

Partikel in der Pampa

Am Pierre-Auger-Observatorium wird nach den energiereichsten Teilchen des Alls gesucht.

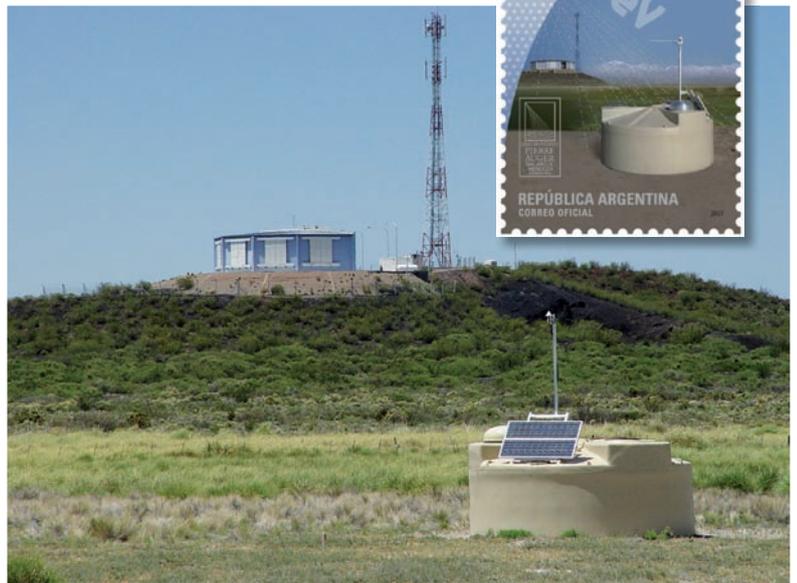
Johannes Blümer

Kosmische Strahlung trifft ständig auf die Erde. Die Teilchen stammen aus der Sonne, von Supernova-Explosionen in unserer Milchstraße – und aus anderen Galaxien. Besonders interessant sind die seltenen Ereignisse, bei denen einzelne Atomkerne kinetische Energien von vielen Joule aufweisen. Ihre Identifizierung, die Suche nach ihrer Herkunft und die Physik ihrer Wechselwirkung mit der Atmosphäre sind die Forschungsziele des Pierre-Auger-Observatoriums.

Victor Hess entdeckte 1912 die Kosmische Strahlung mithilfe von Elektrometern, als er mit Ballons auf bis zu fünf Kilometer Höhe aufstieg: Seine Messgeräte registrierten die Ionisation der Luft durch die schnellen Protonen und schwerere Atomkerne aus dem All. Pierre Auger und andere Pioniere errichteten 1938 auf dem Jungfrauojoch im Berner Oberland die ersten Detektorfelder mit bis zu 300 Metern Ausdehnung. Die gleichzeitig verzeichneten Signale auf so großen Flächen führten sie auf Kaskaden von Sekundärteilchen zurück, die aus der Wechselwirkung eines einzelnen Partikels mit der Luft entstehen. Die Energien der ausgedehnten Luftschauer schätzten sie schon damals auf mehr als 10^{15} eV [1].

Die Zusammensetzung und das Spektrum der Kosmischen Strahlung wurden in den folgenden Jahrzehnten intensiv untersucht. Die Intensität pro Energieintervall folgt im Wesentlichen einem Potenzgesetz und fällt etwa kubisch mit der Energie ab. Enrico Fermi gelang schon 1948 eine qualitative Erklärung: Geladene Teilchen aus dem interstellaren Plasma sind zunächst in Magnetfeldern eingesperrt und streuen zufällig immer wieder an Stoßfronten, die sich zum Beispiel um Supernovae herum bilden, bis ihre Energie ausreicht, die Region zu verlassen. Seither versuchen Theoretiker mit zahlreichen Varianten dieser Idee, das Spektrum und die kleinen, aber wichtigen Abweichungen davon zu erklären (Abb. 1).

Direkte Messungen mit Ballonen und Satelliten sind auf Energien von weniger als 10^{14} eV begrenzt, weil der Fluss hier bereits auf wenige Partikel pro Quadratmeter und Tag abfällt. Die Identifizierung der Primärteilchen wird dadurch außerordentlich erschwert und gelingt mit ausgedehnten Luftschauern nur indirekt: Proton-induzierte Kaskaden dringen tiefer in die Atmosphäre ein als die schwerer Kerne, diese wechselwirken in größerer Höhe und weisen sowohl in der Eindringtiefe



Ein Wasser-Cherenkov-Tank vor der Teleskopstation Los Leones im Süden des Detektorfelds, nahe der 18 000-Einwohner-Stadt Malargüe. Die Briefmarke der

Republik Argentinien illustriert die Hybridmessung von Luftschauern und würdigt die Bedeutung dieses internationalen Projekts für das Sitzland.

als auch in der Teilchenzahl deutlich kleinere Fluktuationen auf. Um Luftschauer zu untersuchen, bieten sich als Beobachtungsgrößen die Teilchendichten, Energiedepositionen und Ankunftszeiten in einem Detektorfeld am Boden an, das aus Szintillatoren oder Wasser-Cherenkov-Tanks bestehen kann. Die Primärpartikel aus dem All dringen meist bis in wenige Dutzend Kilometer Höhe in die Lufthülle ein. Sie ist also

