

Die höchsten Energien im Universum

H. Blümer, IK; C.-Kj. Guérard, Institut für Experimentelle Kernphysik, Universität Karlsruhe

Einleitung

Kaum eine Frage von fundamentaler Bedeutung hat die Astrophysiker vor so große Probleme gestellt, wie diejenige nach dem Ursprung der kosmischen Strahlung. Ihre Energiedichte ist vergleichbar mit der des sichtbaren Sternenlichts oder der 3K-Hintergrundstrahlung, sie ist verantwortlich für elektromagnetische Kontinuumsstrahlungen vom Radiobereich bis zu hochenergetischen γ -Strahlen, und das Energiespektrum scheint sich zu beliebig hohen Werten fortzusetzen. Tatsächlich wurden die höchsten jemals auf der Erde gemessenen Teilchenenergien in der kosmischen Strahlung beobachtet, hundertmillionenfach höher als in unseren Beschleunigern erreichbar. Eine Klärung des fast 100-jährigen Problems verspricht die Untersuchung zweier markanter Bereiche im Energiespektrum: bei etwa $4 \cdot 10^{15}$ eV untersucht das Luftschauerexperiment KASCADE die detaillierte Struktur des Spektrums und die Elementzusammensetzung. Oberhalb von 10^{19} eV wird die höchstenergetische Strahlung mit dem internationalen Pierre Auger-Observatorium in Argentinien erforscht.

Kosmische Strahlung

Im Jahre 1912 entdeckte der Österreicher Victor Hess auf einer Reihe von Ballonflügen bis in 5000 m Höhe, dass die Ionisation der Luft in größeren Höhen deutlich anstieg. Er schloss daraus, dass es sich hierbei um eine extraterrestrische Strahlungsquelle handeln müsse und erhielt für seine Entdeckung 1936 den No-

belpreis für Physik. Während man zunächst vermutete, dass es sich bei der Höhenstrahlung vornehmlich um hochenergetische Elektronen und Gammastrahlung handele, wissen wir inzwischen, dass die kosmische Strahlung vorwiegend aus Protonen, leichten und schweren Kernen besteht, während Elektronen nur etwa 1% beitragen. Schon 1938 erkannte der französische Physiker Pierre Auger, dass in der Höhenstrahlung ganz beträchtliche Teilchenenergien auftreten. Er registrierte in seiner Anordnung aus mehreren Detektoren auf dem Jungfraujoch im Berner Oberland auch dann gleichzeitige Signale, wenn die Detektoren bis zu 300

Metern auseinander platziert waren. Er interpretierte dies zutreffend als Kaskaden von Sekundärteilchen, die in der Erdatmosphäre durch Primärteilchen von sehr hoher Energie ausgelöst werden [1]. Die von Auger vermuteten kosmischen Beschleunigungsmechanismen in „elektrischen Feldern von sehr großer Ausdehnung“ sind bis heute ein ungelöstes Rätsel.

Das Energiespektrum

Die Intensität der kosmischen Strahlung als Funktion ihrer Energie ist im Energiespektrum (Abb. 1) zusammengefasst. Die Strahlung überdeckt einen Energiebe-

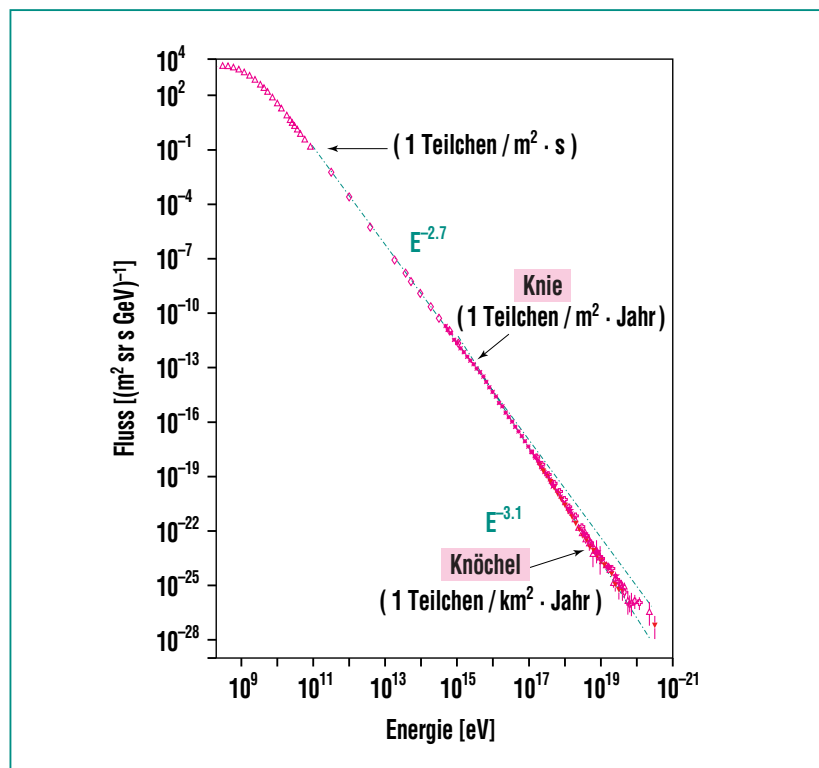


Abb. 1: Energiespektrum der kosmischen Strahlung oberhalb 100 MeV. Die Daten entstammen einer größeren Anzahl unterschiedlicher Messungen und die Zahlen an der Kurve geben die integralen Teilchenflüsse oberhalb der jeweils markierten Stellen an (nach S. Swordy, Univ. Chicago).

