

■ Auf die Quellen kommt es an

Beobachtungen deuten darauf hin, dass der Ursprung kosmischer Strahlung bei höchsten Energien außerhalb unserer Galaxis liegt.

#) Mehr zum Auger-Observatorium im Physik Journal, März 2014, S. 29

Die Wissenschaftler und Techniker am Large Hadron Collider müssten eigentlich vor Neid erblassen: Während sie daran arbeiten, die Strahlenergie von 7 TeV auf 14 TeV zu erhöhen, gelingt es der Natur ohne Schwierigkeiten, die Atomkerne der kosmischen Strahlung auf eine millionenfach höhere Energie zu beschleunigen [1]. Wie und wo dies geschieht, ist eine der wichtigen Fragen der modernen Physik. Ihrer Beantwortung scheint man nun mit neuesten Messungen des Pierre-Auger-Observatoriums nähergekommen zu sein.#) Diese zeigen eine ausgeprägte Anisotropie der Teilchenintensität bei Energien oberhalb von 8 Exaelektronenvolt ($1 \text{ EeV} = 10^{18} \text{ eV}$) [2], die auf einen extragalaktischen Ursprung der kosmischen Strahlung mit höchsten Energien hindeutet.

Hochenergetische kosmische Strahlung erzeugt durch Wechselwirkung mit Atomkernen des atmosphärischen Gases einen Schauer von Sekundärteilchen („Luftschauer“). Beim Auger-Observatorium registrieren insgesamt 1600 Detektor-Tanks die kurzen Lichtblitze, welche die Teilchen eines Luftschauers im Tank auslösen (Cherenkov-Licht). Hieraus lässt sich auf die Energie der Primärteilchen schließen, nicht aber auf ihre Masse, sodass sich nicht zwischen Protonen und schwereren Kernen unterscheiden lässt. Diese Unterscheidung leisten



Das Auger-Observatorium besteht aus 1600 solcher Cherenkov-Tanks und umfasst eine Fläche von 3000 Quadratmetern in der argentinischen Pampa Amarilla.

sechs Teleskope am Rand des Messfeldes. Sie weisen das schwache tiefblaue Fluoreszenzlicht nach, zu dem die geladenen sekundären Teilchen den Stickstoff der Luft anregen. Da schwere Kerne weniger tief in die Atmosphäre eindringen als Protonen, beginnt die Lichtemission weiter oben, sodass die gemessene Höhe des Lichtmaximums Aussagen über die Masse der Primärteilchen erlaubt.

Das Ziel des Auger-Observatoriums ist es, die Primärteilchen der kosmischen Strahlung mit bisher unerreichter Güte zu rekonstruieren und insbesondere den „Greisen-Zatsepin-Kuzmin-Effekt“ (GZK) nachzuweisen. Dieser sagt für Protonen eine Unterdrückung

der Teilchenintensität bei etwa 60 EeV vorher. Der GZK-Effekt rührt daher, dass die extrem hochenergetischen Protonen der Primärstrahlung mit den Photonen des kosmischen Mikrowellenhintergrunds kollidieren können, die in ihrem Ruhesystem zu harter Gammastrahlung „blauverschoben“ sind. Oberhalb von etwa 3 EeV können die Protonen in diesen Kollisionen Elektron-Positron-Paare erzeugen, oberhalb von etwa 60 EeV sogar Pionen. Diese Verlustmechanismen begrenzen die freie Weglänge auf drei Milliarden Lichtjahre bei 3 EeV bzw. 300 Millionen Lichtjahre bei 60 EeV.

Die Unterdrückung der Teilchenintensität für Protonen bei etwa 60 EeV nachzuweisen, ist dadurch erschwert, dass die Zusammensetzung kosmischer Strahlung schwierig zu bestimmen ist. Grundsätzlich unterscheiden sich die Luftschauer von Protonen von denen schwererer Kerne gleicher Energie, doch die Entwicklung der Luftschauer fluktuiert zu stark, um verlässliche Aussagen zu einzelnen Schauern treffen zu können. Schwere Kerne wie Kohlenstoff oder Eisen unterliegen dem GZK-Effekt erst weit oberhalb von 60 EeV, fragmentieren aber durch Kollisionen mit

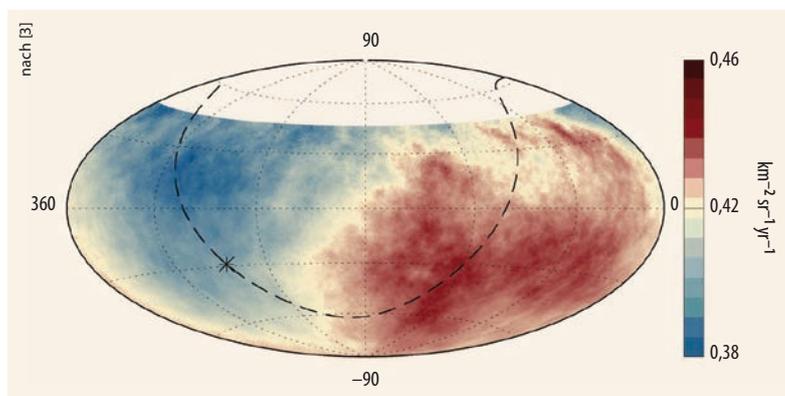


Abb. 1 Die Intensitätsverteilung des Teilchenflusses, hier in galaktischen Koordinaten, zeigt ein Defizit in Richtung des galaktischen Zentrums (Stern).

