

Energien wie an der GSI, denn diese Art von Reaktionen scheint sich für die Entdeckung von sehr exotischen Nukliden besonders gut zu eignen. Um die Dynamik dieser Reaktionen zu verstehen, sind weitere Experimente unbedingt erforderlich.

Aus den existierenden Rechnungen ergab sich bisher kein einheitliches Bild zur Lage der Neutronenabbruchkante in der Massengegend zwischen Sauerstoff und Nickel [5–7]. Die NSCL-Daten sind ein wichtiger Hinweis, dass die Abbruchkanten möglicherweise bei sehr viel größeren Neutronenzahlen zu finden sind, als man bisher angenommen hatte. Entsprechende theoretische Ergebnisse für die Separationsenergien (Hartree-Fock-Bogoljubow-Modellrechnungen, HFG) sagen voraus, dass die Stabilitätsgrenze erst bei ^{44}Mg erreicht wird [8, 9]. Die Ursache dafür ist das Zusammen-

spiel des nuklearen mittleren Potentials und die Restwechselwirkung zwischen Paaren von Nukleonen, aus denen die Valenznukleonen eine geringe, aber entscheidende zusätzliche Bindung erfahren. Ein wichtiger Mechanismus scheinen die virtuellen Anregungen zu sein, in denen Valenzteilchen kurzzeitig in das Einteilchenkontinuum gestreut werden, dem System also den Charakter eines offenen Quantensystems verleihen. Eine solche Dynamik kann offensichtlich erst dann auftreten, wenn die Energielücke zwischen Fermi-Kante und Kontinuumsschwelle kleiner ist als das typische Restwechselwirkungsmatrixelement. Diese Voraussetzung wird in Atomkernen nur in unmittelbarer Nähe der Abbruchkanten erreicht. In Übereinstimmung mit den Ergebnissen für die Mg-Isotope ergeben entsprechende HFB-Rechnungen für Aluminium, dass die Abbruchkante bei ^{45}Al

erreicht wird, also für einen Kern mit einem zusätzlichen Proton, aber der gleichen Anzahl von Neutronen wie bei ^{44}Mg . Aus Sicht der Kernstrukturphysik sind die neuen Experimente am NSCL Signale zum Aufbruch zu neuen Ufern.

Hans Geissel und Horst Lenske

Prof. Dr. Hans Geissel, 2. Physikalisches Institut, Universität Giessen und GSI Darmstadt; Prof. Dr. Horst Lenske, Institut für Theoretische Physik, Universität Giessen und GSI Darmstadt

- [1] M. Thoennessen, Rep. Prog. Phys. **67**, 1187 (2004), B. Jonson, Phys. Rep. **389**, 1 (2004)
- [2] R. Schneider et al., Z. Phys. **A348**, 241 (1994)
- [3] H. Geissel et al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B **70**, 286 (1992); ibid. B **204**, 71 (2003)
- [4] T. Baumann et al. Nature **449**, 1022 (2007)
- [5] E. Caurier et al., Phys. Rev. C **58**, 2033 (1998)
- [6] D. Lunney, J. M. Pearson und C. Thibault, Rev. Mod. Phys. **75**, 1021 (2003)
- [7] M. Samyn et al., Phys. Rev. C **70**, 044309 (2004)
- [8] F. Hofmann und H. Lenske, Phys. Rev. C **57**, 2281 (1998)
- [9] H. Lenske, F. Hofmann und C. M. Keil, Rep. Prog. Nucl. Part. Phys. **46**, 187

■ Kandidatenkür für kosmische Beschleuniger

Die Pierre-Auger-Kollaboration findet Hinweise darauf, dass Aktive Galaktische Kerne kosmische Teilchen auf höchste Energien beschleunigen.

Seit bald hundert Jahren kennt die wissenschaftliche Welt die „kosmische Strahlung“ und untersucht in einem weit verzweigten Forschungsfeld seither die vielfältigen Aspekte dieses natürlichen Phänomens. Von besonderem Interesse sind die „kosmischen“ Teilchen höchster Energie bis etwa 10^{20} eV – das ist das Zehnmillionenfache der Energie, die sich in Beschleunigerlabors erreichen lässt. Im Jahr 1962 hat John Linsley in einem Pionierexperiment erstmals ein Teilchen mit einer Energie jenseits von 10^{20} eV beobachtet, indem er auf dem Erdboden Sekundärteilchen des Teilchenschauers registrierte, den das primäre Teilchen beim Stoß mit Molekülen in der Atmosphäre erzeugt. Trotz großer Fortschritte sind einige wichtige Fragen noch immer unbeantwortet, insbesondere die Frage nach den kosmischen Beschleunigern, die die Teilchen auf diese enorme Energie

bringen. Kürzlich hat nun die Pierre-Auger-Kollaboration Evidenz dafür vorgelegt, dass der Ursprung dieser höchstenergetischen Teilchen in sog. Aktiven Galaktischen Kernen liegen könnte [1].