reich von etwa 10^6 eV bis über $3 \cdot 10^{20}$ eV und man erkennt die großen Schwierigkeiten von experimentellen Untersuchungen in einem so weiten Energiebereich: über 14 Dekaden in der Teilchenenergie E fällt die Intensität $I(E)$ um mehr als 30 Dekaden ab! Der Abfall gehorcht oberhalb von etwa 10^9 eV (1 GeV, dies ist ungefähr die Ruheenergie eines Wasserstoffkerns) einem Potenzgesetz $I(E) \propto E^{-\gamma}$, wobei $\gamma \approx 2,7 \pm 0,1$ ist. Teilchen mit Energien unterhalb 1 GeV stammen überwiegend aus der Sonne, deren Einfluss sich noch bis etwa 10 GeV nachweisen lässt. Bei höheren Energien muss man einen galaktischen und möglicherweise extragalaktischen Ursprung annehmen. Das Spektrum zeigt relativ wenig Struktur, ausgenommen ist ein markanter Knick bei $4 \cdot 10^{15}$ eV, das so genannte „Knie“, an dem sich der Stei-

gungsindex von $\gamma \approx 2,7$ nach $\gamma \approx 3,1$ ändert. Dieser Energiebereich steht im Mittelpunkt der Untersuchungen mit dem Höhenstrahlungsexperiment KASCADE auf dem Gelände des Forschungszentrums Karlsruhe. Im Bereich der höchsten Energien scheint sich ein weiterer Knick anzudeuten, der „Knöchel“. Hier liegen allerdings noch zu wenige Messungen vor. Gerade dieser Energiebereich ist Gegenstand von aktuellen Untersuchungen und Planungen, die in diesem und dem folgenden Artikel behandelt werden.

Der Teilchenfluss oberhalb von 10^{12} eV beträgt immerhin 1 Teilchen/ m^2 s und isotopenspezifische Energieverteilungen können direkt mit hochfliegenden Ballons oder Satelliten gewonnen werden. Hieraus haben sich wichtige Schlussfolgerungen über die Her-

kunft und Propagationseigenschaften der Teilchen in der Galaxis ergeben. Deutlich höhere Energien erfordern aber entsprechend größere Detektorflächen und deshalb erdgebundene Anlagen, der integrale Fluss im Bereich des Knies beträgt nur noch ein Teilchen/ m^2 Jahr. Bei den höchsten Energien treffen weniger als ein Teilchen pro Quadratkilometer und Jahrhundert ein und gewaltige Anlagen wie das internationale Pierre Auger-Observatorium in Argentinien sind erforderlich, um die Rätsel dieser Teilchen zu lösen.

In den letzten zwanzig Jahren wurden Luftschauerexperimente in Haverah Park (Großbritannien), Akeno (Japan), Yakutsk (Sibirien) und Utah (USA) durchgeführt, die mit verschiedenen experimentellen Techniken insgesamt etwa ein Dutzend Ereignis-

