

Die kosmische Strahlung bei höchsten Energien

R.Engel, M. Roth, IK

Einleitung

In der kosmischen Strahlung existieren extrem hochenergetische Teilchen. Ihre Entdeckung in den sechziger Jahren des vorigen Jahrhunderts war eine große Überraschung. Sowohl die Art der Teilchen als auch ihre Quellen sind bislang unverstanden. Extragalaktische Objekte wie aktive Galaxien werden ebenso diskutiert wie neue physikalische Erscheinungen. So genannte Top-Down-Szenarien gehen beispielsweise davon aus, dass die beobachteten Teilchen in der Umgebung der Milchstraße bereits mit hoher Energie beim Zerfall unbekannter Teilchen (möglicherweise der Dunklen Materie) entstehen [1,2]. Der Nachweis der Teilchen ist sehr aufwändig, weil sie sehr selten sind: Bei diesen Energien erwartet man ungefähr ein Teilchen pro Quadratkilometer und Jahrhundert. Daher sind riesige Detektorflächen nötig, um ausreichend viele dieser Teilchen zu finden. Dies geschieht indirekt über die von ihnen in der Erdatmosphäre ausgelösten Kaskaden von Sekundärteilchen, den Luftschauern. Höchstenergetische Luftschauer oder abkürzend einfach nur Schauer enthalten viele Milliarden Sekundärteilchen, die am Erdboden eine Fläche von mehr als 50 km^2 überdecken können. Das Pierre-Auger-Observatorium hat die Untersuchung dieser höchstenergetischen kosmischen Strahlung zum Ziel. Das Observatorium wird daher aus je einer 3000 km^2 großen Detektoranlage auf der Nord- und Südhalbkugel bestehen. Das gewaltige Ausmaß des Pierre-Auger-Observatoriums ist nötig, um genug der höchstenergetischen Teilchen zu studieren –

denn sie sind so selten, dass sich im Schnitt nur eines pro Jahrhundert auf einer Fläche von einem Quadratkilometer nachweisen lässt. Das Pierre-Auger-Observatorium dürfte also etwa 30 pro Jahr aufspüren – fast doppelt so viele wie die 17, die alle früheren Anlagen seit den Sechzigerjahren zusammen gefunden haben. Wenn die Gelder bewilligt werden, beginnt außerdem 2009 der Bau des Nord-Observatoriums in Colorado, das zusammen mit dem argentinischen Pendant den gesamten Himmel überwachen soll. Erste Resultate wurden bereits veröffentlicht und sollen hier näher beleuchtet werden.

Das Rätsel der höchstenergetischen Strahlung

10^{20} Elektronvolt (eV) hatten die energiereichsten Teilchen, die im Laufe der letzten 40 Jahre in der kosmischen Strahlung aufgespürt

wurden. Zum Vergleich: $0,03 \text{ eV}$ beträgt die Bewegungsenergie von Luftmolekülen bei Raumtemperatur. 10^{20} eV – das ist eine makroskopische Größenordnung bei einem mikroskopischen Objekt! So etwas dürfte es nach konservativen physikalischen Abschätzungen gar nicht geben, weil man keine überzeugenden Quellen in unserer kosmischen Nachbarschaft kennt, und weil die Teilchen aus allen Richtungen mit ungefähr der gleichen Häufigkeit zu kommen scheinen, was für sehr weit entfernte Quellen spricht. Hierzu gibt es zwar diverse Kandidaten – doch aus so großen Distanzen dürften die Teilchen gar nicht mit den gemessenen 10^{20} eV zu uns gelangen. Das verbietet eine physikalische Grenze, der GZK-cutoff (Abb. 1).

