atomes de sodium ? De quel type de lumière s'agit-il ?

7.2 L'excitation des atomes par des électrons

Outre les photons, d'autres particules telles que des électrons, des ions, des protons, des atomes et des molécules peuvent être utilisées pour exciter des atomes. Comme les électrons sont très fréquemment utilisés, nous examinerons ce cas dans ce qui suit.

Pour pouvoir exciter un atome, un électron a besoin, en plus de son énergie au repos, de la quantité d'énergie nécessaire à l'excitation. L'énergie d'un électron peut être augmentée en le mettant en mouvement rapide, c'est-à-dire en lui donnant de la quantité de mouvement, car il reçoit de l'énergie en même temps que de la quantité de mouvement. Ce processus consistant à charger l'électron d'une quantité de mouvement et d'énergie n'est pas difficile.

Les électrons sont placés dans un champ électrique. Comme les électrons sont chargés électriquement, le champ les attire. La quantité de mouvement et l'énergie des électrons augmentent. Si de tels électrons rapides frappent des atomes, ces derniers sont déformés et peuvent passer à un état excité.

Si l'électron a reçu plus d'énergie que nécessaire pour l'excitation, il emportera cet excès d'énergie après l'excitation. Il est donc différent des photons à cet égard. Les photons disparaissent dans le processus d'excitation et, par conséquent, rien ne peut absorber l'énergie restante.

Les atomes peuvent être excités par des électrons rapides.

Si l'énergie de l'électron est assez élevée, il peut ioniser l'atome.

7.3 Les gaz comme sources de lumière

Les lampes à décharge à gaz – à ne pas confondre avec les lampes fluorescentes – sont des sources de lumière artificielle fréquemment utilisées.

Une ampoule électrique à incandescence contient un fil métallique incandescent qui s'illumine grâce à un courant électrique. Dans une lampe à décharge à gaz, c'est un gaz qui émet de la lumière. Nous pouvons utiliser nos connaissances sur l'excitation des atomes pour expliquer comment le gaz s'illumine.

Le gaz se trouve dans un tube de verre fermé. A chaque extrémité du tube de verre, il y a une électrode

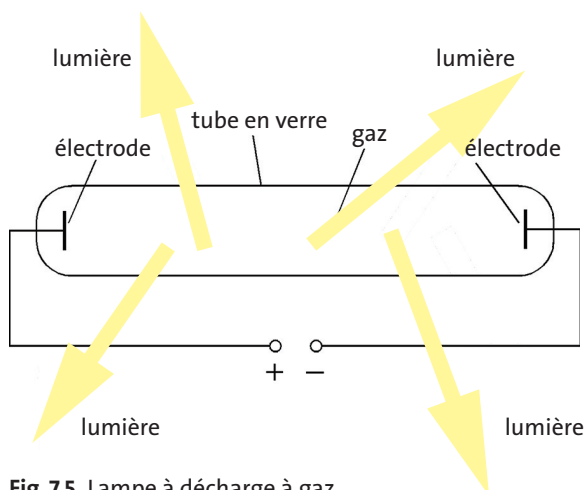


Fig. 7.5 Lampe à décharge à gaz

métallique, Fig. 7.5. L'une des électrodes est à un potentiel électrique faible, l'autre à un potentiel élevé. L'électrode à faible potentiel est de plus chauffée. De ce fait, elle libère des électrons. (Une grande partie des substances solides est en effet constituée d'électronium. En chauffant, l'électronium peut être déformé jusqu'à un point où les électrons se détachent de la substance solide). Comme les électrons ont une charge négative, ils sont tirés vers l'électrode de potentiel élevé par le champ électrique entre les deux électrodes métalliques.

Sur leur chemin vers cette électrode, les électrons rencontrent des atomes. Ainsi, deux choses se produisent :

1. Les atomes qui sont frappés par des électrons rapides sont ionisés, c'est-à-dire que d'autres électrons libres sont produits.
2. Les atomes qui sont frappés par des électrons plus lents sont excités.

Les électrons supplémentaires que nous obtenons dans le processus 1 sont à leur tour accélérés par le champ et peuvent ioniser d'autres atomes, etc. À partir des électrons libérés par l'électrode métallique, de grandes quantités d'électrons libres sont donc créées dans l'ensemble de la lampe à décharge à gaz.

De ce fait, la fréquence du processus 2 augmente également, c'est-à-dire que des atomes sont excités par l'impact des électrons. Les atomes excités émettent des photons en retournant à l'état fondamental : le gaz émet de la lumière.

Dans les lampes à décharge à gaz, les atomes sont excités par des électrons. Les atomes émettent des photons lorsqu'ils retournent à l'état fondamental.

Les passages piétons, les tunnels et les carrefours sont souvent éclairés au moyen de lampes à décharge qui contiennent de la vapeur de sodium. Les atomes de sodium émettant des photons « jaunes », la lumière jaune typique des lampes à sodium est créée.

Par rapport aux autres lampes à décharge à gaz, les lampes au sodium sont celles qui consomment le moins d'énergie. L'inconvénient de ces lampes est leur spectre. Comme elles n'émettent que de la lumière d'une seule longueur d'onde, les objets qu'elles éclairent apparaissent tous de la même couleur : tout apparaît dans un jaune plus ou moins vif. Pour atténuer cet effet, les lampes contiennent souvent des suppléments d'autres gaz qui émettent de la lumière d'autres longueurs d'onde. Cela améliore l'effet de reproduction des couleurs.

Les lampes fluorescentes constituent un type de sources lumineuses légèrement différent. Vous les connaissez bien car elles sont certainement aussi utilisées dans votre école pour éclairer les salles de classe. De plus, les lampes à économie d'énergie sont des lampes fluorescentes.

Le gaz qui est excité par des électrons dans ce cas est la vapeur de mercure. La différence d'énergie entre l'état fondamental et le premier état excité est d'environ $0,8 \cdot 10^{-18}$ J. Les photons de cette énergie sont équivalents à une lumière de longueur d'onde d'environ 250 nm. Par conséquent, la vapeur de mercure émet d'abord une lumière UV invisible. Le tube de verre dans lequel se trouve le mercure est recouvert à l'intérieur d'une substance blanche, la *substance fluorescente*. La lumière UV émise par le mercure réagit avec la substance fluorescente et la lumière visible souhaitée apparaît, Fig. 7.6.

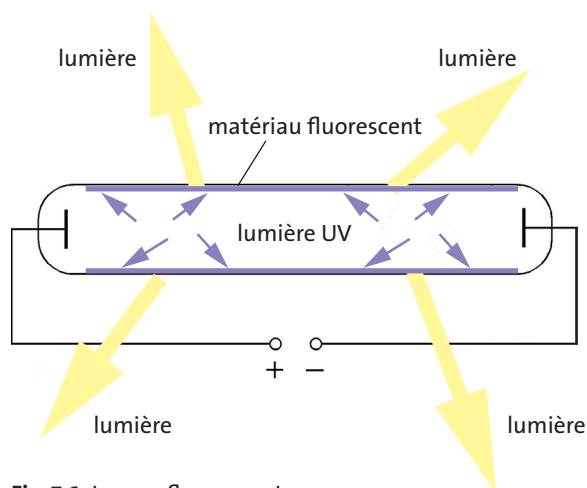


Fig. 7.6 Lampe fluorescente

Le principal avantage de ces lampes par rapport aux lampes à incandescence est leur faible besoin en énergie. Une ampoule ordinaire a besoin de quatre à cinq fois plus d'énergie qu'une lampe fluorescente pour créer la même quantité de lumière. En outre, la durée de vie des lampes fluorescentes est plus longue.

7.4 Les spectres des gaz

Dans une lampe à décharge à gaz, les atomes ne sont pas seulement amenés dans le premier état excité, mais aussi dans des états excités plus élevés.

Pour le retour d'un état excité supérieur à l'état fondamental, l'atome a différentes possibilités comme nous l'avons déjà vu. Il peut retourner à l'état fondamental directement ou descendre par paliers.

Les atomes excités peuvent donc émettre de nombreux photons différents et la lumière émise par une lampe à décharge consiste donc en un mélange de lumière de différentes longueurs d'onde.

La Fig. 7.7 illustre le spectre d'émission de l'hydrogène, cependant de manière incomplète. Pour afficher le spectre complet de la lumière émise par l'hydrogène, il faudrait étendre l'échelle des longueurs d'onde, car l'hydrogène émet également de la lumière dans le domaine des UV et des infrarouges.

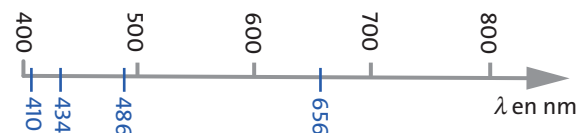


Fig. 7.7 Spectre d'émission de l'hydrogène.

Nous connaissons déjà le spectre d'émission de la vapeur de sodium pour la plage de longueurs d'onde comprise entre 400 et 800 nm : ici, le sodium n'émet qu'un seul type de lumière, Fig. 7.8a.

Nous avons déjà mentionné dans la section précédente que la vapeur de mercure émet principalement de la lumière UV. Cependant, comme nous pouvons le voir sur la Fig. 7.8b, le mercure émet également dans le domaine visible. Nous pouvons trouver de la lumière de longueurs d'onde de 405 nm, 408 nm, 436 nm (ces longueurs d'onde correspondent à du violet), 496 nm (turquoise), 546 nm et 578 nm (les deux longueurs d'onde correspondent à du jaune). Nous percevons ce mélange de lumière comme de la lumière bleu-verte.

Pourquoi les flammes brillent-elles ?

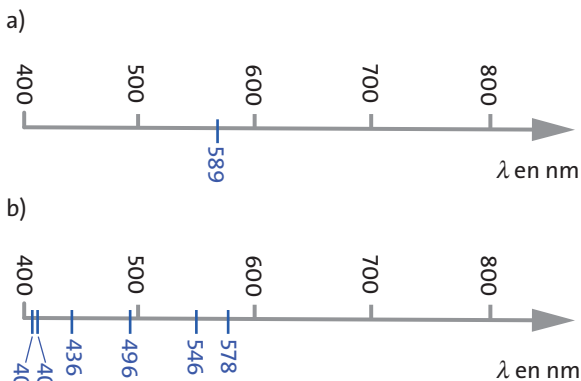


Fig. 7.8 Spectre d'émission du sodium (a) et du mercure (b).

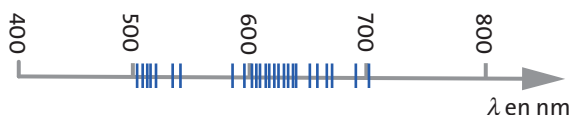


Fig. 7.9 Spectre d'émission du néon.

Le spectre des tubes fluorescents de couleur rougeâtre utilisés pour la publicité est illustré à la Fig. 7.9 et correspond au gaz néon. Des tubes publicitaires fluorescents d'une autre couleur peuvent être obtenus en utilisant d'autres gaz ou mélanges de gaz.

Une comparaison des Fig. 7.7, Fig. 7.8 et Fig. 7.9 montre que les spectres de différents gaz peuvent être facilement distingués les uns des autres. Le spectre est donc un élément caractéristique typique du gaz, c'est-à-dire quelque chose comme son « empreinte digitale ».

Chaque gaz émet de la lumière avec certaines longueurs d'onde qui lui sont propres. Les spectres des gaz peuvent donc être facilement distingués les uns des autres.

Dans les faits, l'*analyse spectrale* est fréquemment utilisée par les chimistes pour identifier les substances. Les atomes de la substance à analyser sont alors excités et la lumière émise est examinée à l'aide d'un spectromètre.

Une autre procédure d'analyse spectrale est l'examen du *spectre d'absorption* d'une substance. Elle consiste à envoyer de la lumière d'une large gamme de longueurs d'onde à travers le gaz et à analyser les longueurs d'onde manquantes dans le spectre avec le spectromètre. Comme les atomes absorbent les mêmes photons qu'ils émettent, le spectre d'absorption fournit les mêmes informations que le spectre d'émission.

L'analyse spectrale joue un rôle particulièrement important en astrophysique. Les étoiles sont beaucoup trop éloignées pour qu'on puisse simplement s'y rendre en vaisseau spatial afin de prélever des échantillons de substance. Nous avons seulement accès au rayonnement électromagnétique émis par les étoiles. Ainsi, nous pouvons tirer des conclusions sur la composition chimique de l'atmosphère gazeuse du soleil en nous basant sur l'absence de lumière avec des longueurs d'onde définies dans la partie visible de la lumière solaire : les atomes de l'atmosphère solaire absorbent les photons de la lumière blanche générée par le soleil. Il s'agit donc du spectre d'absorption de l'atmosphère solaire.

Toutes les connaissances que nous possédons sur le développement chronologique et la composition chimique des étoiles sont basées sur l'examen spectroscopique de leur rayonnement. Bien entendu, la partie visible du rayonnement n'est pas seulement analysée, mais aussi les rayonnements de toutes les autres longueurs d'onde, des ondes radio aux rayons gamma.

7.5 Pourquoi les flammes brillent-elles ?

La flamme d'une bougie, d'un briquet, d'un feu de bois ou d'un bec Bunsen, dans des conditions d'alimentation en air restreinte, brille d'un jaune vif. Lorsque l'on ouvre l'arrivée d'air du bec Bunsen de manière à ce que la flamme brûle avec un bruit de bourdonnement, l'effet de brillance jaune disparaît et la flamme ne brûle que de manière faiblement bleutée, comme les flammes d'une cuisinière à gaz. Une flamme d'hydrogène ne brille presque pas du tout. En revanche, si l'on met du sodium (ou du sel ordinaire, qui est du chlorure de sodium) ou du lithium dans la flamme d'hydrogène, celle-ci brillera d'une couleur jaune ou rouge intense. Comment ces différents effets de brillance des différentes flammes se produisent-ils ?

Les atomes et les molécules d'un gaz vont et viennent à grande vitesse et se heurtent sans cesse. Lorsque les atomes ou les molécules entrent en collision, leurs enveloppes électroniques sont déformées. Normalement, l'énergie n'est pas suffisante pour provoquer une excitation. Lorsque les gaz sont chauffés, les atomes deviennent plus rapides : leur énergie augmente. Si la température est suffisamment élevée, les processus d'excitation peuvent éventuellement avoir lieu.

Toutefois, dans de nombreux gaz, par exemple l'hydrogène et les autres gaz contenus dans une flamme

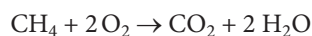
d'hydrogène, tels que l'oxygène et l'azote, il faut beaucoup d'énergie pour exciter les atomes ou les molécules de manière à émettre des photons visibles. La température requise n'est pas atteinte dans la flamme et, par conséquent, une flamme d'hydrogène ne brille pas.

L'énergie des atomes et des molécules de la flamme est cependant suffisante pour amener, par exemple, les atomes de lithium ou de sodium dans le premier état excité. Ainsi, lorsqu'on introduit du lithium dans une flamme d'hydrogène, ses atomes sont amenés au premier état excité et émettent des photons « rouges » lorsqu'ils retournent à l'état fondamental : la flamme brille rouge. De même, la flamme brille en jaune lorsqu'on met du sel commun, c'est-à-dire du sodium, dans la flamme. En analysant la lumière émise à l'aide d'un spectromètre, nous pouvons déterminer quelle substance brille dans la flamme.

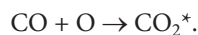
Lorsqu'ils entrent en collision avec d'autres atomes ou molécules, par exemple dans une flamme, les atomes peuvent être excités.

La faible lumière bleutée qu'émet la flamme d'un bec Bunsen lorsqu'elle est alimentée par une quantité suffisante d'oxygène provient des molécules de CO_2 qui passent de l'état excité à l'état fondamental. Toutefois, dans ce cas, les molécules de CO_2 ne sont pas excitées par des collisions avec d'autres atomes ou molécules. Les hydrocarbures (principalement le méthane, CH_4) brûlent dans la flamme du bec Bunsen en dioxyde de carbone (CO_2) et en eau (H_2O).

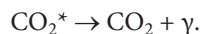
La réaction globale



se déroule en plusieurs étapes. L'une de ces étapes est la combustion du monoxyde de carbone :



Le dioxyde de carbone dans un état excité est produit dans cette réaction. En retournant à l'état fondamental, les molécules de CO_2^* émettent des photons :



Ces photons constituent la faible lumière bleutée des flammes des becs Bunsen et des cuisinières à gaz.

Des atomes et des molécules excités peuvent être formés dans des réactions chimiques.

Les lucioles utilisent le même principe pour créer la lumière qu'elles émettent. Une luciole ne brille pas comme un morceau de fer chaud : des réactions chimiques ont lieu dans l'abdomen de la luciole, au cours desquelles des molécules excitées apparaissent et émettent ensuite des photons visibles.

Lorsque l'on réduit l'alimentation en air d'un brûleur Bunsen, il n'y a pas assez d'oxygène disponible pour une oxydation complète. Il reste des atomes de carbone, qui s'assemblent pour former des granules de carbone. Ces granules sont les composants de la suie. En raison de la température élevée de la flamme, les granules de suie brillent, c'est-à-dire qu'ils émettent de la lumière.

Ainsi, la lueur jaune relativement forte de la flamme d'un bec Bunsen fonctionnant avec une alimentation en air réduite, d'une bougie ou d'un briquet ne provient pas des gaz en jeu mais d'une particule de suie incandescente. Le spectre de ces flammes est donc similaire à celui d'une lampe à incandescence : la lumière émise est composée de lumière de toutes les longueurs d'onde de 400 à 800 nm. Nous apprendrons plus tard comment cet effet incandescent peut se produire. ■

8 MATIÈRE SOLIDE

Avant d'examiner les substances solides, nous allons résumer les différences essentielles et les caractéristiques communes de la disposition des atomes dans les gaz, les liquides et les solides.

8.1 La disposition des atomes dans les gaz, les liquides et les matières solides

Les atomes ou les molécules d'un gaz vont et viennent en tous sens – plus la température est élevée, plus ils vont vite. Au cours de leurs mouvements, ils se heurtent de temps à autre, mais la plupart du temps, ils sont très éloignés les uns des autres.

Dans les liquides et les matières solides, en revanche, les atomes sont disposés très près les uns des autres, comme des balles de tennis dans un panier.

Il y a deux façons de serrer les balles de tennis les unes contre les autres. Elles peuvent soit être empilées en couches régulières (Fig. 8.1), soit être posées les unes à côté des autres ou les unes sur les autres de manière désordonnée (Fig. 8.2). Il en va de même pour les atomes des liquides et des matières solides.

Dans les substances solides, les atomes sont généralement disposés de manière régulière. Ces substances sont appelées solides *crystallins* ou cristaux. Les métaux, la plupart des types de pierre, les sels, le sucre, le soufre et le diamant sont cristallins.

Mais il existe également de nombreuses substances solides dont l'arrangement atomique ressemble davantage à celui des balles de tennis de la Fig. 8.2, par exemple le verre et la plupart des plastiques. La structure de ces substances est dite *amorphe*.

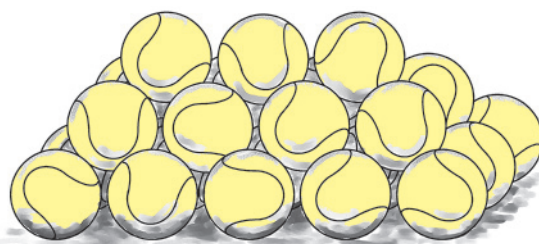


Fig. 8.1 Les balles de tennis peuvent être empilées en couches régulières...

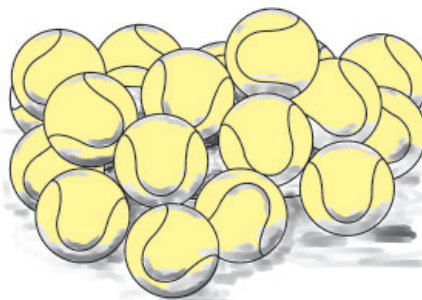


Fig. 8.2 ... ou rassemblés de manière aléatoire.

Dans les liquides, la structure amorphe est la norme commune. Presque tous les liquides sont amorphes, y compris le liquide le plus répandu, c'est-à-dire l'eau. Les liquides cristallins sont utilisés dans les affichages à cristaux liquides des calculatrices et des écrans plats. Vous connaissez peut-être l'acronyme LCD pour le nom de l'affichage à cristaux liquides (correspondant au terme anglais « Liquid Crystal Display »).

Le Tab. 8.1 donne un aperçu des différences et des caractéristiques communes dans la disposition des atomes ou des molécules dans les gaz, les liquides et les substances solides.

	distance entre les atomes ou les molécules	disposition des atomes ou des molécules
gaz	grandes	les gaz volent en tous sens de manière désorganisée
liquides	densément compacts	généralement amorphes, rarement cristallins
solides	densément compacts	cristallins ou amorphes

Tab. 8.1

8.2 La répartition de l'électronium dans les solides

La Fig. 8.3 montre à quoi ressemble l'intérieur d'une substance solide, dans ce cas d'un cristal. Plus la teinte grise de la figure est foncée, plus la densité de l'électronium est élevée. Les noyaux atomiques sont situés aux points de densité maximale. Lorsque l'on s'éloigne du noyau, la densité de l'électronium diminue d'abord, jusqu'au moment où l'on se rapproche du noyau suivant. Ensuite, elle augmente à nouveau.

Tout comme dans les atomes individuels, la plus grande partie de l'électronium est située près des noyaux. Il n'y a pas d'espaces vides entre les atomes individuels comme dans la pyramide de balles de tennis de la Fig. 8.1. Tout l'espace entre les noyaux est rempli d'électronium. De même, il n'y a pas de frontières claires entre les atomes. L'électronium de tous les atomes est fusionné en un « lac » continu.

La Fig. 8.4 montre la distribution calculée de la densité de l'électronium dans une substance solide, ici dans un cristal de sel commun, le NaCl. Ici, la densité de l'électronium est illustrée au moyen de lignes de

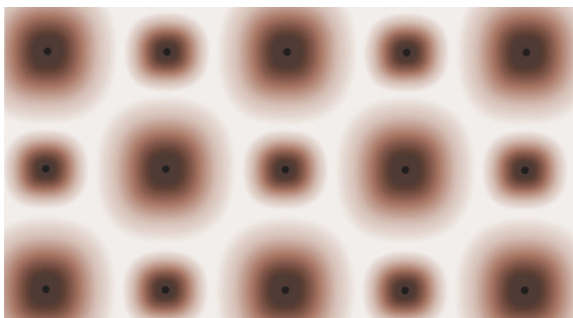


Fig. 8.3 Distribution de l'électronium dans une substance solide. Les petits cercles noirs représentent les noyaux atomiques (non dessinés à l'échelle).

densité constante. Plus le nombre est élevé dans la figure, plus la densité de l'électronium est élevée à l'endroit de la ligne. Ces lignes peuvent être comparées aux lignes de niveaux sur une carte. Plus le nombre est élevé sur une ligne de niveaux, plus l'altitude des lieux correspondants dans le paysage est élevée.

La Fig. 8.4 montre quatre zones dans lesquelles la densité de l'électronium est particulièrement élevée : en haut à gauche et en bas à droite dans la zone des noyaux de sodium, ainsi qu'en haut à droite et en bas à gauche dans la zone des noyaux de chlore. Entre les deux, il existe des zones dans lesquelles la densité de l'électronium est assez faible, mais toujours différente de zéro.

Dans les substances solides, l'électronium remplit tout l'espace entre les noyaux : il forme un « lac » continu.

Dans un gaz, les atomes peuvent se déplacer presque librement. Plus la température du gaz est élevée, plus ils se déplacent rapidement.

Les atomes des substances solides, quant à eux, sont liés à un endroit fixe. Ils ne peuvent pas quitter leur place dans la grille cristalline. Mais ils ne sont pas im-

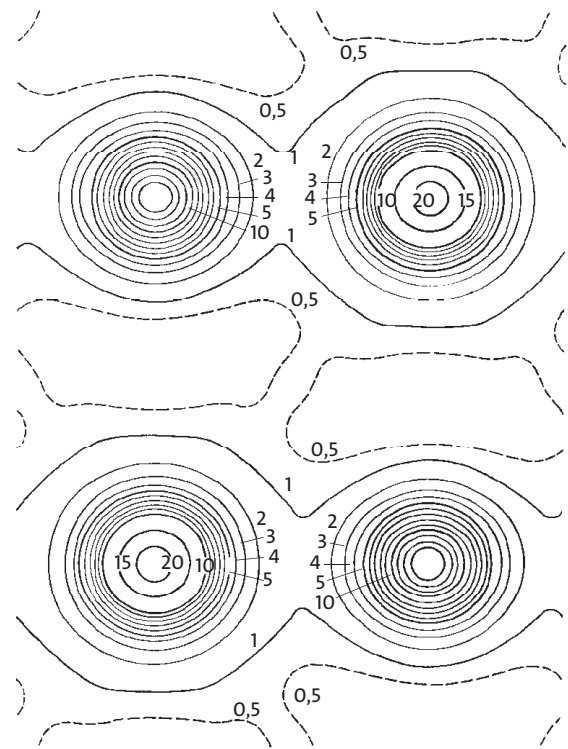


Fig. 8.4 La distribution de l'électronium dans le sel commun.

mobiles pour autant : ils effectuent des oscillations autour d'une position centrale et ce mouvement oscillatoire est d'autant plus rapide que la température est élevée.

Exercice

1. Combien d'atomes sont contenus dans un cristal de sel commun dont la longueur de l'arête est d'un millimètre ?

8.3 L'échelle d'énergie des substances solides

Nous avons vu que l'électronium dans l'enveloppe d'un atome peut être déformé et que certaines formes correspondent à un état stationnaire. Il en va de même pour le lac d'électronium dans les substances solides.

Ici, la déformation signifie – comme dans le cas de l'atome simple – qu'une portion élémentaire de l'électronium est déplacée d'un endroit à un autre. Par conséquent, la distribution de l'électronium dans le lac change : à un endroit, sa densité diminue alors qu'elle augmente en conséquence à un autre endroit.

L'électronium dans la matière solide peut être excité de nombreuses manières différentes et la déformation dans le cas d'une excitation unique n'est pas limitée à la zone d'un atome individuel : elle s'étend sur de nombreux atomes.

Tout comme pour les atomes, l'état stationnaire avec l'énergie la plus basse est appelé état fondamental. Les états d'énergie supérieure sont appelés états excités.

Les échelles d'énergie des substances solides se distinguent nettement de celles des atomes individuels : alors que les barreaux de l'échelle d'énergie d'un atome sont très étroits parce que l'électronium d'un atome ne peut stocker que des quantités très spécifiques d'énergie, les barreaux de l'échelle d'énergie d'une substance solide sont larges. Les énergies que l'électronium d'une substance solide peut stocker comprennent des plages entières de valeurs sur l'échelle énergétique. Dans ce qui suit, nous les appelons les *plages autorisées*. Entre, il y a les *plages interdites*.

Les énergies des états stationnaires des électrons dans les solides forment des plages.

Les échelles d'énergie des substances solides peuvent être divisées en deux groupes.

Dans les substances du premier groupe, la première plage autorisée commence à l'état fondamental, Fig. 8.5a. Les métaux ont des échelles d'énergie de ce type. De très petites quantités d'énergie sont suffisantes pour exciter l'électronium.

Dans le cas du deuxième type d'échelle d'énergie, il existe une plage interdite entre l'état fondamental et la première plage autorisée, Fig. 8.5b. Une telle échelle d'énergie est typique des non-métaux. Ici, les excitations ne seront possibles que si l'énergie d'excitation est suffisante pour surmonter l'écart entre l'état fondamental et la première plage autorisée.

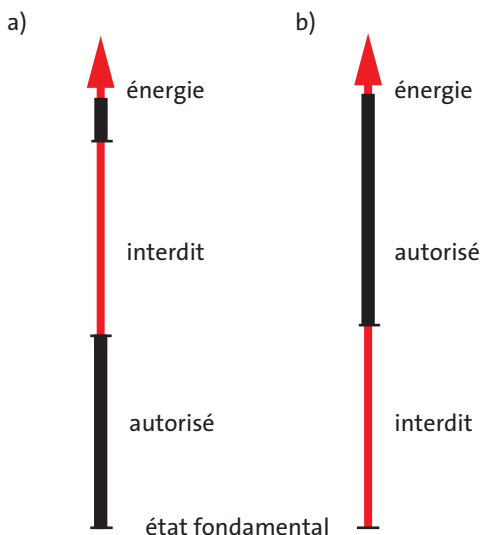


Fig. 8.5 Les échelles d'énergie des métaux (a) et des non-métaux (b).

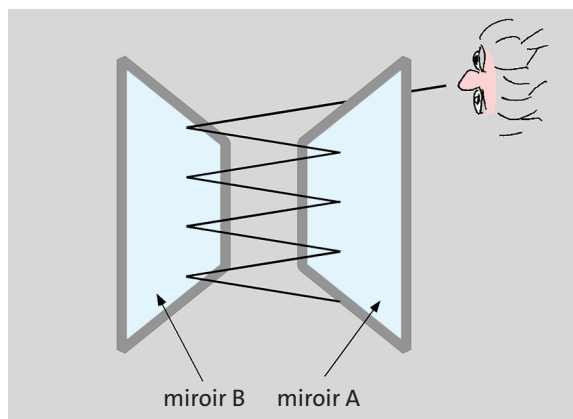


Fig. 8.6 L'observateur reçoit de la lumière qui a été réfléchi plusieurs fois entre les miroirs.

8.4 Quand la lumière frappe les métaux

Lorsque la lumière tombe sur une surface métallique très lisse, elle est en grande partie réfléchi. Par exemple, la couche réfléchissante d'un miroir est faite d'aluminium. Mais toute la lumière n'est effectivement pas réfléchi. Nous pouvons très bien l'observer si nous réalisons l'expérience illustrée à la Fig. 8.6.