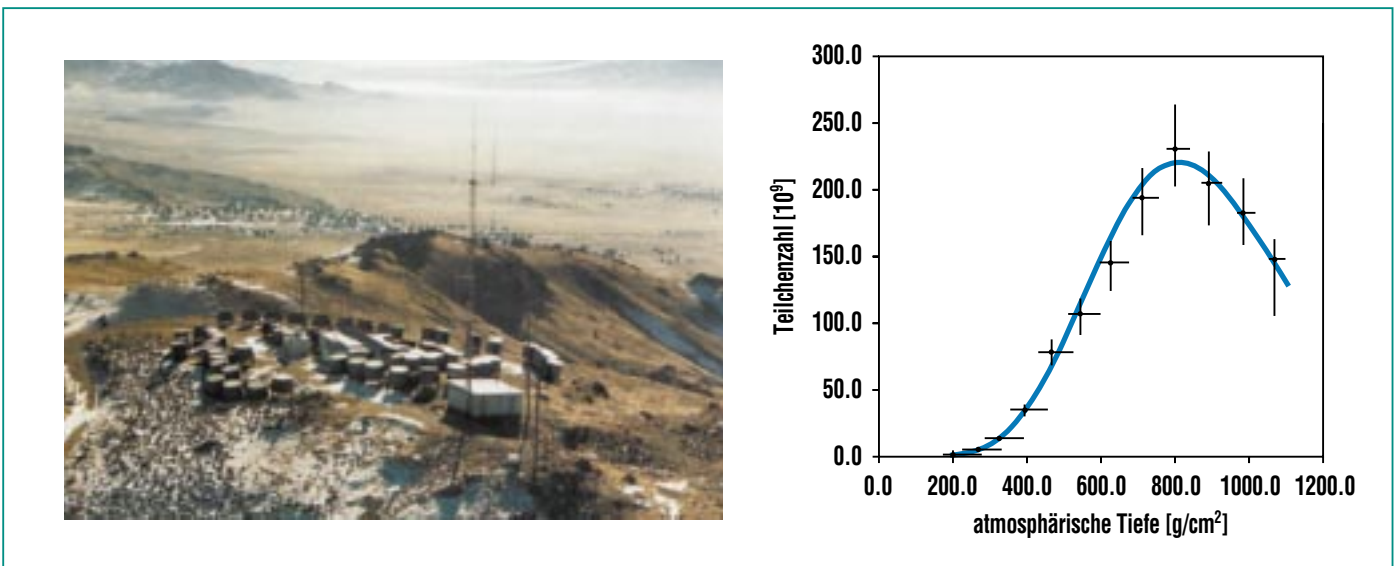


Abb. 2: Das „Fliegenauge“ Fly’s Eye in Utah/USA war ein Fluoreszenzdetektor für hochenergetische Luftschauer. Aus der Lichtintensität entlang der Leuchtspur lassen sich die Teilchenzahl rekonstruieren und Rückschlüsse auf die Natur des Primärteilchens ziehen (leichte Kerne dringen im Mittel tiefer in die Atmosphäre ein als schwere Kerne). Gezeigt ist die entsprechende Kurve für das höchstenergetische Teilchen mit einer Energie von $3 \cdot 10^{20}$ eV.

se mit Energien bis oberhalb von 10^{20} eV registrierten [2]. Heute ist nur noch die japanische AGASA-Anlage in Betrieb, mit etwa 100 km^2 Flächenabdeckung zur Zeit der größte Detektor dieser Art (Akeno Giant Air Shower Array). Das mit $3 \cdot 10^{20}$ eV bislang energiereichste Teilchen wurde vom Fly's Eye Detektor nachgewiesen (Abb. 2, [3]). Es hatte in makroskopisch üblichen Einheiten eine Energie von 50 Joule: die kinetische Energie eines Tennisballs von 160 km/h Geschwindigkeit war auf einen einzigen Atomkern konzentriert!

Luftschauer

Der Nachweis kosmischer Teilchen oberhalb $E \sim 4 \cdot 10^{14}$ eV erfordert Detektorflächen und Messzeiten, die sich nur in erdgebundenen Experimenten realisieren lassen. Hierbei werden aber nicht die primären Teilchen selbst erfasst, sondern die in der Atmosphäre erzeugten Reaktionsprodukte, so genannte ausgedehnte Luftschauer. Aufgrund der Vielzahl entstehender Teilchen genügt eine stichprobenartige Vermessung der verschiedenen Teilchenkomponenten am Erdboden. Darüber hinaus stehen optische Nachweismethoden zur Verfügung, denn die Schauerteilchen erzeugen bei ihrem Weg durch die Luft sowohl Cherenkov-Strahlung als auch Fluoreszenzlicht. Cherenkovstrahlung ist stark in Bewegungsrichtung der Teilchen konzentriert. Sie entsteht ähnlich einem Überschalldruckkegel, wenn sich geladene Teilchen schneller als die Lichtgeschwindigkeit c/n durch ein Medium bewegen, wobei n der Bre-

chungsindex ist. Bei Primärenergien oberhalb $\sim 10^{16}$ eV kann insbesondere Fluoreszenzlicht beobachtet werden, das durch die Wechselwirkung der geladenen Teilchen mit den Stickstoffmolekülen der Luft entsteht. Es wird isotrop hauptsächlich im Wellenlängenbereich zwischen 300-400 nm emittiert und kann für Primärenergien über 10^{20} eV mit Hilfe von Spiegelteleskopen in klaren Nächten bis über 40 km Entfernung beobachtet werden. Die Atmosphäre ist bei diesen optischen Nachweismethoden gleichzeitig Absorber und integrierter Teil des Detektors. Während z.B. das KASCADE-Experiment eine Anordnung von Detektoren auf dem Gelände des Forschungszentrums Karlsruhe verwendet, wird im Pierre Auger-Experiment in Mendoza (Argentinien) erstmals eine Hybrid-Technik verwirklicht werden, bei der ein Teilchennachweis am Boden mit einer Fluoreszenzlichtdetektion kombiniert wird.

Energiequellen und Beschleunigungsmechanismen

Der geplante Beschleuniger LHC (Large Hadron Collider am CERN/Genf) soll ab dem Jahr 2006 Teilchenenergien von 8 TeV erzeugen ($1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$). Wie aber kommt es zur Beschleunigung kosmischer Partikel auf etwa hundertmillionenfach höhere Energien? Ein brauchbares Modell sollte auch das beobachtete Potenzgesetz der energieabhängigen Intensität erklären. Eine bis heute favorisierte Idee wurde von Enrico Fermi schon 1942 geliefert. Sie beruht auf einer Teilchen-

beschleunigung durch stochastische Reflexionen der geladenen Teilchen an sich bewegenden magnetischen Plasmawolken [4]. In den 70er Jahren erkannte man, dass dieser Prozess die notwendige Leistung und Effizienz allerdings erst in starken kosmischen Schockfronten erreicht, die z.B. durch Supernova-Explosionen entstehen.