GZK ist die Abkürzung der Namen dreier Physiker, die 1966 diese Grenze berechneten: K. Greisen (USA) sowie unabhängig G. T. Zatsepin und V. A. Kuz'min (UDSSR). Weil Protonen mit Energien über

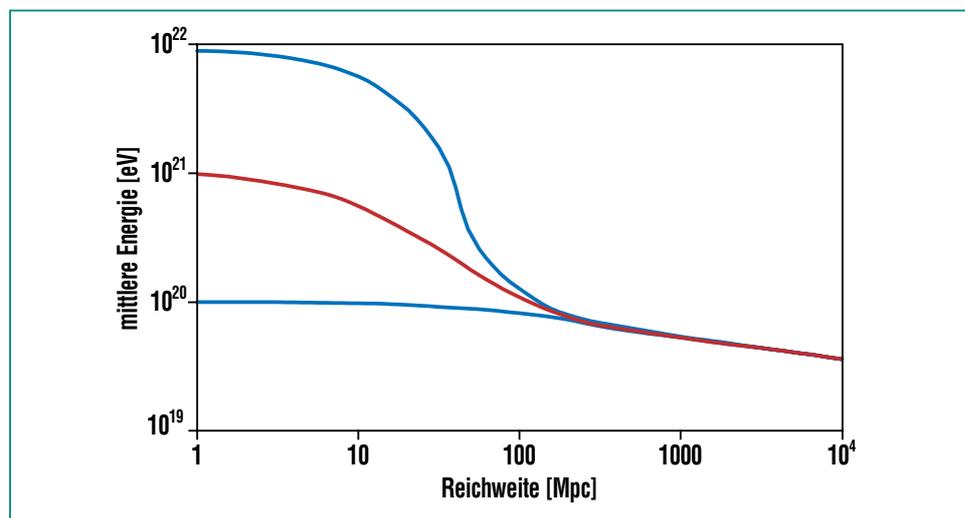
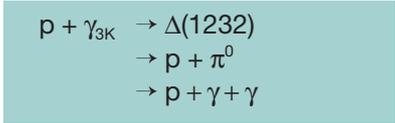
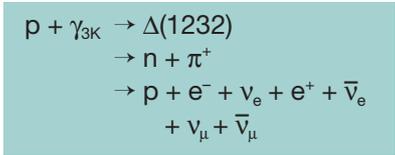


Abb. 1: Der GZK-Effekt als Protonenbremse: Protonen unterschiedlicher Anfangsenergien werden nach etwa 100 Megaparsec (326 Millionen Lichtjahren) durch die Kosmische Hintergrundstrahlung auf Energien unter 10^{20} eV „abgebremst“ [3]. Rätselhafter Weise wurden energiereichere Teilchen beobachtet.

5×10^{19} eV sehr effektiv mit Photonen der Kosmischen Hintergrundstrahlung wechselwirken, dem Restleuchten des Urknalls, verlieren sie einen Teil ihrer Energie. Denn die Hintergrundstrahlung ist zwar niederenergetisch (in unserem Bezugssystem eine Mikrowellenstrahlung mit nur 0,0007 eV), aber auf die nahezu lichtschnellen kosmischen Protonen wirkt sie wie Gammastrahlung. Dadurch wird jedes dieser Protonen angeregt. Man spricht von einer Delta(1232)-Resonanz. Letztlich wird ein neutrales Pion erzeugt, das selbst wieder in hochenergetische Photonen zerfällt:



Dieser Prozess führt ungefähr 20 Prozent der Proton-Energie ab und kann sich mehrfach wiederholen. Gleichwahrscheinlich ist auch eine Umwandlung eines Protons in ein Neutron unter Abstrahlung eines geladenen Pions, wobei das Neutron sich später wieder in ein energieärmeres Proton umwandelt:



Die Energieverluste sind der Grund für die GZK-Grenze: Ein Proton mit 8×10^{19} eV hat nur eine Chance von 10 % weiter als 100 Mpc (Megaparsec) zu kommen, und eines mit 3×10^{20} eV – der bisherige Rekordhalter – gar nur eine von 0,1 %, mehr als 50 Mpc zurückzulegen. Das bedeutet, dass die Hälfte der Teilchen mit 10^{20} eV aus einem Gebiet im Umkreis von