Deux grands miroirs sont opposés l'un à l'autre à une courte distance. En regardant au-delà du bord du miroir A dans le miroir B, nous voyons l'image du miroir A. Dans ce dernier, nous pouvons voir l'image du miroir B, et dans celui-ci à nouveau l'image de A, et ainsi de suite. Au total, nous voyons une sorte de couloir dont les murs sont formés par les bords des miroirs. La lumière qui semble sortir de ce couloir loin derrière est la lumière qui a été réfléchi plusieurs fois entre les miroirs. Il est intéressant pour nous de constater qu'il devient de plus en plus sombre vers le fond de ce couloir, ce qui signifie qu'une partie de la lumière est perdue à chaque processus de réflexion. En fait, environ 10% de la lumière est absorbée lors de chaque réflexion.

Nous pouvons conclure que le miroir, comme tout autre métal, ne reflète pas seulement la lumière mais l'absorbe également. Mais la lumière est majoritairement réfléchi car seule une petite partie est absorbée en pénétrant dans le métal.

L'absorption de la lumière par les métaux se fait en fonction de leur échelle d'énergie, Fig. 8.7. Les trois barres situées à côté de l'échelle d'énergie correspondent à l'énergie des photons de la lumière rouge, verte et bleue. Elles sont représentatives de tous les photons de la gamme spectrale de la lumière visible. Ces trois barres ne s'étendent pas au-delà de la plage d'énergie inférieure autorisée. Cela signifie que les photons de la lumière visible peuvent exciter l'électronium des métaux.

Les photons de la lumière visible peuvent exciter l'électronium des métaux. Ils sont alors absorbés.

Il n'est pas difficile de faire en sorte qu'un métal absorbe non pas 10% mais la totalité de la lumière incidente. Il suffit de désassembler le métal en fines particules. Chaque poudre métallique absorbe presque totalement la lumière : les poudres métalliques sont noires. Comment cela peut-il s'expliquer ?

Lorsque la lumière frappe une poudre métallique, elle est réfléchi non pas une seule fois mais plusieurs fois – d'une particule de poudre à l'autre, Fig. 8.8.

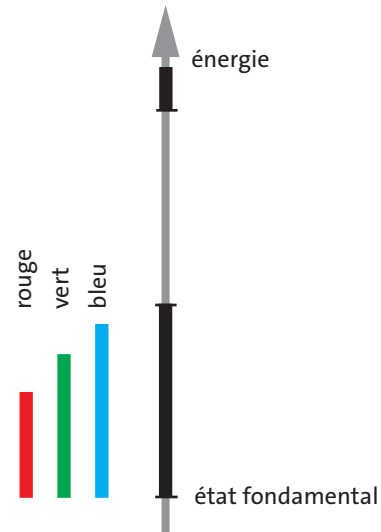


Fig. 8.7 Métal : l'énergie des photons de la lumière visible correspond à la gamme d'énergie la plus basse autorisée.

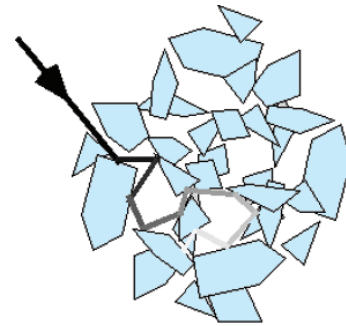


Fig. 8.8 Dans une poudre métallique, la lumière est réfléchi plusieurs fois en tous sens.

Après la première réflexion, il ne reste que 90% de la quantité initiale de lumière, après la deuxième réflexion, seulement 81%, après la troisième, seulement 73%, et ainsi de suite. Après 25 réflexions, il ne reste que 7% et après 50 réflexions, seulement 0,5% environ, c'est-à-dire presque rien. Plus la poudre métallique est fine, plus le nombre de réflexions est élevé et plus la couleur noire de la poudre est foncée. La lumière s'éteint dans la poudre.

Le fait que les métaux pulvérulents absorbent la lumière est démontré par une expérience que tout le monde a déjà faite : lorsqu'une surface d'aluminium propre et brillante est polie avec un produit de nettoyage pour métaux blancs, celui-ci devient noir. La raison de ce processus de noircissement est la poudre d'aluminium qui s'est détachée.

Lorsque la lumière frappe les non-métaux

Une autre expérience très simple montre également comment la lumière peut progressivement disparaître complètement au cours de nombreuses réflexions. Un petit trou est découpé dans une boîte en carton, par exemple une boîte à chaussures, Fig. 8.9.

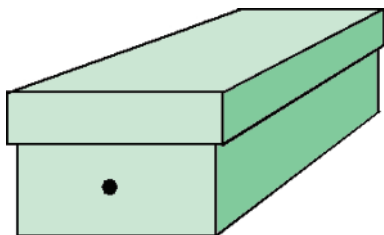


Fig. 8.9 Le trou dans la boîte à chaussures est noir.

Les surfaces intérieures de la boîte doivent être blanches afin de n'absorber qu'une faible quantité de lumière. Mais nous voyons que le trou est complètement noir. La lumière peut entrer dans la boîte par le trou. Cependant, elle ne trouve pas le moyen de sortir de la boîte. Comme une partie de la lumière est absorbée chaque fois qu'elle frappe la paroi de la boîte, il ne reste rien après quelques réflexions.

Tout ce que nous percevons comme noir dans notre environnement est formé de cette manière, par exemple la couleur noire des lettres imprimées. Si nous examinons le papier de plus près, nous constatons que sa surface est rugueuse. La lumière incidente se déplace sur un chemin en zigzag dans le papier avant de ressortir et d'arriver par exemple à vos yeux. S'il y a une substance à l'endroit concerné du papier qui absorbe une partie de la lumière à chaque réflexion, le papier apparaîtra noir à cet endroit.

La lumière s'éteint dans les objets noirs.

8.5 Lorsque la lumière frappe les non-métaux

La Fig. 8.10 montre l'échelle d'énergie des non-métaux. Là encore, les barres de gauche correspondent aux photons de la lumière visible. Les trois barres se terminent dans la plage d'énergie interdite. Par conséquent, l'énergie des photons de la lumière visible n'est pas suffisante pour exciter l'électronium. La lumière n'est pas absorbée mais traverse le matériau. Les substances présentant une telle échelle d'énergie sont donc

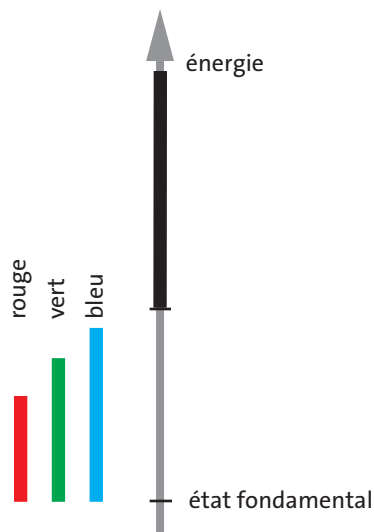


Fig. 8.10 Non-métal : l'énergie des photons de la lumière visible se situe dans la gamme interdite la plus basse.

transparentes. Ces substances sont par exemple le verre, les sels, le sucre, la glace, la cellulose (principal composant du papier), la plupart des minéraux (par exemple le quartz et les feldspaths), le diamant et les matières plastiques.

Peut-être pouvez-vous penser à des objets qui ne sont pas transparents mais blancs bien qu'ils soient constitués d'une des substances mentionnées : par exemple le sel raffiné, le sucre en poudre, le papier, le verre pulvérisé ou la neige. Toutes ces substances ou objets sont constitués de petites particules : granules ou fibres. Plus les particules sont petites, plus la couleur blanche est forte. Le sucre en poudre est plus « blanc » que le sucre raffiné.

Ce qui est blanc ici, cependant, ce ne sont pas les petites particules individuelles. Dans le cas des cristaux de neige, des grains de sel, des cristaux de sucre et des éclats de verre, nous pouvons le voir à l'œil nu. Le papier, en revanche, doit être observé au microscope : les grains ou fibres individuels sont transparents. L'impression de couleur blanche n'émerge que lorsque de nombreuses particules transparentes se rassemblent.

Les objets blancs sont composés de nombreuses petites particules transparentes.

La lumière qui frappe un tel objet d'un côté n'est pas absorbée par les particules transparentes, mais réfractée et réfléchi. La direction de la lumière est modifiée au cours de ce processus, mais rien n'est perdu. Après

plusieurs processus de réfraction et de réflexion, la lumière ressort à l'endroit où elle est entrée dans l'objet. Elle ne traverse donc pas la substance – la substance est opaque.

La couleur blanche des nuages se forme également de cette manière. Un nuage est constitué de nombreuses petites particules transparentes, à savoir des gouttelettes d'eau. Dans le cas du lait, ce sont les gouttelettes de graisse qui donnent la couleur blanche.

Mais tous les non-métaux ne sont pas transparents ou blancs. Par exemple, il existe du verre et du papier colorés, des pierres colorées et des plastiques colorés. Dans ces cas, la couleur est due au fait que les non-métaux transparents sont mélangés à d'autres substances qui absorbent la lumière visible avec des longueurs d'onde spécifiques.

Cependant, il existe une autre raison pour laquelle les non-métaux sont colorés ou même noirs : dans l'échelle d'énergie présentée à la Fig. 8.11, la gamme inférieure interdite est plus petite que l'énergie des photons de la lumière bleue. Le sulfure de cadmium est un exemple de substance présentant une telle échelle d'énergie. La plus longue des trois barres (celle correspondant aux photons de la lumière bleue) s'étend dans la gamme des énergies autorisées. L'énergie de ces photons est donc suffisante pour exciter l'électronium. Les photons de la lumière bleue sont absorbés dans le processus.

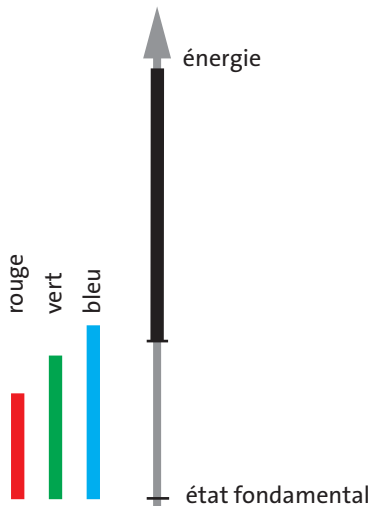


Fig. 8.11 L'échelle d'énergie du sulfure de cadmium.

Tous les autres photons ne sont pas absorbés. Dans la lumière qui a été laissée passer, la lumière bleue est absente et le mélange restant forme une couleur jaune. Un morceau de sulfure de cadmium est donc transpa-

rent et légèrement jaune. La poudre de sulfure de cadmium est fortement jaune.

Dans le cas du silicium, du germanium et du graphite, l'écart entre l'état fondamental et le premier domaine autorisé est encore plus faible que pour le sulfure de cadmium, Fig. 8.12. Les énergies de tous les photons de la lumière visible sont suffisantes pour exciter l'électronium. Par conséquent, la lumière visible n'est pas laissée passer. La partie qui n'est pas réfléchie est absorbée. Comme une plus grande partie de la lumière que dans le cas des métaux s'infiltré dans le matériau, les surfaces lisses n'ont pas un effet miroir mais

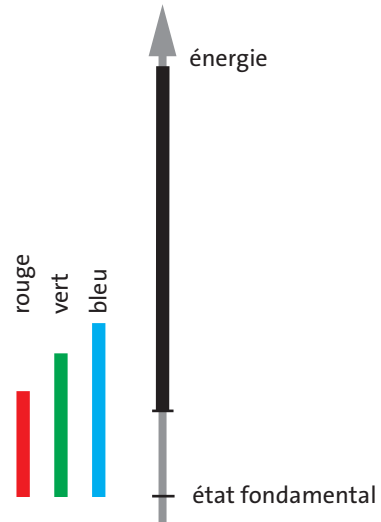


Fig. 8.12 Échelle d'énergie d'un semi-conducteur.

présentent un noir brillant. Ces substances sont appelées semi-conducteurs.

Les semi-conducteurs sous forme de poudre ont également une couleur noire profonde car la lumière s'éteint lors des réflexions sur les grains de la poudre. La suie est une telle substance. Elle se compose principalement de minuscules particules de graphite et est utilisée, entre autres, pour la production d'encre d'imprimerie et pour le noircissement des matières plastiques.

Comme l'énergie des photons infrarouges n'atteint pas la première gamme autorisée, les semi-conducteurs sont perméables à la lumière infrarouge – contrairement aux métaux.

Le silicium est utilisé pour la production de lentilles pour les caméras infrarouges. La lumière infrarouge traverse ces lentilles et est réfractée. La lumière visible, qui éclairerait également le film et qui ne doit donc pas pénétrer dans la caméra, ne passe pas.

8.6 Les substances solides comme sources de lumière

La lumière d'une ampoule à incandescence provient d'un fil de tungstène incandescent, la lumière d'une flamme de bougie provient de particules de suie incandescentes. Comment cette lumière naît-elle ?

Dans une substance solide, les noyaux et l'électronium qui les entoure se déplacent autour d'une position moyenne. Plus la température est élevée, plus le mouvement est rapide et plus l'énergie des atomes est élevée.

Dans un métal, l'énergie de ce mouvement est suffisante pour exciter l'électronium déjà à une température normale. Lors des processus d'excitation, l'électronium n'absorbe toutefois qu'une petite quantité d'énergie. Aussi les photons qui sont émis lors du retour à l'état fondamental ont-ils de faibles énergies. Ce sont des photons infrarouges et non des photons de lumière visible, Fig. 8.13a.

Lorsque le métal est chauffé, le mouvement des atomes devient plus fort, leur énergie augmente. L'électronium est plus déformé et des photons d'une plus grande énergie sont émis lors du retour à l'état fondamental. A une température encore plus élevée, des photons de lumière visible sont finalement formés – le métal brille, Fig. 8.13b.

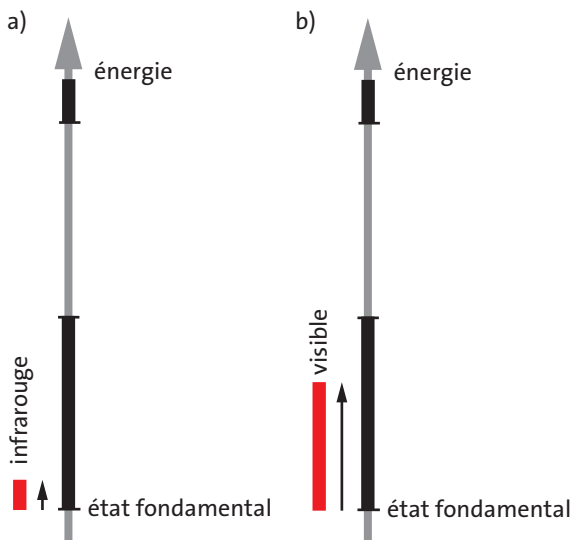


Fig. 8.13 (a) A une température normale, l'énergie du mouvement des atomes dans les métaux n'est suffisante que pour de légères déformations de l'électronium. Le métal n'émet que des photons infrarouges. (b) A une température plus élevée, l'électronium est excité plus fortement. Il émet des photons dans le domaine de la lumière visible. Le métal brille.

De la même manière, tous les non-métaux noirs, c'est-à-dire les semi-conducteurs, commencent à briller lorsqu'ils sont chauffés.

Les métaux et les semi-conducteurs peuvent briller : à haute température, ils émettent de la lumière visible.

Les non-métaux transparents et incolores se comportent différemment. Leur écart énergétique est si important que l'électronium n'est pas excité, même à haute température. Par conséquent, aucun photon de lumière visible ne peut être produit.

Les objets faits de matériaux transparents ne brillent pas.

8.7 Comment les substances solides conduisent l'électricité

Les câbles constitués de fils métalliques – le plus souvent en cuivre – et recouverts de plastique sont utilisés comme lignes électriques. Le fil est en métal car les métaux sont de bons conducteurs d'électricité, et le revêtement est en plastique car les plastiques (et généralement la plupart des non-métaux) ne conduisent pas l'électricité et empêchent donc l'électricité de s'écouler hors de la ligne.

L'électricité repose toujours sur des particules, plus précisément sur les électrons chargés négativement et les protons chargés positivement du noyau atomique. Lorsque l'électricité doit circuler dans un fil de cuivre, soit les noyaux soit l'électronium doivent se déplacer. Cependant, les noyaux sont fermement attachés à leur place dans le réseau cristallin : ils ne peuvent pas se déplacer à travers le fil de cuivre. Par conséquent, seul l'électronium peut le faire.

Nous pourrions imaginer qu'un courant électrique est formé par l'électronium d'une substance solide s'écoulant comme un tout au-delà des noyaux à travers le solide. Cependant, l'électronium est attaché au noyaux si fermement qu'il ne peut être déplacé de cette façon.

La situation est similaire à celle du problème suivant : un grand et lourd tapis doit être déplacé, Fig. 8.14.

Nous saisissons le tapis à une extrémité et essayons de le tirer sur le sol. Mais comme il est grand et lourd, il ne bouge pas. Nous essayons donc une astuce. Nous faisons un pli dans le tapis sur un côté, Fig. 8.15. Ce pli

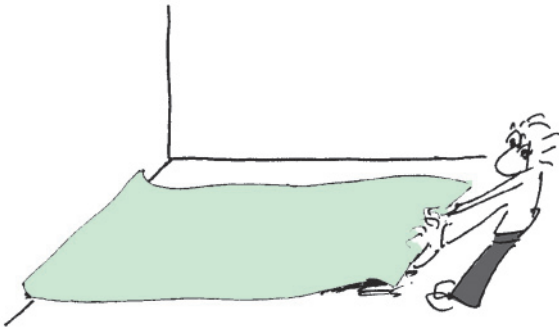


Fig. 8.14 Une possibilité de déplacer un tapis...

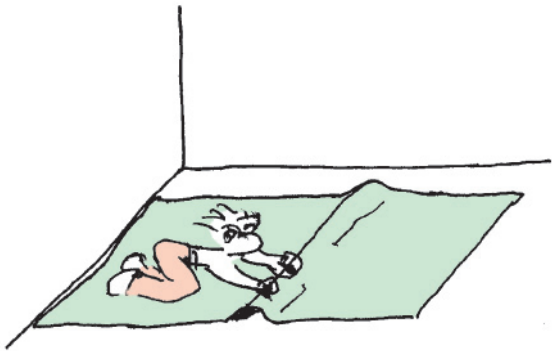


Fig. 8.15 ... et une deuxième possibilité.

peut maintenant être déplacé assez facilement à travers le tapis de proche en proche – et à la fin, le tapis entier a été déplacé un petit peu.

L'électronium dans une substance solide se comporte d'une manière similaire au tapis.

Dans un premier temps, nous imaginons que le « lac d'électronium » se trouve dans son état fondamental. Là, il présente une distribution très spécifique, comme le montrent par exemple les Fig. 8.3 et Fig. 8.4. Lorsqu'il est excité, un électron, c'est-à-dire une portion élémentaire de l'électronium, est amené dans un état d'excitation. La distribution de la densité du lac d'électronium change un peu au cours du processus. (Ce changement a lieu dans une petite zone de l'espace mais n'est pas limité à la zone d'un atome). Par rapport à l'état fondamental, nous obtenons donc une augmentation de la densité à certains endroits et une diminution à d'autres endroits. Si nous appliquons une tension, et créons donc un champ électrique dans le matériau, la zone densifiée se déplace à travers le matériau, de même que la zone de densité réduite.

Nous voyons donc qu'un matériau ne sera électriquement conducteur que si l'électronium peut être facilement excité. C'est le cas des métaux (Fig. 8.7). Le

plus petit champ électrique créé dans le conducteur est alors suffisant pour l'excitation. Les non-métaux ne peuvent pas être excités de cette manière (Fig. 8.10) et ne conduisent donc pas le courant électrique.

Une portion élémentaire supplémentaire de l'électronium, c'est-à-dire un électron, est exactement équivalente à une zone densifiée mobile. Nous pouvons également dire : les métaux contiennent des électrons mobiles.

Une réduction de densité est équivalente à une portion élémentaire manquante dans le lac d'électronium. Une telle portion manquante est également appelée un *trou*. La partie élémentaire manquante se comporte également comme un creux dans le tapis et peut traverser le matériau. Elle se comporte également, en ce qui concerne l'équilibre des charges, comme un porteur de charge mobile chargé positivement.

Les métaux contiennent des électrons et des trous mobiles. Ils sont donc des conducteurs électriques.

La Fig. 8.16 illustre schématiquement le processus de conduction. Le lac d'électrons est représenté – en termes simplifiés – par une zone bleue ciel uniforme. Les électrons mobiles (zones densifiées) sont plus foncés, les trous (zones de densité réduite) plus clairs. Le champ électrique attire les électrons vers la gauche (vers le potentiel haut) et les trous vers la droite (vers le potentiel bas).

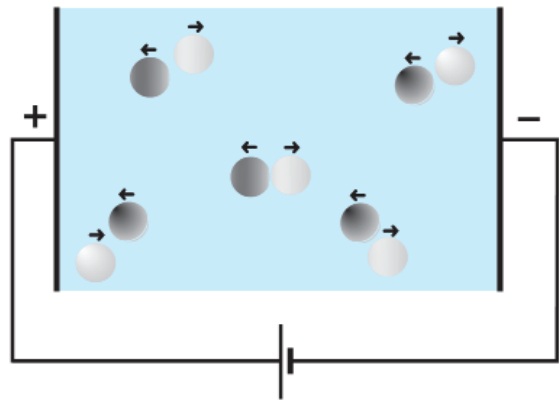


Fig. 8.16 Lorsqu'une pile est connectée, les électrons mobiles (zones densifiées) se déplacent vers la connexion plus et les trous (zones de densité réduite) vers la connexion moins.

Le mouvement des trous peut être comparé à celui d'une bulle d'air qui monte du fond d'un verre d'eau vers le haut. Là où il y avait de l'air avant la montée de

Comment rendre les non-métaux conducteurs ?

la bulle, c'est-à-dire au fond, il y a de l'eau après la montée. Alors que la bulle se déplace du bas vers le haut, l'eau se déplace du haut vers le bas, Fig. 8.17.

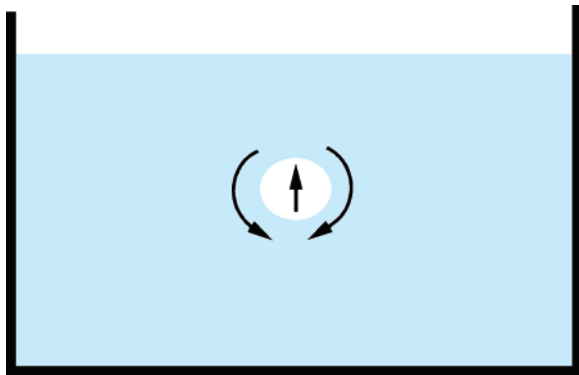


Fig. 8.17 Pendant que la bulle d'air se déplace du bas vers le haut, l'eau se déplace du haut vers le bas.

8.8 Comment rendre les non-métaux conducteurs ?

Considérons un non-métal dont la bande interdite n'est pas trop grande, par exemple le sulfure de cadmium. Les photons de la lumière bleue fournissent suffisamment d'énergie pour surmonter la plage interdite. Lorsqu'un tel non-métal est éclairé par la lumière bleue (ou par la lumière blanche, qui contient également de la lumière bleue), l'électronium est excité : des électrons mobiles sont créés. Si le cristal de sulfure de cadmium fait partie d'un circuit électrique, un courant électrique peut circuler. Le cristal est devenu conducteur grâce à l'excitation. Dès que l'éclairage s'arrête, aucun électron mobile n'est plus créé et la conductivité électrique disparaît à nouveau.

Les substances qui deviennent conductrices lorsqu'elles sont éclairées sont appelées *photoconducteurs*. Le plus de lumière tombe sur un photoconducteur, plus sa résistance est faible. Les photoconducteurs sont utilisés pour mesurer l'intensité lumineuse, par exemple dans les appareils photo.

Les non-métaux ayant une bande interdite étroite peuvent être rendus conducteurs en les éclairant.

Dans le cas des *semi-conducteurs*, l'échauffement suffit déjà à exciter l'électronium et à augmenter la conductivité. Les semi-conducteurs les plus importants sur le plan technique sont le silicium et le germanium.

Il existe une autre possibilité, plus efficace, pour augmenter la conductivité des semi-conducteurs : une petite partie des atomes du matériau est remplacée par des atomes d'une autre substance. Ces atomes « étrangers » sont choisis de telle sorte que leur enveloppe possède soit un électron de plus, soit un électron de moins que les atomes du matériau dans lequel ils sont intégrés. Cette intégration d'atomes étrangers dans un métal autrement pur est appelée *dopage*.

Par exemple, le germanium est dopé avec des atomes d'arsenic. L'électron supplémentaire de chaque atome d'arsenic se comporte comme une densification de l'électronium de l'atome, c'est-à-dire qu'il est mobile. Par conséquent, le germanium devient conducteur grâce à l'introduction d'atomes d'arsenic. Comme les nouveaux porteurs de charge mobiles sont négatifs, on dit aussi que le germanium a été *dopé n*.

Lorsque des atomes dont l'enveloppe a un électron de moins que les atomes de germanium, par exemple des atomes de gallium, sont intégrés dans le réseau cristallin, des zones de densité réduite sont créées. Chaque atome de gallium fournit un trou mobile. De cette manière, le germanium devient conducteur. Comme les trous sont positifs, on dit que le germanium a été *dopé p*.

Les semi-conducteurs peuvent être rendus conducteurs en les dopant avec des atomes étrangers. Les porteurs de charge mobiles peuvent être des électrons négatifs ou des trous positifs.

Pour obtenir une bonne conductivité, il suffit déjà de remplacer environ un atome de germanium sur un million par un atome étranger.

Les composants électroniques les plus importants – les diodes et les transistors – sont constitués de germanium ou de silicium dopés, c'est-à-dire de germanium ou de silicium qui ont été rendus conducteurs. Nous les examinerons dans les sections suivantes. ■

9 DIODE ET TRANSISTOR

9.1 La diode à semi-conducteur

Une diode à semi-conducteur est un dispositif électronique à deux connexions (on dit également « à deux pôles » ou dipôle). Intégrée dans un circuit électrique, elle ne laisse passer l'électricité que dans un seul sens. Une diode est donc à l'électricité ce qu'une valve de vélo est à l'air.

Elle est constituée d'un petit morceau de matériau semi-conducteur, principalement du germanium ou du silicium, avec deux contacts, Fig. 9.1. D'un côté, le matériau est dopé n (à droite sur la figure). De l'autre côté, il est dopé p (côté gauche). La zone n et la zone p se touchent au milieu. Les deux zones sont électriquement conductrices mais les porteurs de charge ne sont pas les mêmes. À droite, il y a des électrons : à gauche, il y a des trous.

Une partie de la diode est conductrice pour les électrons, l'autre pour les trous.

Dans la suite, nous dénommerons les électrons mobiles par e et les trous par t , tout comme le sodium est dénommé par Na , le carbone par C ou la lumière par γ .

Nous connectons la diode à une batterie : la partie dopée p avec les trous est reliée au potentiel élevé et la partie dopée n avec les électrons est reliée au potentiel bas. Les trous positifs se déplacent maintenant vers le potentiel bas, c'est-à-dire vers le milieu de la diode, les électrons négatifs vers le potentiel haut, c'est-à-dire également vers le milieu, Fig. 9.2. Dans le même temps, d'autres trous sont fournis par le contact gauche de la diode, et des électrons par le contact droit, car les deux types de porteurs de charge sont disponibles en quantité suffisante dans les fils métalliques des lignes d'alimentation.

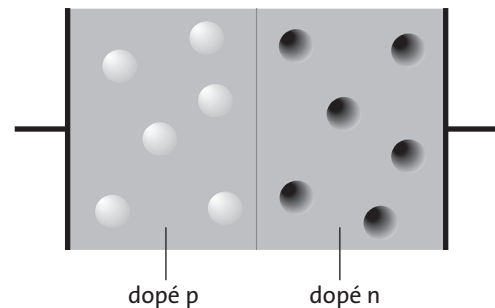


Fig. 9.1 Dans la partie droite de la diode, il y a des électrons mobiles ; dans la partie gauche, il y a des trous mobiles.

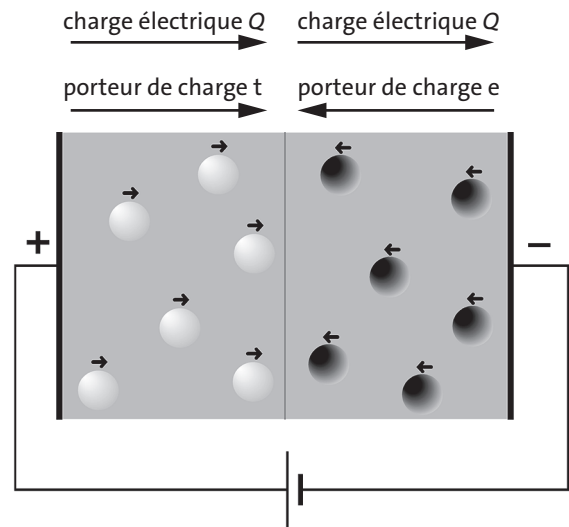
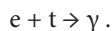


Fig. 9.2 Les électrons et les trous se déplacent vers la surface de séparation. Dans les deux parties, un courant électrique circule de gauche à droite.

Les électrons et les trous se rencontrent à la surface de séparation au milieu de la diode. À cet endroit, les électrons « tombent » dans les trous et des photons sont créés. Nous pouvons décrire ce processus comme une réaction photochimique :



Cette réaction fonctionne tant que la diode est connectée à la batterie. Ainsi, un courant électrique circule. Remarquez que dans la zone de gauche, les porteurs de charge positifs (trous) circulent vers la droite, et dans la zone de droite, les porteurs de charge négatifs (électrons) circulent vers la gauche. Les deux courants de porteurs de charge correspondent à un courant net de charge électrique vers la droite.