KOMPAKT

- Das Pierre Auger-Observatorium in Argentinien misst mit bisher nicht gekannter Datenqualität das Energiespektrum der Kosmischen Strahlung im Übergang von galaktischer zu extragalaktischer Herkunft.
- Teilchen mit wenigen EeV Energie treffen isotrop ein, jene mit mehr als 50 bis 60 EeV zeigen eine Richtungskorrelation mit nahen extragalaktischen Objekten.
- Die Anteil schwerer Kerne steigt zwischen 2 und 35 EeV an – oder wir beobachten einen Anstieg des hadronischen Wirkungsquerschnitts oberhalb von 100 TeV.
- Das siebenmal größer geplante Auger-Nord-Observatorium in Colorado/USA soll den Energiebereich erweitern und erstmals Spektren von einzelnen extragalaktischen Quellen der Kosmischen Strahlung messen.

Prof. Dr. Johannes Blümer, Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP) und Institut für Kernphysik (IK), Karlsruhe Institut für Technologie, Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

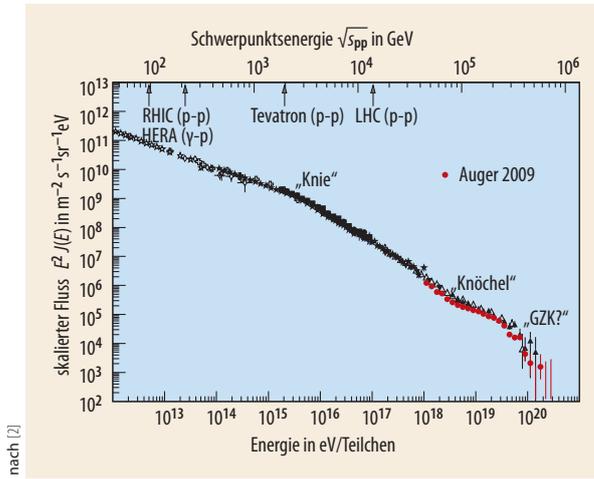


Abb. 1 Verschiedene Experimente (Auger: rot) sind nötig, um das Energiespektrum über den weiten Bereich von 10^{12} eV (1 TeV) bis über 10^{20} eV (100 EeV) zu messen. Zur Verdeutlichung der Formänderung ist der Teilchenfluss mit dem Quadrat der Energie multipliziert. Die Bedeutung von „Knie“, „Knöchel“ und „GZK?“ ist im Text beschrieben.

ein Absorber, in dem viele Generationen von Sekundärteilchen entstehen, die sich über mehrere Quadratkilometer am Erdboden verteilen¹⁾ (Abb. 2). Die Information über die Art des Primärteilchens geht dabei fast verloren; sie lässt sich erst durch die aufwändige optische Beobachtung des Schauerprofils in Ausbreitungsrichtung teilweise zurückgewinnen: Die Milliarden von Sekundärteilchen regen den Luftstickstoff zu einer Fluoreszenz zwischen 300 und 400 nm an. Abbildende Teleskope mit empfindlichen Hochgeschwindigkeitskameras erlauben dann, aus dem Verlauf der Leuchtstärke das Schauerprofil zu rekonstruieren, allerdings nur in klaren dunklen Nächten. 2005 wurde deshalb vorgeschlagen, auch die Radioemission von Luftschauern zu detektieren. Dieses Verfahren wird zurzeit im Projekt LOPES²⁾ und auch im Auger-Observatorium untersucht.

Was bringt die Teilchen in Fahrt?

Die Maximalenergie eines kosmischen Beschleunigers lässt sich abschätzen, wenn man das dort herrschende Magnetfeld kennt. Dabei muss der Larmor-Radius der Z -fach geladenen Teilchen kleiner als die Ausdehnung R der Beschleunigungsregion sein, in der ein Magnetfeld B vorliegt. Man erhält

$$E_{\max} \approx 10^{18} \text{ eV } Z \beta_s (R / \text{kpc}) (B / \mu\text{G}) \quad (1)$$

wobei $0 < \beta_s := v/c < 1$ in den einfachsten Modellen ein Maß für die Geschwindigkeit v der Stoßwellen ist.

Trägt man die bekannten oder vermuteten Ausdehnungen und Magnetfeldstärken von Beschleunigerkandidaten gegen einander auf, erhält man das so genannte Hillas-Diagramm (Abb. 3). Als Quellen innerhalb der Milchstraße kommen die Stoßwellen von Supernova-Überresten in Betracht: Wenige Supernova-Explosionen pro Jahrhundert können die Energiedichte der Kosmischen Strahlung aufrecht erhalten. Dabei ergibt

sich jedoch das „Beschleunigerproblem“: Supernovae, Neutronensterne, Gammastrahlenausbrüche, Aktive Galaktische Kerne oder die Jets von Radiogalaxien können nur mit Schwierigkeiten das Auftreten von Teilchen mit mehr als 100 EeV (10^{20} eV) erklären. Überhaupt ist die Modellierung der Quellen eine Herausforderung – denn man muss realistische Randbedingungen annehmen, um die Dissoziation von Kernen in zu dichten Quellen und Synchrotronverluste in zu starken Magnetfeldern zu vermeiden.