20 Mpc stammen sollte. Wären die Teilchen nicht Protonen sondern Eisenkerne, so läge ihre GZK-Grenze etwas weiter entfernt. Doch auch so sind in dieser – nach kosmologischen Maßstäben beurteilt – relativ geringen Entfernung keine Quellen bekannt. Wenn die Teilchen der Kosmischen Strahlung aber aus allen Richtungen mit der gleichen Häufigkeit eintreffen, stammen sie wahrscheinlich aus extrem großen Distanzen, denn einzelne Quellen in räumlicher Nähe sollten sich durch eine Häufung der Teilchen an bestimmten Stellen des Himmels bemerkbar machen. Allerdings gilt dies nur für Teilchen mit Energien um 10^{20} eV, da niederenergetischere geladene Teilchen durch galaktische und ex-

tragalaktische Magnetfelder stark abgeleget würden.

Wenn die GZK-Grenze wirklich überschritten wird, dürften revolutionäre Erkenntnisse bevorstehen:

1. Entweder stammen die Teilchen nicht aus kosmologischen Entfernungen, sondern werden in der Nähe erzeugt, etwa im galaktischen Halo, der die Milchstraßenscheibe kugelförmig umschließt. Dort könnten bislang unbekannte Teilchen zerfallen, die vielleicht noch aus der Zeit des Urknalls stammen. Dann müsste das Standardmodell der Elementarteilchenphysik erweitert werden. Aber dagegen spricht die Isotropie der Strahlung.

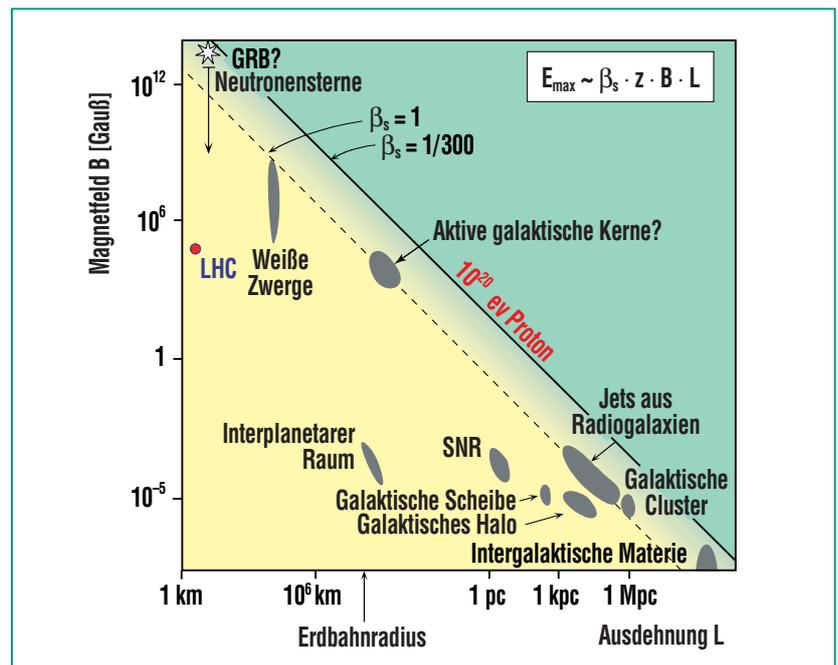


Abb. 2: Das Hillas-Diagramm: Das Diagramm zeigt, wie die Leistungsfähigkeit verschiedener Beschleunigungsquellen im All von der Größe und der dort herrschenden oder vermuteten Magnetfeldstärke abhängt [4]. Als Vergleich dient der LHC – der stärkste Teilchenbeschleuniger auf der Erde. Unterhalb der gestrichelten Linie können keine Protonen ($z = 1$) auf Energien größer 3×10^{20} eV beschleunigt werden. 1 Parsec (pc) entspricht 3,26 Lichtjahren.