Nous connectons maintenant la diode à la batterie en sens inverse, c'est-à-dire que nous connectons le côté dopé p au potentiel bas et le côté dopé n au potentiel haut. Les trous de la partie dopée p s'éloignent maintenant du milieu de la diode vers la gauche, les électrons de la partie n se déplacent vers la droite, Fig. 9.3.

Comme aucun électron ou trou supplémentaire n'est fourni par la surface de séparation au milieu de la diode, le processus s'arrête immédiatement. Malgré la batterie, aucun courant électrique ne circule dans la diode.

Il en résulte plusieurs possibilités d'application.

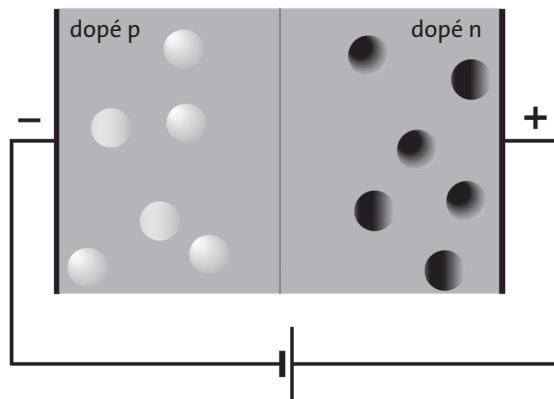


Fig. 9.3 Les électrons et les trous s'éloignent légèrement de la zone de séparation. Ils ne peuvent pas aller loin car aucun nouveau porteur de charge supplémentaire n'est fourni par la zone de séparation.

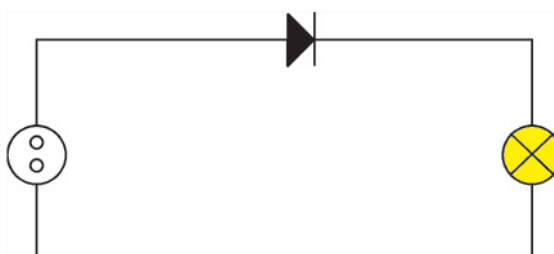


Fig. 9.4 La diode redresseuse laisse passer le courant électrique dans un seul sens.

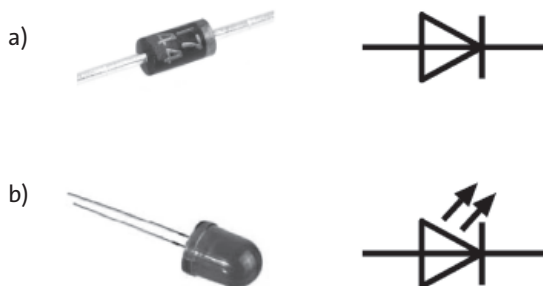


Fig. 9.5 Diode redresseuse (a) et diode électroluminescente (b) avec leurs symboles.

9.2 La diode à semi-conducteur comme redresseur, comme source de lumière et comme cellule solaire

La diode en tant que redresseur

Nous avons vu que la diode est un conducteur d'électricité dans un sens mais pas dans l'autre. Si une diode est intégrée dans un circuit électrique alimenté par une source de *tension* alternative, Fig. 9.4, aucun *courant* alternatif ne circule. La diode laisse le courant circuler dans un seul sens. Le courant est *redressé*. La diode fonctionne comme un *redresseur*.

Les diodes redresseuses existent dans de nombreuses tailles différentes. Certaines mesurent plusieurs cm et peuvent supporter des courants de 50 A, d'autres se trouvent par millions sur une puce d'ordinateur et sont si minuscules qu'elles ne peuvent être perçues à l'œil nu. Les diodes moyennes normales que

l'on trouve dans les magasins d'électricité sont de petits cylindres peu spectaculaires avec deux connexions dont l'aspect se distingue à peine de celui d'une résistance ou d'un condensateur, Fig. 9.5.

La diode comme source de lumière

Lorsqu'une diode est connectée à une batterie comme le montre la Fig. 9.2, elle émet de la lumière. La lumière provient des environs immédiats de la frontière entre le matériau n et le matériau p, c'est-à-dire de l'endroit

où les électrons et les trous réagissent entre eux. Une diode optimisée comme source de lumière est appelée *diode électroluminescente* ou DEL (on trouve également très souvent le sigle LED venant de l'anglais « Light-Emitting Diode »).

La diode comme cellule solaire

La réaction

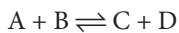


peut également être amenée à se dérouler de manière inverse, c'est-à-dire que



Comment cela peut-il être réalisé? On applique une règle que tout chimiste connaît.

Pour conduire une réaction



vers la droite, c'est-à-dire pour que les substances A et B se transforment en C et D, il suffit d'augmenter la

concentration de l'une des substances A et B. Pour entraîner la réaction vers la gauche, on inverse la procédure: on augmente la concentration de C et/ou de D. (La version quantitative de cette règle s'appelle la *loi d'action de masse*).

Pour s'assurer que la réaction (9.1) se dirige vers la gauche, nous devons envoyer de la lumière avec une intensité (« concentration ») suffisante dans la zone limite entre la région p et la région n, Fig. 9.6. Là, des électrons et des trous mobiles sont créés par la lumière. Les électrons ne peuvent s'écouler que vers la droite via la région n, car la région p n'est pas un conducteur d'électrons. De la même façon, les trous ne peuvent s'écouler que vers la gauche.

Le courant d'électrons et de trous est alimenté par la concentration excessive de porteurs de charge qui sont créés par la lumière dans la zone frontière.

En ce qui concerne les directions, la même chose que ce que nous avons déjà vu pour le redresseur s'applique: les courants de particules dans la zone p et dans la zone n ont des directions opposées tandis que le courant électrique a la même direction.

Ainsi la diode à semi-conducteur fonctionne comme une « pompe à électricité », c'est-à-dire comme une source d'énergie électrique.

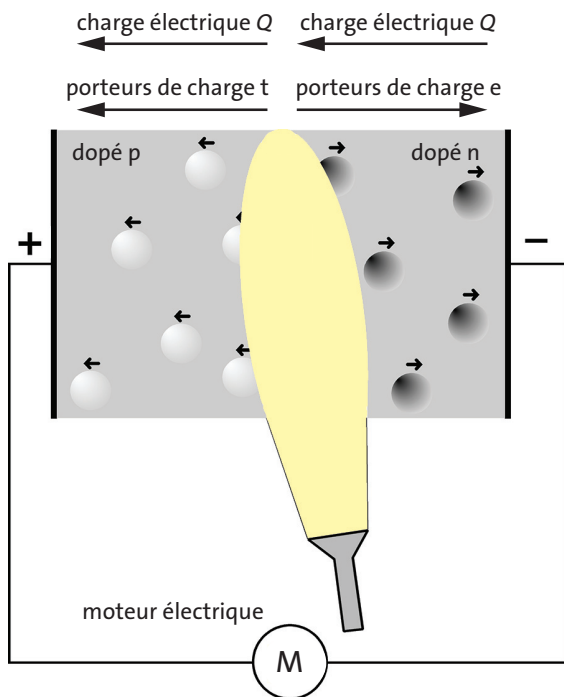


Fig. 9.6 Au niveau de la surface limite entre la zone p et la zone n, la lumière crée des électrons et des trous mobiles. Les électrons ne peuvent s'échapper que vers la droite et les trous que vers la gauche. Il en résulte un courant électrique qui s'écoule vers la gauche.

La lumière crée des électrons et des trous dans la région frontière entre les zones p et n. Les électrons sont poussés vers un côté à travers la région n, les trous vers l'autre côté via la région p.

L'application technique de ce type de diode est la *cellule solaire*.

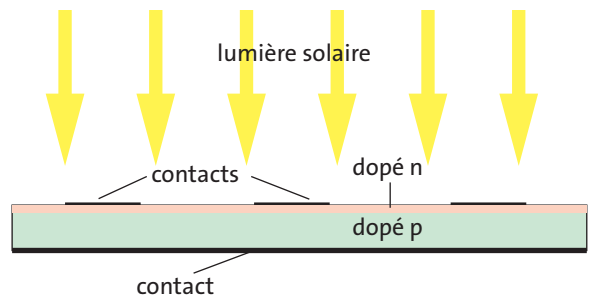


Fig. 9.7 Vue schématique en coupe d'une cellule solaire.

La Fig. 9.7 montre une vue en coupe d'une cellule solaire. Son épaisseur est égale à une fraction de millimètre seulement. Les contacts du côté qui fait face à la lumière doivent être étroits afin de ne pas occulter trop fortement la lumière incidente.

Exercices

1. Tracez le graphique du courant électrique en fonction du temps pour le circuit électrique de la Fig. 9.4.
2. Une résistance est connectée à un transformateur sur la Fig. 9.8. Entre les deux, il y a quatre diodes de redressement. La disposition de ces diodes est appelée pont redresseur. Quel est son effet ? Comment fonctionne-t-il ?

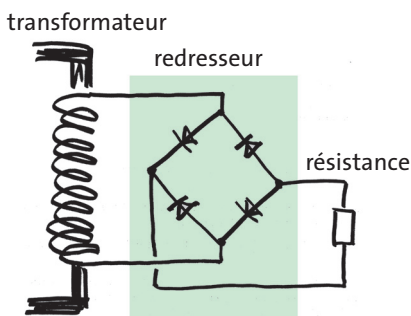


Fig. 9.8 Pour l'exercice 2.

9.3 Le transistor à effet de champ

Un transistor est un interrupteur pour le courant électrique qui peut être commandé électriquement, c'est-à-dire ouvert ou fermé. Il fait donc essentiellement la même chose qu'un relais (un interrupteur commandé par un électro-aimant). Par rapport au relais, il présente plusieurs avantages : premièrement, un courant beaucoup plus faible est nécessaire pour la commande ; deuxièmement, il réagit beaucoup plus rapidement ; troisièmement, il est beaucoup plus petit ; et quatrièmement, cet interrupteur peut non seulement être ouvert et fermé, mais sa « perméabilité » au courant électrique peut également être réglée sur des valeurs intermédiaires.

Les transistors sont utilisés dans tous les appareils électriques : dans les ordinateurs, les téléviseurs, les lecteurs MP3, les smartphones, etc.

La Fig. 9.9 montre la conception d'un transistor à effet de champ. Le courant à contrôler est envoyé à travers un « canal semi-conducteur » dopé n.

Sur un côté du canal (en haut sur la figure), il y a une couche métallique, la grille. La grille est isolée électriquement du canal semi-conducteur. Avec le semi-conducteur, elle forme un condensateur. Ce condensateur peut être chargé par l'application d'une tension entre la grille et le semi-conducteur.

Lorsque le canal semi-conducteur est à un potentiel élevé (et la grille à un potentiel bas), Fig. 9.10, le se-

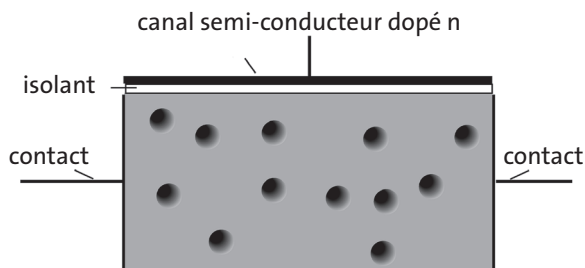


Fig. 9.9 Conception d'un transistor à effet de champ. Le courant électrique dans le canal semi-conducteur est contrôlé au moyen de la grille.

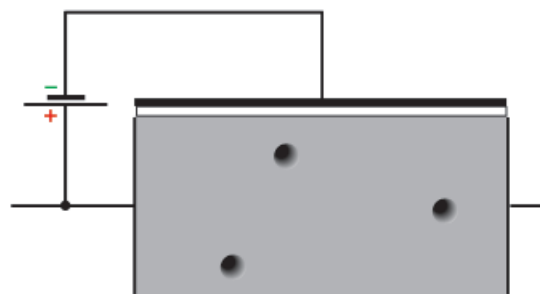


Fig. 9.10 La pile a retiré presque tous les électrons du canal semi-conducteur. Le canal n'est plus un conducteur.

mi-conducteur est chargé positivement. Il contient moins d'électrons qu'à l'état non chargé. En d'autres termes, il contient moins de porteurs de charge mobiles et est donc également moins conducteur. La conductivité peut ainsi diminuer jusqu'à un point où le canal est pratiquement isolant pour le courant électrique. Il se comporte alors comme un interrupteur ouvert.

Si le canal semi-conducteur est au potentiel le plus bas (et la grille au potentiel le plus élevé), Fig. 9.11, il contient plus de porteurs de charge mobiles : sa conductivité est maintenant élevée. Il se comporte comme un interrupteur fermé.

Par conséquent, le canal peut être ouvert et fermé au moyen d'une tension variable entre le canal et la grille.

Les Fig. 9.12a, Fig. 9.12b et Fig. 9.13 montrent un circuit électrique complet avec un transistor. Si le potentiel de la grille est inférieur au potentiel du canal, Fig. 9.12a, le semi-conducteur ne conduit pas et la lampe ne s'allume pas. Si le potentiel de la grille est supérieur, le semi-conducteur sera conducteur et la lampe s'allumera, Fig. 9.12b.

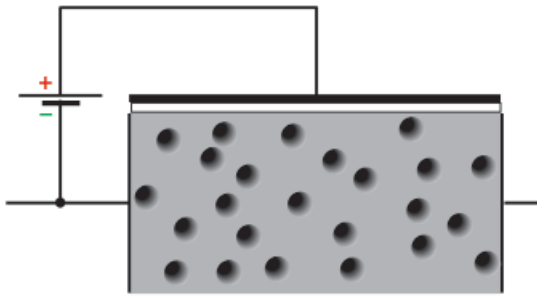


Fig. 9.11 La pile a poussé des électrons dans le canal semi-conducteur. Le canal est un conducteur.

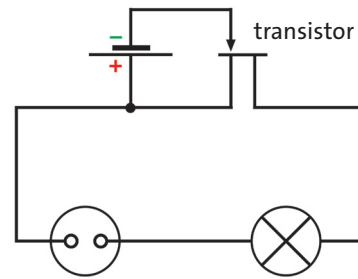


Fig. 9.13 Identique à la Fig. 9.12a mais avec le symbole technique du transistor.

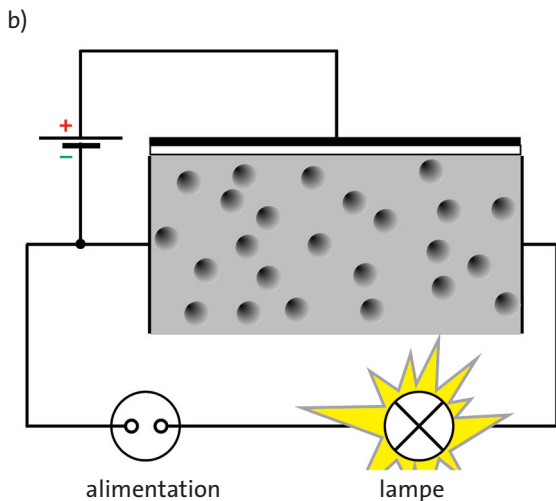
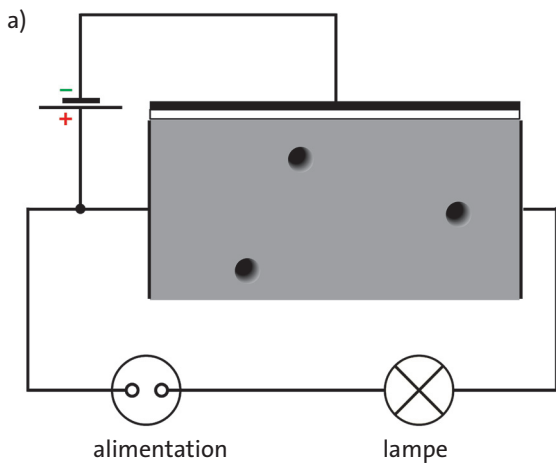


Fig. 9.12 (a) La grille a poussé les électrons mobiles (négatifs) hors du canal : le canal n'est plus conducteur et la lampe ne brille pas. (b) La grille a attiré les électrons dans le canal : le canal est conducteur et la lampe brille.

Exercice

1. Il existe des transistors dont le canal est constitué d'un matériau dopé p. Comment doit-on connecter une pile au transistor pour que celui-ci se comporte comme un interrupteur ouvert ?

10 PHYSIQUE NUCLÉAIRE

Au cours de notre étude des atomes jusqu'à maintenant, nous nous sommes principalement intéressés à l'électronium de l'enveloppe atomique. Le noyau atomique n'était alors requis que pour maintenir l'électronium ensemble. Cependant, il existe dans la nature des processus que nous ne pouvons comprendre que si nous avons une connaissance plus approfondie du noyau atomique : les processus dans lesquels les noyaux atomiques se modifient. Ces processus sont appelés réactions nucléaires.

Les réactions nucléaires naturelles ont lieu dans une faible mesure sur Terre : celles qui se produisent dans le soleil sont beaucoup plus importantes. Elles permettent au soleil d'émettre de la lumière et donc de fournir de l'énergie à la Terre. Mais les réactions nucléaires sont également utilisées à des fins techniques, pour le bien et le malheur de l'homme : dans les réacteurs nucléaires, dans les réacteurs à fusion, dans les bombes atomiques et dans les bombes à hydrogène.

En étudiant la structure du noyau, vous rencontrerez de nombreux aspects que vous avez déjà appris en rapport avec l'enveloppe atomique. Et vous pourrez appliquer une grande partie de ce que vous avez appris concernant la description des réactions chimiques courantes en cours de chimie.

10.1 La structure des noyaux atomiques

Comme nous l'avons déjà vu, le diamètre du noyau atomique est approximativement égal à $1/50\,000$ du diamètre de l'atome. Malgré cette taille minuscule, pratiquement toute la masse de l'atome est située dans le noyau atomique. La masse de l'enveloppe, quant à elle, ne représente qu'environ $1/4\,000$ de la masse nucléaire.

Outre la masse et la taille, l'enveloppe et le noyau diffèrent par une autre caractéristique.

Vous vous souvenez peut-être que la masse volumique de l'électronium diminue de l'intérieur vers l'extérieur, de sorte que l'enveloppe atomique n'a pas de bord net – comme l'atmosphère de la Terre. En outre, nous avons vu que les enveloppes des atomes lourds et légers ne sont pas très différentes les unes des autres en

termes de taille, mais plutôt en termes de masse volumique. Un atome d'or et un atome de lithium ont approximativement la même taille. Cependant, la masse volumique de l'électronium de l'atome d'or est beaucoup plus élevée que celle de l'atome de lithium.

Les noyaux atomiques se comportent de manière complètement différente. La masse volumique du noyau atomique est la même partout, contrairement à ce qui se passe dans l'atmosphère de la Terre, mais par exemple comme dans une sphère de verre. En outre, la masse volumique de la matière nucléaire est la même dans tous les noyaux atomiques. Le noyau de l'atome de lithium a approximativement la même masse volumique que le noyau de l'atome d'or. En revanche, les noyaux de l'atome de lithium et de l'atome d'or diffèrent par leur taille, Fig. 10.1.

La masse volumique d'un noyau atomique est la même partout. Les masses volumiques des différents noyaux atomiques sont égales.

En ce qui concerne la forme, le noyau et l'enveloppe sont très similaires. Les noyaux sont également presque

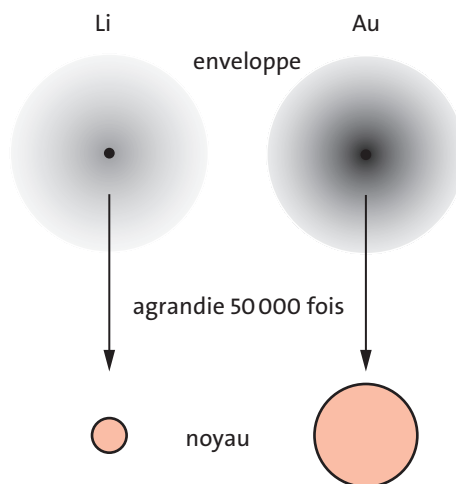


Fig. 10.1 L'enveloppe de l'atome d'or est à peu près aussi grande que celle de l'atome de lithium. Cependant, elle a une masse volumique beaucoup plus élevée. Le noyau de l'atome d'or a approximativement la même masse volumique que le noyau de l'atome de lithium. Il est cependant beaucoup plus grand.

sphériques. Certains divergent légèrement de la forme sphérique : certains sont un peu aplatis comme une mandarine, d'autres sont légèrement allongés comme un kiwi.

La masse volumique ρ est mesurée en kg/m^3 . Par exemple, l'eau a une densité de

$$\rho = 1 \text{ g/cm}^3,$$

c'est-à-dire que la masse de 1 m^3 d'eau est de 1000 kg, ou la masse de 1 litre d'eau est de 1 kg, ou la masse de 1 cm^3 d'eau est de 1 g.

Le fait que la quasi-totalité de la masse d'un atome soit concentrée dans le noyau entraîne une masse volumique énorme. La matière nucléaire a une masse volumique de

$$\rho = 10^{14} \text{ g/cm}^3.$$

Si'il y avait 1 cm^3 de matière nucléaire, elle aurait une masse de $10^{14} \text{ g} = 100\,000\,000$ tonnes.

Pour en savoir plus sur cette matière particulière dont sont faits les noyaux, nous allons faire une expérience de pensée que nous avons déjà faite lors de l'examen de l'enveloppe électronique : nous « mettons la main dedans » pour en sortir une portion. Encore une fois, il ne faut pas comprendre cela littéralement, car nous ne pouvons ni entrer dans l'enveloppe ni dans le noyau avec nos mains. Cependant, nous pouvons faire quelque chose d'assez similaire : nous pouvons utiliser d'autres particules pour tirer contre le noyau afin de catapulter une partie de la matière nucléaire à l'extérieur. Pour l'instant, il importe peu de savoir comment cela fonctionne en détail.

Alors, pénétrons dans le noyau, prenons-en une portion et regardons ce que nous tenons « dans notre main ». Vous ne serez pas surpris de constater que, tout comme dans le cas de l'électronium de l'enveloppe, nous n'obtiendrons toujours que des portions très spécifiques. Mais un aspect est différent : il y a deux sortes de plus petites portions. Parfois, nous tenons quelque chose qui est chargé électriquement et parfois nous obtenons quelque chose d'électriquement neutre. Si nous « attrapons » une plus grande quantité de noyau, il est possible que notre « prise » soit le double de la portion élémentaire chargée ou le double de la portion élémentaire neutre ou encore autant qu'une portion chargée et une portion neutre ensemble. Vous pouvez imaginer ce qui pourrait se passer si nous « attrapons » une encore plus grande quantité de noyau.

En outre, vous savez déjà comment ces portions sont appelées : une portion élémentaire positive est ap-

	charge électrique	masse
proton	$1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	$1,6725 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
neutron	0 C	$1,6748 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
électron	$-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	$9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

Tab. 10.1 Données pour le proton, le neutron et l'électron.

pelée proton, une portion élémentaire neutre est un neutron. Par conséquent, un noyau contient un nombre entier de portions positives et généralement un autre nombre entier de portions neutres. En d'autres termes : un noyau contient un nombre bien défini de protons et un nombre bien défini de neutrons.

Remarquez toutefois que les protons et les neutrons du noyau ne sont pas séparés spatialement les uns des autres. Si vous imaginez que la matière des protons ressemble à une pâte rouge et celle des neutrons à une pâte blanche, l'ensemble de la pâte du noyau ne serait pas composée de zones rouges et blanches mais serait uniformément rose.

Le Tab. 10.1 présente la charge électrique et la masse du proton, du neutron et de l'électron. Les masses du proton et du neutron sont presque mais pas exactement égales. Le neutron est légèrement plus lourd. Nous verrons plus tard que cette différence est importante pour certaines réactions nucléaires. Rappelez-vous que chacune de ces deux particules est environ 1800 fois plus lourde que l'électron.

La charge électrique de l'électron est exactement égale mais opposée à la charge du proton. Un atome contient autant d'électrons dans son enveloppe qu'il y a de protons dans son noyau. L'atome n'a donc pas de charge électrique dans son ensemble : il est électriquement neutre.

La matière nucléaire peut être divisée en

- des portions qui sont chargées positivement et
- des portions électriquement neutres.

Une portion positive est appelée proton, une portion neutre est appelée neutron.

Exercices

1. Le nombre total de protons et de neutrons dans un noyau A est huit fois supérieur à celui d'un noyau B. De quel facteur le volume de A est-il supérieur à celui de B ? De quel facteur le rayon de A est-il supérieur à celui de B ?
2. Il existe des corps célestes constitués de matière nucléaire : les *étoiles à neutrons*. Une étoile à neutrons typique a un diamètre de 10 km. Quelle est sa masse ?

10.2 Eléments, nucléides, isotopes

Les atomes des différents éléments chimiques diffèrent par le nombre de protons de leurs noyaux. Le numéro atomique indique précisément ce nombre de protons. Et tant que l'atome n'est pas ionisé, le numéro atomique est également égal au nombre d'électrons.

Numéro atomique = nombre de protons dans le noyau.

Si l'on évalue les noyaux uniquement en fonction de leur nombre de protons, il existe autant de noyaux différents que d'éléments chimiques différents, c'est-à-dire environ une centaine.

Cependant, un noyau atomique avec un nombre donné de protons peut contenir plus ou moins de neutrons. Par exemple, il existe des noyaux atomiques de potassium (c'est-à-dire des noyaux atomiques avec 19 protons) avec des nombres de neutrons allant de 16 à 33, d'où l'existence de différents types de potassium, ou *isotopes* comme on les appelle. Les différents isotopes d'un élément ne sont presque pas différents les uns des autres en termes chimiques. Le potassium normal, naturel, est un mélange de différents isotopes. Il existe également différents isotopes de tous les autres éléments.

Les isotopes d'un élément diffèrent par le nombre de neutrons dans le noyau atomique.

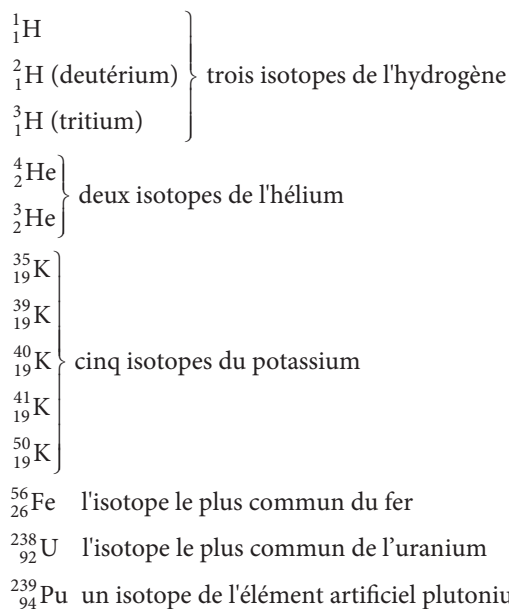
En comptant les différents types de chaque élément chimique individuellement, nous n'obtenons pas environ 100 substances de base différentes mais environ 3 000.

Comme vous le savez, les 100 substances chimiques de base différentes sont appelées éléments. Les 3 000 substances de base différentes que nous obtenons en distinguant les noyaux en plus par le nombre de neutrons sont appelées *nucléides*.

La notation suivante est utilisée pour dénommer un nucléide :

- le symbole en lettres de l'élément tel qu'il est connu en chimie :
- le nombre total des protons et des neutrons, écrit à gauche et en haut du symbole de l'élément, et le numéro atomique, c'est-à-dire le nombre de protons, à gauche et en bas.

Vous trouverez ici quelques exemples de nucléides dans cette notation :

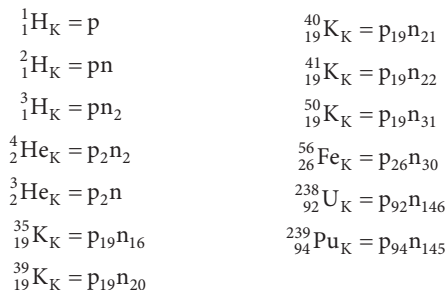


Comme vous pouvez le constater, les deux isotopes lourds de l'hydrogène ont même leur propre nom : l'isotope à un neutron est appelé *deutérium* et celui à deux neutrons est appelé *tritium*.

Lorsque nous examinons les réactions nucléaires, nous ne nous intéressons généralement qu'aux noyaux. Il est donc utile d'introduire un symbole spécial pour les noyaux d'un nucléide : nous ajoutons un K en indice au symbole du nucléide. Ainsi, alors que le symbole ${}^{25}_{12}\text{Mg}$ représente les atomes dans son ensemble d'un nucléide de magnésium défini, le symbole ${}^{25}_{12}\text{Mg}_K$ désigne uniquement les noyaux de ce nucléide.

À certaines fins, une autre représentation symbolique des nucléides est plus appropriée. Elle s'inspire de la représentation qui est utilisée en chimie pour caractériser les molécules. La formule Al_2O_3 indique la teneur en aluminium et en oxygène de l'oxyde d'aluminium.