Um die schon erwähnte Energiedichte der kosmischen Strahlung von etwa 1 eV/cm^3 aufrechtzuerhalten, ist im Volumen der Galaxis eine Leistung von $\sim 10^{33} \text{ W}$ oder 10^7 Sonnenleuchtkräften nötig. Supernovae können diese Leistung erbringen, sobald nur einige Prozent der kinetischen Hüllenenergie in Beschleunigungsenergie umgesetzt werden. Diese Vorstellung wird durch Computersimulationen und Messungen an bekannten Supernovae unterstützt. Das Röntgenspektrum des Supernova-Überrests aus dem Jahr 1006 wurde mit dem Forschungssatelliten ASCA vermessen und lässt sich als Synchrotronstrahlung von TeV-Elektronen interpretieren. Zudem konnten von dieser Quelle γ -Quanten mit TeV-Energien nachgewiesen werden, die beim Stoß der Elektronen mit den Photonen der 3K-Hintergrundstrahlung entstehen (inverse Compton-Stöße). Ein direkter Beweis für die Beschleunigung von Hadronen fehlt bislang. Die gegenwärtig im Aufbau befindlichen Cherenkov-Teleskope [5] könnten dazu beitragen, wenn der zweifelsfreie Nachweis von Gammastrahlung aus dem π^0 -Zerfall gelänge, der in typischen hadronischen Reaktionen stattfindet.

Eine einfache Abschätzung zeigt, dass die maximal erreichbare Energie E_{max} von der Ladung z des beschleunigten Teilchens, der Magnetfeldstärke B und der Ausdehnung L der Beschleunigungsregion abhängt. Zusätzlich muss man einen Faktor $\beta_s = v_s/c$ einführen, der die Geschwindigkeit v_s der beschleunigenden Schockwellen relativ zur Lichtgeschwindigkeit c berücksichtigt: $E_{max} \approx \beta_s \cdot z \cdot B \cdot L$. Man erhält für Supernovae etwa 10^{15} eV und unter besonders günstigen Voraussetzungen sogar 10^{16} eV [6]. Weiteren Aufschluss versprechen die lau-

fenden Untersuchungen im Energiebereich des Knies insbesondere mit dem KASCADE-Experiment.

Das Rätsel der höchsten Energien

Die grundsätzlichen Überlegungen zur Maximalenergie gelten auch für die höchsten Teilchenenergien, die noch mal um einen Faktor Einhunderttausend oberhalb des Kniebereichs liegen. Hierzu klassifiziert man geeignete astrophysikalische Kandidaten-Objekte im so genannten Hillas-Diagramm nach Größe und Magnetfeldstärke (Abb. 3, [7]). Die Maximalenergie ist in dieser doppellogarithmischen Darstellung eine gerade Linie. Selbst unter idealen Bedingungen erfordert die Beschleunigung von Protonen auf 10^{20} eV eine Überschreitung der durchgezogenen Linie im Hillas-Diagramm, denn realistische Werte der normierten Schockgeschwindigkeit liegen im Bereich $\beta_s = 1/300$. Selbst für $\beta_s = 1$ würden nur wenige Objekte im Universum die notwendigen Bedingungen für einen Beschleuniger erfüllen. Für schwere Atomkerne ist dies wegen ihrer vielfach höheren Ladung leichter, bei Eisen also um einen Faktor 26. Weitere Einschränkungen für die Größe von Beschleunigungsregionen ergeben sich, wenn man Energieverluste berücksichtigt: in sehr kompakten Quellen tritt aufgrund der starken magnetischen Ablenkung Synchrotronstrahlung auf und in sehr ausgedehnten Quellen spielen schließlich Streuverluste eine wachsende Rolle. Nach gegenwärtigen Vorstellungen scheinen lediglich Jets aus Radiogalaxien [8] alle notwendigen Bedingungen zu erfüllen (Abb. 4). Da genügend leistungsfähige Quellen dieser Art aber nur in relativ großen Entfernungen (~ 100 Mpc) bekannt sind, ergibt sich ein zweites Problem in der Ausbreitung dieser Teilchen.

Schon bald nach der Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung durch Penzias und Wilson (1964) wiesen Greisen, Zatsépin und Kuzmin darauf hin, dass Protonen mit einer Energie oberhalb $5 \cdot 10^{19}$ eV sehr effektiv mit den Photonen der 3 K-Hinter-

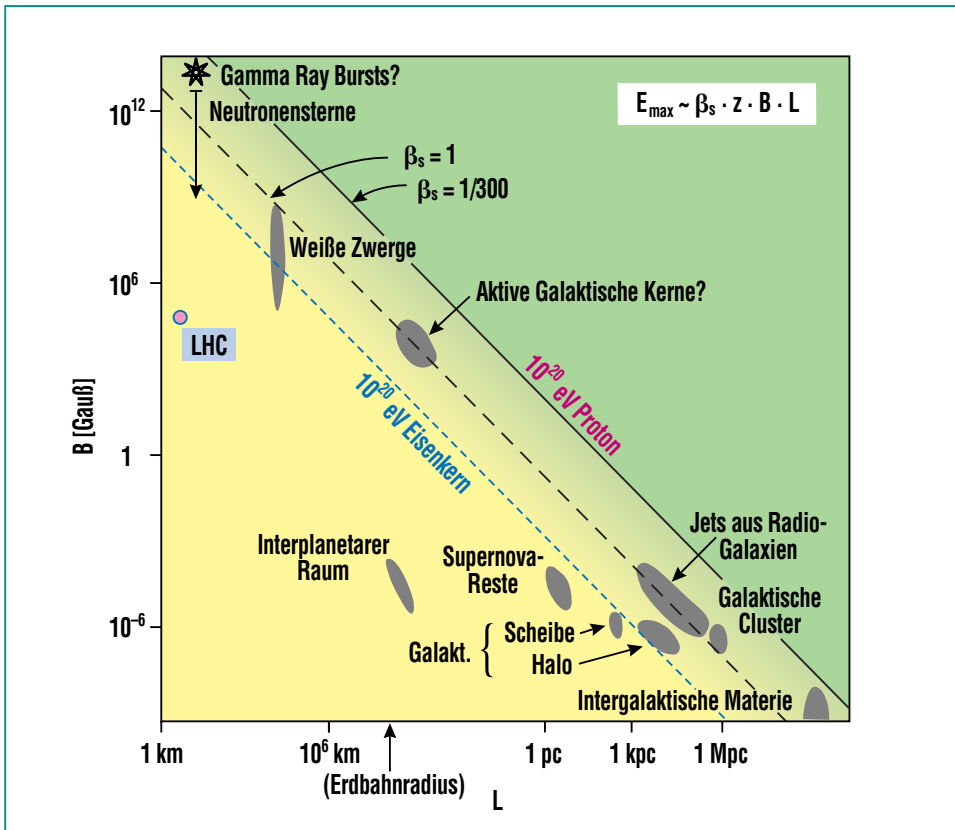
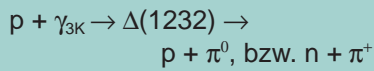