2. Oder die GZK-Grenze wird durch einen unbekanntem physikalischen Effekt umgangen – vielleicht durch Verletzung der so genannten Lorentz-Invarianz, eines Grundpfeilers der Speziellen Relativitätstheorie, was letztlich das Dogma einer stets gleich bleibenden Vakuum-Lichtgeschwindigkeit zu Fall bringen würde. Aber dann wäre weiterhin unklar wie die hohe Bewegungsenergie der Teilchen zustande kommt. Kandidaten hierfür sind beispielsweise supermassive schwarze Löcher im Zentrum der Galaxien. Wenn sie Materie verschlingen, werden dabei Teilchen herausgeschleudert. Weil das „große Fressen“ aber überwiegend in der Frühzeit des Alls stattfand, gibt es nur wenige dieser aktiven Galaxien in relativer Nähe – innerhalb der GZK-Grenze. Dasselbe gilt für andere Beschleunigungsmechanismen: Kollisionen von Galaxien, Supernovae und Sternwinde in Starburst-Galaxien, Gammastrahlungsausbrüche sowie hochenergetische Teilchenströme (Jets), die in intergalaktische Gaswolken schießen. Unabhängig von der Entfernung und Art der Quellen ist die maximal erreichbare Energie E_{\max} beschleunigter Teilchen mit einer Ladung z , durch das vorherrschende Magnetfeld B und die Größe der Quelle L bestimmt: $E_{\max} \sim \beta_s \cdot z \cdot B \cdot L$. Der Faktor $\beta_s = v_s/c$ berücksichtigt die Ausbreitungsgeschwindigkeit v_s der beschleunigenden Schockwellen relativ zur Lichtgeschwindigkeit c (siehe das nach M. Hillas benannte Diagramm in Abb. 2). Neben diesen Quellen, die Teilchen beschleunigen können, gibt es weitere Szenarien, so genannte „Nicht-Beschleuniger-Modelle“, bei denen Protonen ihre Energie nicht durch Beschleunigung sondern durch den Zerfall noch höherenergetischer Teilchen erhalten – also als niederenergetische Zerfallsprodukte – etwa durch zerfallende topologische Defekte (Überbleibsel des Urknalls in riesigen Entfernungen) oder unter anderem durch den Zerfall von Z^0 -Bosonen, den Vermittlern der schwachen Kernkraft, die bei der Kollision hochenergetischer Neutrinos mit Relikt-Neutrinos des Urknalls entstehen könnten.

nen Protonen ihre Energie nicht durch Beschleunigung sondern durch den Zerfall noch höherenergetischer Teilchen erhalten – also als niederenergetische Zerfallsprodukte – etwa durch zerfallende topologische Defekte (Überbleibsel des Urknalls in riesigen Entfernungen) oder unter anderem durch den Zerfall von Z^0 -Bosonen, den Vermittlern der schwachen Kernkraft, die bei der Kollision hochenergetischer Neutrinos mit Relikt-Neutrinos des Urknalls entstehen könnten.

Erste Resultate

Die Messungen des Pierre-Auger-Detektors mit seinen insgesamt 1600 Wassertanks werden verwendet, um mit der großen Anzahl nachgewiesener Ereignisse deren Energieverteilung – das Energiespektrum der kosmischen