Die KASCADE³⁾-Kollaboration konnte im Jahr 2002 mit ihrem Detektorfeld auf dem heutigen Campus Nord des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) zeigen, dass das „Knie“ im Spektrum – d. h. die geänderte Steigung bei zirka $5 \cdot 10^{15}$ eV (Abb. 1) – auf das allmähliche Abnehmen Proton-artiger Schauer ($Z = 1$) zurückzuführen ist. Eisen-artige Schauer ($Z = 26$) zeigen hingegen keine Änderung im Spektrum. Die Interpretation hierfür liefert die Gleichung (1) für die Maximalenergie: Supernovae können Protonen bis auf etwas mehr als $5 \cdot 10^{15}$ eV beschleunigen. Momentan wird intensiv nach dem Auftreten eines entsprechenden „Eisen-Knies“ bei der 26-fachen Energie gesucht, um das Modell zu verifizieren.

Viele Ansätze gehen von einem Potenzgesetz $J(E) \sim E^{-2}$ direkt an der Quelle aus und erklären das E^{-3} -Spektrum damit, dass bei der Ausbreitung im Magnetfeld der Milchstraße die Entweichwahrscheinlichkeit proportional zur Energie ist. Bei Werten oberhalb von einem EeV können die Teilchen das galaktische Magnetfeld von typisch $3 \mu\text{G}$ mehr oder weniger direkt verlassen – daher dürfte Kosmische Strahlung höherer Energien auf extragalaktische Quellen zurückgehen.

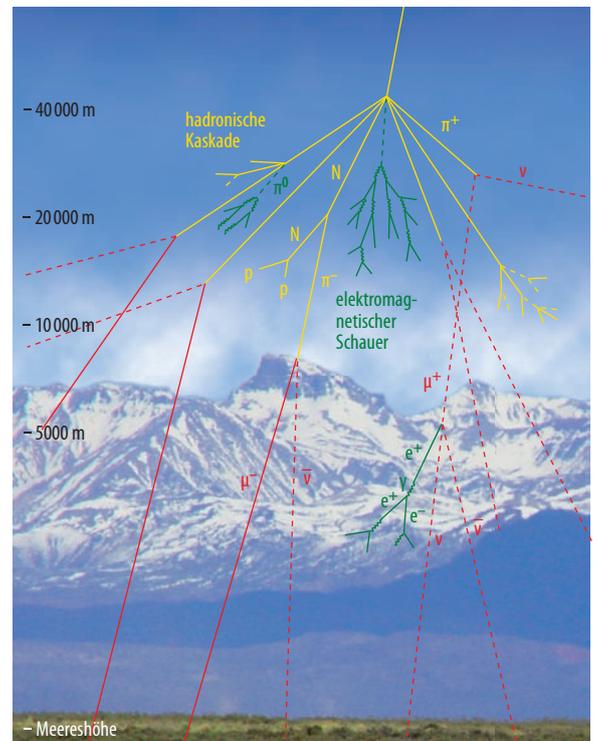


Abb. 2 Teilchen der Kosmischen Strahlung dringen in die Atmosphäre ein und erzeugen in wenigen Dutzend Kilometer Höhe Kaskaden von zig Millionen Sekundärteilchen.

1) Die Lufthülle hat eine Säulendichte von rund 1000 g/cm^2 in Meereshöhe, was 11 nuklearen Wechselwirkungslängen oder 27 elektromagnetischen Strahlungslängen entspricht.

2) Low Frequency Array Prototype Station, www.astro.ru.nl/lopes/

3) Karlsruhe Shower Core and Array Detector, www-ik.fzk.de/KASCADE_home.html

Pierre Auger, CERN, bearb.

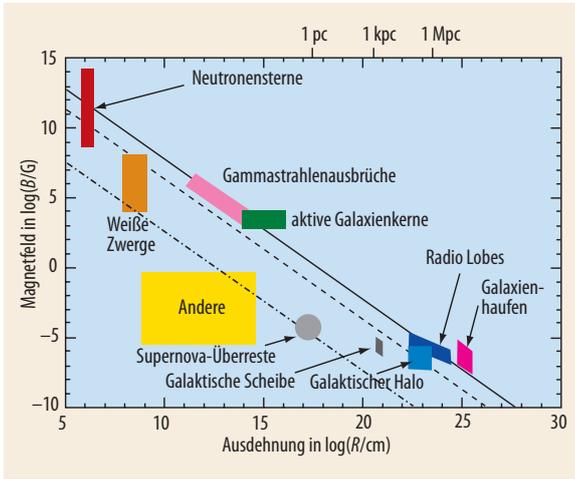


Abb. 3 Das Hillas-Diagramm zeigt typische Magnetfeldstärken und Ausdehnungen von Objekten, die als Beschleuniger infrage kommen: Nur diejenigen oberhalb der Linien sind leistungsfähig genug, um das jeweils nötige E_{\max} (gemäß Gl. 1) zu erreichen. Durchgezogene Linie: Protonen mit 100 EeV, gestrichelt: Eisen mit 100 EeV; Strichpunkte: Protonen mit 100 TeV.