En conséquence, les nucléides peuvent également être caractérisés en indiquant la teneur en protons p et en neutrons n. Vous trouverez ici quelques exemples de cette notation, en lien avec la notation précédente :



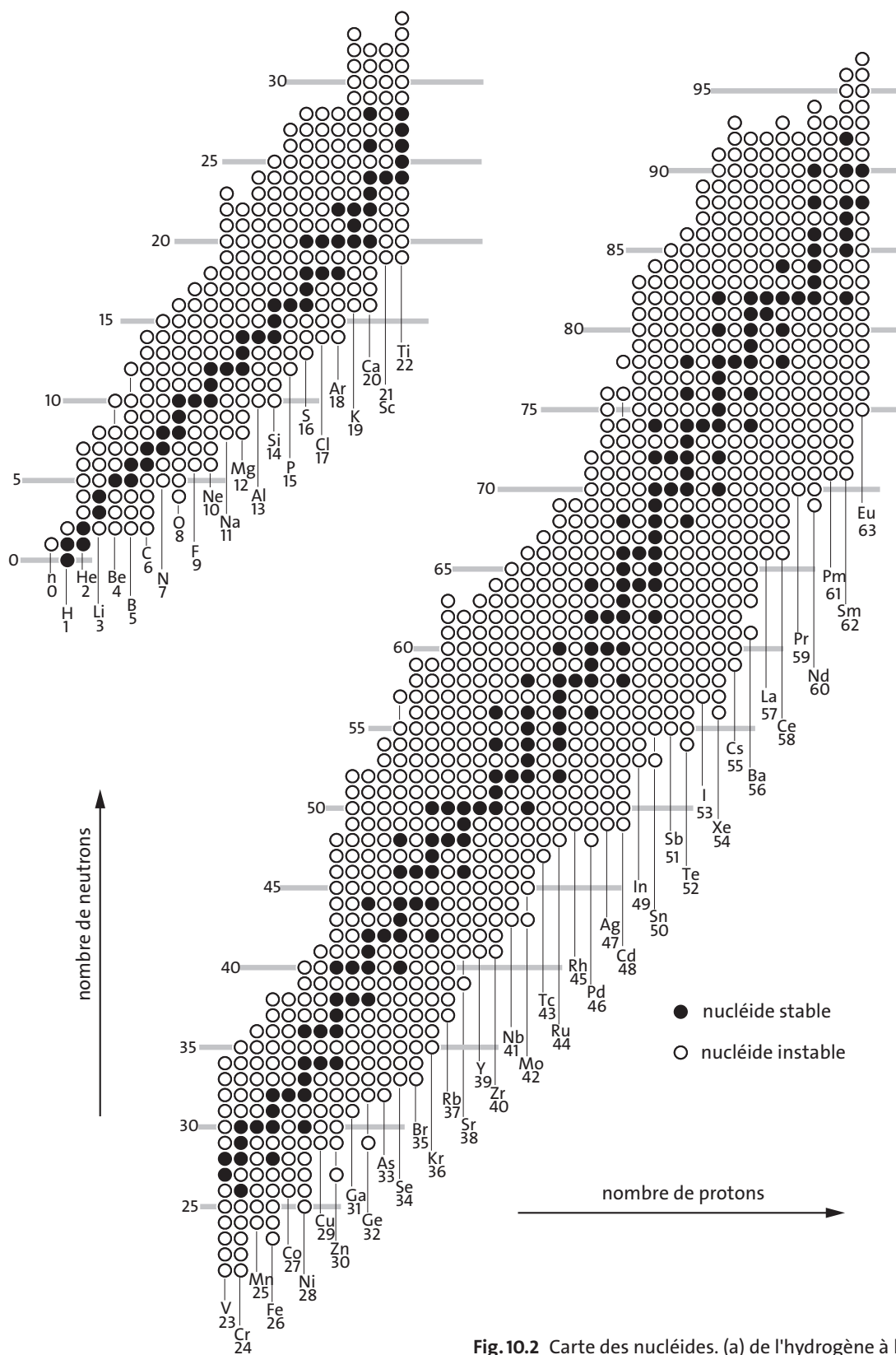


Fig. 10.2 Carte des nucléides. (a) de l'hydrogène à l'euprium.

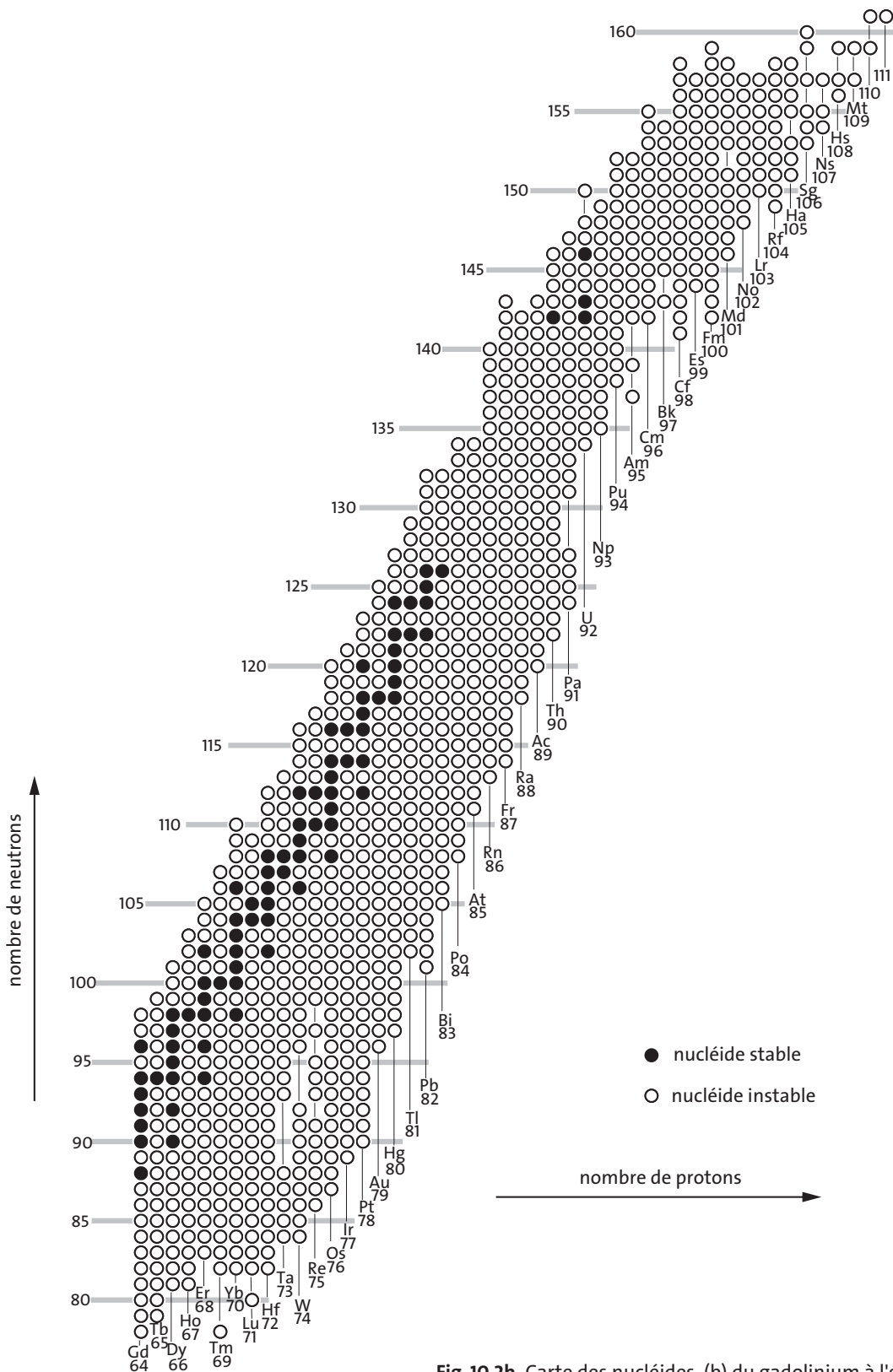


Fig. 10.2b Carte des nucléides. (b) du gadolinium à l'élément 111.

Mais quels types de nucléides existent réellement ? Nous avons déjà dit qu'il existe un total de 3 000 nucléides. Cela signifie que chaque formule « chimique » arbitraire ne correspond pas à un nucléide existant. Ainsi, il n'y a par exemple pas de pn_3 , c'est-à-dire d'hydrogène avec 3 neutrons. De même, l'isotope d'oxygène p_8n_{17} ou l'isotope de zinc $p_{30}n_{50}$ n'existent pas.

La question de savoir quels nucléides existent, c'est-à-dire quelles combinaisons de la matière nucléaire p et de la matière nucléaire n sont possibles, est similaire par exemple à la question des composés existants des substances hydrogène et oxygène. Parmi les composés de l'hydrogène et de l'oxygène énumérés à la ligne suivante, lesquels existent ?

O, H, H₂, O₂, HO, H₂O, HO₂, O₃, H₂O₂, H₃O, H₃O₂, HO₃, ...

Vous connaissez déjà certaines d'entre elles : l'hydrogène moléculaire H₂, l'oxygène moléculaire O₂, l'eau H₂O. Quant aux autres substances de la liste, vous savez certainement qu'elles n'existent pas. Vous connaissez peut-être aussi le peroxyde d'hydrogène H₂O₂. Bien que cette substance existe, elle n'est pas stable. Il en va de même pour l'ozone O₃. Et l'hydrogène atomique H est encore plus instable.

Cela s'applique de la même manière aux nucléides. La plupart des combinaisons possibles p_xn_y n'existent pas. Et seule une petite fraction de celles qui pourraient exister est stable.

La Fig. 10.2 montre la *carte des nucléides*, c'est-à-dire un diagramme avec tous les nucléides connus. Le nombre de protons est indiqué sur l'axe horizontal vers la droite, le nombre de neutrons sur l'axe vertical vers le haut. Chaque cercle correspond à l'un des nucléides qui ont été découverts ou produits jusqu'à présent. Cependant, seuls les cercles pleins représentent des nucléides stables. Les nucléides correspondant aux cercles vides sont instables, c'est-à-dire qu'ils se désintègrent progressivement par eux-mêmes. Si la durée de vie de certains est très courte, elle est très longue pour d'autres.

Il existe environ 100 éléments différents et 3 000 nucléides différents.

	énergie d'excitation typique	temps de transition typique
enveloppe atomique	10 ⁻¹⁹ J	10 ⁻⁸ s
noyau atomique	10 ⁻¹³ J = 0,1 pJ	10 ⁻¹⁴ s

Tab. 10.2

Exercices

1. Choisissez six nucléides de numéros atomiques différents sur la carte des nucléides, Fig. 10.2, et écrivez-les symboliquement selon les deux méthodes décrites dans le texte.
2. Formulez une règle grossière pour le rapport entre protons et neutrons dans les nucléides existants, aussi bien pour les éléments légers (jusqu'à environ 20 protons) que pour les éléments lourds. Utilisez la carte des nucléides, Fig. 10.2.
3. Quel est le nombre de nucléides stables existants ?
4. Quel est le nucléide stable le plus lourd ?
5. Quels sont les isotopes stables du néon ?
6. Quel est l'élément le plus léger qui n'a pas d'isotope stable ?
7. Quel élément possède le plus grand nombre d'isotopes ? Combien y en a-t-il ? Combien d'entre eux sont stables ?

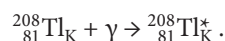
10.3 L'excitation des noyaux

Tout comme l'enveloppe atomique, le noyau peut également être déformé ; et le noyau se verrouille dans des formes définies de la même manière que l'enveloppe. Les différences les plus importantes sont les suivantes : premièrement, il faut environ un million de fois plus d'énergie pour déformer un noyau atomique que pour déformer l'enveloppe, et deuxièmement, la durée d'une transition entre deux états du noyau ne représente qu'environ un millionième de la durée de transition dans l'enveloppe, Tab. 10.2.

Dans ce qui suit, nous rencontrerons souvent des énergies de l'ordre de grandeur de 10⁻¹² à 10⁻¹⁵ Joule. Il est donc pratique d'utiliser l'abréviation « pico » pour 10⁻¹² : 10⁻¹² J = 1 pJ. La Fig. 10.3 montre l'échelle d'énergie d'un isotope du thallium.

De même, les méthodes d'excitation sont en principe les mêmes que pour l'enveloppe.

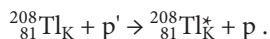
Par exemple, le noyau peut être excité par des photons, qui doivent avoir exactement l'énergie correspondant à la transition entre l'état fondamental et l'état excité. Cette énergie ne doit pas être trop faible, mais elle ne doit pas non plus être trop élevée. Comme indiqué précédemment, nous avons besoin de beaucoup plus d'énergie que pour l'excitation de l'enveloppe. Les photons doivent donc être du rayonnement γ . Un exemple d'un tel processus est l'excitation d'un noyau de thallium.



Cependant, les noyaux peuvent aussi être excités par des particules qui ont une masse au repos, par exemple des

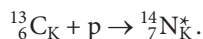
L'énergie de séparation

électrons, des protons ou des neutrons. (Ce processus correspond également à un processus d'excitation de l'enveloppe). Dans ce cas, la particule excitatrice doit fournir suffisamment d'énergie: elle peut même avoir plus d'énergie que celle requise pour l'excitation. La particule qui s'échappe peut emporter l'énergie restante. Prenons à nouveau l'exemple du noyau de thallium :



Ici, p' représente un proton rapide, p un proton lent.

La troisième méthode pour produire un noyau excité a également une contrepartie dans l'enveloppe atomique: certaines réactions chimiques conduisent à des produits de réaction dans un état excité. Une flamme de gaz en est un exemple. De même, les produits de réaction des réactions nucléaires existent souvent dans un état excité. Nous aborderons les réactions nucléaires en détail ultérieurement. Pour le moment, mentionnons simplement un premier exemple: un certain isotope de carbone réagit avec un proton pour former un isotope d'azote excité :



Le noyau atomique peut être excité tout comme l'enveloppe atomique. Dans un état excité, le noyau a une autre forme que dans l'état fondamental. Une certaine quantité d'énergie est stockée dans le noyau pendant l'excitation.

Vous vous souvenez que la masse et l'énergie sont la même grandeur physique. Lorsque la grandeur est mesurée dans l'unité kg, on l'appelle masse. On l'appelle énergie lorsqu'elle est mesurée en joule. Ainsi une unité de mesure peut être facilement convertie dans l'autre. En d'autres termes: la masse peut être exprimée en unités d'énergie.

La conversion se fait selon la formule

$$E = k \cdot m$$

$k = 9 \cdot 10^{16} \text{ J/kg}$ est le facteur de conversion.

Si nous fournissons de l'énergie à un système, il deviendra plus lourd. Dans de nombreux cas, cependant, l'augmentation d'énergie est si faible par rapport à l'énergie totale du système que l'augmentation de masse ne peut être remarquée. Par exemple, la masse de l'atome change si peu pendant l'excitation de l'enveloppe qu'elle ne peut presque pas être perçue.

L'excitation des noyaux atomiques est différente. Nous examinons l'excitation de l'isotope ${}^{208}_{81}\text{Tl}$ du thal-

lium, dont l'échelle d'énergie est illustrée à la Fig. 10.3, vers le deuxième état excité. Pour cela, il faut lui fournir une quantité d'énergie de 0,05 pJ. On convertit en kg :

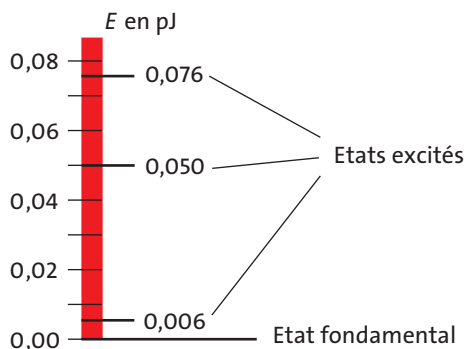


Fig. 10.3 Echelle d'énergie d'un isotope de thallium.

$$m = \frac{E}{k} = \frac{0,05 \cdot 10^{-12} \text{ J}}{9 \cdot 10^{16} \text{ J/kg}} = 0,56 \cdot 10^{-30} \text{ kg}.$$

Comparée à la masse totale de l'atome de thallium, cette quantité est encore faible. Cependant, elle est presque aussi importante que la masse d'un électron ($0,9 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$).

Un noyau devient plus lourd lorsqu'il est excité.

Exercices

- La masse d'un atome de thallium est de $350 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. De quelle fraction de la masse totale l'atome deviendra-t-il plus lourd ?
 - dans le cas d'une excitation typique de l'enveloppe atomique,
 - dans le cas d'une excitation typique du noyau ?
- Est-il possible de distinguer, à l'aide d'une balance, la masse d'une mole de substance dont les noyaux sont excités de la masse de la même substance dont les noyaux sont à l'état fondamental ?

10.4 L'énergie de séparation

Il faut de l'énergie pour séparer deux aimants collés l'un à l'autre. Par conséquent, les aimants séparés ont plus d'énergie que les aimants collés. Comme l'énergie est égale à la masse, cela signifie que les aimants séparés sont plus lourds que les aimants joints, Fig. 10.4. Cependant, cet effet est si faible qu'il ne peut être prouvé par une expérience comme celle de la Fig. 10.4.

Pour extraire un proton d'un noyau, il faut de l'énergie. Le noyau et le proton ont donc moins d'énergie que le noyau et le proton séparément. Si on extrait un proton d'un noyau de ${}^{14}_7\text{N}$, on obtient un noyau de ${}^{13}_6\text{C}$. Le noyau ${}^{14}_7\text{N}$ est plus léger que le noyau ${}^{13}_6\text{C}$ et le proton ensemble, Fig. 10.5. Ici, l'effet est beaucoup plus important que dans l'exemple avec l'aimant, et il peut être tout à fait prouvé.

Bien entendu, il en va de même pour un noyau dont on extrait un neutron. De même, lors de la séparation d'un neutron, le système devient plus lourd car de l'énergie est nécessaire pour ce processus.

Nous aimerions maintenant démanteler un noyau atomique imaginaire étape par étape en protons et neutrons individuels. Pour ce processus de démantèlement complet d'un noyau de nucléide, une quantité d'énergie très spécifique – l'énergie de séparation – est nécessaire. Elle a une valeur différente pour chaque nucléide. Nous aurons besoin de ces valeurs d'énergie plus tard afin de décider dans quelle direction se déroule une réaction nucléaire. Le tableau en annexe présente les énergies de séparation d'environ 1000 nucléides.

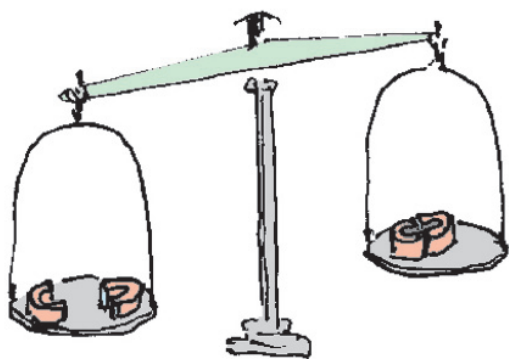


Fig. 10.4 Les aimants séparés ont plus d'énergie que les aimants qui sont en contact. Cependant, l'effet est si faible qu'il ne peut être prouvé au moyen d'une pesée.

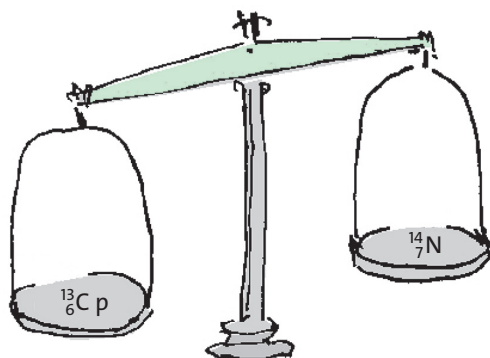


Fig. 10.5 Un noyau de ${}^{14}_7\text{N}$ est plus léger qu'un noyau de ${}^{13}_6\text{C}$ et un proton réunis.

De l'énergie (l'énergie de séparation) est nécessaire pour décomposer un noyau en protons et en neutrons. Par conséquent, les composants pris séparément sont plus lourds que le noyau.

Exercices

1. L'énergie de séparation est approximativement proportionnelle au nombre total de protons et de neutrons. Choisissez 5 nucléides dans le tableau de l'annexe et représentez graphiquement leur énergie de séparation en fonction du nombre total de protons et de neutrons.
2. Si on sépare un neutron d'un noyau de ${}^{15}_6\text{C}$, on obtient un noyau de ${}^{14}_6\text{C}$. Si on sépare un neutron de ce dernier, on obtiendra un noyau de ${}^{13}_6\text{C}$: après avoir séparé un troisième neutron, on obtiendra un noyau de ${}^{12}_6\text{C}$, et ainsi de suite.

Quelle quantité d'énergie est nécessaire pour les processus correspondants de séparation d'un neutron? Faites un graphique de cette énergie en fonction du nombre total de protons et de neutrons de l'isotope de carbone correspondant. Faites le même exercice pour les isotopes de l'hélium. Que pouvez-vous observer?

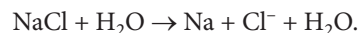
10.5 Grandeurs conservées

Notre but est de prédire quelles réactions nucléaires sont possibles. En principe, vous connaissez le procédé que nous allons utiliser. Nous allons tirer parti du fait que certaines grandeurs de type substance ne peuvent pas changer de valeur au cours d'une réaction.

Vous avez déjà appris à connaître certaines de ces grandeurs. Elles sont appelées *grandeurs conservées*.

L'énergie est une grandeur conservée. Dans chaque processus, la quantité totale d'énergie ne change pas. Il en va de même pour la charge électrique.

Observez maintenant la réaction décrite par l'équation chimique suivante :



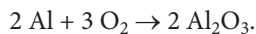
Une telle réaction ne peut pas avoir lieu car elle ne tient pas compte de la conservation de la charge électrique. Les réactifs (partie gauche) dans leur ensemble sont neutres, les produits (partie droite) dans leur ensemble portent une charge électrique négative. Une réaction autorisée est en revanche :



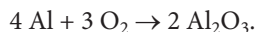
Ici, le bilan des charges est correct.

Particules et antiparticules

Un autre processus interdit est :



Ici, une autre loi de conservation est violée : dans les réactions chimiques, le nombre d'atomes de chaque espèce sont des grandeurs conservées. Et les nombres d'atomes à droite et à gauche de l'équation chimique ne sont pas égaux. Une réaction possible est alors :



Dans les réactions chimiques, les nombres d'atomes sont des grandeurs conservées.

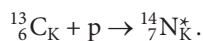
Ainsi, pour établir une équation de réaction chimique, nous utilisons la conservation de la charge électrique et la conservation du nombre d'atomes.

Mais il existe un problème concernant la conservation du nombre d'atomes : la loi de conservation ne s'applique pas toujours ! Nous avons insisté sur le fait qu'elle s'applique aux « réactions chimiques ». Dans ce qui suit, nous verrons qu'elle ne s'applique pas, par exemple, aux réactions nucléaires.

Par conséquent :

Certaines lois de conservation ne s'appliquent que dans certaines conditions.

Nous avons déjà vu un exemple de réaction nucléaire :



Vous pouvez voir qu'il y a un noyau de carbone sur le côté gauche de l'équation mais pas sur le côté droit. De même, il y a un proton du côté gauche, c'est-à-dire un noyau d'un atome d'hydrogène, mais pas du côté droit. À droite, en revanche, il y a un noyau d'azote – mais pas à gauche. Le nombre d'atomes ou de noyaux atomiques n'est donc pas conservé au cours de cette réaction nucléaire.

Il y a maintenant un problème : nous n'avons plus de règle pour l'établissement de l'équation de la réaction. Ou bien n'importe quelle réaction est-elle permise ? L'expérience montre que ce n'est pas du tout le cas. L'examen des réactions nucléaires a montré qu'il existe d'autres grandeurs physiques pour lesquelles une loi de conservation s'applique et qui n'étaient pas connues auparavant : la *charge baryonique* et la *charge leptonique*. Pour chaque noyau et en général pour chaque particule, la charge baryonique et la charge leptonique ont une valeur spécifique. La charge baryo-

nique des particules du côté gauche de l'équation de la réaction (les réactifs) doit toujours être égale à celle du côté droit (les produits). De même, la charge leptonique des réactifs et des produits doit être égale.

La charge baryonique ne peut être ni créée ni détruite.

La charge leptonique ne peut être ni créée ni détruite.

Avant d'étudier l'établissement d'une équation de réaction nucléaire en relation avec ce nouvel aspect, nous devons développer un peu plus notre connaissance des portions élémentaires.

Exercice

1. Quelles grandeurs de type substance connaissez-vous ? Lesquelles sont des grandeurs conservées et lesquelles ne le sont pas ?

10.6 Particules et antiparticules

Au cours du processus de démontage de l'enveloppe et du noyau, nous avons rencontré jusqu'à présent trois types différents de matière élémentaire ou de *particules élémentaires* : les électrons, les protons et les neutrons. En dehors de ces trois types de particules, d'autres ont été découvertes. Cependant, la majeure partie de la nature qui nous entoure n'est constituée que d'électrons, de protons et de neutrons. Les autres particules sont pour la plupart créées artificiellement.

L'existence de ces nouvelles particules semble à première vue rendre l'exposé sur les réactions nucléaires plus compliquée. En réalité, toutes ces particules peuvent être classées de manière très systématique et claire. Le Tab. 10.3 les énumère avec certaines de leurs caractéristiques. Nous aimerions discuter de ce tableau en détail.

Ce que nous savons déjà

La colonne de gauche contient les noms des particules. Nous connaissons déjà quatre de ces particules : le photon, l'électron, le proton et le neutron.

Le neutrino

En fait, nous devrions également le connaître car il existe en quantité importante sur Terre. Beaucoup de ces particules nous traversent librement : environ 10^{13}

nom, symbole	énergie au repos	charge électrique*	charge baryonique	charge leptonique
photon γ	0 pJ	0	0	0
électron e	0,0819 pJ	-1	0	1
antiélectron \bar{e}	0,0819 pJ	1	0	-1
neutrino ν	presque 0 pJ	0	0	1
antineutrino $\bar{\nu}$	presque 0 pJ	0	0	-1
proton p	150,3277 pJ	1	1	0
antiproton \bar{p}	150,3277 pJ	-1	-1	0
neutron n	150,5349 pJ	0	1	0
antineutron \bar{n}	150,5349 pJ	0	-1	0

* en multiples de la charge élémentaire

Tab. 10.3 Énergie au repos, charge électrique, baryonique et leptonique de quelques particules.

particules par centimètre carré et par seconde. Elles proviennent principalement du soleil. Là, elles se forment dans la réaction qui fait aussi que le soleil nous envoie de la lumière. On perçoit très peu ces neutrinos car ils traversent toute la matière presque sans encombre. Par conséquent, il n'y a presque aucune réaction qui pourrait être utilisée pour les détecter. La plupart de ces neutrinos pénètrent la Terre entière sans réagir avec d'autres particules et même sans être déviés.

Grâce aux neutrinos, nous pouvons apprendre quelque chose sur les réactions qui ont lieu au cœur du soleil. Cependant, comme les neutrinos sont si faiblement réactifs, les expériences visant à les mesurer prennent beaucoup de temps. Les dispositifs de détection doivent être très grands pour que la probabilité qu'un neutrino γ soit capturé ne soit pas trop faible. En outre, les expériences doivent être protégées contre toutes les autres particules qui se forment dans les réactions nucléaires ou qui proviennent de l'espace. C'est pourquoi ces expériences sont réalisées profondément sous la surface de la Terre : dans des tunnels ou dans d'anciennes mines.

L'existence des neutrinos avait déjà été supposée à une époque où il n'était pas encore possible de réaliser des expériences aussi sophistiquées. Comment cela a-t-il été possible ? Grâce à une méthode qui s'est déjà révélée efficace à plusieurs reprises en microphysique : en analysant une réaction particulière, on constate qu'une loi de conservation semble enfreinte, alors qu'on est convaincu de sa validité. Dans le cas des neutrinos, on a constaté que l'énergie n'était pas conservée dans une réaction particulière. On en a donc conclu qu'une autre particule, inconnue et non détectée jusqu'alors, devait être impliquée dans la réaction.

Les neutrinos ne réagissent que faiblement avec d'autres particules.

Antiparticules

Le tableau contient quatre autres particules. Les noms de ces particules commencent tous par le préfixe « anti » : l'antiélectron, l'antineutrino, l'antiproton et l'antineutron. Vous pouvez facilement vous convaincre qu'elles sont très similaires à la particule respective sans le « anti » : elles sont complètement identiques, sauf pour le signe +/- des trois charges. Cela signifie que le proton a une charge électrique et baryonique positive et que l'antiproton a une charge électrique et baryonique négative.

Nous disons que l'antiproton est l'antiparticule du proton, et que le proton est l'antiparticule de l'antiproton. Ainsi, la particule et l'antiparticule forment une paire de deux partenaires très semblables.

Les particules et les antiparticules diffèrent par le signe +/- de la charge électrique, baryonique et leptonique.

Les électrons et les neutrinos, ainsi que leurs antiparticules, portent une charge leptonique.

Les protons et les neutrons, ainsi que leurs antiparticules, portent une charge baryonique.

Il n'y a pas d'antiparticule au photon.

10.7 Bilan des charges

Nous sommes maintenant capables d'établir l'équation d'une réaction nucléaire. Examinons d'abord quelques exemples très simples. La réaction suivante est-elle possible

La direction d'une réaction

$$n \overset{?}{\longleftrightarrow} p + e \quad (10.1)$$

dans laquelle un neutron se transforme en un proton et un électron ? On établit les bilans de charge électronique, baryonique et leptonique :

	n	p + e
charge électrique	0	1 + (-1)
charge baryonique	1	1 + 0
charge leptonique	0	0 + 1

La charge électrique des réactifs et des produits est la même, c'est-à-dire zéro. Par conséquent, le principe de conservation de la charge électrique est respecté. De même, la charge baryonique a la même valeur à gauche et à droite, c'est-à-dire 1. La charge leptonique, quant à elle, ne serait pas conservée dans la réaction : elle est nulle à gauche et égale à 1 à droite. La réaction ne peut donc pas avoir lieu, ni de la gauche vers la droite, ni de la droite vers la gauche.