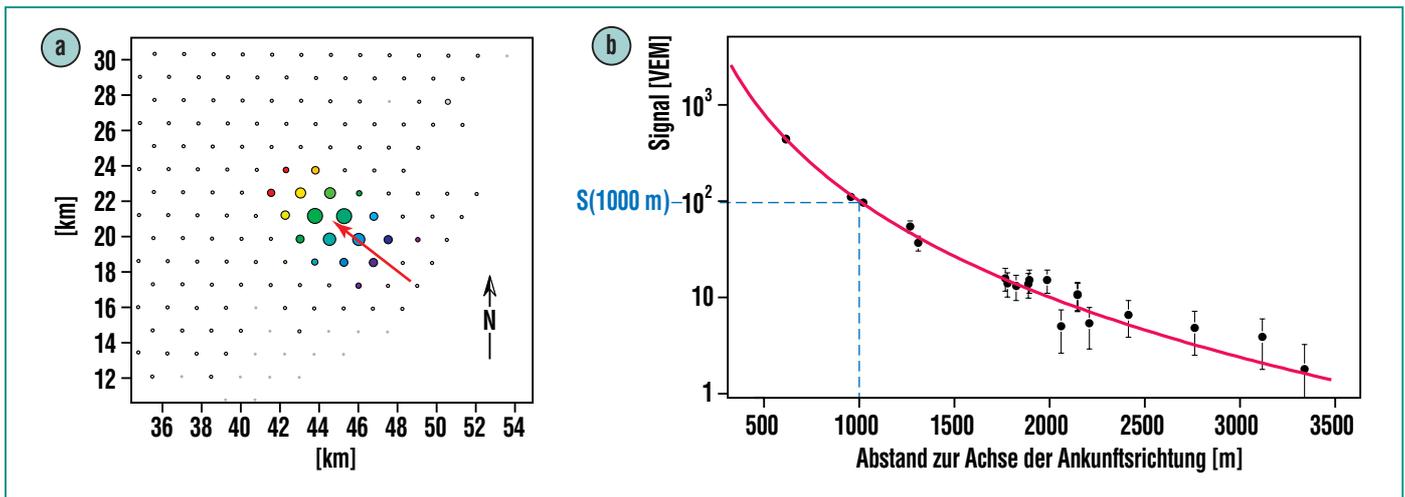


Abb. 3: a) Der Fußabdruck, nämlich das zweidimensionale Abbild des Luftschauers auf dem Erdboden, ist in den Tanks (farbige Kreise) nachweisbar. Der Farbverlauf und der rote Pfeil deuten die Ankunftsrichtung des Luftschauers aus Südosten kommend an. Leere Kreise entsprechen Tanks ohne Signal. Zusätzlich zeigt der rote Pfeil das Zentrum des Luftschauers.

b) Die Signale als Funktion des Abstandes zur Achse der Ankunftsrichtung des ursprünglichen Teilchens zeigen eine vom Zentrum abfallende Verteilung. Die Signale in den Wassertanks werden in relativen Einheiten des Signals eines einzelnen Myons angegeben (VEM: vertical equivalent muon).

Strahlung – zu bestimmen. Die Tatsache, dass der Luftschauer nur durch einen zweidimensionalen „Fußabdruck“ (Abb. 3a) des Luftschauers auf dem Erdboden registriert wird, macht es unmöglich ohne Modellierung der physikalischen Prozesse oder durch eine weitere unabhängige Messung die Energie des ursprünglichen Teilchens zu bestimmen. Weitere Details insbesondere zum Luftschauernachweis und zu den zwei unterschiedlichen Detektortypen, nämlich das Detektorfeld aus Wassertanks und den vier am Rande des Detektorfelds installierten Fluoreszenzteleskopstationen, finden sich im Beitrag von H. O. Klages et al. auf S. 43 in diesem Heft.

Die Modellierung eines Luftschauers ist großen Unsicherheiten unterworfen, da die physikalischen Prozesse bei solch hohen Energien nur unzureichend bekannt sind. Hier kommt die große

