



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

Max-Planck-Institut  
für Radioastronomie



## Teilchen mit den größten beobachteten Energien im Universum

P.L. Biermann, H. Falcke, S. Casanova, T. Kellmann, Hyesook Lee, S. Markoff, Meli, G. Pavalas, V. Tudose, A. Vasile

mit

Eun-Joo Ahn/Univ. Chicago, A. Donea/Univ. Adelaide, Hyesung Kang/Pusan National Univ., P. Kronberg/Univ. Toronto und Los Alamos, N. Langer/Univ. Utrecht, G. Medina-Tanco/Univ. Sao Paolo, N. Nemes/Univ. Cluj-Napoca, A. Popescu/Univ. Bukarest, G. Pugliese/Santa Cruz, W. Rhode/Univ. Wuppertal, Dongsu Ryu/Chungnam National Univ., Daejeon, Eun-Suk Seo/Univ. of Maryland, College Park, G. Sigl/Institut d'Astrophysique, Paris, T. Stanev/Bartol Research Inst., Univ. of Delaware, Newark, Y. Wang/Purple Mountain Observatory, Nanjing, T. Kephardt, T. Weiler, S. Wick/Vanderbilt Univ., Nashville

Teilchen mit den größten Energien werden in den Beschleunigern bei CERN, DESY, Fermilab und Stanford zur Untersuchung dessen benutzt, was die Welt im Innersten zusammenhält. Aber wir beobachten Teilchen mit Energien, welche die im Labor erzeugten um das Millionenfache übertreffen: Energien bis zu  $3 \times 10^{20}$  eV (das sind 50 Joule). Diese Teilchen von Energien um  $10^{20}$  eV, ihre Natur, ihre Herkunft, ihre Wechselwirkungen zu erforschen ist daher eine der größten Herausforderungen der Physik heute.

Seit 1912 Victor Hess die ersten Beobachtungen der "kosmischen Strahlung" mit Ballonflügen machte, hat man gelernt, dass energetische Teilchen bis fast  $10^{21}$  eV unsere Erde treffen. Bei  $10^{20}$  eV beobachtet man etwa ein Teilchen pro  $\text{km}^2$  pro Jahrhundert.

Die Teilchen stammen wohl aus einer Art Tennisball an Stoßfronten; solche Stoßfronten werden in unserer Galaxie von explodierenden Sternen erzeugt. Magnetische Irregularitäten auf beiden Seiten einer Stoßfront wirken dabei über eine resonante Teilchen-Welle Wechselwirkung wie Tennisschläger. Die Grundidee dieses Prozesses geht auf Arbeiten von Enrico Fermi Ende der 1940er Jahre zurück. Wir konnten zeigen, dass Teilchen bis  $3 \times 10^{18}$  eV aus solchen Stoßfronten herrühren könnten. Ab dieser Energie gibt es Hinweise auf eine neue, vermutlich extragalaktische Komponente.

*Beobachtungsmethoden:* Die Teilchen der hohen Energien treffen in der oberen Erdatmosphäre auf einen Kern im ersten Stoß und initiieren so einen Luftschauer. Das ist eine Kaskade, bei der sowohl neue Teilchen erzeugt werden als auch Strahlung ausgesandt wird. Die neuen Teilchen dabei sind Pionen, Muonen, Elektronen und Positronen, sowie Neutrinos. Die Strahlung besteht zum einen aus Cherenkov-Strahlung in der Luft, Radiostrahlung durch Geosynchrotronstrahlung (zu deren Messung neue Experimente unterwegs sind) sowie zum anderen aus einer deutlichen Fluoreszenz-Emission angeregter Moleküle der Luft.

**Die extragalaktische Komponente:** Diese extragalaktische Komponente, jenseits von  $3 \times 10^{18}$  eV sichtbar, scheint überwiegend aus Protonen zu bestehen. Protonen, und noch stärker ganze Atomkerne, erleiden Energieverluste in der Wechselwirkung mit den Photonen des Mikrowellenhintergrundes vom Urknall. Das heißt, dass Protonen aus einer Entfernung von mehr als etwa 50 Mpc zurückgelegtem Weg den größten Teil ihrer Energie verloren haben. Bei der doppelten Annahme von a) vernachlässigbaren intergalaktischen Magnetfeldern, und b) einer gleichmäßigen Quellenverteilung sollte daher das Energiespektrum kosmischer Teilchen bei etwa  $5 \times 10^{19}$  eV abschneiden. Dieses Abschneiden wurde bisher nicht gefunden.