Bereits unmittelbar nach Linsleys Beobachtung wurden größere Detektorfelder in Angriff genommen, bei denen Wassertanks oder Szintillationszähler über eine möglichst große Fläche verteilt sind und das von den Sekundärteilchen erzeugte Cherenkov-Licht detektiert wird. Mit einer instrumentierten Fläche von zehn Quadratkilometern war das japanische AGASA-Experiment bis vor kurzem das größte solche Detektorfeld. Eine parallel dazu entwickelte andere Nachweisteknik beruht darauf, die Fluoreszenz zu detektieren, zu der die Sekundärteilchen die Stickstoffmoleküle in der Atmosphäre anregen. Die Fluoreszenzphotonen bilden einen leuchtenden „Strich“

am Himmel. Dieser lässt sich mit „Teleskopen“ aus Photomultipliern, die wie ein Fliegenauge angeordnet sind, registrieren. Diese Technik hat den großen Vorteil, dass der ganze Teilchenschauer und seine detaillierte Entwicklung zu sehen sind und sich damit recht direkt die Energie des einfallenden Teilchens bestimmen lässt. Außerdem erlaubt sie es, ein großes Luftvolumen zu erfassen. Mit mindestens zwei „Fliegenaugen“ wie beim HiRes-Projekt in Utah ist auch der räumliche Verlauf des Schauers rekonstruierbar.

Nach der allgemeinen Maxime, dass das nächste Experiment nur Erfolg haben kann, wenn es seine Vorgänger in Qualität und Sensitivität um mindestens eine Größenordnung übertrifft, wird derzeit das Auger-Experiment in der argentinischen Pampa auf etwa 1500 Meter Höhe realisiert. Die Kollaboration, der rund 370 Mitglieder aus 104



Die Karte vermittelt einen Eindruck von der riesigen Ausdehnung des Pierre-Auger-Observatoriums in der argentinischen Provinz Mendoza. In der blau unterlegten Fläche sind die Teilchendetektoren im Abstand von 1,5 km bereits installiert. Gelb unterlegt sind die Namen der vier Teleskopstationen, mit den „Blickrichtungen“ (grün) der jeweils sechs Teleskope.

+ vgl. den Artikel auf S. 33 in diesem Heft.

Instituten in 17 Nationen angehören, kombiniert beide Techniken. Einerseits verfügt es über ein sehr großes Detektorfeld aus 1500 Wassertanks auf einem 1,5-km-Raster (Abb.). Eine genaue Messung der Ankunftszeit von Schauerteilchen in den Tanks erlaubt es, die Schauerrichtung mit etwa 1° Auflösung zu bestimmen. Aus der Anzahl der getroffenen Tanks und deren Ver-

teilung im Detektorfeld ergibt sich auch die Energie des Luftschauers mit etwa 20 bis 30 % Genauigkeit. Andererseits beinhaltet das Auger-Experiment auch vier fliegenaugenartige Teleskope, die das Detektorfeld überschauen und in dunklen Nächten (rund 10 % der Zeit) die Luftschauer über die Stickstofffluoreszenz registrieren. Die Kombination beider Techniken ist neben der absoluten Größe des Detektorfeldes (3000 km²) der entscheidende Vorteil von Auger gegenüber früheren Detektoren. Obwohl das Experiment nach einer vierjährigen Bauzeit erst kurz vor der Vollendung steht, kann die Kollaboration bereits Ergebnisse vorlegen.