Cependant, il est facile de corriger l'équation de la réaction, par exemple en ajoutant un antineutrino du côté droit :

$$n \overset{?}{\longleftrightarrow} p + e + \bar{\nu}.$$

Cette fois, le bilan est correct :

	n	p + e + $\bar{\nu}$
charge électrique	0	1 + (-1) + 0
charge baryonique	1	1 + 0 + 0
charge leptonique	0	0 + 1 + (-1)

La charge leptonique est maintenant égale à gauche et à droite, c'est-à-dire zéro. Cette réaction a réellement lieu : un neutron libre se désintègre de lui-même en un proton, un électron et un antineutrino.

L'équation (10.1) peut également être corrigée en ajoutant un neutrino du côté gauche :

$$n + \nu \overset{?}{\longleftrightarrow} p + e.$$

Cette réaction est aussi autorisée comme le montre le tableau de bilan :

	n + ν	p + e
charge électrique	0 + 0	1 + (-1)
charge baryonique	1 + 0	1 + 0
charge leptonique	0 + 1	0 + 1

Exercice

1. Établissez une équation qui décrit la réaction d'un proton avec un antiproton. Il y a plusieurs possibilités.

10.8 La direction d'une réaction

Une question importante n'a toujours pas trouvé de réponse : dans quelle direction se déroule la réaction que nous avons établie ?

Là encore, nous pouvons prendre notre décision en appliquant une loi de conservation. Nous n'avons pas encore considéré la conservation de l'énergie jusqu'à présent. Le bilan énergétique d'une réaction doit bien sûr être correct. L'énergie des réactifs et des produits doit être égale. Cependant, si nous comparons l'énergie au repos des particules d'un côté d'une équation chimique à celle de l'autre côté, les énergies n'auront jamais exactement la même valeur. En fait, les énergies au repos n'ont pas besoin d'être égales.

Lorsque les noyaux ou les particules initiales sont au repos, l'énergie des particules initiales est la somme de l'énergie au repos de ces particules. L'énergie totale au repos des particules produites ne peut certainement pas être supérieure à celle des particules initiales. Cependant, elle peut effectivement être inférieure. Dans ce cas, il resterait quelque chose de l'énergie des particules initiales. Cette énergie restante peut cependant toujours être utilisée : il suffit de la fournir aux particules produites en les faisant se déplacer rapidement. Plus les particules produites se déplacent rapidement, plus elles ont d'énergie en plus de leur énergie au repos. Par conséquent, une réaction nucléaire se produit de telle sorte que l'énergie au repos des noyaux et des particules impliqués diminue.

Pour distinguer dans quelle direction se déroule une réaction, il faut donc comparer l'énergie totale au repos des particules du côté gauche à celle des particules du côté droit. La réaction va de la haute à la basse énergie au repos.

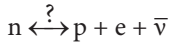
Une réaction nucléaire dans laquelle les particules initiales sont au repos se déroule toujours vers l'énergie au repos décroissante.

Nous allons maintenant mettre en pratique nos nouveaux outils. Nous aimerions examiner dans quelle direction une réaction se déroule.

$$A + B + \dots \overset{?}{\longleftrightarrow} U + V + \dots$$

Les neutrons sont-ils stables ?

La réaction



est correct en ce qui concerne le bilan des charges électrique, baryonique et leptonique, comme nous l'avons déjà vu à la section précédente. Cependant, il manque encore le bilan énergétique. Nous l'ajoutons au tableau en plus des bilans de charge : la somme des énergies au repos du côté gauche et la somme des énergies au repos du côté droit. Nous pouvons prendre les énergies au repos des particules individuelles dans le tableau de l'annexe.

	n	p + e + $\bar{\nu}$
charge électrique	0	1 + (-1) + 0
charge baryonique	1	1 + 0 + 0
charge leptonique	0	0 + 1 + (-1)
Énergie au repos en pJ	n 150,5349	p 150,3277 e 0,0819
somme en pJ	150,535	150,410

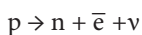
L'énergie au repos du neutron est supérieure à celle du proton, de l'électron et de l'antineutrino réunis. Par conséquent, la réaction se déroule de gauche à droite : le neutron n'est pas stable. On soustrait la plus petite somme de la plus grande et on obtient :

$$\Delta E = 150,535 \text{ pJ} - 150,410 \text{ pJ} = 0,125 \text{ pJ}.$$

Dans les faits, nous pouvons observer que les neutrons libres, c'est-à-dire les neutrons qui ne sont pas liés à un noyau, se désintègrent effectivement d'eux-mêmes. Les neutrons peuvent être produits artificiellement. Cependant, ils se désintègrent en quelques minutes si on les stocke soigneusement. En fait, leur durée de vie est beaucoup plus courte car ils sont très réactifs et se lient rapidement aux divers noyaux atomiques qu'ils rencontrent.

Les protons sont-ils stables ?

Vous savez déjà que les protons ne se désintègrent pas. Nous aimerions nous convaincre que notre nouvel outil nous conduit également à ce résultat. En ce qui concerne les équilibres des trois charges, la réaction suivante serait permise :



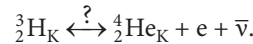
Nous créons un tableau avec les bilans :

	p	n + \bar{e} + ν
charge électrique	1	0 + 1 + 0
charge baryonique	1	1 + 0 + 0
charge leptonique	0	0 + (-1) + 1
Énergie au repos en pJ	p 150,3277	n 150,5349 \bar{e} 0,0819
somme en pJ	150,328	150,617

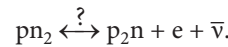
L'énergie au repos du proton est inférieure à celle du neutron et de l'antiélectron réunis. Par conséquent, la réaction ne peut se faire que de droite à gauche : le proton ne peut pas se désintégrer.

Le tritium est-il stable ?

Nous allons essayer la désintégration du tritium avec pour produits un noyau d'hélium, un électron et un antineutrino :



Par souci de clarté dans les tableaux de bilan, nous utiliserons à partir de maintenant l'écriture de chaque noyau en terme de combinaisons quantifiées de protons et de neutrons, et non plus avec le symbole de l'élément :



Les bilans de charge sont corrects.

	pn ₂	p ₂ n + e + $\bar{\nu}$
charge électrique	1	2 + (-1) + 0
charge baryonique	3	3 + 0 + 0
charge leptonique	0	0 + 1 + (-1)
Énergie au repos en pJ	p 150,3277 n 2 · 150,5349	p 2 · 150,3277 n 150,5349 e 0,0819
-E _T en pJ	-1,359	-1,2364
somme en pJ	450,0385	450,0358

On calcule l'énergie au repos d'un noyau en soustrayant l'énergie de séparation de l'énergie au repos des particules qui le composent.

On va chercher E_T(pn₂) et E_T(p₂n) dans le tableau de l'annexe. La somme de gauche est plus grande que celle de droite : par conséquent, la réaction peut se dérouler de gauche à droite.

Dans les faits, le tritium est effectivement instable. L'eau normale contient une très petite quantité de tritium. Ce tritium se désintègre selon la réaction que

La direction d'une réaction

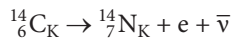
nous venons d'analyser. Dans 1 kg d'eau, environ 45 noyaux de tritium se désintègrent par minute. Mais comment est-il possible que l'eau contienne du tritium ? La quantité totale de tritium qui était présente à un moment donné dans l'eau pour une raison quelconque ne devrait-elle pas être désintégrée depuis longtemps ?

D'un côté le tritium se désintègre, mais d'un autre côté il est constamment produit à nouveau dans une réaction faisant intervenir ce qu'on appelle le rayonnement cosmique.

La Terre est constamment frappée par un courant de particules à très haute énergie – principalement des protons et des noyaux d'hélium. Ces particules provoquent de nombreuses réactions nucléaires dans l'atmosphère. De cette façon, de nombreux nucléides instables sont formés.

La désintégration du $^{14}_6\text{C}_K$

L'isotope de carbone instable $^{14}_6\text{C}_K$ est également produit par le rayonnement cosmique. Il se désintègre selon



ou



Désormais, nous n'écrivons plus dans le bilan d'énergie les énergies au repos des particules qui apparaissent à la fois à gauche et à droite de la formule de la réaction, car elles s'annulent les unes avec les autres. Ainsi, dans le cas de l'équation (10.2), nous ne prendrons plus en compte :

	p_6n_8	$p_7n_7 + e + \bar{\nu}$
charge électrique	6	7 + (-1) + 0
charge baryonique	14	14 + 0 + 0
charge leptonique	0	0 + 1 + (-1)
Énergie au repos en pJ	n 150,5349	p 150,3277 e 0,0819
$-E_T$ en pJ	-16,87	-16,77
somme en pJ	133,66	133,64

La somme de gauche est plus grande que celle de droite, ce qui veut dire que la réaction peut avoir lieu.

La désintégration de l'uranium

Les isotopes de l'uranium peuvent se désintégrer de nombreuses manières différentes. Nous allons exami-

ner l'une des nombreuses possibilités de désintégration de l'isotope d'uranium $^{235}_{92}\text{U}_K$, à savoir la désintégration en baryum et en krypton :

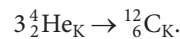


	$p_{92}n_{143}$	$p_{56}n_{85} + p_{36}n_{56} + 2n$
charge électrique	92	56 + 36 + 0
charge baryonique	235	141 + 92 + 2
charge leptonique	0	0 + 0 + 0
$-E_T$ en pJ	-285,80	-188,09 – 129,78
somme en pJ	-285,80	-317,87

Cette réaction est l'une des nombreuses réactions qui sont exploitées pour la production d'énergie dans les réacteurs nucléaires.

La synthèse du carbone

Nous allons analyser une réaction qui a lieu dans les étoiles et qui est responsable de la formation du carbone dans l'univers :

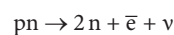
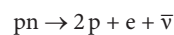
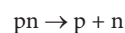


	$3p_2n_2$	p_6n_6
charge électrique	3 · 2	6
charge baryonique	3 · 4	12
charge leptonique	0	0
$-E_T$ en pJ	-3 · 4,53	-14,77
somme en pJ	-13,59	-14,77

Le fait que cette réaction n'ait normalement pas lieu sur Terre est dû à la résistance élevée de la réaction. Cette résistance peut être réduite à l'aide des méthodes habituelles utilisées en chimie : par une augmentation de la température ou par l'utilisation d'un catalyseur. Comme il s'agit d'une réaction nucléaire et non d'une réaction chimique normale, la température à laquelle la réaction démarre est très élevée : elle doit être supérieure à 100 millions de kelvins. Cette température est atteinte dans les étoiles.

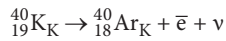
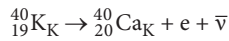
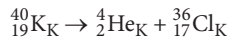
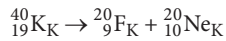
Exercices

1. Vérifiez si le deutérium peut se désintégrer de l'une des manières suivantes :

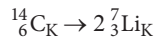
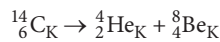


Exercices

2. L'isotope $^{40}_{19}\text{K}$ du potassium est instable. Selon quelles réactions sa désintégration peut-elle avoir lieu ?



3. Vérifiez laquelle de ces deux réactions peut avoir lieu :



4. Dans le soleil, quatre protons réagissent pour former un noyau ^4_2He . Quelles sont les particules qui se forment en plus ? Établissez le bilan énergétique de la réaction.

10.9 Rayonnement nucléaire

Lorsque l'on étudie un nucléide spécifique pour décider s'il est stable ou non, il faut examiner toutes les possibilités de désintégration. Au cours de ce processus, nous constatons qu'il existe une grande variété de possibilités pour de nombreux nucléides.

Cependant, l'observation a montré à de nombreuses reprises que le nucléide est en réalité stable. Il ne se désintègre pas alors qu'il serait autorisé à le faire au regard des bilans des trois charges et de l'énergie. Cela est dû à la résistance de réaction qui est trop élevée – un phénomène que nous connaissons également en chimie.

Et nous faisons également une autre observation : la plupart des réactions de désintégration qui ont réellement lieu peuvent être classées en un petit nombre de groupes. Nous examinerons cette classification dans ce qui suit. Le point commun de ces réactions types est le fait que l'un des produits de la réaction est une très petite particule : un électron, un antiélectron, un neutrino ou un noyau ^4_2He .

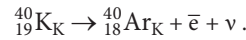
Dans les réactions de désintégration les plus fréquentes, l'un des produits de la réaction est une très petite particule.

Formation d'un électron

Un exemple est la désintégration de l'isotope du carbone $^{14}_6\text{C}$ que nous avons examiné dans la section précédente : voir l'équation (10.2).

Formation d'un antiélectron

Dans un autre type de réaction fréquent, l'un des produits de la réaction est un antiélectron. Le $^{40}_{19}\text{K}$ peut se désintégrer de cette manière :



Nous vérifions si cette réaction est effectivement autorisée :

	$p_{19}n_{21}$	$p_{18}n_{22} + \bar{e} + \nu$
charge électrique	19	18 + 1 + 0
charge baryonique	40	40 + 0 + 0
charge leptonique	0	0 + (-1) + 1
Énergie au repos en pJ	p	n
	150,3277	150,5349
	\bar{e}	0,0819
$-E_T$ en pJ	-54,72	-55,08
Somme en pJ	95,61	95,54

La somme du côté gauche est plus grande que celle du côté droit : par conséquent, la réaction est autorisée.

Formation d'un noyau ^4_2He

Un exemple de ce type de réaction est la désintégration de l'isotope du radium $^{226}_{88}\text{Ra}$ en un isotope du radon $^{222}_{86}\text{Rn}$ et un noyau de l'isotope de l'hélium ^4_2He :



	$p_{88}n_{138}$	$p_{86}n_{136} + p_2n_2$
charge électrique	88	86 + 2
charge baryonique	226	222 + 4
charge leptonique	0	0 + 0
Énergie au repos en pJ	0	0
$-E_T$ en pJ	-277,43	-273,68 - 4,5334
somme en pJ	-277,43	-278,21

Dans la plupart des réactions nucléaires qui nous occupent, seules de très petites quantités réagissent. Le taux de conversion est minuscule comparé à celui d'une réaction chimique typique. Habituellement, les produits de la réaction sont en si petite quantité qu'ils ne peuvent même pas être détectés avec les balances les plus sensibles. On pourrait penser que la preuve qu'une réaction nucléaire a eu lieu est très difficile. Cependant, le processus d'une réaction nucléaire est clairement perceptible. Si l'une des particules émergentes est une particule légère, elle s'empare de la plus grande partie de l'énergie ΔE qui reste de la réaction.

Rayonnement nucléaire

tion. Elle s'éloigne à une vitesse très élevée et peut donc être détectée de nombreuses manières différentes.

Alors qu'il faut généralement au moins un milliard de molécules pour détecter la progression d'une réaction avec des méthodes chimiques, les réactions de désintégration nucléaire mentionnées peuvent déjà être détectées si un seul noyau se désintègre.

Alors qu'il faut un très grand nombre de particules pour détecter l'évolution d'une réaction par des méthodes chimiques, la désintégration d'un seul noyau peut souvent être détectée dans le cas d'une réaction nucléaire.

Le fait qu'il existe effectivement des réactions des noyaux a été découvert pour la première fois de la manière suivante. On a constaté que certaines substances émettent un « rayonnement » inconnu : des particules qui se déplacent très rapidement. On a également dit de ces substances qu'elles étaient *radioactives*. Comme les particules rapides se forment dans les réactions nucléaires, on les appelle *rayonnement nucléaire*. Aussi, on parle souvent de « rayonnement radioactif ». Le mot radioactif signifie actif par rayonnement (rayon = faisceau). Toutefois, ce qui est radioactif, c'est la substance en désintégration, et non le rayonnement.

Au départ, on n'avait découvert que trois types de rayonnements nucléaires différents par leur charge électrique. (La charge des particules était facile à déterminer.) Avant de savoir de quoi il s'agissait exactement, les trois types de rayonnement découverts ont été nommés : les particules qui ont été identifiées plus tard comme des noyaux d'hélium ont été appelées rayonnement α , les électrons rapides ont été appelés rayonnement β . En outre, des photons de haute énergie étaient libérés lors de nombreuses réactions, c'est-à-dire toujours dans les cas où le produit de la réaction se trouve dans un état excité. Ces photons ont été appelés rayonnement γ . Les noms de rayonnement α , β et γ ont été maintenus jusqu'à présent bien que nous savons qu'il ne s'agit que de produits de réaction normaux et qu'il existe également de nombreux autres produits de réaction qui n'ont pas reçu de nom supplémentaire.

Nous avons dit que dans la plupart des désintégrations de nucléides instables, l'un des produits de réaction est un électron, un antiélectron ou un noyau d'hélium. Ce comportement est illustré sur la Fig. 10.6. La figure montre une version simplifiée de la carte des nucléides de la Fig. 10.2.

Exercices

- Laquelle des trois particules e , \bar{e} et ${}^4_2\text{He}_K$ est formée pendant la désintégration de
a) ${}^{61}_{29}\text{Cu}$ b) ${}^{66}_{29}\text{Cu}$, c) ${}^{228}_{90}\text{Th}$.
- Démontrez que le bilan des trois charges est correct pour la réaction
 ${}^{55}_{26}\text{Fe} \rightarrow {}^{55}_{25}\text{Mn} + \nu$.
Veuillez garder à l'esprit que ce ne sont pas les symboles des noyaux mais ceux des atomes entiers, y compris l'enveloppe, qui sont écrits ici. La réaction se produit réellement. Décrivez avec des mots ce qui se passe dans le processus. Établissez le bilan énergétique.
- (a) Nous étudions la réaction de désintégration d'un nucléide A instable, au cours de laquelle un nucléide B et un électron sont formés $A_K \rightarrow B_K + e + \bar{\nu}$. Où se trouve le nucléide dans la carte des nucléides ? Où se trouve A par rapport à B ?
(b) Où sont les nucléides C et D présents dans la réaction de désintégration suivante ?
 $C_K \rightarrow D_K + \bar{e} + \nu$?
(c) Où sont les nucléides E et F présents dans la réaction de désintégration suivante ?
 $E_K \rightarrow F_K + p_2n_2$

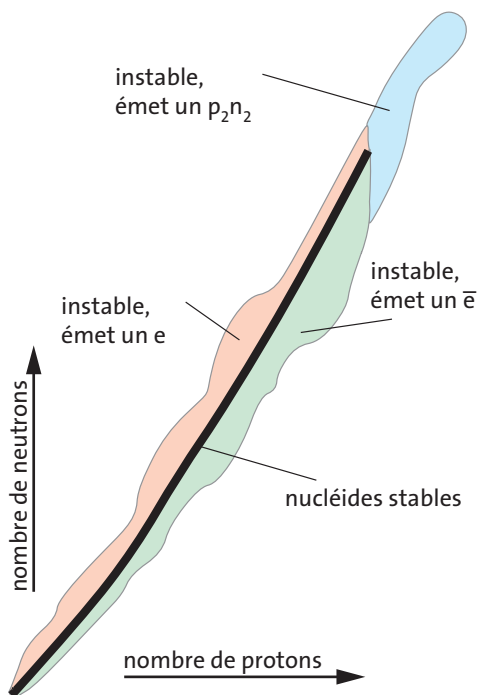


Fig. 10.6 Carte des nucléides fortement simplifiée.

10.10 Le taux de conversion des réactions nucléaires

Si nous remarquons si peu les réactions nucléaires dans la vie quotidienne, c'est parce qu'elles se produisent généralement très lentement. Le taux de conversion de la réaction

$$\text{taux de conversion} = \frac{\text{nombre de conversions}}{\text{intervalle de temps}}$$

ou en utilisant des symboles

$$I_n = \frac{n}{t}$$

nous indique la vitesse à laquelle une réaction se produit.

Le nombre de conversion n est une mesure de la quantité des substances qui réagissent. Dans les réactions chimiques, il est mesuré avec l'unité mole (symbole: mol), de sorte que le taux de conversion est exprimé dans l'unité mol/s.

Les taux de conversion des réactions nucléaires sont si faibles que même les préfixes *nano*, *pico* ou *femto* ne sont pas pratiques. Par conséquent, la conversion n'est plus mesurée en mole mais par le nombre de réactions élémentaires: le nombre de noyaux qui se sont désintégrés ou qui ont été formés.

Comme on le sait, une mole correspond à $6 \cdot 10^{23}$ particules ou encore « quantités élémentaires » :

$$1 \text{ mol} = 6 \cdot 10^{23} \text{ quantités élémentaires.}$$

Le taux de conversion se mesure donc par le nombre de quantités élémentaires par seconde, soit

$$1 \frac{\text{mol}}{\text{s}} = 6 \cdot 10^{23} \frac{\text{quantités élémentaires}}{\text{s}}.$$

L'unité « quantité élémentaire par seconde » a reçu son propre nom: le *Becquerel*, de symbole Bq. D'où :

$$1 \frac{\text{mol}}{\text{s}} = 6 \cdot 10^{23} \text{ Bq.}$$

Exemple

Nous avons appris précédemment qu'une très petite partie de l'hydrogène de l'eau courante est le tritium, un isotope de l'hydrogène. Ce tritium se désintègre selon l'équation nucléaire suivante :



Le taux de conversion dans un mètre cube d'eau ordi-

naire s'élève à environ

$$I_n = 750 \text{ Bq.}$$

En comparaison, nous examinons une réaction chimique considérée comme lente: la corrosion d'une voiture.

Nous partons de l'hypothèse réaliste qu'une mole de rouille se forme en un an. D'où,

$$\begin{aligned} I_n &= \frac{1 \text{ mol}}{1 \text{ an}} = \frac{1 \text{ mol}}{32 \cdot 10^6 \text{ s}} \\ &= \frac{1}{32 \cdot 10^6} 6 \cdot 10^{23} \text{ Bq} = 1,9 \cdot 10^{16} \text{ Bq.} \end{aligned}$$

Cette comparaison montre une différence typique entre les réactions chimiques et nucléaires: la plupart des réactions nucléaires auxquelles nous avons affaire ont des taux de conversion beaucoup plus faibles que les réactions chimiques typiques. Par conséquent, la quantité d'éléments chimiques sur Terre ne change que dans une mesure très limitée du fait des réactions nucléaires.

Les taux de conversion des réactions nucléaires typiques sont beaucoup plus faibles que ceux des réactions chimiques typiques.

On cherche souvent à accélérer une réaction chimique, c'est-à-dire à augmenter le taux de conversion. Deux méthodes différentes permettent d'y parvenir :

- l'augmentation de la température,
- l'ajout d'un catalyseur (une substance dont la quantité ne change pas au cours de la réaction).

Les mêmes méthodes peuvent être appliquées aux réactions nucléaires. Le taux de conversion peut être augmenté par l'augmentation de la température ou par l'ajout d'un catalyseur.

Cependant, des températures de plusieurs millions de kelvins sont nécessaires pour augmenter le taux de conversion de façon notable par une augmentation de la température. De telles conditions existent dans le soleil et dans d'autres étoiles. En effet, la production d'énergie dans le soleil et dans les étoiles est assurée par des réactions nucléaires. Un autre exemple d'augmentation du taux de conversion par des températures élevées est le réacteur à fusion, c'est-à-dire un système en cours de développement qui devrait être utilisé un jour pour la production d'énergie électrique.

L'accélération catalytique d'une réaction nucléaire se produit dans les réacteurs nucléaires. Les neutrons y jouent le rôle de catalyseur.

La demi-vie

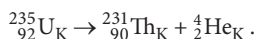
Nous examinerons plus tard de plus près ces processus : les réactions nucléaires dans les réacteurs nucléaires et dans le soleil.

Les réactions nucléaires peuvent être accélérées de la même manière que les réactions chimiques

- en augmentant la température ;
- en utilisant un catalyseur.

Exercice

1. L'uranium naturel contient 99,28% de l'isotope $^{238}_{92}\text{U}$ et 0,72% de l'isotope $^{235}_{92}\text{U}$. Combien de moles de l'isotope $^{235}_{92}\text{U}$ sont contenues dans un kg d'uranium naturel ? L'isotope $^{235}_{92}\text{U}$ est utilisé dans les réacteurs nucléaires pour produire de l'énergie. Tant qu'il n'est pas dans le réacteur, il se désintègre de lui-même selon l'équation de la réaction :



Le taux de conversion pour 1 kg de mélange d'isotopes d'uranium naturel pour cette réaction est le suivant

$$I_n = 5,76 \cdot 10^5 \text{ Bq}.$$

Convertissez le taux de conversion en mol/s. Combien de temps faut-il pour la désintégration de 1% de l'isotope $^{235}_{92}\text{U}_K$?

10.11 La demi-vie

L'isotope du phosphore $^{30}_{15}\text{P}_K$ est instable. Il se désintègre selon



Nous observons un noyau individuel de cet isotope du phosphore. Il peut se désintégrer, et il se désintégrera, mais quand ? La réponse à cette question est la même que celle à une question que nous avons déjà formulée et à laquelle nous avons déjà répondu. Le moment où la réaction a lieu est indéterminé. Mais cela ne signifie pas que l'on ne peut rien dire sur ce moment. La *probabilité* qu'un noyau se désintègre dans un intervalle de temps donné a une valeur bien définie. Dans le cas de notre réaction, la probabilité que le noyau se désintègre en 2,5 minutes est de 50%. C'est comme si le noyau tirait à pile ou face toutes les 2,5 minutes. Selon qu'il a tiré pile ou face, il se désintégrera ou non dans les 2,5 minutes suivantes.

Si le noyau a plusieurs possibilités de désintégration – ce qui est le cas pour de nombreux noyaux – le résultat du « lancer de dés » déterminera également de quelle façon le noyau se désintégrera.

Nous allons maintenant nous intéresser à un très grand nombre de noyaux $^{30}_{15}\text{P}_K$, par exemple un million. Nous savons alors qu'après 2,5 minutes, il n'en restera que la moitié et que l'autre moitié se sera désintégrée. Par conséquent, il ne restera qu'environ 500 000 noyaux de phosphore après 2,5 minutes. Après 2,5 minutes supplémentaires, il restera environ 250 000 noyaux : 2,5 minutes plus tard, ce nombre sera de 125 000, et ainsi de suite, Fig. 10.7.

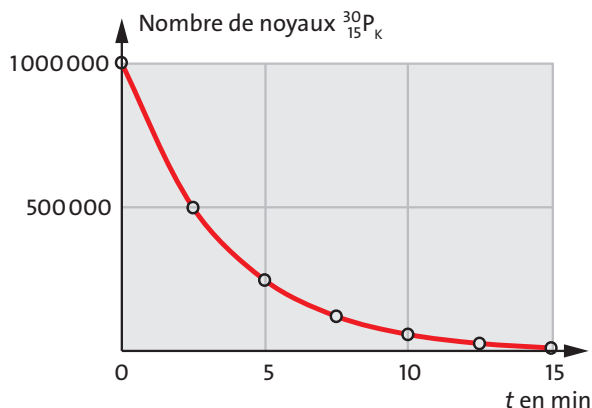


Fig. 10.7 Le nombre de noyaux $^{30}_{15}\text{P}_K$ diminue de moitié à chaque intervalle de 2,5 minutes.

L'intervalle de temps au bout duquel la substance réactive s'est désintégrée jusqu'à la moitié de sa valeur initiale est appelé *demi-vie* $T_{1/2}$. La diminution du nombre N de noyaux en désintégration au cours du temps est décrite par une fonction exponentielle. Nous désignons le nombre au temps $t = 0$ par N_0 . Alors,

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}.$$

Dans notre exemple, nous avons :

$$N_0 = 1\,000\,000 \\ T_{1/2} = 2,5 \text{ min}.$$

Donc, le nombre de noyaux de phosphore en fonction du temps est de

$$N(t) = 1\,000\,000 \cdot 2^{-\frac{t}{2,5 \text{ min}}}.$$

Si nous insérons par exemple 10 min pour t , nous obtiendrons

$$N(t) = 1\,000\,000 \cdot 2^{-\frac{10 \text{ min}}{2,5 \text{ min}}} \\ = 1\,000\,000 \cdot 2^{-4} = 62\,500.$$

La demi-vie est l'intervalle de temps pendant lequel la moitié de la quantité d'une substance s'est désintégrée.

Exercices

1. Un nucléide instable a une demi-vie de 5 minutes. Combien de noyaux parmi les 400 000 existants à l'origine resteront après 20 minutes ?
2. La quantité d'un nucléide dont la demi-vie est de 2 ans s'est désintégrée d'une quantité initiale de $8 \cdot 10^8$ à $1 \cdot 10^8$. Combien d'années se sont écoulées ?
3. La quantité d'un nucléide a diminué à 1/16 de la quantité initiale en 4 mois. Quelle est sa demi-vie ?
4. Un nucléide A se désintègre en un nucléide B (plus deux particules rapides) avec une demi-vie de 2 jours, puis en un nucléide C avec une demi-vie de 120 ans. Au temps t_0 , il y a du A pur. Quelle est la composition en proportion du mélange des noyaux A, B et C aux temps suivants $t_0 = 0$ an, $t_1 = 2$ ans, $t_2 = 1\ 000\ 000$ ans ?
5. Comme vous le savez, la quantité d'une substance dont les noyaux sont instables diminue de moitié au cours de la demi-vie. De quel facteur le taux de conversion est-il réduit dans cet intervalle de temps ?

10.12 Réactions nucléaires dans le soleil

Le soleil « fonctionne » grâce à des réactions nucléaires. Par « fonctionnement », nous entendons : l'énergie qui accompagne la lumière du soleil est fournie par des réactions nucléaires.

Le soleil est une étoile. Il existe d'innombrables autres étoiles dans l'univers qui ont la même structure que le soleil et dans lesquelles les mêmes processus se déroulent. Si le soleil nous paraît plus grand que les autres étoiles, c'est uniquement parce que nous sommes beaucoup plus proches de lui.

Pour avoir une idée de la taille, de la masse, de la température et de la composition du soleil, nous allons le comparer à la Terre. Les données les plus importantes sont résumées dans le Tab. 10.4. La distribution de la masse volumique du soleil est particulièrement intéressante.