Den ersten Luftschauer mit einer Energie von mehr als 100 EeV dokumentierte John Linsley 1963. Kenneth Greisen sowie Georgiy Zatsepin und Vadim Kuzmin formulierten kurz darauf den später nach ihnen gemeinsam benannten „GZK-Effekt“: Protonen müssen durch Streuung an den Photonen des kosmischen Mikrowellenhintergrunds und damit einher gehender Pionenproduktion Energie verlieren [3]. Dieses Phänomen setzt oberhalb von ungefähr 60 EeV ein, wenn die Photonen der Hintergrundstrahlung im Schwerpunktsystem als harte Gammastrahlung auftreten. Teilchen oberhalb der GZK-Schwelle sollten also aus unserer extragalaktischen Nachbarschaft stammen, sonst hätten sie ihre hohe Energie schon verloren. In dieser „GZK-Sphäre“ von rund 200 Mpc Radius sind die möglichen Quellen recht inhomogen verteilt, wie wir von astronomischen Durchmusterungen wissen. Neuere Rechnungen berücksichtigen jedoch nicht nur Protonen, sondern ziehen auch die Propagation von schweren Kernen über intergalaktische Distanzen in Betracht. Eisen und Protonen als typische Vertreter von schweren und leichten Kernen haben recht ähnliche Energieverlustlängen, während mittelschwere Kerne rascher dissoziieren. Die Hälfte der Teilchen mit mehr als 60 EeV muss danach aus Entfernungen von sogar nur 75 Mpc stammen.

Alternative Erklärungen im Rahmen von Top-down-Modellen gehen von einem Zerfall schwerer Teilchen aus, die vom Urknall bis heute überlebt haben, oder gar von topologischen Defekten im Raum-Zeit-Gefüge. Auch wurde eine Verletzung der Lorentz-Invarianz bei sehr hohen Energien vorgeschlagen, was die Mindestenergie für den GZK-Effekt verschieben könnte. Alle diese exotischen Szenarien vermeiden zwar das Beschleunigerproblem, das wir aus dem Hillas-Diagramm abgelesen haben, sagen jedoch aus den Zerfällen der postulierten neuen Teilchen relativ hohe Flüsse von Photonen und Neutrinos voraus und sollten sich darüber testen lassen. Ein ideales Observatorium



Abb. 4 Innenleben einer Teleskopstation – wird die Apertur hinter der Ringlinse (links) geöffnet, kann das Instrument aus segmentiertem Spiegel (rechts) und den Photomultiplierkameratele (Mitte) unter flachem Winkel einen Teil des Luftraums über dem Observatorium erfassen.

für Kosmische Strahlung müsste daher anhand der Schauereigenschaften alle infrage kommenden Primärteilchen von Protonen bis Eisen sowie Photonen und Neutrinos identifizieren können.

Die als „Knöchel“ bezeichnete Abflachung des Spektrums bei wenigen EeV (Abb. 1) trat in den 1990er-Jahren durch eine Reihe von Pioniermessungen mit Luftschauerdetektoren in Erscheinung. Für anhaltende Kontroversen sorgte die japanische AGASA-Kollaboration⁴⁾, die mit ihrem 110 km² großen Detektorfeld aus Szintillatorzählern zwischen 1992 und 2004 etwa ein Dutzend Ereignisse oberhalb der GZK-Schwelle registrierte. Zwischen 1996 und 2006 führte die amerikanische HiRes-Gruppe⁵⁾ Beobachtungen mit zwei optischen Detektoren in Utah/USA durch, ohne jedoch die Kontroverse über Teilchen jenseits der GZK-Schwelle eindeutig klären zu können. Eine Reihe wesentlicher Fragen waren ohne einen technologischen Durchbruch in der Beobachtung nicht zu beantworten: Wie ist die absolute Energieskala im EeV-Bereich? Um welche Teilchen handelt es sich? Was sind die Quellen der energiereichsten Teilchen der Kosmischen Strahlung? Können wir ihre Maximalenergie bestimmen? Kann man die extragalaktische Herkunft zeigen? Lassen sich die Quellen direkt am Himmel identifizieren?

Von der Idee zum Experiment

Vor diesem Hintergrund haben James Cronin und Alan Watson 1991 das Pierre Auger-Observatorium als zwei Detektorfelder von jeweils 5000 km² in der nördlichen und in der südlichen Hemisphäre vorgeschlagen. Ihr Konzept hat zwei bedeutende Erweiterungen erfahren. Die erste war die Hinzunahme von Fluoreszenzteleskopen zur Energiekalibration und Teilchenidentifizierung im südlichen Observatorium, dessen Bau 1999 in der westargentinischen Provinz Mendoza begann. Die zweite Modifikation betrifft