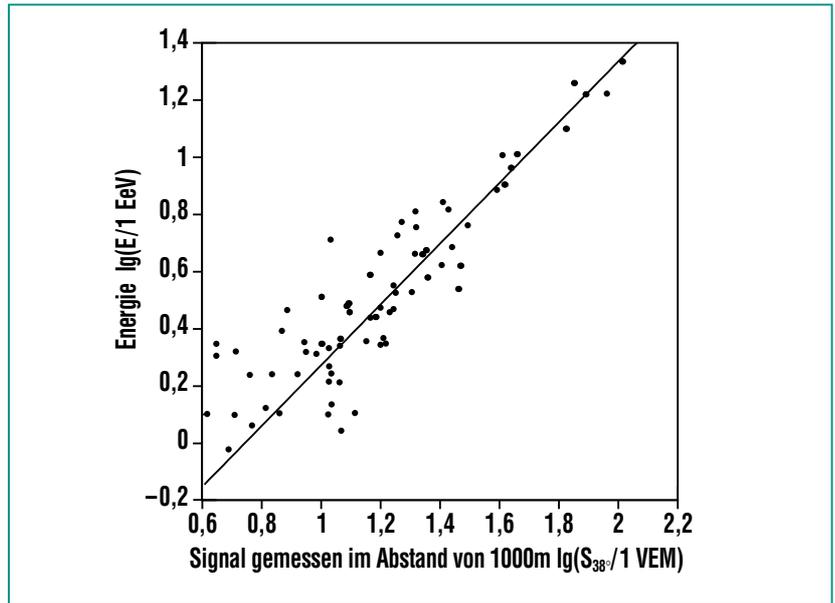


Abb. 4: Korrelation zwischen der kalorimetrischen Energiemessung durch die Fluoreszenzmessung und dem Energieschätzer S_{38° des Detektorfeldes.

Stärke des „Hybridexperiments“ Pierre Auger zum Tragen. Der zeitgleiche Nachweis desselben Luftschauers durch Fluoreszenztele-

skope ermöglicht ein quasi dreidimensionales Abbild des Luftschauers. Der Fluoreszenznachweis ist eine kalorimetrische Messung und gibt direkten Aufschluss über die Energie des Teilchens. Da die Teleskope nur bei klaren mondlosen Nächten Schauer detektieren können, reduziert sich die Messzeit allerdings auf 15 % pro Jahr. Nun macht man sich zunutze, dass die Energie sehr stark mit dem gemessenen Signal in den Wassertanks korreliert ist. Die Messgröße $S(1000m)$, die wie in Abb. 3b zu sehen durch das Detektorfeld bestimmt wird, ist ein geeignetes Maß für die Schätzung der Energie. Sie wird auf einen Einfallswinkel von 38° relativ zum Zenit umgerechnet und so ergibt sich die Größe S_{38° als winkelunabhängige Größe (Abb. 4).

Das sich hieraus ergebende Energiespektrum [5] zeigt Abb. 5. Die Resultate aus 2005 sind mit bisherigen Messungen verglichen.

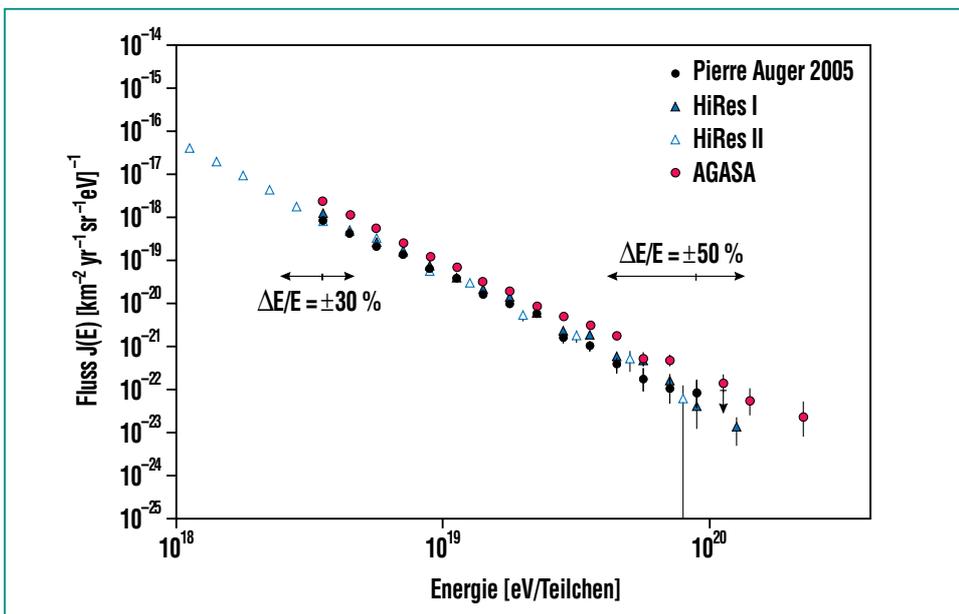


Abb. 5: Das vorläufige Energiespektrum des Pierre-Auger-Observatoriums, wie es auf Konferenzen seit 2005 präsentiert wird, im Vergleich zu weiteren veröffentlichten Daten der Experimente HiRes und AGASA [6].