La Fig. 10.8 montre que la masse volumique dans la zone externe (au-delà de la moitié du rayon) du soleil est très faible. 90 % de la masse du soleil est située dans la zone centrale (moins de la moitié du rayon). Par conséquent, on peut presque dire qu'en réalité, le soleil est deux fois moins grand qu'il n'y paraît.

Considérez également de quoi se compose le soleil : presque entièrement d'hydrogène et d'hélium.

	Terre	soleil
masse	$6 \cdot 10^{24}$ kg	$2,0 \cdot 10^{30}$ kg
rayon	6 000 km	700 000 km
masse volumique intérieur / extérieur	17 g/cm ³ 3 g/cm ³	100 g/cm ³ 0,0001 g/cm ³
température intérieur / extérieur	6000 K 300 K	15 000 000 K 6000 K
composition (Les valeurs en pourcentage se rapportent à la masse).	35 % Fe 30 % O 15 % Si 13 % Mg 7 % autres	75 % H 23 % He 2 % autres

Tab. 10.4

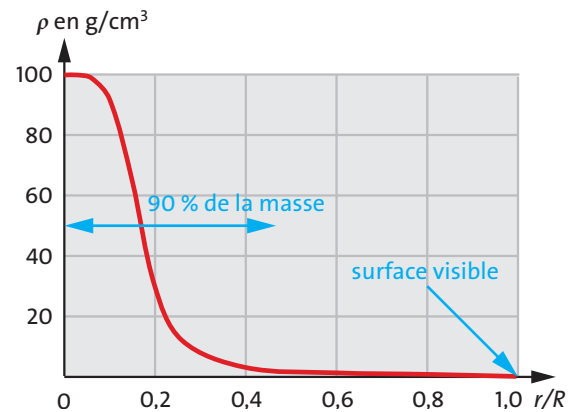


Fig. 10.8 La masse volumique du soleil en fonction de la distance r au centre. La distance r est mesurée en unités du rayon solaire R . Nous pouvons constater que la plus grande partie de la masse du soleil est située à un rayon inférieur à la moitié de R , c'est-à-dire à l'intérieur de $r/R = 0,5$.

La structure du soleil n'est pas très compliquée. Il s'agit simplement d'une grosse boule de gaz. C'est d'ailleurs surprenant car sa densité interne est supérieure à celle de toute la matière solide sur Terre. Mais avec des températures aussi élevées que celles qui existent dans le soleil, toute la matière se comporte comme un gaz.

Le soleil se compose presque exclusivement d'hydrogène et d'hélium.

Le soleil émet de la lumière et donc de l'énergie. Le courant d'énergie qui quitte le soleil de cette manière est très important. Il s'élève à

$$P = 4 \cdot 10^{26} \text{ W.}$$

Seule une partie de deux milliardièmes de cette énergie atteint la Terre. Il s'agit de

Réactions nucléaires dans le soleil

$$P = 2 \cdot 10^{17} \text{ W.}$$

D'où vient exactement cette énergie ? Une réaction nucléaire a lieu à l'intérieur du soleil. L'hydrogène se transforme en hélium selon l'équation de la réaction



On vérifie le bilan de la réaction :

	4 p	$p_2 n_2 + 2 \bar{e} + 2 \nu$
charge électrique	4 · 1	2 + 2 · 1 + 0
charge baryonique	4 · 1	4 + 0 + 0
charge leptonique	0	0 + 2 · (-1) + 2 · 1
Énergie au repos in pJ	2 p 2 · 150,3277	2 n 2 · 150,5349 2 \bar{e} 2 · 0,0819
$-E_T$ en pJ	0	-4,5334
somme en pJ	300,655	296,7

Il reste donc une quantité d'énergie de $\Delta E = 3,956 \text{ pJ}$. Avec cette énergie, de l'entropie est produite au cours de la réaction.

Dans des conditions normales, c'est-à-dire des conditions que nous, les humains vivant sur Terre, considérons comme normales, la réaction de synthèse de l'hélium ne se produit pas, car la résistance de la réaction est beaucoup trop élevée. La réaction n'est possible dans le soleil que parce que la température y est très élevée. En fait, la réaction a lieu exclusivement à l'intérieur du soleil où il y a une température d'environ 15 millions de kelvins. Pour nous, habitants de la Terre, il s'agit d'une température extrême. Pour les réactions nucléaires, cependant, elle n'est pas très élevée. Cela est démontré par le fait que la réaction que nous venons d'examiner se déroule assez lentement, même à 15 000 000 K. La conversion de la réaction d'un litre de matière solaire provenant de l'intérieur du soleil, c'est-à-dire de l'endroit où la température est la plus élevée, ne s'élève qu'à environ

$$I_n = 2,5 \cdot 10^9 \text{ Bq} \\ = 2,5 \cdot 10^9 \text{ conversions élémentaires par seconde.}$$

Comparons encore une fois avec la voiture rouillée pour laquelle nous avons calculé environ $2 \cdot 10^{16} \text{ Bq}$. Il est rassurant de savoir ce qui suit : une voiture sera complètement rouillée après plusieurs décennies. Le soleil, en revanche, a déjà « fonctionné » pendant environ 5 milliards d'années et il a encore assez de « carburant », c'est-à-dire d'hydrogène, pour briller pendant une autre période équivalente.

En raison du faible taux de conversion, la quantité d'énergie fournie par un litre de soleil par seconde n'est pas non plus très élevée. Nous obtenons le courant d'énergie en multipliant le taux de conversion I_n (dans l'unité de mesure Becquerel) par l'énergie qui est libérée par conversion élémentaire, c'est-à-dire par 3,955 pJ :

$$P = 2,5 \cdot 10^9 \cdot 3,955 \text{ pJ/s} = 2,5 \cdot 10^9 \cdot 3,955 \cdot 10^{-12} \text{ J/s} \\ = 0,01 \text{ W.}$$

Par conséquent, le courant d'énergie qui sort de chaque litre de soleil grâce à la réaction nucléaire s'élève à 0,01 W.

Nous le comparons à d'autres fournisseurs d'énergie que nous connaissons : une flamme terrestre commune d'un volume de 1 litre produit environ 1000 W, soit 100 000 fois plus que 1 litre de soleil.

Le fait que le soleil émette autant d'énergie au total est dû au grand volume du soleil en tant que « réacteur ».

Dans le soleil, des noyaux d'hélium sont produits à partir de noyaux d'hydrogène dans une réaction nucléaire. Malgré la température élevée, le taux de conversion est très faible. L'énergie qui reste de la réaction est transportée vers l'extérieur, hors de la zone de réaction, avec l'entropie.

Nous savons maintenant en quoi consiste la source d'énergie du soleil. Cependant, cela ne suffit pas à expliquer le principe de fonctionnement global du soleil. Nous devons répondre à deux autres questions pour le comprendre :

- Comment est-il possible que les températures à l'intérieur du soleil soient si élevées alors que la réaction se produit à une vitesse très lente ?
- La réaction nucléaire dans le soleil est la même que celle qui a lieu dans une bombe à hydrogène. Mais pourquoi le soleil n'explose-t-il pas comme une énorme bombe à hydrogène ?

Exercices

1. Quelle quantité d'énergie est libérée dans le soleil lors de la formation d'une mole d'hélium ? Comparez avec l'énergie qui est libérée lors d'un processus normal de combustion d'une mole d'hydrogène (par exemple, la réaction avec l'oxygène).
2. Tous les êtres humains produisent de la chaleur : ils libèrent de l'énergie et de l'entropie. Estimez la quantité d'énergie libérée par « 1 litre d'être humain ». Comparez avec l'énergie libérée par 1 litre de soleil.

10.13 Pourquoi il fait si chaud à l'intérieur du soleil

Le fait que des températures très élevées puissent être atteintes malgré un taux de conversion très faible est également rencontré dans certains phénomènes sur Terre, par exemple dans une meule de foin. Nous imaginons que le foin vient d'être mis en tas. Une réaction très lente a lieu dans le foin frais, au cours de laquelle de l'entropie est produite – mais très peu. La meule de foin se réchauffe très lentement au cours de ce processus. Comme l'intérieur de la meule de foin est très bien isolé thermiquement de l'environnement, la température devient lentement de plus en plus élevée. En raison de la température intérieure plus élevée, l'entropie se déplace de l'intérieur vers l'extérieur. Cependant, la température n'augmente que jusqu'à ce que l'entropie qui s'échappe soit égale à celle qui est générée : un équilibre de flux s'établit. La température à l'intérieur de la botte de foin est d'autant plus élevée que la distance est grande, d'où la résistance thermique que l'entropie doit surmonter sur son chemin de l'intérieur

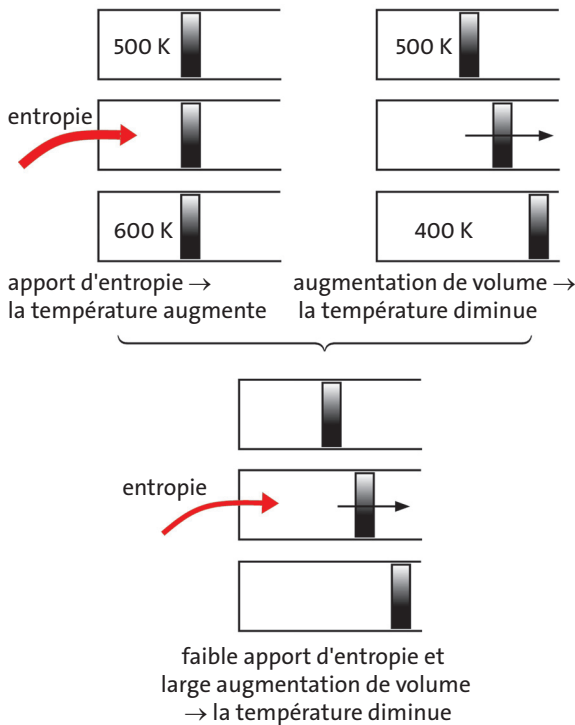


Fig. 10.9 (a) Le piston est fixe. L'apport d'entropie provoque une augmentation de température. (b) L'augmentation du volume provoque une diminution de la température. (c) La température va diminuer en cas de faible apport d'entropie et de forte augmentation du volume.

vers l'extérieur. Dans une grande botte de foin, la température peut devenir si élevée que le foin commence à brûler. Il faut donc surveiller la température à l'intérieur d'une grande botte de foin.

C'est précisément cet « effet botte de foin » qui est à l'origine de la température élevée à l'intérieur du soleil et nous pouvons comprendre pourquoi les températures à l'intérieur du soleil atteignent de tels niveaux. Comme le soleil est très grand, le chemin entre la zone de réaction à l'intérieur et la surface est très long : plusieurs centaines de milliers de kilomètres. Une différence de température de plusieurs millions de kelvins doit s'établir pour que l'entropie puisse franchir cette distance.

Le soleil doit être beaucoup plus chaud à l'intérieur qu'à l'extérieur pour qu'un équilibre de flux puisse être maintenu pour l'entropie.

Exercice

1. Estimez le gradient de température dans le soleil de l'intérieur vers l'extérieur. Estimez le gradient de température de la Terre. Comparez avec le gradient de température dans le mur d'une maison.

10.14 La réaction particulière du soleil sur un apport d'entropie

Si un corps est alimenté en entropie, il se réchauffe, c'est-à-dire que sa température augmente. C'est du moins le comportement normal. Nous savons également qu'il existe des cas où la température ne change pas pendant l'apport d'entropie : par exemple, lorsque l'eau bout. Lorsque l'eau a atteint $100\text{ }^\circ\text{C}$ et qu'elle reste sur la plaque chauffante, c'est-à-dire que l'apport d'entropie se poursuit, la température n'augmente plus, mais l'eau se vaporise.

Imaginons maintenant que nous puissions librement fournir de l'entropie au soleil ou en extraire. Nous observerions un comportement particulier. Si nous fournissons de l'entropie au soleil, il ne deviendrait pas plus chaud mais plus froid, c'est-à-dire que sa température diminuerait. Si nous lui retirions de l'entropie, il ne deviendrait pas plus froid mais plus chaud : la température augmenterait.

Cela semble paradoxal, mais ce n'est pas le cas. Pour le comprendre, nous allons faire quelques expériences imaginaires avec un gaz, par exemple de l'air, dans un cylindre avec un piston mobile (Fig. 10.9).

Pourquoi le soleil n'explose pas

Dans un premier temps, nous apportons de l'entropie au gaz tout en maintenant le piston dans une position fixe. Nous observons que la température du gaz augmente – très plausible, non ?

Dans une deuxième expérience, nous déplaçons le piston de sorte que le volume du gaz augmente. Espérons que vous vous souvenez de ce qui se passe alors : la température du gaz diminue. (L'effet est le même que si l'air s'écoule hors d'un pneu de voiture. Sa température diminue également).

Enfin, une troisième expérience : nous apportons de l'entropie au gaz et augmentons simultanément son volume. L'apport d'entropie seul entraînerait une augmentation de la température, l'augmentation du volume seule entraînerait une diminution de la température. Selon l'importance respective de l'apport d'entropie et de l'augmentation du volume, l'un ou l'autre effet sera dominant. Si l'apport d'entropie est faible et l'augmentation de volume élevée, la température diminuera, ce qui nous amène à ce que nous recherchons : une réduction de la température malgré l'apport d'entropie.

Vous voyez l'astuce : la température ne dépend pas seulement de l'entropie mais aussi du volume. Par conséquent, nous pouvons obtenir une diminution de la température malgré une augmentation de l'entropie.

C'est comme dans l'exemple suivant : comment peut-on réduire la taille d'un terrain rectangulaire en augmentant sa longueur ? En réduisant la largeur dans une plus grande mesure que la longueur, Fig. 10.10.

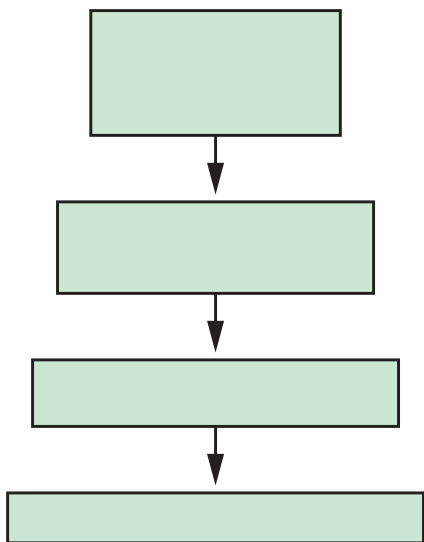


Fig. 10.10 Bien que la longueur du rectangle augmente, sa surface est réduite.

On pourrait dire qu'il s'agit là d'un tour de passe-passe. Peut-être, mais c'est l'astuce qui est utilisée dans le soleil. En cas d'apport d'entropie, le soleil augmente simultanément son volume de manière suffisamment forte pour obtenir une baisse de température. Le fait que son volume soit augmenté de manière aussi significative est dû à la loi de la gravité. Plus la taille d'un corps céleste augmente fortement, plus il est facile d'augmenter encore sa taille. La matière s'éloigne du centre et est donc de moins en moins attirée vers le centre.

Si son entropie augmente, le soleil deviendra plus grand et plus froid : si son entropie diminue, il deviendra plus petit et plus chaud.

Exercice

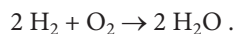
1. Décrivez un processus avec un cylindre muni d'un piston (à l'image de la Fig. 10.9) dans lequel la température du gaz augmente bien qu'il soit privé d'entropie.

10.15 Pourquoi le soleil n'explose pas

La réaction oxyhydrogène

Dans un premier temps, nous allons nous intéresser à une explosion qui n'a encore rien à voir avec le soleil.

L'oxyhydrogène est un mélange d'hydrogène et d'oxygène dans un rapport de 2 à 1. L'hydrogène peut réagir avec l'oxygène :



Le bilan énergétique de la réaction est positif, c'est-à-dire que de l'énergie est libérée. Si aucune mesure particulière n'est prise, cette énergie restante sera simplement utilisée pour produire de l'entropie, de sorte que la température augmentera.

À une température normale, la réaction se déroule extrêmement lentement. La résistance de la réaction est très élevée : la réaction est pratiquement inhibée. Cependant, elle deviendra plus rapide si la température est augmentée : plus la température est élevée, plus le taux de conversion est élevé.

Nous allons maintenant chauffer légèrement l'oxyhydrogène pour que la réaction puisse commencer. Le bilan énergétique de la réaction est positif, c'est-à-dire qu'il reste de l'énergie. L'entropie est générée par cette énergie restante. La température augmente dans

le processus et la réaction s'accélère. Encore plus d'énergie est libérée, ce qui crée encore plus d'entropie et la température augmente encore, et ainsi de suite.

Ce que nous avons décrit ici est une explosion.

Explosion : une réaction crée les conditions préalables à sa progression de plus en plus rapide.

Un argument qui soutient l'hypothèse que le soleil explose

Le soleil est composé en grande partie d'hydrogène. L'hydrogène peut être transformé en hélium par la réaction nucléaire suivante :



De l'énergie est libérée lorsque cette réaction a lieu. Lorsque nous conservons l'hydrogène dans les conditions terrestres, la réaction n'a pratiquement pas lieu, elle est inhibée. Elle se produirait si la température était suffisamment élevée. Dans ce cas également, nous pouvons maintenant imaginer qu'il suffirait d'« allumer » la réaction pour qu'elle démarre. Il suffirait de porter l'hydrogène à une température suffisamment élevée. Il réagirait et de l'entropie serait produite dans le processus : la température augmenterait encore et toute la quantité d'hydrogène réagirait très rapidement et de manière explosive.

Le processus décrit ici existe réellement. Mais il n'est pas équivalent au processus survenant dans le soleil mais à celui survenant dans une bombe à hydrogène.

Et pourtant le soleil n'explose pas

Nous savons que le soleil n'a pas explosé jusqu'à présent et qu'il n'explosera certainement pas dans un avenir proche. Cela signifie qu'il doit y avoir une erreur dans notre approche. Nous l'illustrons à nouveau, côté gauche de la Fig. 10.11.

La température augmente : par conséquent, le taux de conversion $I_n(R)$ augmente : par conséquent, davantage d'entropie est produite, ce qui augmente encore la température, etc. On peut dire qu'il y a ici une *réaction positive*.

Cependant, appliquer cette conclusion au soleil est une erreur. Rappelez-vous le message de la section précédente : si l'entropie du soleil augmente, la température sera réduite. La conclusion corrigée en conséquence est illustrée à droite sur la Fig. 10.11. L'augmentation initiale de la température conduit à un processus qui entraîne une réduction de la tempéra-

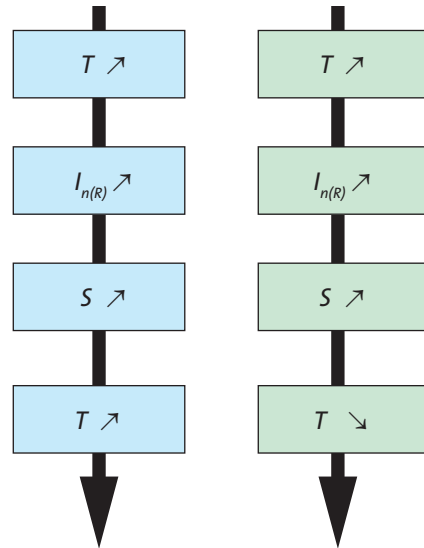


Fig. 10.11 A gauche : réaction positive ; une augmentation de température entraîne une autre augmentation de température. A droite : réaction négative ; une augmentation de température s'inverse d'elle-même.

ture. Si la température a diminué en raison d'une perturbation au départ, le processus la fera augmenter à nouveau. On peut dire qu'une *réaction négative* a lieu au cours d'un tel processus. Ainsi, une réaction positive mène à une explosion, une réaction négative à la stabilisation d'un état.

Dans notre cas, la température du soleil est stabilisée et, par conséquent, le taux de conversion et la production d'entropie également.

Puisque la température du soleil diminue lorsque l'entropie augmente, la réaction nucléaire est stabilisée.

Exercice

1. Nommez et décrivez d'autres processus avec une réaction positive et avec une réaction négative.

10.16 Le réacteur nucléaire

La centrale nucléaire

La Fig. 10.12 montre la structure d'une centrale nucléaire.

Le fonctionnement d'une centrale nucléaire est très similaire à celui d'une centrale au charbon. Dans les

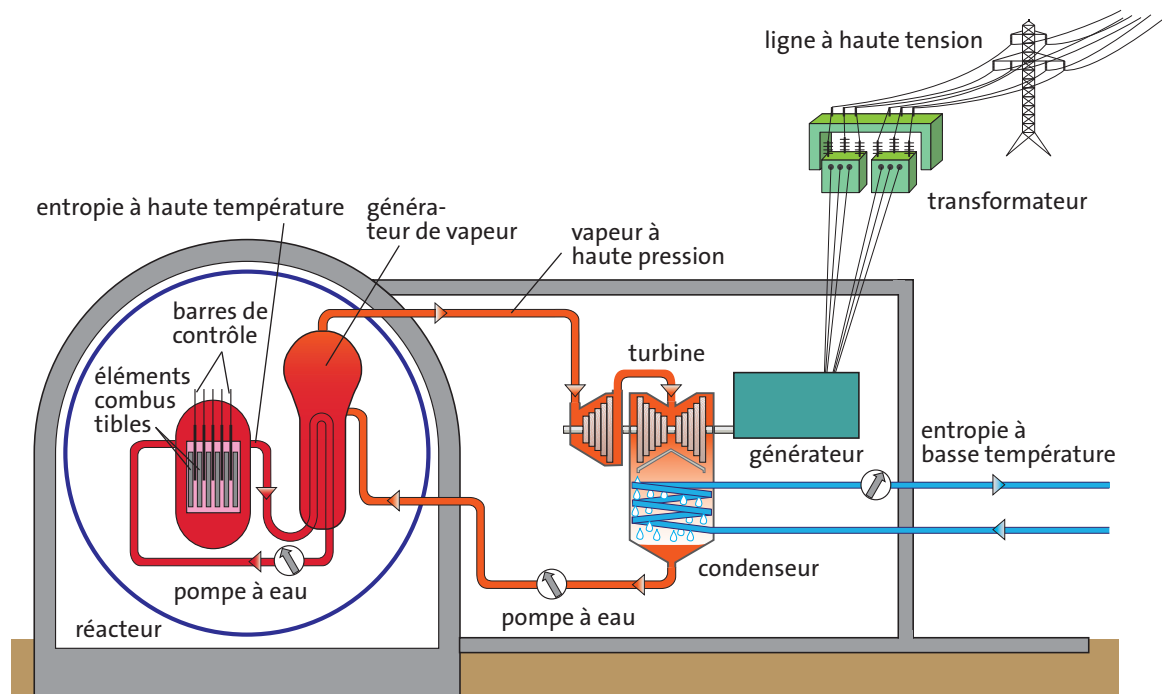


Fig. 10.12 Schéma d'une centrale nucléaire.

deux types de centrales, de la vapeur est produite, qui a une haute pression et une haute température. Il faut donc de l'entropie à haute température. Cette entropie est générée dans la chaudière par la combustion du charbon dans le cas d'une centrale au charbon. Dans les centrales nucléaires, la création d'entropie a lieu dans le réacteur nucléaire. L'énergie nécessaire est fournie par une réaction nucléaire.

L'entropie est transportée par convection du réacteur au *générateur de vapeur* avec l'eau du circuit primaire. (Le circuit primaire fonctionne comme un système de chauffage central: dans un système de chauffage central également, l'entropie est transportée par convection d'un endroit, c'est-à-dire la chaudière, à un autre, c'est-à-dire les radiateurs).

Dans le générateur de vapeur, de la vapeur d'eau à haute pression (environ 50 bars) et à haute température (environ 270°C) est créée à partir de l'eau liquide du circuit primaire. Une turbine à vapeur est entraînée par la vapeur. A la sortie des turbines, la vapeur n'a qu'une pression d'environ 70 millibars et une température de 40°C. Dans le *condenseur*, la vapeur détendue cède son entropie à l'eau du circuit de refroidissement. L'eau de refroidissement apporte ensuite l'entropie par convection à un endroit quelconque de l'environnement: par un autre échangeur de chaleur dans une rivière ou dans l'air via une tour de refroidissement.

Les réactions nucléaires

Parlons maintenant des réactions nucléaires qui ont lieu dans le réacteur nucléaire. Le nucléide responsable de la production d'énergie est l'isotope $^{235}_{92}\text{U}_K$ de l'uranium. L'uranium naturel n'en contient que 0,7 %.

Les 99,3 % restants sont constitués par l'isotope $^{238}_{92}\text{U}_K$. Pour être utilisé dans les réacteurs nucléaires, l'uranium est d'abord enrichi jusqu'à une teneur en $^{235}_{92}\text{U}_K$ de 3%.

Le $^{235}_{92}\text{U}_K$ est instable et peut se désintégrer en deux autres nucléides, par exemple comme ceci :



ou comme ceci :



ou comme ceci :



ou de bien d'autres façons encore. De l'énergie est libérée dans toutes ces réactions.

Vous voyez que deux neutrons sont formés en plus des deux plus gros nucléides. Nous verrons dans la suite que c'est important.

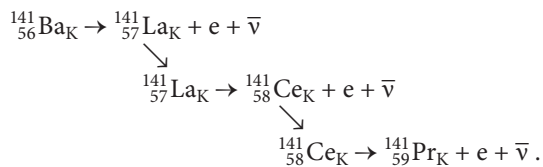
Toutes ces réactions de désintégration ont d'abord une résistance de réaction élevée. Leur rendement est si faible qu'elles ne sont pas du tout adaptées à la production d'énergie.

Cependant, la réaction peut être facilement accélérée à l'aide d'un catalyseur. Il est remarquable que les neutrons conviennent comme catalyseur, c'est-à-dire précisément la substance qui est elle-même formée au cours de la réaction. Les réactions dans lesquelles le catalyseur qui accélère la réaction est produit lui-même sont appelées *réactions autocatalytiques*. Pour souligner le rôle du catalyseur, on pourrait ajouter un neutron au côté gauche de l'équation de la réaction. Cela entraînerait, bien sûr, un neutron supplémentaire du côté droit également. Ainsi, nous obtenons par exemple :



L'uranium réagit avec *un* neutron, et *trois* neutrons sont formés dans ce processus.

Cette désintégration en deux fragments plus grands et quelques neutrons n'est cependant que la première étape de la réaction. En effet, non seulement les neutrons nouvellement formés réagissent encore, mais les fragments plus grands qui ont été formés sont également instables. Ils se désintègrent dans une série de réactions secondaires au cours desquelles, toutefois, seules de petites particules sont détachées du noyau respectif : des électrons ou des noyaux ${}^4_2\text{He}_K$. À titre d'exemple, nous observons le noyau ${}^{141}_{56}\text{Ba}_K$ qui se forme lors de la désintégration de l'uranium.



Un noyau instable de ${}^{141}_{57}\text{La}_K$ se forme d'abord à partir du noyau de ${}^{141}_{56}\text{Ba}_K$, puis un noyau de ${}^{141}_{58}\text{Ce}_K$ émerge,

Temps après l'arrêt	Production d'énergie (sur la base d'un fonctionnement normal de l'installation)
secondes	5 %
1 minute	4 %
10 minutes	3 %
1 heure	1 %
1 jour	0,7 %
2 jours	0,5 %

Tab. 10.5

lui aussi instable. Seul le noyau de ${}^{141}_{59}\text{Pr}_K$ formé lors de la dernière étape de la réaction est stable.

Toutes les réactions mentionnées contribuent à la production d'énergie du réacteur, mais dans des proportions très différentes. Environ 95 % de l'énergie totale libérée est formée par la désintégration de l'uranium catalysée par les neutrons et seulement 5 % par les réactions secondaires.

Malgré leur importance limitée pour le bilan énergétique du réacteur, les réactions secondaires jouent un rôle très important dans le fonctionnement du réacteur : elles sont la raison pour laquelle un réacteur nécessite des dispositifs de sécurité très coûteux.

Dans un réacteur nucléaire, les noyaux se désintègrent en deux noyaux ayant approximativement la même taille ainsi qu'en quelques neutrons. La réaction est catalysée par les neutrons (autocatalyse). Tous les nucléides émergents sont instables et continuent à se désintégrer.

Le système de contrôle du réacteur

Tout d'abord, rappelons comment est contrôlée la chaudière d'une centrale au charbon : de la même manière qu'un système de chauffage au fioul, un poêle à charbon ordinaire ou un feu ouvert. Pour accélérer la réaction, on introduit plus de combustible et plus d'oxygène : pour réduire le taux de conversion, on réduit l'apport de combustible ou d'air.

Comme une réaction autocatalytique a lieu dans le réacteur nucléaire, on peut procéder différemment : le réacteur est chargé une fois par an avec le « combustible », c'est-à-dire avec la quantité d'uranium nécessaire pour l'année entière.

Il s'agit toutefois d'un système à réaction positive : des neutrons sont créés pendant la réaction : les neutrons entraînent un taux de conversion plus élevé et davantage de neutrons sont créés, etc. Ce qui est décrit ici n'est pas un réacteur nucléaire mais une bombe atomique. Pour le transformer en réacteur, il faut contrôler la réaction en agissant sur la quantité de catalyseur, c'est-à-dire de neutrons.

La concentration de neutrons dans le réacteur peut être réduite en insérant des *barres de contrôle* dans la zone de réaction. Les barres de contrôle sont des barres faites d'un métal qui absorbe les neutrons, c'est-à-dire qui réagit particulièrement bien avec les neutrons.