4) Akeno Giant Air Shower Array, www.akeno.icrr.u-tokyo.ac.jp/AGASA

5) High Resolution Fly's Eye Experiment, www.cosmic-ray.org

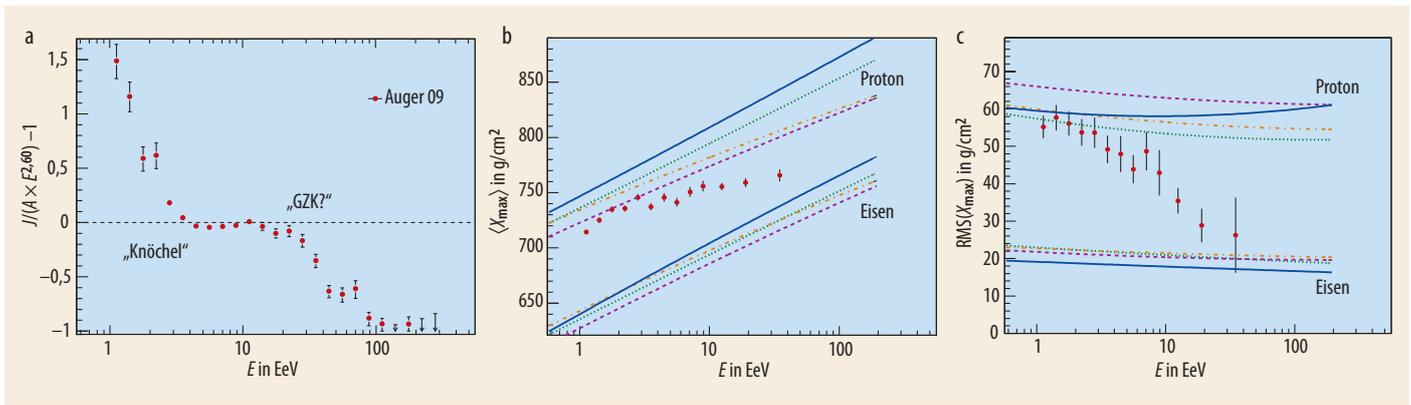


Abb. 5 (a) Detailansicht des Energiespektrums relativ zu einem Spektrum (gestrichelte Linie), das wie $E^{-2.60}$ abfällt. (b) Die mittlere Eindringtiefe von Schauern in die Luftsäule als Funktion

der Energie. Die Position des Schauersmaximums X_{\max} und seine Fluktuationen (c) sind mit den Fluoreszenzteleskopen direkt zugänglich. Die Kurven zeigen verschiedene Modellrechnungen

für leichte und schwere Primärteilchen. Der Abfall der Messpunkte oberhalb von 1 EeV deutet auf eine Abnahme des Anteils an Protonen hin.

das geplante Auger-Nord: Hier soll der Fokus auf den allerhöchsten Energien liegen. Da von den besonders interessanten Teilchen mit mehr als 60 EeV nur mit einem einzigen Treffer pro Quadratkilometer und Jahrhundert zu rechnen ist, soll seine Fläche um ein Vielfaches größer werden, als die des argentinischen Observatoriums.

Auger-Süd nutzt erstmals in großem Stil die Möglichkeiten moderner Technologie, wie drahtlose Datenkommunikation und komplexe optische Luftschauerdetektoren. Ein großes Feld am Boden sorgt im kontinuierlichen Betrieb für genügend Statistik, während zusätzlich in klaren dunklen Nächten Teleskope das schwache Fluoreszenzlicht der Schauer in Echtzeit elektronisch abbilden. Das 3000 km² große Detektorfeld besteht aus 1600 Wasser-Cherenkov-Tanks, aufgestellt im Abstand von eineinhalb Kilometern. An seinem Rand stehen vier Gruppen von je sechs Fluoreszenzteleskopen (Abb. auf S. 31). Die Tanks enthalten

12 m³ Reinstwasser und sind mit Solarstrom, Pufferbatterie, Datenfunk und GPS zur Zeitsynchronisation auf 20 ns ausgerüstet. Drei Photomultiplier lesen das Cherenkov-Licht der durchgehenden schnellen Teilchen aus. Das Signal wird kontinuierlich mit 40 MHz digitalisiert, lokal gespeichert und in verkürzter Form im Sekundentakt an die Zentralstation in der Stadt Malargüe gefunkt. Nur solche Datenmuster, bei denen mindestens drei benachbarte Stationen innerhalb von 100 μ s ein Ereignis verzeichnen, werden anschließend vollständig ausgelesen und dokumentiert. Die Ankunftsrichtung ergibt sich aus den unterschiedlichen Ankunftszeiten der Signale, was bei höheren Energien eine Winkelauflösung von besser als einem Grad ermöglicht.

In klaren dunklen Nächten dient die Atmosphäre als optisches Kalorimeter. Insgesamt 24 Teleskope arbeiten als System von Spiegelreflex-Digitalkameras (Abb. 4). Die Winkelauflösung der 440-Pixel-Photomultiplierkameras beträgt nur 1,5° pro Pixel, aber die Datenaufzeichnung mit 10 MHz und ein schnelles Triggersystem erlauben es, in Echtzeit nach Leuchtspuren von Luftschauern zu suchen und deren Bilder abzuspeichern. Hybridmessungen, also die gleichzeitige Messung mit Cherenkov-Bodendetektoren und Fluoreszenzteleskopen, liefern nach entsprechender Qualitätsauswahl etwa 7 % der gesamten Daten.

Das Observatorium verzeichnet pro Minute ein Ereignis, wovon etwa drei rekonstruierte Schauer pro Tag oberhalb von 3 EeV übrig bleiben. Bei dieser Energie erreicht das Detektorfeld die volle Effizienz, unabhängig von der Art und Richtung des Primärteilchens. Die Hybridtechnik drückt dabei die Mindestenergie auf unter 1 EeV: Selbst kleine Schauer, die nur einen einzigen Bodendetektor treffen, lassen sich in Verbindung mit einer Leuchtspur rekonstruieren.