Abb. 3: Im sog. Hillas-Diagramm wird die charakteristische Größe L eines Objektes gegen die dort herrschende oder vermutete Magnetfeldstärke B aufgetragen. Objekte unterhalb der gestrichelten Linie können keine Protonen ($z=1$) auf $E \geq 10^{20}$ eV beschleunigen, für Eisenkerne gilt entsprechend die gepunktete Linie ($z=26$). 1 Parsec (pc) entspricht 3,26 Lichtjahren oder $3,1 \cdot 10^{13}$ km.

grundstrahlung wechselwirken [9]. Oberhalb dieser Energieschwelle steht genügend Energie im Schwerpunktsystem zur Verfügung, um das Proton in seinen ersten angeregten Zustand anzuregen, die Δ -Resonanz. Diese zerfällt unmittelbar wieder in Pionen und Nukleonen:



Diese Prozesse entziehen dem Primärteilchen Energie, bis schließlich die Energieschwelle unterschritten wird. Aus der mittleren Dichte von 412 Photonen/cm³ und dem bekannten $p\gamma$ -Wirkungsquerschnitt errechnet man, dass nahezu unabhängig von der Anfangsenergie eines Protons seine Energie innerhalb einer Strecke von höchstens 100 Mpc auf $5 \cdot 10^{19}$ eV sinkt. Abb. 5 illustriert diesen so genannten GZK-Effekt für drei verschiedene Anfangsenergien der Protonen [10].

Für schwere Kerne liegt die Energieschwelle für Stöße mit der 3K-Hintergrundstrahlung entsprechend der Massenzahl höher, sie erleiden aber im Bad der energiereicheren kosmischen Infrarotstrahlung bei etwa gleicher Energie ebenfalls einen selbsterstörerischen Prozess: durch Anregung von Kernschwingungen (Riesenresonanzen) kommt es zum Zerfall und die Reichweite schwerer Kerne ist gering. Die Intensität der Infrarotstrahlung ist nach neuesten Satellitenmessungen aber möglicherweise viel niedriger als bisher gedacht und entsprechend müsste man die Vorstellungen von den unter-

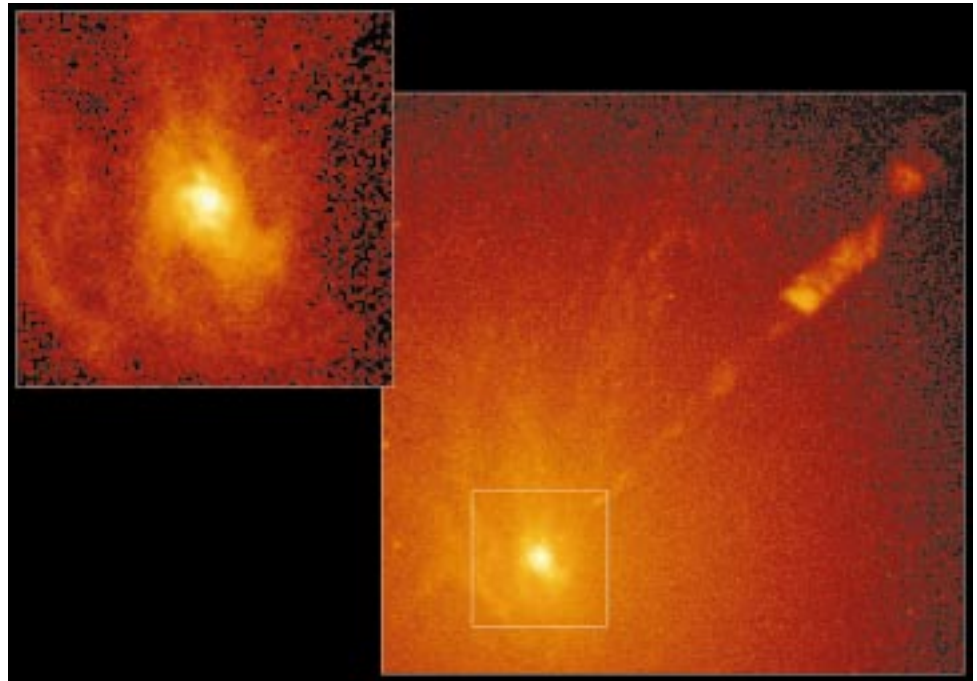


Abb. 4: In den Zentren großer Galaxien werden supermassive Schwarze Löcher vermutet. Die Aufnahme mit dem Hubble-Weltraumteleskop zeigt die Radiogalaxie M87 im 16 Mpc entfernten Virgo-Galaxienhaufen. Man erkennt den im optischen Bereich etwa 2-3 kpc langen Jet, der durch das spiralförmige Einsaugen von Materie in das Schwarze Loch entsteht und dabei Teilchen auf ultrahohe Energien beschleunigen könnte.