Les dispositifs de sécurité

Lors de la décomposition catalytique de l'uranium, de nombreux nucléides différents se forment et tous sont

instables – ils continuent à réagir. Cependant, les réactions secondaires ne sont accélérées par aucun catalyseur. Chacune d'entre elles se déroule à une vitesse qui lui est propre : certaines sont rapides, d'autres sont lentes. Nous avons vu que dans ces réactions secondaires, une particule légère est toujours formée à côté d'un nucléide lourd : un électron ou un noyau ${}^4_2\text{He}_K$. Nous savons déjà que, dans ce cas, presque toute l'énergie qui est libérée au cours de la réaction est emportée par la particule légère. Cela signifie que les produits de désintégration de l'uranium sont radioactifs. En raison des taux de conversion élevés dans le réacteur, le rayonnement nucléaire émis par les produits de désintégration est très intense et dangereux.

C'est l'un des problèmes qui se posent lors de l'exploitation d'un réacteur. Les produits de désintégration de l'uranium ne doivent pas s'échapper dans l'environnement. Éviter cela est assez compliqué. Mais il y a encore un autre problème : la production d'énergie d'un réacteur ne peut pas être arrêtée rapidement. Bien qu'il soit possible d'arrêter rapidement la réaction de désintégration de l'uranium à l'aide des barres de contrôle, les réactions secondaires ne peuvent pas être influencées. Les réactions secondaires se poursuivent et ne s'atténuent que progressivement. Le Tab. 10.5 montre comment la production d'énergie se poursuit après l'arrêt de la fission de l'uranium.

Dans des conditions normales de fonctionnement, une grande centrale électrique produit environ 1000 MW. Si elle est arrêtée, elle produira encore 0,7 % de 1000 MW après un jour, soit 7 MW. Par conséquent, l'évacuation de l'énergie doit encore être assurée pendant plusieurs jours après l'arrêt. Sinon, le réacteur pourrait s'échauffer si fortement que le contenant du réacteur fondrait.

Les systèmes de sécurité des centrales nucléaires doivent être conçus de manière à ce que l'évacuation de la chaleur soit également assurée dans les situations d'urgence, afin que la fusion du contenant du réacteur devienne très improbable. Si cela devait malgré tout se produire, d'autres barrières de sécurité doivent garantir qu'aucune substance radioactive ne soit libérée dans l'environnement.

En raison des réactions secondaires des produits de désintégration de l'uranium, un réacteur nécessite des systèmes de sécurité sophistiqués, car

- les produits de désintégration de l'uranium sont radioactifs et ne doivent pas s'échapper dans l'environnement ;
- la production d'énergie au cours des réactions secondaires ne peut pas être interrompue.

Les déchets radioactifs

Lorsque le réacteur est chargé en uranium neuf une fois par an, les produits de réaction de l'année précédente doivent d'abord être retirés du réacteur. Ces produits de réaction sont un mélange de divers nucléides. Beaucoup de ces nucléides sont instables et ils ont alors des demi-vies variées.

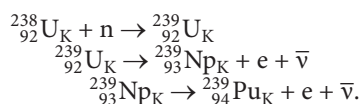
Bien entendu, il n'est pas possible d'attendre, avec le processus d'évacuation des produits de réaction, que tous les nucléides instables aient été transformés en nucléides stables, car certains nucléides ont des demi-vies de plusieurs années, d'autres de plusieurs décennies et certains même de plusieurs siècles et millénaires.

Par conséquent, les produits de la réaction qui sont retirés du réacteur une fois par an sont encore radioactifs et le resteront pendant assez longtemps. Ils doivent donc être stockés dans un endroit d'où ils ne peuvent pas entrer en contact avec le cycle biologique de la matière vivante.

Le plutonium

Les processus de désintégration de l'uranium et des produits secondaires sont les réactions les plus importantes et les plus fréquentes dans un réacteur nucléaire. Par ailleurs, d'autres réactions d'un type différent ont également lieu : les réactions de synthèse.

Le ${}^{238}_{92}\text{U}_K$ réagit avec les neutrons pour former des nucléides lourds. Parmi ceux-ci, le plutonium est particulièrement important. Le plutonium est un élément dont on ne trouve aucun isotope dans la nature. Dans le réacteur, le nucléide ${}^{239}_{94}\text{Pu}_K$ est créé à partir du ${}^{238}_{92}\text{U}_K$ dans les réactions suivantes :



Résumé : ${}^{238}_{92}\text{U}_K + n \rightarrow {}^{239}_{94}\text{Pu}_K + 2e + 2\bar{\nu}$.

Par conséquent, le plutonium est également contenu dans les déchets radioactifs. Le ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ est également radioactif. Au cours de sa désintégration, il libère des noyaux d'hélium avec une demi-vie de 24 000 ans.

Tout comme le ${}^{235}_{92}\text{U}_K$, la désintégration du ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ en deux parties ayant approximativement la même taille est catalysée par les neutrons.

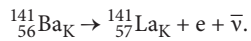
Le ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ pourrait donc être utilisé comme combustible de réacteur. Pour cela, il faudrait d'abord le séparer des autres déchets radioactifs. Mais cela pose un autre problème. Une bombe atomique pourrait être construite de manière relativement facile avec ce plutonium pur et séparé.

Exercices

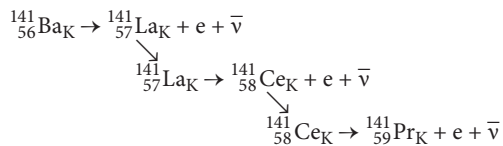
1. Comparez l'énergie produite par la réaction de désintégration de l'uranium



avec l'énergie produite par la réaction suivante :



2. On considère la réaction consécutive où d'abord ${}_{56}^{141}\text{Ba}_K$ se transforme en ${}_{57}^{141}\text{La}_K$, puis en ${}_{58}^{141}\text{Ce}_K$ et enfin en ${}_{59}^{141}\text{Pr}_K$:



Les valeurs de demi-vie des trois nucléides sont :

$$T_{1/2}({}_{56}^{141}\text{Ba}) = 18 \text{ minutes}$$

$$T_{1/2}({}_{57}^{141}\text{La}) = 4 \text{ heures}$$

$$T_{1/2}({}_{58}^{141}\text{Ce}) = 32 \text{ jours.}$$

Nous commencerons au temps t_0 avec une certaine quantité de ${}_{56}^{141}\text{Ba}$. Donnez une estimation approximative de la quantité présente de Ba, La, Ce et Pr (« beaucoup », « moyen », « peu », « très peu ») :

- après 30 secondes
- après 18 minutes
- après 5 jours
- après 1 an.

11 PHYSIQUE DES PARTICULES

11.1 Rayonnement – diffusion élastique et inélastique

Si un type quelconque de substance se déplace en ligne droite sans être perturbé, il formera un faisceau. Un jet d'eau ou un faisceau lumineux en sont des exemples. De nombreux autres types de faisceaux sont créés à des fins scientifiques et techniques : radar et rayons X, faisceaux d'électrons, de protons et d'atomes. On dit aussi que les électrons, les protons, etc. constituent un *rayonnement*.

Lorsqu'un rayonnement frappe un obstacle, il se produit généralement un changement : l'énergie et la quantité de mouvement des particules du rayonnement peuvent changer, le rayonnement peut disparaître et de nouvelles particules peuvent être créées. Dans tous les cas, on dit que le rayonnement a été *diffusé* (on dit aussi parfois *dispersé*, même si l'adjectif ne reprend pas la même racine que le nom « diffusion » du phénomène).

Les nombreux processus différents qui se produisent peuvent être grossièrement classés en deux catégories.

Diffusion élastique

Les particules du rayonnement restent ce qu'elles sont – les électrons restent des électrons, les photons restent des photons. Elles sont simplement déviées. Cela signifie que leur quantité de mouvement change. (La quantité de mouvement est un vecteur dont la direction change.) Leur énergie cinétique peut être redistribuée dans le processus.

Diffusion inélastique

Les particules du rayonnement disparaissent et de nouvelles particules, différentes, sont créées.

Si de la lumière blanche tombe sur une feuille de papier blanc, cette lumière sera diffusée en retour. Son énergie ne change pas au cours du processus, seule sa direction change. Il s'agit d'une diffusion élastique.

Si des rayons X tombent sur un « réseau cristallin », il se forme un motif d'interférence permettant de tirer des conclusions sur la structure du cristal. L'énergie des rayons X ne change pas au cours de ce processus, mais seulement leur direction et donc leur quantité de mouvement. Il se produit une diffusion élastique.

Si de la lumière UV tombe sur un matériau blanc et si ce dernier émet de la lumière visible, l'énergie de la lumière change. La diffusion est inélastique. (Dans ce contexte, on parle de *fluorescence*).

Si un proton d'un faisceau de protons entre en collision avec un faisceau qui va dans la direction opposée (par exemple dans le LHC à Genève), des centaines de nouvelles particules sont produites. La diffusion est inélastique.

11.2 Diffusion élastique – « voir » avec différents types de rayonnement

Pour pouvoir voir un objet, il faut qu'il émette de la lumière. Certains objets émettent de la lumière par eux-mêmes, d'autres émettent de la lumière lorsqu'ils sont éclairés. Pour l'instant, nous ne nous intéressons qu'au second cas. L'objet est donc éclairé et la lumière est partiellement absorbée et partiellement diffusée de manière élastique.

Les objets peuvent être vus, dans un sens figuré, en profitant non pas de la « lumière visible » mais de rayonnements d'autres longueurs d'onde que nous ne

percevons pas avec nos yeux. Nous devons alors utiliser un *détecteur* approprié, c'est-à-dire un système de détection ou un appareil de mesure adéquat.

Par exemple, nous pouvons « voir » un avion grâce aux ondes radar, c'est-à-dire des ondes électromagnétiques d'une longueur d'onde de 1 à 10 cm. Les rayons X, c'est-à-dire les ondes électromagnétiques d'une longueur d'onde de 10 à 1000 pm (1 picomètre = 10^{-12} m), peuvent être utilisés pour voir l'intérieur du corps humain.

De plus, le rayonnement ne doit pas nécessairement être un rayonnement électromagnétique. Cela fonctionne également avec n'importe quel autre rayonnement. Par exemple, on peut « voir » quelque chose avec des ondes sonores. L'échosondeur est utilisé pour examiner le fond de l'océan depuis un navire. Les ondes ultrasonores utilisées ont une longueur d'onde d'environ 10 cm. Les ultrasons peuvent également être utilisés pour voir l'intérieur du corps humain. Les ondes sonores ont alors une longueur d'onde d'environ 0,5 mm. Les chauves-souris s'orientent au moyen d'ondes ultrasonores. Comme pour le radar, elles « illuminent » le monde avec des ondes sonores d'une longueur d'onde de quelques millimètres et reçoivent le signal sonore qui est diffusé en retour par les objets, par exemple par des insectes.

Nous pourrions maintenant nous demander pourquoi un rayonnement est utilisé dans un cas et un autre rayonnement dans un autre cas. Il y a deux réponses à cette question :

1. Le rayonnement doit parcourir librement le chemin entre l'observateur et l'objet observé. Il ne doit pas être absorbé en cours de route. C'est pourquoi la lumière visible ne peut pas être utilisée pour voir l'intérieur du corps humain car la lumière ne pénètre pas dans le corps jusqu'aux organes que l'on souhaite voir. Elle est absorbée. Les rayons X ou les ultrasons, en revanche, peuvent être utilisés pour voir l'intérieur du corps.

Toutefois, cela n'est pas encore suffisant. Si le rayonnement n'est pas suffisamment absorbé ou diffusé par l'objet à observer, il n'est pas non plus utile car il traverserait l'objet sans être perturbé, sans nous fournir d'informations à son sujet. Les rayons X pénètrent dans le corps mais y sont partiellement absorbés. Ainsi, nous obtenons des informations sur la structure des parties absorbantes du corps, par exemple les os, grâce au rayonnement qui s'échappe. Les ondes radar traversent l'air sans être gênées mais sont diffusées sur les objets métalliques. C'est pourquoi les avions ou les nuages de pluie peuvent être « vus » à l'aide des ondes radar. Il en va de manière similaire pour les ondes ultrasonores.

Un objet peut être imagé au moyen d'un rayonnement. Le rayonnement ne doit pas être absorbé ou diffusé sur le chemin vers l'objet. Le rayonnement doit être absorbé ou diffusé par l'objet.

2. Un élément important en faveur ou à l'encontre du choix d'un rayonnement particulier dépend de la *résolution* que nous cherchons à obtenir : quelle est la taille minimale des détails que nous voulons distinguer ? Une résolution élevée signifie que nous pouvons détecter de petits détails de l'objet. La résolution d'un rayonnement peut être évaluée facilement. Il n'est possible de détecter que des structures qui ne sont pas plus petites que la longueur d'onde du rayonnement utilisé.

Par exemple, un radar de vol avec $\lambda = 10$ cm ne peut être utilisé que pour détecter des objets ou des structures sur un objet qui ne sont pas plus petits que 10 cm.

Les atomes ne peuvent pas être vus avec la lumière visible ($\lambda \approx 600$ nm) car leur diamètre est d'environ 0,1 nm, c'est-à-dire environ 10 000 fois plus petit que la longueur d'onde. Les rayons X, en revanche, peuvent être utilisés pour « voir » les atomes.

Seules les structures qui ne sont pas plus petites que la longueur d'onde du rayonnement utilisé peuvent être détectées.

En plus des ondes électromagnétiques et des ondes sonores, il existe des ondes de matière. Nous avons appris que les électrons peuvent former une onde sinusoïdale et que des interférences peuvent être produites avec de telles ondes. Quelle est leur longueur d'onde ? Ce que nous connaissons généralement du rayonnement, c'est l'énergie de ses particules. Nous aimerions calculer la longueur d'onde à partir de l'énergie des particules.

Rappelons-nous la relation entre la quantité de mouvement et la longueur d'onde :

$$p = \frac{h}{\lambda}.$$

Si les particules sont très rapides, c'est-à-dire si elles ont presque la vitesse limite c , leur énergie au repos E_0 ne représente qu'une petite partie de leur énergie globale E .

D'où,

$$E_0 \ll E.$$

Nous avons vu que la relation entre l'énergie et la quantité de mouvement est très simple dans ce cas :

La taille des particules

$$E = c \cdot p.$$

Cela nous permet de calculer la longueur d'onde :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h \cdot c}{E}.$$

Exemple : le SLAC (Centre d'Accélérateur Linéaire de Stanford)

L'accélérateur linéaire du SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) crée des électrons d'une énergie de 30 GeV (= $30 \cdot 10^9$ eV). Pour leur longueur d'onde, nous obtenons

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{h \cdot c}{E} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{30 \cdot 10^9 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}} \\ &= 4,1 \cdot 10^{-17} \text{ m}. \end{aligned}$$

C'est beaucoup moins que le diamètre d'un proton ($1,7 \cdot 10^{-15}$ m). En fait, on a découvert au SLAC que le proton a une structure interne. Il est constitué de parties plus petites, à savoir les *quarks*.

Exemple : le LHC (Grand Collisionneur de Hadrons)

Dans le LHC (Large Hadron Collider), des protons orbitent avec une énergie de 7000 GeV (7000 giga électrons volts).

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{h \cdot c}{E} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{7 \cdot 10^{12} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}} \\ &= 1,8 \cdot 10^{-19} \text{ m}. \end{aligned}$$

La longueur d'onde est donc 200 fois plus petite que celle des électrons au SLAC.

Vous voyez qu'une très haute résolution peut être atteinte avec des ondes de matière.

11.3 La taille des particules

Si nous voulions savoir à quoi ressemble un électron, nous pourrions essayer ceci : nous envoyons deux faisceaux d'électrons hautement énergétiques dans des directions opposées l'un vers l'autre et nous examinons comment un groupe d'électrons est diffusé par l'autre. Cela peut servir à calculer la taille des électrons. Cependant, nous avons vu précédemment qu'un électron, c'est-à-dire une portion d'électronium, peut prendre une diversité de formes. L'électron peut avoir une variété de tailles différentes. Pour pouvoir le rendre très petit, il faut le comprimer. Il

faut donc de l'énergie. Plus il est comprimé, c'est-à-dire plus on lui fournit d'énergie, plus il devient petit. Lorsque nous analysons un électron avec un rayonnement à haute énergie, il reçoit de l'énergie. Plus l'énergie du rayonnement est élevée, plus sa longueur d'onde est courte et plus la résolution est bonne, mais plus l'électron examiné est petit. La question n'est donc pas nécessairement « quelle est la taille de l'électron ? », mais « quelle taille minimale l'électron peut-il atteindre ? ».

Jusqu'à présent, on n'a pas été en mesure de découvrir une limite inférieure pour le diamètre de l'électron. Comme les électrons ont été examinés avec un rayonnement d'une longueur d'onde de 10^{-19} m, on ne peut que conclure que la taille minimale de l'électron doit être inférieure à cette valeur.

La situation est différente pour le proton. Les recherches ont montré que le proton a une taille de $1,7 \cdot 10^{-15}$ m. On a donc découvert une extension finie. Cela signifie que le proton a une structure interne, qui a également été découverte : il est constitué de trois particules plus petites, les quarks, pour lesquels cependant aucune taille minimale n'a encore été détectée.

On dit parfois que les électrons et les quarks sont ponctuels. Cette affirmation est un peu irréfléchie pour deux raisons :

- Si nous savons que la taille maximale d'une particule est de 10^{-19} m, cela ne signifie pas qu'il n'est pas possible de trouver un jour un diamètre et une structure plus petits que 10^{-19} m, par exemple 10^{-20} m ou 10^{-200} m ou encore 10^{-2000} m.
- Pour réduire la taille d'une particule à un point, une quantité infinie d'énergie serait nécessaire. Par conséquent, il est en principe impossible de détecter la forme ponctuelle d'une chose.

11.4 Diffusion inélastique – réactions de particules

Les particules à haute énergie ne sont pas seulement créées pour « résoudre » (c'est-à-dire voir) de petites structures, mais surtout pour créer de nouvelles particules. Comment cela peut-il se faire ? Toutes les particules qui sont disponibles en quantité suffisante sont chargées avec autant d'énergie que possible. Dans le cas du LHC, ces particules sont généralement des protons. On génère deux faisceaux de protons et on les fait se croiser selon un très petit angle, c'est-à-dire de façon qu'ils se heurtent presque frontalement. La plupart des protons traversent cette zone d'inter-

section en ligne droite. Seuls quelques-uns d'entre eux sont diffusés de manière inélastique l'un contre l'autre. On peut également dire qu'ils entrent en *collision* les uns avec les autres. Lorsque cela se produit, un grand nombre de nouvelles particules se forment. Parmi elles, il y en a beaucoup qui n'existent pas dans notre environnement naturel. Vous savez que la matière qui nous entoure n'est constituée que de trois particules différentes : les protons, les neutrons et les électrons.

Chaque fois qu'un nouvel accélérateur atteint une énergie plus élevée, de nouvelles particules ayant une masse au repos plus importante sont générées – plus d'une centaine de types différents jusqu'à présent.

Mais pourquoi ces particules créées artificiellement n'existent-elles pas dans la nature ? Parce qu'elles se désintègrent très rapidement. Cette désintégration est un processus statistique que nous connaissons déjà dans le domaine de la physique nucléaire. Pour une particule donnée, nous ne pouvons pas indiquer quand elle se désintègre. Cependant, si nous observons un grand nombre de particules similaires, nous pouvons indiquer un intervalle de temps après lequel il ne restera qu'un pourcentage bien défini d'entre elles. Lorsque nous choisissons 50 % pour ce pourcentage, le temps correspondant est appelé *demi-vie*. Il est courant d'observer le temps après lequel il n'en restera que 37 %. C'est ce qu'on appelle la *durée de vie* des particules.

En raison de la courte durée de vie des particules, la détection et la détermination de leurs caractéristiques à l'aide de détecteurs sont compliquées.

Nous aimerions maintenant essayer d'avoir une vue d'ensemble des différentes particules.

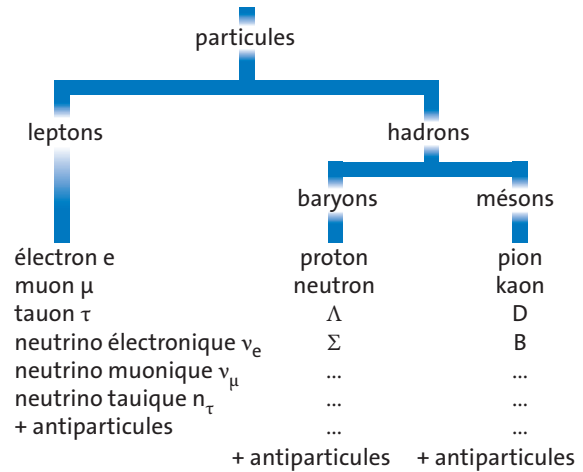


Fig. 11.1 Classification des particules. Les leptons n'ont (en l'état actuel des connaissances) aucune structure interne.

11.5 Les anciennes et les nouvelles particules

Classification

Toutes les particules peuvent être divisées en deux classes : les *leptons* et les *hadrons* (Fig. 11.1). Jusqu'à présent, aucune structure interne n'a pu être détectée pour les leptons. Les hadrons, en revanche, sont des particules composées. Ils sont constitués de ce qu'on appelle des quarks. Aucune structure interne non plus n'a été découverte pour les quarks.

Les hadrons, à leur tour, peuvent être classés en mésons et baryons. Les mésons sont constitués de deux quarks, les baryons de trois quarks.

paire lepton-antilepton		charge électrique		charge leptonique		énergie au repos (= masse au repos / c ²)	durée de vie en s
e (électron)	\bar{e}	-1	+1	+1	-1	0,511 MeV	∞
μ (muon)	$\bar{\mu}$	-1	+1	+1	-1	105,7 MeV	2,2 · 10 ⁻⁶ s
τ (tauon)	$\bar{\tau}$	-1	+1	+1	-1	1777 MeV	3 · 10 ⁻¹³ s
ν _e (neutrino électronique)	$\bar{\nu}_e$	0	0	+1	-1	< 2,2 eV	∞
ν _μ (neutrino muonique)	$\bar{\nu}_\mu$	0	0	+1	-1	< 0,17 eV	∞
ν _τ (neutrino tauique)	$\bar{\nu}_\tau$	0	0	+1	-1	< 15,5 eV	∞

Tab. 11.1 Leptons et antileptons avec leur charge électrique (l'unité est la charge élémentaire), charge leptonique, énergie de repos et durée de vie.

Les anciennes et les nouvelles particules

paire quark-antiquark		charge électrique		charge baryonique		Énergie au repos (= masse au repos / c^2)
u (Up)	\bar{u}	+2/3	-2/3	+1/3	-1/3	~ 3 MeV
d (Down)	\bar{d}	-1/3	+1/3	+1/3	-1/3	~ 5 MeV
s (Strange)	\bar{s}	-1/3	+1/3	+1/3	-1/3	~ 100 MeV
c (Charm)	\bar{c}	+2/3	-2/3	+1/3	-1/3	~ 1,25 GeV
b (Bottom)	\bar{b}	-1/3	+1/3	+1/3	-1/3	~ 4,2 GeV
t (Top)	\bar{t}	+2/3	-2/3	+1/3	-1/3	~ 171 GeV

Tab. 11.2 Quarks et antiquarks avec leur charge électrique (l'unité est la charge élémentaire), charge baryonique et énergie au repos

hadron	Énergie au repos (= masse au repos / c^2)	charge électrique	charge baryonique	charge leptonique	durée de vie en s	composition
proton	938,3 MeV	+1	+1	0	∞	uud
neutron	939,6 MeV	0	+1	0	885,7	udd
Λ^0	1115,6 MeV	0	+1	0	$2,6 \cdot 10^{-10}$	uds
Σ^0	1189,4 MeV	+1	+1	0	$0,8 \cdot 10^{-10}$	uus
π^+	139,6 MeV	+1	0	0	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$u\bar{d}$
K^0	493,7 MeV	-1	0	0	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$u\bar{s}$
η_c	2980,0 MeV	0	0	0	$2,5 \cdot 10^{-23}$	$c\bar{c}$
B^+	5270,8 MeV	+1	0	0	$1,4 \cdot 10^{-12}$	$u\bar{b}$

Tab. 11.3 Données pour plusieurs hadrons

Leptons

Il existe 12 leptons différents (Tab. 11.1, deux premières colonnes). Chacun d'entre eux appartient à une paire particule-antiparticule. La charge baryonique de tous les leptons est égale à zéro. Parmi les leptons, il y a quelques particules que nous connaissons déjà : l'électron et le neutrino électronique que nous avons simplement appelé neutrino auparavant, et leurs antiparticules. Le muon n'a qu'une durée de vie courte, le taon une durée de vie encore plus courte.

Malgré leur courte durée de vie, on peut trouver des muons sur Terre. Ils sont créés par le rayonnement cosmique à une altitude d'environ 10 km. Le rayonnement provenant de l'espace se compose en grande partie de protons hautement énergétiques. Si ces protons frappent les noyaux atomiques de l'atmosphère, des muons, dont la vitesse est proche de la vitesse limite c , se forment par une série d'étapes intermédiaires. Le

fait qu'ils parviennent jusqu'à la surface de la Terre est surprenant car on s'attendrait à ce qu'ils parcourent une distance de seulement

$$s = v \cdot t = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s} \approx 600 \text{ m}$$

au cours de leur vie. Mais $2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ est la durée de vie dans leur propre système de référence. Dans le système de référence de la Terre – et c'est ce qui compte – elle est beaucoup plus longue.

Quarks

Il existe 12 quarks différents – autant que de leptons. Chaque quark appartient à une paire quark-antiquark, Tab. 11.2. La charge leptonique de tous les quarks est égale à zéro.

Pour décrire les nouvelles particules qui sont créées dans un collisionneur, il est utile d'introduire de nou-

velles grandeurs physiques. Il n'existe pas pour ces grandeurs physiques de caractéristiques correspondantes que nous connaissons de notre expérience macroscopique normale. Elles ne nous apparaissent donc que comme des aides mathématiques. Vous avez déjà rencontré deux de ces grandeurs en rapport avec les réactions nucléaires : la charge baryonique et la charge leptonique. Pour la physique des particules, plusieurs autres grandeurs de ce type ont été introduites. Comme les valeurs de ces grandeurs sont toujours des multiples entiers d'une valeur spécifique, tout comme dans le cas de la charge électrique ou du moment cinétique, elles sont toujours indiquées en multiples de cette unité. Par conséquent, les valeurs qui sont indiquées sont des nombres entiers. Ces nombres sont appelés *nombres quantiques*.

Hadrons

En combinant les six quarks et leurs antiquarks, on obtient les différents hadrons dont plus de 100 sont connus. Deux d'entre eux, le proton et le neutron, forment, avec en plus l'électron, presque toute la matière qui existe dans la nature, ainsi que la matière des corps célestes. Tous les autres ont été créés artificiellement. Les baryons sont constitués de trois quarks, les mésons de deux quarks. Le Tab. 11.3 contient les données de quatre baryons et de quatre mésons à titre d'exemple. Dans la dernière colonne, on trouve les deux ou trois quarks dont est constitué le hadron.

Les quarks sont maintenus ensemble dans un baryon ou un méson par un champ. Il s'agit du champ de l'interaction forte. Comme il est situé exclusivement à l'intérieur des hadrons, nous ne le connaissons pas dans le monde macroscopique.

Une comparaison des valeurs de l'énergie au repos des Tab. 11.2 et Tab. 11.3 montre que l'énergie au repos des hadrons est beaucoup plus élevée que la somme des énergies au repos des quarks qui les composent. Prenons l'exemple du proton :

proton	938 MeV
u-quark 3 MeV	} 11 MeV
u-quark 3 MeV	
d-quark 5 MeV	

La majeure partie de l'énergie au repos du proton ne provient pas des quarks mais du champ de l'interaction forte qui maintient les quarks ensemble.

Une caractéristique particulière des quarks n'a pas encore été abordée ici : les quarks n'existent qu'à l'intérieur des hadrons : il n'y a pas de quarks libres. On pour-



Fig. 11.2 Tant que le ressort est détendu, les deux chiens se sentent libres. Pour s'éloigner l'un de l'autre, ils doivent fournir de l'énergie au ressort. S'ils tirent trop fort, c'est-à-dire s'ils fournissent trop d'énergie au ressort, celui-ci va se rompre et les deux chiens seront de nouveau libres.

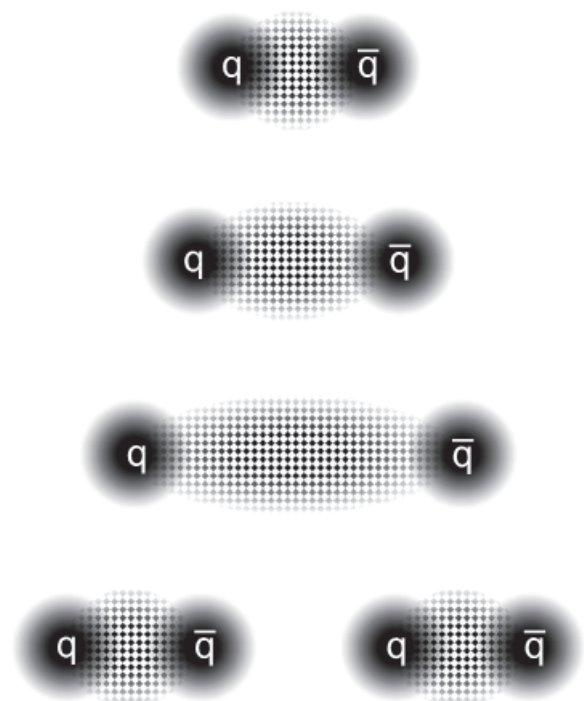


Fig. 11.3 Tant que le quark et l'antiquark (en haut de la figure) sont proches l'un de l'autre, ils sont « libres ». Pour les éloigner l'un de l'autre, il faut mettre de l'énergie dans le champ de l'interaction forte. Si l'énergie est suffisante pour créer un nouveau quark et un nouvel antiquark, la paire quark-antiquark initiale se séparera et deux nouvelles paires seront formées.

rait aussi l'exprimer autrement : les quarks n'existent que par groupes de deux ou trois. Mais pourquoi ne serait-il pas possible d'expulser un quark d'un proton ? Nous aimerions essayer de comprendre, à l'aide d'une comparaison, pourquoi ce n'est pas possible.