Eine Kenngröße für die Leistungsfähigkeit eines Experiments ist das Produkt aus Messfläche, Raumwinkel (hier etwa 2 sr für Zenitwinkel bis 60°) und Beobachtungsdauer. Das Auger-Observatorium hat von 2004 bis Mitte 2009 eine „exposure“ von zirka 14 000 km² sr Jahre erreicht, etwa neunmal so viel wie das AGASA-Projekt in zwölf Jahren. Die Kombination des großen

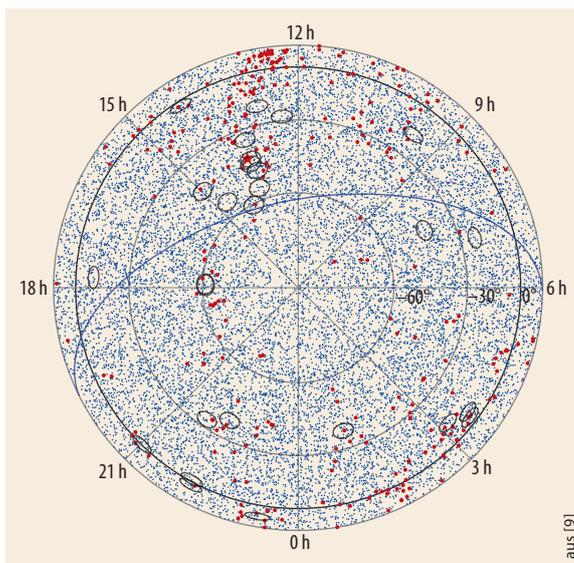


Abb. 6 Polarprojektion des Südhimmels mit Auger-Daten von 2004 bis 2007. Die blaue Linie zeigt den galaktischen Äquator. Centaurus A ist mit einem roten Stern markiert, andere nahe Aktive Galaxien (12. Véron-Cetty-Katalog) mit einem roten Punkt. Blaue Punkte repräsentieren Schauer mit mehr als 3 EeV, die 27 Ellipsen jene mit mehr als 56 EeV.

Detektorfelds mit optischen Fluoreszenzteleskopen hat sich als gute Wahl erwiesen: Die Datenqualität ist ausgezeichnet, und die riesige Anlage arbeitet zuverlässig.

Vergleicht man das in **Abb. 1** enthaltene von der Auger-Kollaboration gemessene Energiespektrum mit einer Kurve, die im fraglichen Energiebereich mit $E^{-2,60}$ verläuft, treten die Details besonders stark hervor (**Abb. 5a**). Der „Knöchel“ ist sehr deutlich bei 3 – 4 EeV zu erkennen, ebenso der mit „GZK?“ bezeichnete Knick bei 20 – 30 EeV. Dieser besitzt zwar alle Eigenschaften des vorhergesagten Effekts, lässt sich aber noch nicht mit Sicherheit davon unterscheiden, ob die Quellen hier einfach ihre Maximalenergie erreichen. Zwischen 50 und 60 EeV ist die Intensität auf die Hälfte jenes Werts gesunken, den man aus einer Extrapolation des extragalaktischen Spektrums erwartet [4]. Wenn die Deutung als GZK-Effekt richtig ist, sollten die wenigen Teilchen mit noch höheren Energien allesamt aus unserer kosmischen Nachbarschaft stammen. Sind die Magnetfelder zwischen Quelle und Erde nicht zu stark und die Energien hoch genug, dann müssten sie eine Richtungskorrelation mit ihren Quellen aufweisen.

Ein Maß für die Reichweite des Primärteilchens und seiner Sekundärpartikel auf ihrem Weg durch die Atmosphäre ist der Ort der maximalen Schauerentwicklung X_{\max} (**Abb. 5b**), der mit den Teleskopen direkt anhand der Richtung zur höchsten Lichtintensität eines Schauers ermittelt wird. Ein wichtiger Informationsträger sind auch die Fluktuationen davon, $\text{RMS}(X_{\max})$ [5] (**Abb. 5c**). Der Vergleich von X_{\max} mit Modellergebnissen für Protonen und Eisen zeigt im Bereich des „Knöchels“ eine Zunahme des Anteils schwerer Primärteilchen. Die Abnahme der Fluktuation von X_{\max} ist besonders deutlich und überdies von den Modellrechnungen ziemlich unabhängig. Das bedeutet, dass sich alle Schauer offenbar extrem ähnlich entwickeln! Dieser Befund ist zunächst unerwartet – mit überwiegend Eisen-artigen Schauern bei 10 EeV hatte man nicht gerechnet, eher mit Protonen. Diese Messungen stellen erstmals eine äußerst wertvolle unabhängige Information für Modelle bereit, die den „Knöchel“ als Übergang von galaktischer zu extragalaktischer Strahlung quantitativ erklären wollen.