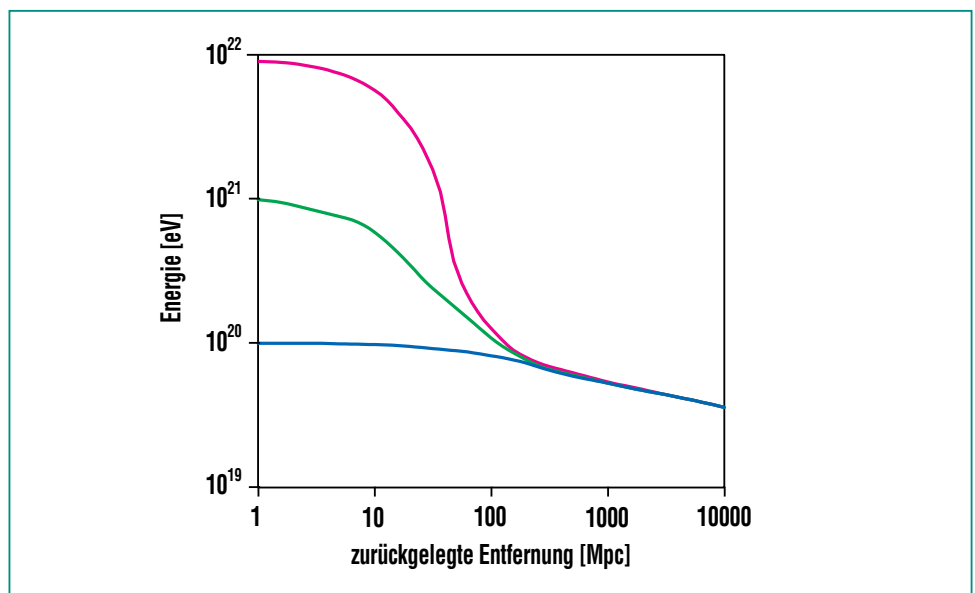


Abb. 5: Greisen-Zatsepin-Kuzmin-Effekt in Simulationsrechnungen [10]: Protonen mit drei unterschiedlichen Anfangsenergien werden nach etwa 100 Mpc auf die typische GZK-Schwellenenergie $5 \cdot 10^{19}$ eV „abgebremst“.

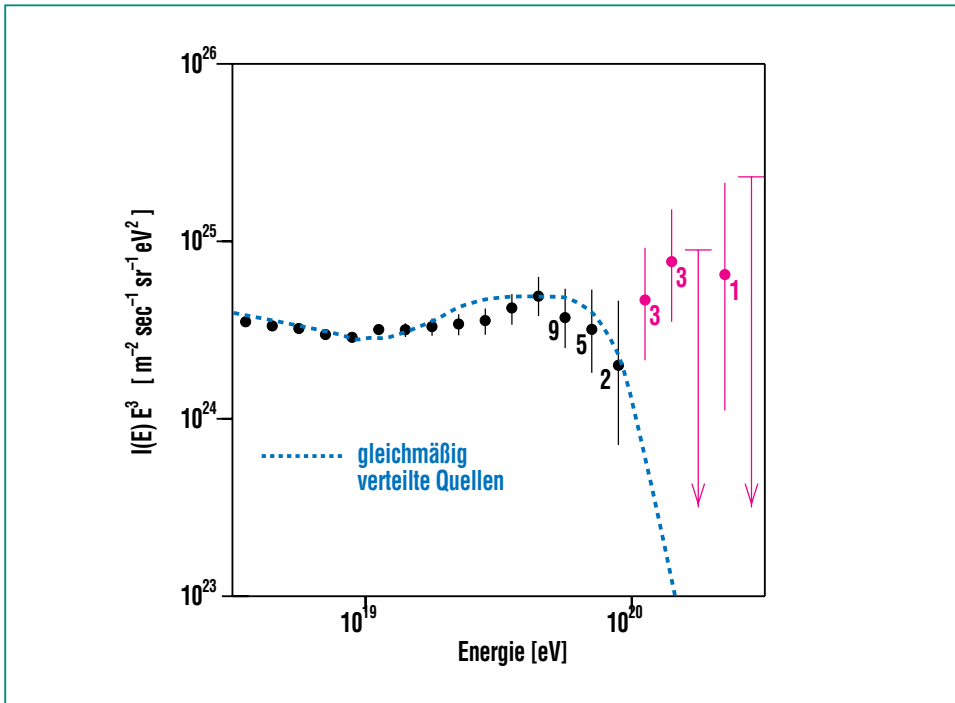


Abb. 6: AGASA-Energiespektrum [12]. Die Intensität $I(E)$ multipliziert mit E^3 ist gegen die gemessene Energie E aufgetragen. Die Daten zeigen nicht den aufgrund des GZK-Effekts erwarteten Abbruch (gestrichelte Kurve).