Deux chiens sont attachés l'un à l'autre par un ressort (Fig. 11.2). Tant que le ressort n'est pas tendu,

Les anciennes et les nouvelles particules

chaque chien a l'impression de pouvoir se déplacer librement. Ce n'est que lorsqu'ils essaient de s'éloigner l'un de l'autre qu'ils se rendent compte qu'ils sont attachés. Ils peuvent s'éloigner un peu l'un de l'autre, mais seulement avec un apport d'énergie. Plus ils souhaitent s'éloigner l'un de l'autre, plus ils doivent mettre d'énergie dans le ressort. Il en va de même pour les quarks d'un baryon ou d'un méson.

Si les chiens injectent de plus en plus d'énergie dans le ressort, ce dernier finira par se briser et les chiens seront vraiment libres. Dans le cas des quarks, il se passe quelque chose de différent si l'on injecte de plus en plus d'énergie dans le méson ou le baryon : lorsque l'énergie atteint la quantité nécessaire pour créer une nouvelle paire quark-antiquark, les deux quarks d'origine seront en fait détachés mais chacun d'eux formera immédiatement une nouvelle paire avec l'un des quarks nouvellement créés, Fig. 11.3. Par conséquent, nous n'avons pas réussi à obtenir un quark libre.

Exercices

1. Quelles sont les régularités contenues dans le Tab. 11.1 ?
2. Quelles sont les régularités contenues dans le Tab. 11.2 ?
3. Vérifiez si les entrées des colonnes avec la charge électrique et la charge baryonique du Tab. 11.3 sont correctes.

12 PRINCIPES D'ORGANISATION EN PHYSIQUE

Pourquoi nous intéressons-nous à la création et aux propriétés des particules créées artificiellement au point d'investir des milliards d'euros dans des appareils permettant de les créer ?

Le monde nous semble déroutant et complexe. Comprendre le monde signifie découvrir des principes d'organisation dans le chaos apparent – s'il existe de tels principes d'organisation. L'expérience acquise au cours des derniers siècles, c'est-à-dire depuis l'émergence de sciences physiques solides, a montré que de tels principes d'organisation existent bel et bien.

Il en existe deux types :

- La diversité des phénomènes est expliquée en référence à l'interaction de nombreuses particules dont il n'existe qu'un nombre limité de types. Toutes les particules d'un même type sont égales entre elles. Nous appelons cette méthode le « principe du Lego ».
- Le monde est décrit mathématiquement, c'est-à-dire à l'aide de théories.

12.1 Le « principe du Lego »

La première méthode pour obtenir une idée simplifiée du monde peut être mieux comprise au moyen d'une comparaison. Prenons l'exemple des briques Lego. Pour simplifier, nous supposons que les briques Lego existent en dix formes différentes, chacune d'entre elles en six couleurs différentes. Il y a donc au total 60 types de briques. Elles peuvent être utilisées pour construire toute une série de choses différentes : des

maisons, des véhicules, des personnes, des animaux, des robots... Aucune de ces choses n'est identique à une autre. Cependant, la diversité chaotique des œuvres en Lego repose sur un principe simple. La variété n'émerge que grâce aux différentes combinaisons de quelques composants élémentaires.

Cette méthode peut également être appliquée au-delà du monde des jouets.

Une telle démarche pour expliquer le monde a déjà été faite par *Leucippe* et *Democrite* au 5^{ème} siècle avant Jésus-Christ. Du point de vue de notre époque, ces idées pourraient être considérées comme des conjectures, mais on a découvert plus tard que la méthode d'explication fonctionne réellement. La chimie est la science qui s'en occupe. L'existence d'innombrables substances (pures) différentes peut être comprise grâce au « principe du Lego » : une substance pure est constituée de molécules identiques entre elles. Une molécule est composée d'atomes, et il n'y en a qu'une centaine – autant que d'éléments chimiques. Ainsi, l'existence des millions de substances différentes que nous connaissons peut être ramenée à une centaine de composants fondamentaux.

Dans notre exemple, les différents atomes correspondent aux différents types de briques Lego. Une molécule correspond à une structure qui a été construite à partir de briques Lego.

Nous n'avons pas encore considéré dans ce contexte, que les atomes de chaque élément chimique existent avec des masses différentes. En effet, il existe une série d'isotopes de chaque élément. Si nous considérons les différents isotopes de tous les éléments comme des composants fondamentaux, nous aurons affaire à envi-

Théories

ron 3 000 substances fondamentales : les nucléides. Les atomes d'un nucléide sont identiques entre eux : les atomes de nucléides différents sont différents. Par « identiques entre eux », nous entendons : ils ont les mêmes caractéristiques chimiques et ils ont la même masse, Fig. 12.1.

Le principe du Lego peut donc expliquer la diversité des substances de manière géniale. Des millions de molécules différentes sont composées d'environ 3 000 atomes différents. Mais cela nous amène directement à la question suivante : de quoi sont constitués les atomes individuels ? Nous avons trouvé la raison de la diversité des substances pures. Mais comment expliquer la diversité des différents atomes ? Vous connaissez déjà la réponse. Nous appliquons à nouveau le principe du Lego : comme précédemment, les atomes sont construits à la manière d'un Lego à partir de composants qui n'existent que sous trois types différents : protons, neutrons et électrons.

Sommes-nous arrivés à la fin ? Vous venez d'apprendre que la réponse à cette question doit être « non ». Bien que seuls trois composants du niveau Lego le plus profond entrent dans la composition de la matière naturelle qui nous entoure, ce ne sont pas les seuls composants qui existent à ce niveau. Nous savons que, outre le proton et le neutron, il existe de nombreux autres hadrons et d'autres leptons que les électrons. Et le principe du Lego peut être appliqué une fois de plus aux hadrons. La diversité des hadrons peut être attribuée aux quarks, qui sont au nombre de 12 seulement. Par conséquent, il n'y aurait que 12 leptons et 12 quarks comme composants de la matière.

Vous pouvez certainement imaginer la suite. L'hypothèse selon laquelle il ne s'agit pas de l'état final semble logique. En fait, des théories récentes suggèrent qu'il existe davantage de particules au niveau des quarks et des leptons et qu'il faut leur trouver un nouveau principe d'organisation. Ces théories sont appelées théories supersymétriques.

Exercice

1. Continuez la Fig. 12.1 dans une direction ascendante. Plusieurs continuations sont possibles : une vers une complexité croissante et une vers une taille croissante.

12.2 Théories

La deuxième méthode pour mettre de l'ordre dans le chaos apparent du monde consiste à appliquer les ma-

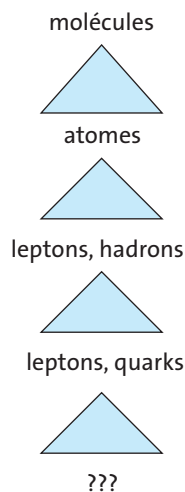


Fig. 12.1 Hiérarchie des composants : les molécules sont formées d'atomes, les atomes de hadrons et de leptons, les hadrons de quarks.

thématiques à la nature. Il s'agit de décrire les différents phénomènes aux différents endroits et instants avec une formule identique. La relation $P = v \cdot F$ est valable pour une voiture, un électron et une étoile. Elle est valable en Allemagne, en Chine, sur Mars et dans la galaxie d'Andromède. Elle est valable aujourd'hui et elle était valable il y a 10 000 ans et 10 milliards d'années, et elle sera encore valable dans 10 milliards d'années. Par conséquent, une théorie ou une formule englobe les caractéristiques communes de nombreux processus différents.

Mais les scientifiques doivent continuellement inventer de nouvelles théories pour différentes raisons :

- Une théorie décrit toujours un phénomène de manière seulement approximative. La validité d'une théorie est confirmée par des mesures. Les mesures n'ont en principe qu'une précision limitée et deviendront plus précises avec le temps. A un moment donné, les scientifiques découvrent que la théorie actuelle ne décrit pas le monde de manière suffisamment précise et établissent par conséquent une nouvelle théorie. La mécanique « classique » en est un exemple. Elle était utile tant qu'elle traitait de vitesses faibles par rapport à la vitesse limite c . Avec une précision de mesure croissante, mais aussi avec une vitesse croissante des objets analysés, il s'est avéré que la mécanique classique n'était plus suffisante. C'est pourquoi la théorie de la relativité a été inventée.
- Les théories qui sont utilisées pour décrire différents domaines de phénomènes sont généralement élaborées de manière isolée les unes des autres. A

un moment donné, on découvre que deux domaines peuvent être combinés, c'est-à-dire qu'ils peuvent être décrits par une théorie unique et plus complète. L'électricité et le magnétisme en sont des exemples. Au début, les phénomènes électriques et magnétiques semblaient n'avoir rien à voir les uns avec les autres. Puis, il s'est avéré qu'ils étaient très étroitement liés et la théorie de l'électromagnétisme, qui couvre à la fois les phénomènes électriques et magnétiques, a été développée.

- Lorsque les méthodes d'examen sont améliorées, il est possible d'explorer des domaines de phénomènes qui étaient encore inconnus auparavant. Une nouvelle théorie doit être inventée dans ce but. La physique des particules en est un exemple. Tant que la structure interne des hadrons n'était pas encore connue, la théorie quantique était une approche valable. Avec la découverte des quarks, une toute nouvelle théorie a été nécessaire : la chromodynamique quantique.

Les chercheurs sont encore confrontés à de nombreux problèmes à résoudre. Cela signifie que d'autres théories nouvelles doivent être conçues. Il existe déjà des candidats qui attendent leur conclusion et leur confirmation : les théories supersymétriques mentionnées précédemment, les « théories des cordes » et la « théorie de grande unification ».

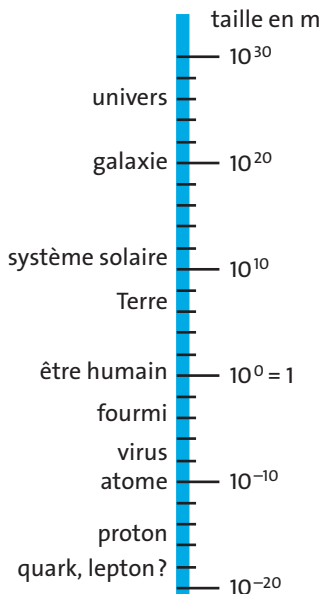


Fig. 12.2 Tailles de différents objets, du plus petit au plus grand, sur une échelle logarithmique : la distance entre deux traits courts adjacents correspond à un facteur 100.

12.3 Le très petit et le très grand

La physique des particules nous a permis d'examiner les structures les plus petites qui ont été explorées jusqu'à présent. Pour mieux se rendre compte de la taille des particules, la Fig. 12.2 montre la taille de différents objets sur une échelle logarithmique. La distance entre deux traits courts adjacents correspond à un facteur 100.

Sur la figure, le quark et le lepton sont répertoriés à 10^{-19} m, avec toutefois un point d'interrogation car tout ce que nous savons jusqu'à présent est que la taille maximale de ces particules est de 10^{-19} m. Nous ne savons pas s'il existe des structures plus grandes que 10^{26} m ou plus petites que 10^{-19} m.

12.4 Les particules élémentaires et la Théorie du Tout

Parfois, on dit que la science est à la recherche des derniers composants de la matière, définitifs, sans structure, élémentaires. Et l'on entend dire que les théoriciens travaillent à la recherche d'une théorie du tout, c'est-à-dire d'une théorie qui décrit tout de manière concluante.

En fait, certains spécialistes des sciences physiques ont peut-être le désir secret d'arriver un jour à un point final, c'est-à-dire de trouver les particules élémentaires définitives et la théorie qui comprend tout.

La quête de ces réponses définitives est humaine. C'est la même recherche qui a conduit nos ancêtres à inventer des dieux et des démons. Ainsi, il y avait une explication finale à toute adversité, comme les coups de foudre, les mauvaises récoltes et les guerres perdues – du moins pour ceux qui n'étaient pas très exigeants dans leur raisonnement. Il y avait une clarté sur ce qui était bon et mauvais, et il y avait des réponses définitives à la question du début et de la fin du monde. Pour ceux qui recherchent la connaissance, cependant, la perspective que tout a déjà été exploré à un moment donné est plutôt déprimante. Une recherche continue et fructueuse est beaucoup plus satisfaisante et excitante. ■

TABLE DES ÉNERGIES DE SÉPARATION

Z = nombre de protons

N = nombre de neutrons

E_T = énergie de séparation en pJ

	Z	N	E_T		Z	N	E_T		Z	N	E_T										
H	1	0	0,00	N	7	5	11,86	Na	11	9	23,39										
		1	0,356			6	15,08			10	26,13										
		2	1,359			7	16,77			11	27,90										
He	2	1	1,2364			8	18,50			12	29,89	P	15	13	35,48						
		2	4,5334			9	18,90			13	31,01			14	38,34						
		3	4,39			10	19,84			14	32,45			15	40,15						
		4	4,69			11	20,30			15	33,35			16	42,12						
Li	3	2	4,22			O	8			6	15,82			Mg	12	9	23,90	S	16	14	39,04
		3	5,13							7	17,94					10	27,01			15	41,13
		4	6,29							8	20,45					11	29,12			16	43,54
		5	6,61							9	21,11					12	31,76			17	44,93
		6	7,26	10	22,40					13	32,94					18	46,76				
		Be	4	3	6,02					F	9					8	20,54			14	34,72
4	9,05			9	22,01	15	35,75					17	45,75								
5	9,32			10	23,68	16	37,11					18	47,78								
6	10,41			11	24,74	17	37,72					19	49,15								
7	10,49	12	26,04	Al	13	11	29,41	20	50,80			21	51,78								
B	5	3	6,05			13	33,95	Ar	18			16	44,66								
		4	9,02			14	36,04					17	46,70								
		5	10,37			15	37,28					18	49,14								
		6	12,21			16	38,79			19	50,55										
		7	12,75			17	39,71			20	52,45										
C	6	3	6,25			Ne	10			7	18,09	21	53,50			22	55,08				
		4	9,71	8	21,17					22	53,08										
		5	11,77	9	23,04					23	54,01										
		6	14,77	10	25,74					24	55,28										
		7	15,56	11	26,82					Si	14	12	33,01	25	58,47						
		8	16,87	12	28,48			13	35,14			26	59,81								
		9	17,06	13	29,31			14	37,90												
		14	30,74	15	31,42			15	39,25												
16	40,95	16	32,13	16	40,95																
17	39,71	17	32,95	17	42,01																
18	43,48	18	33,95	18	43,48																
19	41,23	19	34,04	19	41,23																

	Z	N	E _T		Z	N	E _T		Z	N	E _T		Z	N	E _T	
K	19	18	49,44	Ti	22	21	57,55	Fe	26	25	69,13	Cu	29	30	81,69	
		19	51,37			22	60,16			26	71,73			31	83,30	
		20	53,47			23	61,68			27	73,44			32	85,18	
		21	54,72			24	63,80			28	75,58			33	86,60	
		22	56,33			25	65,22			29	77,07			34	88,34	
		23	57,54			26	67,08			30	78,87			35	89,61	
		24	59,09			27	68,39			31	80,09			36	91,20	
		25	60,25			28	70,14			32	81,70			37	92,33	
		26	61,68			29	71,16			33	82,76			38	93,79	
		27	62,78			30	72,41			34	84,17			39	94,80	
		28	64,12			31	73,28			35	85,06					
										36	86,35					
Ca	20	18	50,17	V	23	23	62,54	Co	27	27	74,14	Zn	30	31	84,15	
		19	52,30			24	64,62			28	76,39			32	86,21	
		20	54,80			25	66,31			29	78,01			33	87,67	
		21	56,14			26	68,16			30	79,83			34	89,58	
		22	57,98			27	69,66			31	81,21			35	90,85	
		23	59,25			28	71,43			32	82,88			36	92,63	
		24	61,04			29	72,60			33	84,08			37	93,76	
		25	62,22			30	73,96			34	85,57			38	95,39	
		26	63,89			31	74,94			35	86,63			39	96,43	
		27	65,05							36	87,99			40	97,90	
								41	98,84			42	100,26			
												43	101,12			
Sc	21	21	56,83	Cr	24	22	61,20	Ni	28	27	74,88	Ga	31	33	88,30	
		22	58,77			23	63,31			28	77,54			34	90,21	
		23	60,32			24	65,92			29	79,18			35	91,67	
		24	62,14			25	67,62			30	81,14			36	93,47	
		25	63,54			26	69,70			31	82,58			37	94,80	
		26	65,25			27	71,18			32	84,41			38	96,45	
		27	66,57			28	73,11			33	85,66			39	97,67	
		28	68,19			29	74,39			34	87,36			40	99,17	
		29	69,16			30	75,94			35	88,45			41	100,21	
						31	76,94			36	90,00			42	101,68	
		32	78,27	37	90,98	43	102,71									
				38	92,42	44	104,07									
				39	93,34											
Mn	25	25	68,35													
		26	70,55													
		27	72,23													
		28	74,16													
		29	75,60													
		30	77,24													
		31	78,40													
		32	79,79													
33	80,81															

annexe

	Z	N	E _T		Z	N	E _T		Z	N	E _T		Z	N	E _T		
Ge	32	34	91,21	Br	35	41	105,16	Sr	38	43	111,43	Nb	41	48	122,87		
		35	92,67			42	106,92			44	113,45			49	124,49		
		36	94,65			43	108,25			45	114,87			50	126,42		
		37	95,97			44	109,96			46	116,78			51	127,68		
		38	97,81			45	111,22			47	118,15			52	129,10		
		39	99,00			46	112,85			48	119,99			53	130,25		
		40	100,72			47	114,07			49	121,34			54	131,61		
		41	101,81			48	115,60			50	123,12			55	132,72		
		42	103,45			49	116,70			51	124,14			56	134,01		
		43	104,49			50	118,12			52	125,39			Mo	42	48	123,96
		44	106,00			Kr	36			39	102,77					49	125,58
		45	106,97							40	104,82					50	127,61
		46	108,37							41	106,31					51	128,91
47	109,29	42	108,23	52	130,46												
As	33	37	96,69	43	109,57			Y	39	45	115,63	53	131,64				
		38	98,55	44	111,42					46	117,50	54	133,10				
		39	99,90	45	112,68					47	119,02	55	134,20				
		40	101,63	46	114,44					48	120,92	56	135,58				
		41	102,91	47	115,63					49	122,41	57	136,53				
		42	104,55	48	117,32					50	124,25	58	137,86				
		43	105,72	49	118,46					51	125,35	59	138,72				
		44	107,28	50	120,04					52	126,62	Tc	43			51	129,65
		45	108,39	51	120,92					53	127,67			52	131,24		
		46	109,82	52	122,05	54	128,87			53	132,50						
Se	34	37	97,66	53	122,87	55	129,86	54	134,02								
		38	99,72	Rb	37	45	113,61	55	135,19								
		39	101,07			46	115,36	56	136,62								
		40	103,00			47	116,76	57	137,71								
		41	104,29			48	118,44	Zr	40	47	120,20						
		42	106,07			49	119,83			48	122,18						
		43	107,26			50	121,42			49	123,67						
		44	108,94			51	122,39			50	125,59						
		45	110,06			52	123,54			51	126,74						
		46	111,65			53	124,46			52	128,13						
		47	112,72			Ru	44			50	121,42	53	129,21				
		48	114,21							51	122,39	54	130,52				
		49	115,14							52	123,54	55	131,56				
50	116,53	53	124,46							56	132,82						
				57	133,71												
				58	134,74												
				50	129,27												
				51	130,70												
				52	132,42												
				53	133,72												
				54	135,35												
				55	136,54												
				56	138,09												
				57	139,18												
				58	140,66												
				59	141,66												
				60	143,09												
				61	144,03												
				62	145,39												
				63	146,26												

	Z	N	E_T		Z	N	E_T		Z	N	E_T		Z	N	E_T		
Rh	45	53	134,41	Cd	48	56	141,92	Sn	50	59	147,92	Te	52	65	158,42		
		54	136,08			57	143,28			60	149,73			66	160,12		
		55	137,39			58	145,02			61	151,04			67	161,33		
		56	138,97			59	146,29			62	152,77			68	162,98		
		57	140,17			60	147,94			63	154,01			69	164,14		
		58	141,66			61	149,12			64	155,66			70	165,71		
		59	142,78			62	150,70			65	156,87			71	166,83		
		60	144,22			63	151,82			66	158,40			72	168,34		
		61	145,27			64	153,33			67	159,51			73	169,39		
Pd	46	53	135,42	65	154,38	68	161,01	74	170,85	I	53	70	166,50				
		54	137,20	66	155,82	69	162,05	75	171,86			71	167,70				
		55	138,53	67	156,81	70	163,51	76	173,26			72	169,23				
		56	140,22	68	158,20	71	164,49	77	174,24			73	170,38				
		57	141,44	69	159,13	72	165,91	78	175,59			74	171,84				
		58	143,04	70	159,75	73	166,86	79	176,54			75	172,94				
		59	144,18	In	49	61	149,95	74	168,22			80	177,83	76	174,35		
		60	145,71			62	151,56	75	169,14			81	178,77	77	175,39		
		61	146,76			63	152,79	76	170,45			Sb	51	67	160,30	78	176,77
		62	148,24			64	154,30	68	161,83					70	164,43	79	177,78
		63	149,22			65	155,47	69	162,95					71	165,52	80	179,22
		64	150,63			66	156,91	72	166,96					72	166,96		
65	151,55	67	158,00	73	168,00	73	168,00										
66	152,90	68	159,41	74	169,39	74	169,39										
Ag	47	56	140,89			69	162,95	75	170,39								
		57	142,23			70	164,43	76	171,73								
		58	143,84			71	165,52										
		59	145,11			72	166,96										
		60	146,64			73	168,00										
		61	147,80			74	169,39										
		62	149,28			75	170,39										
		63	150,37			76	171,73										
		64	151,78														
65	152,82																

annexe

	Z	N	E_T		Z	N	E_T		Z	N	E_T		Z	N	E_T		
Xe	54	67	162,92	La	57	78	181,32	Nd	60	79	185,37	Eu	63	85	195,71		
		68	164,70			79	182,51			80	187,05			86	197,03		
		69	165,95			80	183,98			81	188,30			87	198,06		
		70	167,63			81	185,17			82	189,88			88	199,33		
		71	168,84			82	186,58			83	190,86			89	200,34		
		72	170,45			83	187,41			84	192,11			90	201,71		
		73	171,61			84	188,49			85	193,03			91	202,74		
		74	173,15	85	189,30	86	194,25			92	204,05						
		75	174,26	Ce	58	75	177,95			87	195,09			93	205,06		
		76	175,74			76	179,61			88	196,27			94	206,26		
		77	176,80			77	180,87			89	197,08			Gd	64	85	196,69
		78	178,23			78	182,46			90	198,26					86	198,09
		79	179,26			79	183,65	91	199,11	87	199,13						
		80	180,63			80	185,21	92	200,28	88	200,51						
		81	181,67			81	186,41	Pm	61	81	188,97	89	201,51				
		82	182,95			82	187,88			82	190,57	90	202,93				
		83	183,59			83	188,75			83	191,61	91	203,96				
		Cs	55			75	175,13			84	189,90	84	192,88			92	205,33
76	176,62					85	190,73			85	193,88	93	206,35				
77	177,77			86	191,83	86	195,11			94	207,62						
78	179,21			87	192,59	87	196,06			95	208,57						
79	180,31			Pr	59	79	184,38			88	197,22	96	209,77				
80	181,73					80	185,95			89	198,12	97	210,67				
81	182,81					81	187,22	Sm	62	80	188,51	Tb	65	91	204,81		
82	184,14	82	188,72			81	189,89			92	206,22						
83	184,84	83	189,66			82	191,57			93	207,30						
Ba	56	71	170,47			84	190,83			83	192,66			94	208,60		
		72	172,20			85	191,76			84	194,00			95	209,63		
		73	173,43			Sm	62			85	195,02			85	195,02	96	210,86
		74	175,08	86	196,33					86	196,33			97	211,86		
		75	176,28	87	197,27					87	197,27	Dy	66	87	200,66		
		76	177,85	88	198,55					88	198,55			88	202,15		
		77	179,00	89	199,44					89	199,44			89	203,25		
		78	180,52	90	200,77			90	200,77	90	204,76						
		79	181,63	91	201,71			91	201,71	91	205,88						
		80	183,09	92	202,98			92	202,98	92	207,33						
		81	184,20	93	203,91			93	203,91	93	208,42						
		82	185,58	Tb	65			80	188,51	94	209,79			94	209,79		
		83	186,33			81	189,89	95	210,83	95	210,83						
84	187,37	82	191,57			96	212,14	96	212,14								
85	188,09	83	192,66			97	213,15	97	213,15								
		84	194,00			98	214,37	98	214,37								
		85	195,02			99	215,29	99	215,29								
		86	196,33			100	216,42	100	216,42								
		87	197,27														
		88	198,55														
		89	199,44														
		90	200,77														
		91	201,71														
		92	202,98														
		93	203,91														

	Z	N	E_T		Z	N	E_T		Z	N	E_T		Z	N	E_T
Ho	67	95	211,67	Lu	71	101	222,61	Re	75	107	233,23	Au	79	115	246,14
		96	213,02			102	223,93			108	234,58			116	247,48
		97	214,08			103	225,01			109	235,62			117	248,55
		98	215,37			104	226,24			110	236,85			118	249,84
		99	216,37			105	227,25			111	237,84			119	250,88
		100	217,54			106	228,38			112	239,02			120	252,10
Er	68	92	208,96	Hf	72	99	220,98	Os	76	106	232,97	Hg	80	113	244,54
		93	210,12			100	222,43			107	234,09			114	246,01
		94	211,60			101	223,55			108	235,50			115	247,11
		95	212,70			102	224,93			109	236,56			116	248,53
		96	214,12			103	226,01			110	237,89			117	249,62
		97	215,18			104	227,31			111	238,90			118	250,98
		98	216,54			105	228,34			112	240,18			119	252,05
		99	217,57			106	229,56			113	241,13			120	253,33
		100	218,82			107	230,54			114	242,37			121	254,33
		101	219,78			108	231,72			115	243,30			122	255,57
		102	220,94			109	232,63			116	244,51			123	256,53
		103	221,85			110	233,71			117	245,40			124	257,73
		104	222,95			111	234,56			118	246,54			125	258,64
		Tm	69			97	215,93			Ta	73			105	229,13
98	217,33			106	230,39	112	240,91	120	254,13						
99	218,42			107	231,46	113	241,93	121	255,23						
100	219,71			108	232,67	114	243,22	122	256,49						
101	220,77			109	233,64	115	244,22	123	257,55						
102	221,97			110	234,75	116	245,46	124	258,76						
Yb	70	96	215,76	W	74	104	228,99	Pt	78	109	237,94	Pb	82	119	253,70
		97	216,89			105	230,10			110	239,40			120	255,10
		98	218,34			106	231,44			111	240,48			121	256,21
		99	219,44			107	232,52			112	241,90			122	257,55
		100	220,80			108	233,81			113	242,93			123	258,63
		101	221,86			109	234,80			114	244,32			124	259,92
		102	223,14			110	235,99			115	245,33			125	261,00
		103	224,16			111	236,91			116	246,67			126	262,18
		104	225,36			112	238,06			117	247,64			127	262,81
		105	226,29			113	238,94			118	248,91			128	263,65
		106	227,39			114	240,03			119	249,85			129	264,26
		107	228,28							120	251,06			130	265,08
		108	229,37							121	251,95				
										122	253,12				

annexe

	Z	N	E_s
Bi	83	123	259,20
		124	260,49
		125	261,60
		126	262,79
		127	263,53
		128	264,35
		129	265,05

Po	84	122	258,78
		123	259,90
		124	261,25
		125	262,36
		126	263,59
		127	264,32

At	85	123	260,33
		124	261,68
		125	262,83
		126	264,07
		127	264,88
		128	265,84
		130	267,58

Rn	86	121	258,29
		124	262,32
		125	263,48
		126	264,76
		132	270,29
		136	273,68

Fr	87	122	259,98
		125	263,82
		128	267,07
		133	271,75
		136	274,52

Ra	88	134	273,76
		135	274,58
		136	275,62
		137	276,40
		138	277,43
		139	278,16
		140	279,18

	Z	N	E_T
Ac	89	135	275,27
		136	276,34
		137	277,20
		138	278,25
		139	279,05

Th	90	138	279,27
		139	280,11
		140	281,20
		141	282,02
		142	283,05
		143	283,82
		144	284,81

Pa	91	138	279,94
		139	280,86
		140	281,96
		141	282,85
		142	283,89

U	92	141	283,86
		142	284,95
		143	285,80
		144	286,85
		145	287,67
		146	288,66
		147	289,43

Np	93	143	286,58
		144	287,63
		145	288,51
		146	289,50

Pu	94	143	287,47
		144	288,59
		145	289,50
		146	290,54
		147	291,38
		149	293,20

Am	95	145	290,20
		146	291,26
		147	292,15
		148	293,17
		149	294,03

	Z	N	E_T
Cm	96	150	296,05
		151	296,88
		152	297,87
		153	298,63

Bk	97	149	295,70
		150	296,76

Cf	98	153	300,42
		154	301,41

Es	99	153	301,08
		154	302,10

Fm	100	156	304,82
		157	305,61

Md	101	156	305,41
		157	306,26

No	102	156	306,20
		157	307,08

Lr	103	153	303,51
		154	304,65
		157	307,59

Rf	104	157	308,25
-----------	-----	-----	--------

Db	105	156	307,66
		157	308,67

Sg	106	157	309,17
-----------	-----	-----	--------

Bh	107	155	307,05
-----------	-----	-----	--------