Eine alternative Interpretation des Verhaltens von X_{\max} könnte aber auch in der Teilchenphysik liegen, z. B. in einem Anstieg des hadronischen Wirkungsquerschnitts und modifizierter Teilchenproduktion in diesem mit Beschleunigern nicht direkt zugänglichen Energiebereich. Hier gibt es Synergien mit Experimenten am LHC, die verbesserte Modelle für die Wechselwirkung von Hadronen ergeben dürften.

Photonen und Neutrinos als Primärteilchen lassen sich über ihre Schauerentwicklung ebenfalls identifizieren. Photonen dringen tiefer in die Atmosphäre ein als Protonen und weisen X_{\max} -Werte auf, die teilweise außerhalb des Diagramms in **Abb. 5b** liegen. Neutrinos sind die einzigen Teilchen, die auch bei ganz flachem Eintreffen auf die Atmosphäre das Detektorfeld erreichen und erst am Boden einen Schauer auslösen kön-



nen. Der Anteil von Photonen beträgt weniger als zwei Prozent im Energiebereich bis 10 EeV [6]. Zusammen mit dem Umstand, dass bisher keine Neutrinos beobachtet wurden [7], schränkt dies die vorhin erwähnten exotischen Modelle stark ein.

Abb. 7 Centaurus A in einer Überlagerung von Beobachtungen bei verschiedenen Wellenlängen.

Von der Einzelmessung zur Karte

Im November 2007 veröffentlichte die Auger-Kollaboration die erste Hochenergiekarte des Südhimmels im Lichte der Kosmischen Strahlung [8], in der gleiche Flächen gleichen Beobachtungsdauern entsprechen (**Abb. 6**). Die zirka 18 000 niederenergetischen Ereignisse in dreieinhalb Jahren sind gleichmäßig verteilt, während die 27 energiereichsten anisotrop auftreten und mit nahen aktiven Galaxien korrelieren. Dies muss noch nicht bedeuten, dass diese als Quellen identifiziert sind, weil es sich dabei um recht häufige Objekte handelt, die in etwa der allgemeinen Materieverteilung im Kosmos folgen.

Die Korrelation zwischen Teilchenrichtungen und Quellgebieten wurde statistischen Tests unterzogen, sie hat sich seit 2007 von 69 auf 39 % verringert, wobei die statistische Signifikanz mit einem Vertrauensniveau von mehr als 99 % ungefähr konstant geblieben ist. Da extragalaktische Teilchen so selten sind, lassen sich die ersten Ergebnisse nicht rasch präzisieren, aber eine aktualisierte Himmelskarte und weiterführende Analyse der Korrelation sind für 2010 in Vorbereitung. Der in der Auger-Karte andeutungsweise zu erkennende Überschuss an Ereignissen aus der in nur gut 4 Mpc stehenden aktiven Galaxie Centaurus A (**Abb. 7**) hat sich mit zunehmender Datenbasis verstärkt.

Hier helfen in Zukunft mehr Statistik und die konsequente Verfolgung eines *Multi-Messenger*-Ansatzes weiter, der alle Informationen von verschiedenen Botenteilchen in einer gemeinsamen Analyse zusammenführt. Dazu gehören die geladenen Teilchen der

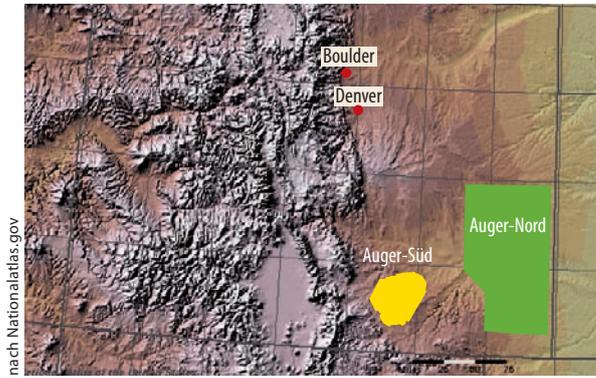


Abb. 8 Das nördliche Auger-Instrument soll eine Fläche von 20 000 km² in Südost-Colorado abdecken. Daneben ist der Umriss von Auger-Süd zum Größenvergleich abgebildet.

Kosmischen Strahlung, die Photonen der Gamma-Astronomie und Neutrinos aus dem Detektor IceCube in der Antarktis. Erste Kampagnen sind schon durchgeführt worden, z. B. eine Studie von Centaurus A mit dem Gamma-Observatorium HESS in Namibia [10].

Auger-Süd wird momentan erweitert, um den zugänglichen Energiebereich bis hinunter auf 0,1 EeV zu senken. Dann besteht ein Überlapp mit Anlagen wie KASCADE-Grande, das die galaktische Kosmische Strahlung vermisst. Drei neue Teleskope, die sich um 30° nach oben schwenken lassen und so auch nähere, lichtschwache Schauer im Blickfeld haben, ermöglichen künftig Hybridmessungen im niedrigen Energiebereich. Weitere Ziele sind eine noch bessere Messung der Schauerpartikel mit unterirdischen Myonendetektoren und eine groß angelegte Studie der Radioemission von Luftschauern mit einem 20 Quadratkilometer großen Antennenfeld.