Während durch das HiRes-Experiment ein GZK-Effekt angedeutet wird, scheinen die Daten des AGASA-Experiments keinen solchen zu unterstützen [6]. Erst durch eine lange Messperiode des Pierre-Auger-Observatoriums bei dem die Messunsicherheiten, z. B. durch noch unzureichende Kalibrierung der Detektoren verursacht, deutlich reduziert werden, kann eine definitive Aussage über die Existenz des Effekts getroffen werden.

Ein wesentliches Resultat stellt auch die gemessene Obergrenze nachweisbarer Photonen dar (gezeigt in Abb. 6). Die Grenze ist insbesondere deshalb interessant, da viele der oben genannten „Nicht-Beschleuniger“-Modelle einen großen Anteil an Photonen in der kosmischen Strahlung vorhersagen. Durch eine Untersuchung des Schauermaximums konnte die Obergrenze vorhandener Photonen bei einer Energie von 10^{19} eV auf weniger als 16 % bestimmt werden [7]. Diese Messung stößt erstmals in Bereiche von Vorhersagen vor. Durch zunehmende Anzahl gemessener Luftschauer kann die Grenze verbessert und somit können Modelle ausgeschlossen werden (siehe Abb. 6). Da beim GZK-Effekt ebenso Photonen entstehen, ist dies auch ein Test für dessen Existenz.

In einer ersten Durchmusterung des Himmels konnte keine Abweichung der Ankunftsrichtung kosmischer Strahlung von einer gleichmäßigen Verteilung beobachtet werden. Exemplarisch zeigt Abb. 7 Abweichungen von der mittleren Anzahl an Teilchen im Zentrum unserer Galaxie (GZ). Die Kreise deuten die Regionen nahe des Zentrums an, innerhalb derer die Ex-

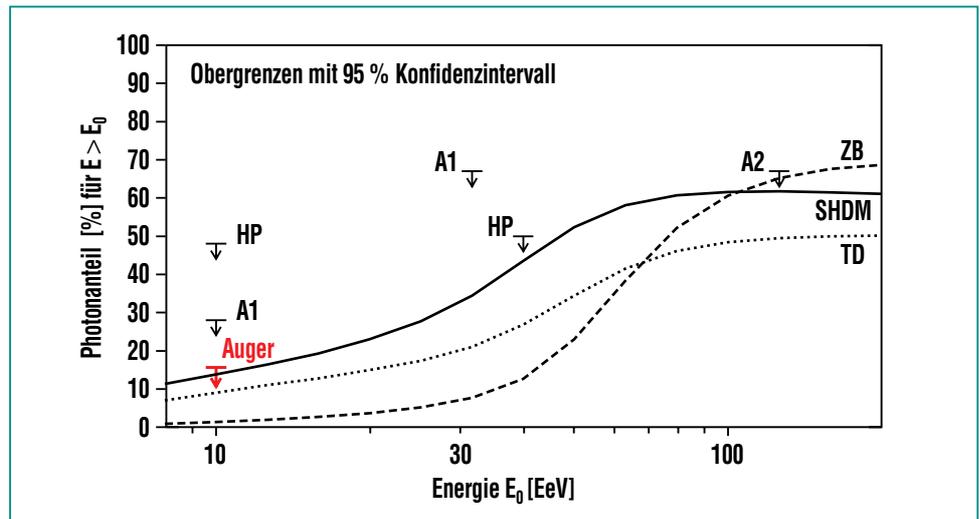


Abb. 6: Gezeigt ist die Obergrenze des Photonanteils in der kosmischen Strahlung bei einer Energie oberhalb von 10^{19} eV im Vergleich mit einer Zusammenstellung bereits gemessener Obergrenzen und Vorhersagen von „Nicht-Beschleuniger“-Modellen (ZB = Z-Burst-Modell; SHDM = Super-Heavy-Dark-Matter-Modell; TD = Topological-Defect-Modell; HP = Obergrenzen des Haverah-Park-Experiments; A1, A2 = Obergrenzen des AGASA-Experiments; vgl. die Zusammenstellung in [6]).