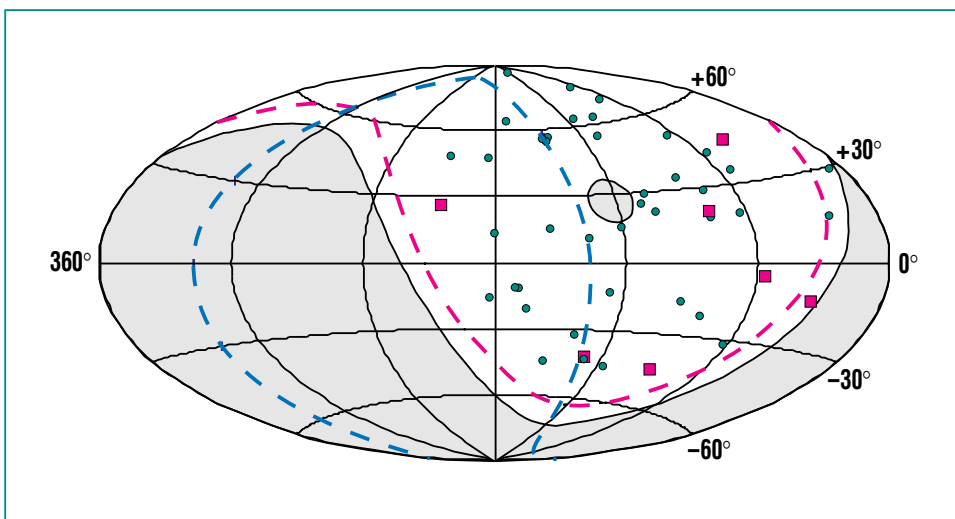


Abb. 7: Winkelverteilung aus dem AGASA-Experiment [12]. Die Richtungen gemessener Ereignisse für $E = (4-10) \cdot 10^{19}$ eV (grüne Punkte) und $E \geq 10^{20}$ eV (rote Quadrate) sind in galaktischen Koordinaten angegeben. Der graue Bereich (einschließlich des galaktischen Zentrums) ist dem Experiment unzugänglich. Der Äquator unserer Milchstraße ist die rot gestrichelte, der unseres Milchstraßenhaufens die blau gestrichelte Kurve. In diesen Richtungen gibt es besonders viele Sterne bzw. Galaxien, ohne dass von dort entsprechend viele höchstenergetische Teilchen einzufallen scheinen.

schiedlichen Reichweiten leichter und schwerer Kerne modifizieren.

Der GZK-Effekt bewirkt also in Abhängigkeit von der Wegstrecke der kosmischen Teilchen eine Energiebegrenzung und eine Anreicherung leichter Kerne. Daraus ergibt sich eine charakteristische Deformation des Energiespektrums, die sich mit entsprechend vielen Ereignissen rekonstruieren ließe.

Die oben erwähnten Pionen sind instabil und bei ihrem Zerfall entstehen charakteristische hochenergetische Neutrinos, die man möglicherweise mit kubikkilometergroßen Wasser- oder Eisdetektoren nachweisen kann. Entsprechende Ideen wie etwa ICECUBE als Nachfolgeprojekt von AMANDA im Südpoleis (Antarctic Muon And Neutrino Detection Array) oder ANTARES im Mittelmeer werden derzeit mit Detailstudien verfolgt [11].

Das obere Ende des Spektrums aus dem AGASA-Experiment ist in Abb. 6 dargestellt, wobei die Intensität mit E^3 multipliziert wurde, um im Gegensatz zu Abb. 1 eine ungefähr flache Kurve zu erhalten [12]. Der Verlauf folgt zumindest mit der verfügbaren Statistik nicht der gestrichelten Kurve, die den erwarteten Abbruch aufgrund des GZK-Effekts wiedergibt. Der einfache Schluss auf relativ nahe Quellen verbietet sich aber aufgrund des bereits diskutierten Hillas-Diagramms. Klärende Hinweise könnten sich auch aus der Richtungsverteilung der Teilchen ergeben. Bisher wurde eine nahezu isotrope Gesamtverteilung beobachtet, einige wenige Ereig-

nispaare stammen aus fast gleichen Richtungen (Abb. 7).

Zahlreiche Forscher spekulieren, ob überhaupt eine Beschleunigung von Teilchen stattfindet („bottom-up-Szenario“). Als Alternativen und aus Mangel an konventionellen Erklärungsmöglichkeiten werden so genannte „top-down-Szenarien“ diskutiert, in denen die beobachteten Teilchen bereits mit hoher Energie entstehen. Einige dieser Modelle sind X-Bosonfragmentation von topologischen Defekten, der Z^0 -Zerfall an kosmologischen Neutrinos oder zerfallende massive Reliktteilchen aus der Urknallphase [13]. Als Quellen werden auch supersymmetrische Neutralteilchen diskutiert und sogar Neutronen, deren vorzeitiger Zerfall durch eine Verletzung der Lorentz-Invarianz unterdrückt ist [14]. Diese Modelle führen auf primäre Energiespektren, deren Hochenergieanteil wesentlich größer als bei Schockwellenbeschleunigung ist. Zusammen mit dem GZK-Effekt ergeben sich in vielen Fällen überprüfbare Vorhersagen für die Form des Energiespektrums und die Winkelverteilung der Quellen.