In **Abbildung 1** wird der Energiebereich kosmischer Teilchen von  $10^{17}$  eV bis  $10^{19}$  eV gezeigt, und darin Daten der Experimente Yakutsk, Akeno, HiRes und Fly's Eye (Zhen Cao & die HiRes-Kollaboration). Da die gegenseitige Kalibration der Experimente systematische Fehler in der Energie der Teilchen enthalten kann, wurden hier alle Daten auf das HiRes-Experiment renormiert. Dargestellt wird der differentielle Fluss als Funktion der Energie  $E$  mit dem Faktor  $E^3$  multipliziert. Man erkennt deutlich ein weiteres Abknicken bis etwa  $3 \times 10^{18}$  eV, was wir als das endgültige Abschneiden der galaktischen Komponente deuten.

In **Abbildung 2** werden AGASA Daten gezeigt zusammen mit einem simplen Modell des erwarteten Spektrums bei gleichmäßiger Quellenverteilung (Masahiro Teshima, AGASA, sowie Hans Blümer, Karl-Heinz Kampert, Karlsruhe).

In **Abbildung 3** sieht man die Himmelsverteilung aller AGASA Ereignisse (Masahiro Teshima, AGASA, sowie Hans Blümer, Karl-Heinz Kampert, Karlsruhe). Dabei ergibt sich eine Häufung von Dubletten und Tripel-Ereignissen in der Ankunftsrichtung am Himmel.

**Abbildung 4** zeigt das unrenormierte Spektrum aller existierenden und zitierfähigen Daten jenseits von etwa  $3 \times 10^{17}$  eV, aus HiRes, Fly's Eye, AGASA und Akeno (Gordon Thomson & Doug Bergman, Rutgers Univ.).

Alle vier Abbildungen entsprechen dem Stand vom Sommer 2001, dem Zeitpunkt der letzten großen "International Cosmic Ray