Neben der Frage nach dem Ursprung der kosmischen Teilchen ist auch ihre Natur noch nicht abschließend geklärt. Eng damit verbunden ist der sog. GZK-cuttoff, ein 1966 von K. Greisen, G. Zatsepin und V. Kuzmin (daher GZK) postulierter „Knick“ im Energiespektrum der Teilchen bei einer Energie von etwa $5 \cdot 10^{19}$ eV [2]. Seine Ursache ist ein dramatischer Energieverlust der Protonen. Dieser kommt – unter der Annahme, dass die höchstenergetischen Teilchen extragalak-

tisch sind und ihre Quellen isotrop in den Tiefen des Universums verteilt sind –, dadurch zustande, dass die höchstenergetischen Protonen an den Photonen der Mikrowellen-Hintergrundstrahlung streuen und dabei Pionen entstehen. Erst kürzlich haben sowohl HiRes (im Frühjahr 2007) als auch Auger (einige Monate später) Evidenz für einen Cutoff bei der vorhergesagten Energie vorgelegt. Angesichts dieser Beobachtung gilt als sehr wahrscheinlich, dass die höchstenergetischen Teilchen tatsächlich hauptsächlich Protonen sind.

Bleibt die Frage, wo die Protonen auf die höchsten Energien beschleunigt werden. Im Hinblick auf die Quellen der kosmischen Strahlung hat die Astronomie mit hochenergetischen Photonen ($> 10^{12}$ eV) in den letzten Jahren einen Durchbruch gebracht. Die Gamma-Teleskope haben in großer Zahl sowohl galaktische Quellen gefunden als auch eine spezielle Klasse extragalaktischer Kandidaten, nämlich Aktive Galaktische Kerne (AGN), die sich bis zu sehr großen Entfernungen im All durch hohe Aktivität z. B. im Radiobereich auszeichnen. AGNs sind große aktive Schwarze Löcher im Zentrum von Galaxien mit etwa einer Milliarde Sonnenmassen. Diese nehmen über Akkretionsscheiben Materie auf und emittieren einen Teil davon wieder über gigantische Jets, die Gammateleskope wie MAGIC und H.E.S.S. detektieren können.^{+) Sind also AGNs die Objekte, die Protonen bis zu den höchsten Energien beschleunigen?}

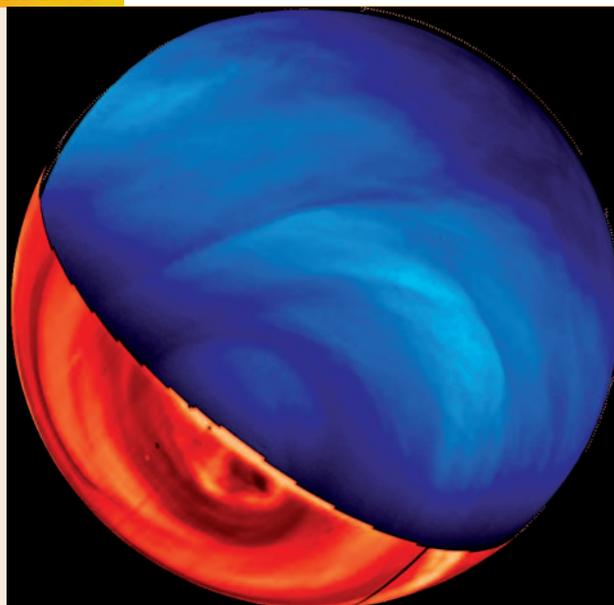
Wegen des GZK-cuttoffs müssen die Quellen höchstenergetischer Teilchen, die wir auf der Erde beobachten, näher als rund 100 Mpc liegen. Andernfalls wäre aufgrund der Streuung an den Photonen die Energie der Teilchen wesentlich niedriger. Damit wäre deren Beitrag nur gering, da das Energiespektrum der auf die Erde einfallende kosmische Strahlung ohnehin mit einer Potenz von etwa 3 zu niedrigeren Energien ansteigt. Weiterhin lässt die (leider sehr unvollständige) Kenntnis der kosmischen Magnetfelder erwarten, dass sich Teilchen mit Energien im Bereich von 10^{20} eV „geradlinig“ zur

DIE UNGLEICHE SCHWESTER DER ERDE

Erde und Venus haben zwar ähnliche Masse und Radius, doch während auf der Erde Leben entstehen konnte, herrschen auf der Oberfläche der Venus Temperaturen von über 400 °C und ein Druck, der hundertmal größer ist als auf der Erde.