Letztlich kann nur eine erheblich verbesserte Statistik Aufschluss darüber geben, ob die Verteilung von identifizierten Punktquellen der bekannten Materieverteilung, derjenigen von Halo-Modellen mit Dunkler Materie, oder der aus den „top-down“ Modellen erwarteten Isotropie folgt.

Die nächsten Schritte

In einer Reihe von Workshops in den letzten zehn Jahren wurde die konkrete Idee entwickelt, einen sehr großen, preisgünstigen und robusten Detektor zu entwerfen, der die verfügbare Statistik der höchstenergetischen Ereignisse um mindestens eine Größenordnung verbessern sollte. In dem nach Pierre Auger benannten Projekt kombiniert ein Hybriddetektor erstmalig für individuelle Ereignisse die Fluoreszenzlichtmessung in der Luft mit dem Schauernachweis am Boden.

Idealerweise sollte der gesamte Himmel mit je einem Observatorium auf der Nord- und Südhalbkugel beobachtet werden können. Die wichtigsten Anforderungen an den Standort waren eine ca. 50 km durchmessende Ebene ohne störende Einrichtungen, ein klarer Nachthimmel, Infrastruktur am Rande des Geländes und Projektförderung durch das Sitzland. Die Wahl fiel auf Millard County in Utah und auf die Pampa Amarilla in der argentinischen Provinz Mendoza. Die begrenzten Ressourcen führten zunächst zu einer Konzentration auf den südlichen Detektor, der in diesem Heft noch näher beschrieben wird.

Umfangreiche Simulationsrechnungen zur Schauerentwicklung in der Erdatmosphäre und zur Signalformung in den Detektoren begleiten die experimentellen Ar-

beiten. Die Rechnungen können teilweise mit den im KASCADE-Experiment gewonnenen Daten bei niedrigerer Energie verifiziert werden. Die erforderliche Rechenzeit skaliert allerdings mit der Primärenergie, so dass auch hier neue methodische Ansätze nötig sind.

Der nächste Schritt schließlich ist eine möglichst vollständige Abdeckung des Himmels durch das nördliche Pierre Auger-Observatorium, möglicherweise ergänzt durch ein großes Feld von Fluoreszenzteleskopen (Telescope Array-Projekt). Diese Art der Luftschauermessung ließe sich in einem übernächsten Schritt mit Hilfe von Satellitenbeobachtung auf die ganze Erdatmosphäre ausdehnen (OWL, Airwatch, EUSO). Erste Pilotstudien hierzu wurden bereits gestartet.

Zusammenfassung

Die Untersuchung der kosmischen Strahlung, ihrer Zusammensetzung, Herkunft und Energie bis in Bereiche, die hundertmillionenfach über den irdischen Beschleunigern liegen, bleibt ein spannendes und zukunftsweisendes Unternehmen. Unser Verständnis von der Struktur der Materie und dem Wirken der fundamentalen Kräfte profitiert enorm von den interdisziplinären Synergien in der Teilchenastrophysik, die alle Wellenlängenbereiche und alle Teilchen aus dem Kosmos ausnutzt.

Literatur

- [1] P. Auger,
Rev. Mod. Phys. 11 (1938) 288.
- [2] J. Cronin,
Rev. Mod. Phys. 71 (1999) 165;
S. Yoshida, H. Dai,
J. Phys. G24 (1998) 905.
- [3] D. J. Bird et al.,
Phys. Rev. Lett. 71 (1993) 3401;
D. J. Bird et al.,
Astrophys. J. 441 (1995) 144.
- [4] R. Blandford, D. Eichler,
Phys. Rep. 154 (1987) 1;
L. O'C. Drury,
Contemp. Phys. 35 (1994) 231.
- [5] H. Krawczynki et al.,
Phys. Bl. 56, Nr.3 (2000) 47.
- [6] H. J. Völk, P. L. Biermann,
Astrophys. J. 333 (1988) L65;
B. Wiebel-Sooth, P. L. Biermann,
Landolt-Börnstein, vol. VI/3c,
Springer Publ. Comp., 1999,
p. 37 – 90.
- [7] M. Hillas,
Ann. Rev. Astron. Astrophys. 22
(1984) 425.
- [8] G. R. Farrar, P. L. Biermann,
Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 3579.
- [9] K. Greisen,
Phys. Rev. Lett. 16 (1964) 748;
G. T. Zatsepin and V. A. Kuz'min,
JETP Letters 4 (1966) 78.
- [10] F. A. Aharonian, J. W. Cronin,
Phys. Rev. D50 (1994) 1892.
- [11] Ch. Spiering,
Phys. Bl. 56, Nr.3 (2000) 53.
- [12] M. Takeda, et al.
(AGASA Coll.), *Phys. Rev. Lett.*
81 (1998) 1163,
astro-ph/9902239.
- [13] G. Sigl, S. Lee,
P. Bhattacharjee, S. Yoshida,
Phys. Rev. D59 (1999) 43504.
- [14] S. Coleman, S.L. Glashow,
Phys. Rev. D59 (1999) 116008.