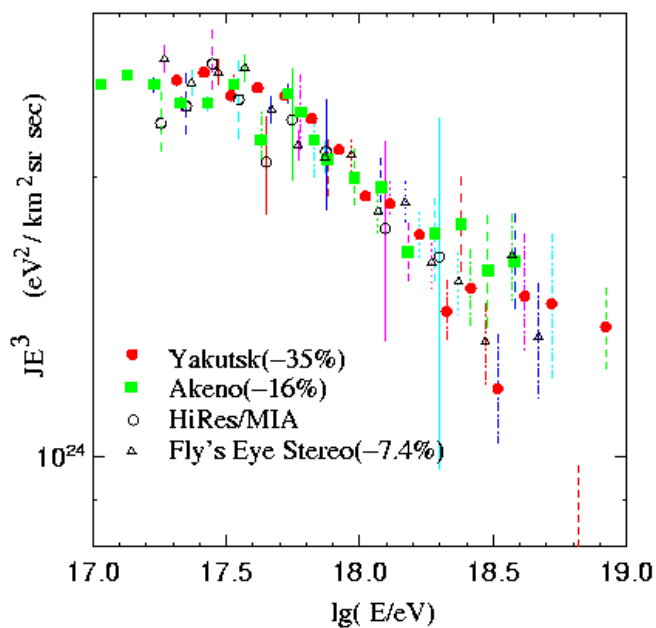


Abbildung 1

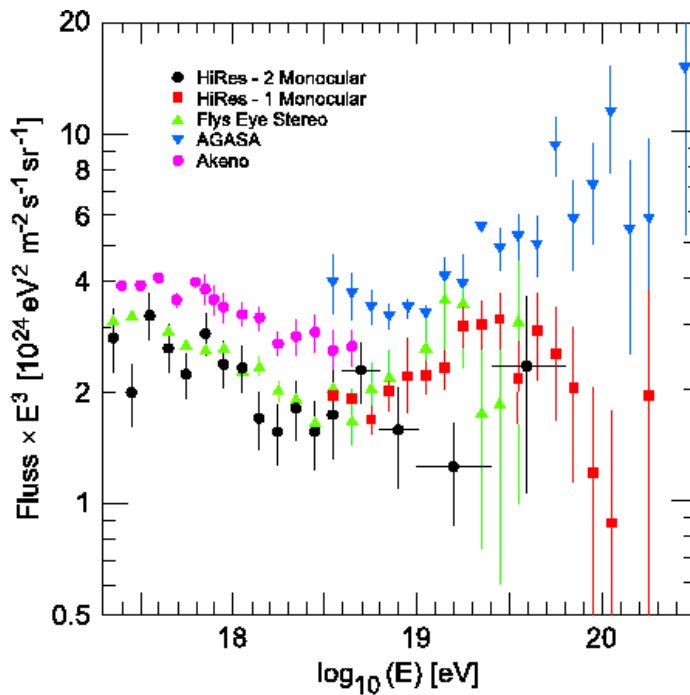


Abbildung 2

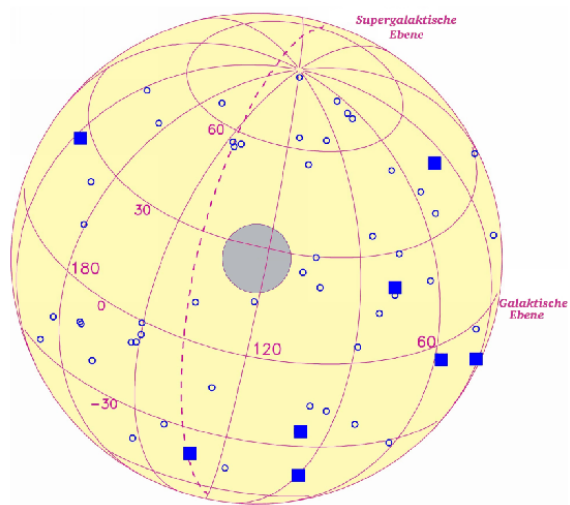


Abbildung 3

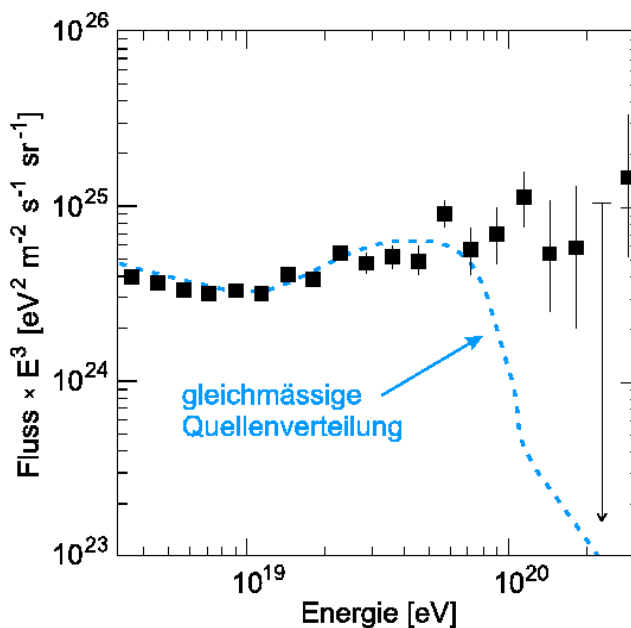


Abbildung 4

Die beobachteten Ereignisse zeigen eindeutig weder das zwingend erwartete Abschneiden im Spektrum, noch in ihrer Ankunftsrichtung die erwartete völlig gleichmäßige Verteilung am Himmel.

**Theoretische Deutungen:** Die theoretische Deutung dieser Ergebnisse war ein Schwerpunkt unserer Arbeit in den letzten Jahren. Dabei war insbesondere die Erkenntnis wichtig, dass kosmische Magnetfelder eine große Rolle spielen müssen.

Aus Radiobeobachtungen wissen wir heute, dass Magnetfelder in Haufen von Galaxien stärker sind als in unserer Galaxie, und dass es intergalaktische Magnetfelder außerhalb von Haufen gibt. Aus kosmischen Simulationen, die wir durchgeführt haben, wissen wir, dass kosmische Magnetfelder die gleiche Grundstruktur in ihrer Verteilung zeigen wie auch die Galaxien: Sie sind extrem inhomogen, mit riesigen Unterschieden in ihrer Stärke in den kosmischen Filamenten und dazwischen. Das kann zu einer Art "magnetischem Linseneffekt" führen - analog dem Gravitationslinseneffekt. So haben wir gezeigt, dass kosmische Magnetfelder den Weg geladener Teilchen von der Quelle bis zu uns entscheidend beeinflussen; andererseits haben wir aber auch zeigen können, dass eine etwaige Korrelation der Ankunftsrichtungen am Himmel mit kosmischen Quellen in großer

kosmologischer Entfernung bedeutet (siehe **Abb. 3**), dass die Teilchen ungeladen sind, und so mit hoher Wahrscheinlichkeit ganz neue Teilchen sein müssen, etwa Teilchen der Supersymmetrie.