Seit April 2006 umrundet die ESA-Sonde Venus Express den unwirtlichen Nachbarplaneten und brachte neue Erkenntnisse über dessen Atmosphäre. So lieferte das ASPERA-4-Experiment an Bord Hinweise darauf, wie Wasser vom Planeten in den Weltraum entweicht. Der Sonnenwind, der das solare Magnetfeld mit sich trägt, induziert ein elektrisches Feld, das stark genug ist, Ionen aus der Ionosphäre zu ziehen. Das gemessene Verhältnis zwischen Sauerstoff- und Wasserstoff-Ionen von ca. 1:2 deutet auf Wassermoleküle als Quelle. Ohne Wasser, das CO₂ wie auf der Erde binden konnte, kam es auf der Venus zu einem extremen Treibhauseffekt. (AP)

Focus: Venus Express, Nature 450, 629ff (2007)



An Bord von Venus Express befinden sich die Venus Monitoring Camera (VMC) und die Visual and Infrared Thermal Mapping Spectrometer (VIRTIS). Diese Instrumente liefern Ansichten der Venus im ultravioletten (blau) bzw. sichtbaren und infraroten Spektralbereich (rot-orange) und ermöglichten damit bislang unbekannte Einblicke in die komplexe Dynamik der Venusatmosphäre.

Quelle zurückverfolgen lassen. Diese Koinzidenz lässt andererseits die Möglichkeit offen, dass Quellen der kosmischen Strahlung, die näher als 100 Mpc sind, entdeckt werden könnten. Aufgrund dieser Zusammenhänge hat die Auger-Kollaboration nach räumlichen Korrelationen mit auf kosmischem Maßstab „nahe“ AGNs gesucht und hochinteressante und willkommene Hinweise gefunden – von 27 Kandidaten zeigen 23 auf AGNs innerhalb einer räumlichen Auflösung von etwa 3° .

Dieses Ergebnis hat für einiges Aufsehen gesorgt, aber auch Kritik hervorgerufen. So wird – nicht unerwartet – eine überzeugendere Statistik eingefordert und (wie üblich) auch das Analyseverfahren kritisch betrachtet. Nach Jahresfrist aber wird Auger die Statistik verdoppelt haben, die AGN-Kandidaten explizit benennen und somit eine bessere Beurteilung des Ergebnisses zulassen. Denkbar und auch viel diskutiert ist die Möglichkeit, dass die AGNs nur der Anzeiger für eine Umgebung sind, z. B. Cluster von

Galaxien, in denen die Beschleunigung der Teilchen stattfindet. Weiterhin sollten die Gammateleskope H.E.S.S. und MAGIC die AGN-Kandidaten beobachten, denn eine Umgebung, die Protonen auf 10^{20} eV beschleunigt, müsste wohl auch bei 10^{15} eV schon sehr effektiv und daher für die Gamma-Teleskope sichtbar sein. Das Feld der

kosmischen Strahlung wird jedenfalls in nächster Zeit sicher noch für Überraschungen sorgen.

Hinrich Meyer

Prof. Dr. Hinrich Meyer, Fachbereich Physik, Universität Wuppertal

[1] *The Pierre Auger Collaboration*, *Science* **318**, 938 (2007)

[2] *K. Greisen*, *Phys. Rev. Lett.* **16**, 748 (1966), *G.T. Zatsepin*, *V. A. Kuzmin*, *Zh. Eksp. i Teor. Fiz. Pisma* **4**, 114 (1966)

KURZGEFASST

■ Photoelektrischer Effekt extrem

Physiker am Freie-Elektronen Laser in Hamburg (FLASH) haben den photoelektrischen Effekt bei einer Wellenlänge von 13,3 nm im extrem ultravioletten Spektralbereich und bei sehr hohen Photonenintensitäten untersucht. Dabei beobachteten sie, dass die bestrahlten Xenon-Atome bis zu 21 Elektronen verloren. Die Forscher weisen darauf hin, dass bisherige theoretische Ansätze nicht ausreichen, um die Wechselwirkung von Licht und Materie unter diesen extremen Bedingungen beschreiben zu können.

A. A. Sorokin et al., *Phys. Rev. Lett.* **99**, 213002 (2007)

■ Synchrotron kompakt

Erstmals ist es gelungen, eine Synchrotron-Strahlungsquelle im Labormaßstab zu realisieren. Das deutsch-britische Forscherteam kombinierte dafür erfolgreich einen in Jena entwickelten Hochintensitätslaser mit einem Undulator. Der Laser beschleunigte die Elektronen aus einem Helium-Plasma auf Energien zwischen 55 und 75 MeV. Im Undulator emittierten die hochenergetischen Elektronen Synchrotronstrahlung im optischen Bereich von sehr enger spektraler Bandbreite.

H.-P. Schlenvoigt et al., *Nature Physics*, doi:10-1038/nphys811 (2007)