Im Bereich von 100 EeV ist der Mangel an Ereignissen jenseits der GZK-Schwelle besonders schmerzlich für die weitere Überprüfung der extragalaktischen Herkunft der Teilchen. Der Datenpunkt für die Schauerprofile bei den höchsten Energien in Abb. 5b/c enthält nur 34 Hybrid-Ereignisse nach mehreren Jahren Messzeit – Auger-Süd ist zu klein, um die Komposition jenseits der GZK-Schwelle mit praktikablem Zeitaufwand messen zu können. Die weitere Analyse der Schauerprofile wird sich auch mit Fragen aus der Teilchenphysik beschäftigen, so lässt sich beispielsweise der Wirkungsquerschnitt von Proton-Proton-Stößen bei Schwerpunktsenergien von 300 TeV bestimmen und mit den LHC-Daten bei 14 TeV vergleichen.

Das japanisch-amerikanische Telescope Array⁶⁾ (TA) in Utah zielt auf eine Überprüfung des AGASA-Experiments. Mit 576 Szintillatoren und drei Fluoreszenzteleskopen auf 762 Quadratkilometern wird auch hier die Hybridtechnik angewandt. Das TA nimmt seit Anfang 2008 Daten und wird weitere Ergebnisse zum Übergang von galaktischer zu extragalaktischer Strahlung zwischen 0,1 und 10 EeV liefern.

Die Fortführung der Messungen zu höheren Energien hin erfordert ein wesentlich größeres Detektorfeld. Der beste und nach derzeitigem Stand einzige mögliche Standort für Auger-Nord liegt in Südost-Colorado, USA. Die verfügbare Fläche beträgt hier 20 000 km²,

siebenmal so viel wie in Argentinien (Abb. 8). Die Beobachtung der zweiten Himmelshälfte kommt als Bonus hinzu – ein „astronomisches“ Argument.

Auger-Nord erweitert die Suche nach Quellen, die Teilchenidentifizierung und das Studium der Wechselwirkungen auf über 100 EeV. Es wird erstmals genügend Daten sammeln, um den hellsten Quellen ein eigenes Energiespektrum zuordnen zu können. Die Basiskonfiguration sieht 4000 Wasser-Cherenkov-Detektoren auf einem Gitter von 2,3 km vor, ergänzt durch 400 weitere mit geringeren Abständen. Eine fast vollständige Abdeckung mit Fluoreszenzteleskopen ist insbesondere für die Detailmessungen der Luftschauer bei den höchsten Energien wichtig [11]. Am Bau wollen sich 482 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler von rund 80 Instituten aus allen 18 Mitgliedsländern des Auger-Projekts beteiligen; in Deutschland sind dies die Universitäten Aachen, Siegen und Wuppertal sowie ganz wesentlich die Helmholtz-Gemeinschaft mit dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Kein anderes Projekt wird auf absehbare Zeit in der Lage sein, bei diesen Energien zu messen. Das vorwiegend japanische Experiment JEM-EUSO⁷⁾ wird frühestens 2015 ein Fluoreszenzteleskop am japanischen Modul der Internationalen Raumstation ISS anbringen. Es reicht allerdings hinsichtlich Winkelauflösung und Teilchenidentifizierung nicht an die Kapazität von Auger-Süd und -Nord heran. JEM-EUSO ist dennoch als Pilotprojekt sehr wichtig, um die Machbarkeit von weltraumbasierten Beobachtungen zu demonstrieren: Das Blickfeld von 30° aus 400 Kilometern Höhe ergibt die 60-fache atmosphärische Abdeckung von Auger-Süd! Somit wäre SuperEUSO, ein frei fliegender Satellit mit hoher Auflösung, der übernächste Schritt hin zum ultimativen Observatorium für Kosmische Strahlung.

Literatur

- [1] P. Auger, Rev. Mod. Phys. **11**, 288 (1938)
- [2] J. Blümer, R. Engel und J. Hörandel, PPNP **63**, 293 (2009)
- [3] K. Greisen, Phys. Rev. Lett. **16**, 748 (1966); G. T. Zatsepin und V. A. Kuz'min, Sov. Phys. JETP Lett. **4**, 78 (1966)
- [4] J. Abraham et al., Phys. Lett. B **685**, 239 (2010)
- [5] J. Abraham et al., Phys. Rev. Lett. **104**, 09110 (2010)
- [6] J. Abraham et al., Astropart. Phys. **29**, 243 (2008)
- [7] J. Abraham et al., Phys. Rev. D **79**, 102001 (2009)
- [8] J. Abraham et al., Science **318**, 938 (2007)
- [9] J. Beatty und S. Westerhoff, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. **59**, 319 (2009)
- [10] F. Aharonian et al., ApJL **695**, L40 (2009)
- [11] J. Blümer et al., New J. Phys. **12**, 035001 (2010)

DER AUTOR

Johannes Blümer hat an der Universität Dortmund studiert und anschließend an der Universität Mainz und am CERN Neutrinoeigenschaften und CP-Verletzung untersucht. Seit 1999 ist er am Institut für Experimentelle Kernphysik und als Leiter des Instituts für Kernphysik des heutigen Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) tätig. Er ist Sprecher des KIT-Center Elementarteilchen- und Astroteilchenphysik (KCETA) und des Helmholtz-Programms Astroteilchenphysik.



6) www.telescopearray.org

7) Japanese Experiment Module – Extreme Universe Space Observatory, jemeuso.riken.jp/en