Nahe astronomische Quellen sind so gut wie ausgeschlossen, wenn kosmische Magnetfelder zu schwach sind, um die Teilchen signifikant abzulenken. Denn dann müssten alle gefundenen kosmischen Teilchen direkt auf nahe astronomische Quellen zeigen, die wir aber nicht finden.

Bereits die erste Vermutung, von Vitalij Ginzburg, zur Deutung der hochenergetischen Ereignisse war, dass Radiogalaxien wie M87 die besten Kandidaten sein könnten. Radiogalaxien sind allerdings so selten, dass ohne ein Verständnis der intergalaktischen Magnetfelder es nicht aussichtsreich erscheint, gute Kandidaten zu identifizieren: wie wir zeigen konnten, ist die Galaxie M87 ein guter solcher Kandidat; M87 ist auch nahe genug im Kosmos zu uns. Angesichts der vielen am Himmel etwa gleichmäßig verteilten Ereignisse brauchen wir dann aber eine sehr deutliche Streuung im intergalaktischen Magnetfeld sowie möglicherweise auch im Magnetfeld des Halos unserer Galaxie.

Andere kosmische Explosionen sind Gamma-Ray-Bursts. Sie können auch Teilchen beschleunigen, nur passierten die meisten dieser Explosionen in den Frühzeiten des Kosmos. Aufgrund unserer Emissionsmodelle und einer Untersuchung der kosmologischen Verteilung von Gamma-Ray-Bursts meinen wir aber, dass die Anzahl dieser kosmischen Explosionen nicht ausreicht, um den gemessenen Fluss kosmischer Teilchen zu erklären.

Alle Thesen (es gibt noch viel mehr als hier aufgeführt werden können) haben ernsthafte Probleme, die weitere Fragen aufwerfen, und wir sind noch nicht davon überzeugt, dass exotische Modelle auf genügend fundierter Grundlage stehen. Neue Experimente werden hier aber sicher weitere Fortschritte bringen.

**Experimente der Zukunft:** Was sind die Experimente der nahen und fernen Zukunft? Das Experiment HiRes wird als Nachfolgeexperiment von Fly's Eye in der Nähe von Salt Lake City entwickelt und zeigt erste Ergebnisse (**Abb. 1 & 4**). Das Experiment AUGER wird in der argentinischen Pampas bei Malargue gebaut und wird als erstes Experiment die beiden Techniken der Wasser-Cherenkov-Technik mit der der Luft-Fluoreszenz kombinieren. Mit unseren theoretischen Vorhersagen sind wir an der Planung und Interpretation des AUGER-Experiments beteiligt. In einem anderen Experiment (LOPES), das wir zur Zeit aufbauen, wird versucht, die Radiostrahlung kosmischer Schauer zu untersuchen. Es gibt auch zwei Versuche, die Fluoreszenz von Luftschauern vom Weltall aus zu beobachten, einmal in Europa das Projekt EUSO, an dem wir ebenfalls beteiligt sind, auf der Raumstation, und das weiter in der Zukunft liegende Projekt der USA, mit Hilfe von mehreren Satelliten Luftschauer zu beobachten, OWL.

Mithilfe dieser Experimente und ihrer theoretischen Interpretation versuchen wir zusammen mit unseren Kollegen die oben gestellten Fragen zu beantworten. Schließlich stellen die beobachteten Teilchen der höchsten Energien eine besondere Herausforderung dar: für unser physikalisches Verständnis der Natur solcher Teilchen, für das Verständnis ihre Herkunft und ihren Weg durch den Kosmos, wie auch für den Experimentator. Ultrahochenergetische Teilchen gehören damit zu recht den großen fundamentalen Fragen der heutigen Physik

*Max-Planck-Gesellschaft Jahrbuch 2002. Copyright © 2002 Max-Planck-Institut f. Radioastronomie.*

🔴 MPIfR-Home

[ute\\_at\\_mpifr-bonn.mpg.de](mailto:ute_at_mpifr-bonn.mpg.de)