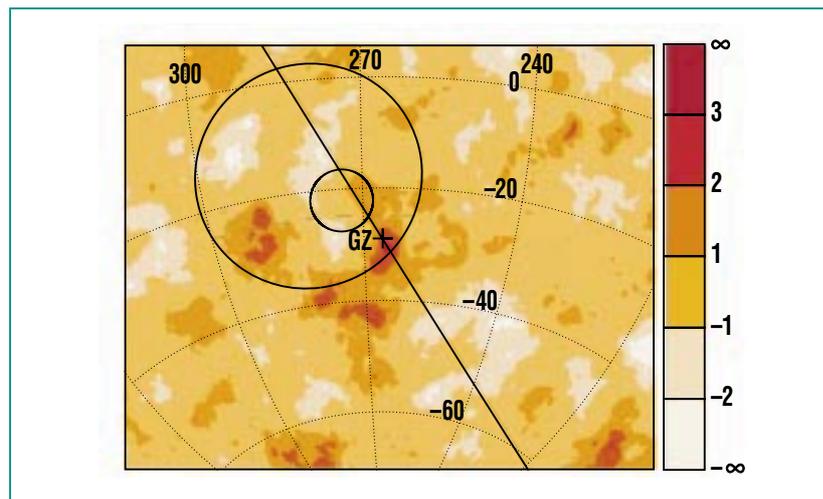


Abb. 7: Farbkodiert ist die Signifikanz der Abweichung des Mittelwertes für Ereignisse im Energiebereich von $1-2,5 \times 10^{18}$ eV dargestellt. Der Himmelsausschnitt zeigt an keiner Stelle eine Abweichung über den zu erwartenden statistischen Schwankungen.

perimente AGASA [8] und SUGAR [9] statistisch signifikante Abweichungen gesehen haben. Untersuchungen der Pierre-Auger-Daten konnten diese Abweichungen nicht

bestätigen, und dadurch konnten einige Modelle, die das galaktische Zentrum als Quelle der Kosmischen Strahlung annehmen, ausgeschlossen werden.

Ausblick

Das Pierre-Auger-Observatorium befindet sich zwar noch im Aufbau, liefert allerdings bereits vielversprechende Ergebnisse die auch schon publiziert wurden. Eine Vielzahl weiterer Untersuchungen, z. B. zur Häufigkeit verschiedener Elemente in der Kosmischen Strahlung,

zum Nachweis von Neutrinos und weitere Analysen zur Anisotropie zur Identifizierung möglicher Quellen, lassen höchst interessante Ergebnisse erwarten. Allerdings wird erst die Komplettierung mit dem Nord-Observatorium eine vollständige Himmelsdurchmusterung ermöglichen. Die spannende Phase des im Aufbau be-

findlichen Pierre-Auger-Projekts bringt schon eine erste reichhaltige Ernte physikalischer Resultate, die Antworten auf die drängendsten Fragen der Astroteilchenphysik liefern.

Literatur

- [1] A.V. Olinto,
Phys. Rep. 333 (2000) 329-348
- [2] P. Bhattacharjee, G. Sigl,
Phys. Rep. 327 (2000) 109
- [3] F.A. Aharonian, J. W. Cronin,
Phys. Rev D 50 (1994) 1892
- [4] M. Hillas,
Ann. Rev. Astron. Astrophys. 22 (1984) 425
- [5] P. Sommers
for the Pierre Auger collaboration,
Proc. 29th Int. Cosmic Ray Conf.,
Vol. 7 Pune (2005) 387
- [6] M. Nagano, A.A. Watson,
Rev. Mod. Phys. 72 (2000) 689
- [7] M. Risse
for the Pierre Auger collaboration,
Proc. 29th Int. Cosmic Ray Conf.,
Vol. 7 Pune (2005) 147.
- [8] N. Hayashida et al.,
Astropart. Phys. 10 (1999) 303
- [9] J.A. Bellido et al.,
Astropart. Phys. 15 (2001) 167