dem Mikrowellenhintergrund und sind so ebenfalls unterdrückt. Mit dem Auger-Observatorium haben Messungen tatsächlich einen Abfall des Teilchenflusses bei etwa 60 EeV ergeben. Gleichzeitig lässt sich aber keine eindeutig von leichten Teilchen wie Protonen dominierte Zusammensetzung nachweisen. Ob der Abfall des Flusses also dem GZK-Effekt zuzuschreiben ist, einer starken räumlichen Ungleichverteilung der kosmischen Teilchenbeschleuniger oder möglicherweise ihrer Energiegrenze, ist daher heute noch nicht zu beantworten.

Auf die Quellen der kosmischen Strahlung mit höchsten Energien kommt es also an. Grundsätzlich sollte man in Richtung der Quellen eine höhere Intensität erwarten. Allerdings bewegen sich die Protonen und schwereren Atomkerne im interstellaren Magnetfeld, was zu einer Kreisbewegung um dessen Feldlinien (Gyration) führt. Innerhalb unserer Milchstraße beträgt der Gyration- oder Larmor-Radius eines Atomkerns der Energie 60 EeV und der Ladungszahl Z etwa $(6 \text{ kpc})/Z$. Für Protonen mit $Z=1$ fällt er geringer aus als der Abstand der Sonne vom galaktischen Zentrum. Daher sind für Protonen Ablenkungen von einigen zehn Grad und für schwere Kerne stark beeinflusste Trajektorien zu erwarten. Erste Messungen ergaben in der Tat eine leicht erhöhte Intensität kosmischer Strahlung oberhalb 50 EeV aus Richtungen, in denen man auch aktive Galaxienkerne innerhalb von 200 Millionen Lichtjahren beobachtet, von denen die Teilchen stammen könnten. Interessant war dieser frühe Befund, weil nur sehr leichte Kerne eine so geringe Ablenkung aufweisen dürften, dass eine Richtungskorrelation mit ihren Quellen beobachtbar wäre. Nur für diese leichten Kerne sollte auch der GZK-Effekt auftreten und die Mehrdeutigkeit der beobachteten Flussunterdrückung aufgehoben sein. Eine Analyse von 2010 zeigt aber, dass diese Korrelation nicht signifikant ist und die kosmische Strahlung höchster Energie nicht einer bestimmten Quellklasse zuzuordnen ist [3].

Die Auger-Kollaboration hat nun ihre neuesten Messungen der Anisotropie bei Teilchenenergien oberhalb von 8 EeV vorgestellt [2]. Die Wahl der Energie unterhalb der Schwellenenergie für Pionen-erzeugung erweitert den Horizont bis zu einer Entfernung von einigen Milliarden Lichtjahren. Aufgrund der Vielzahl möglicher Quellen wird so eine Zuordnung zwar schwierig, aber dafür ergeben sich eine Reihe von Vorteilen. Zum einen ist die Zahl der auch mit der Fluoreszenztechnik beobachteten Ereignisse so hoch, dass sich die am besten gemessenen Teilchen mit geringer Messunsicherheit untersuchen lassen. Zum anderen sind die Larmor-Radien der Teilchen so klein, dass selbst Protonen in der Milchstraße sehr stark abgelenkt werden [4]. Auch im intergalaktischen Transport sind gekrümmte Trajektorien zu erwarten.

Wenn kosmische Strahlung bei Energien um 8 EeV in der Milchstraße selbst erzeugt würde, müsste man eine großskalige Anisotropie mit einem Intensitätsmaximum in Richtung der inneren Galaxie beobachten. In der Tat zeigt sich dies bei niedrigeren Energien zwischen 1 PeV und 1 EeV [5]. Die jetzt mit Auger bei etwa 8 EeV gefundene dipolare Anisotropie weist ihr Intensitätsmaximum hingegen etwa 120° vom galaktischen Zentrum entfernt in Richtung der äußeren Galaxie auf (Abb. 1). Dies

ist ein starker Hinweis darauf, dass kosmische Strahlung oberhalb von 1 EeV extragalaktischen Ursprungs ist. Die wahre Amplitude der Anisotropie sollte noch etwas höher als die gemessenen sechs Prozent sein, da der Transport der Teilchen im galaktischen Magnetfeld die Anisotropie etwas verschmieren und verschieben sollte.

Die gemessene dipolare Anisotropie kann nicht auf Eigenbewegung der Milchstraße oder des Sonnensystems zurückgehen, da die betreffenden Geschwindigkeiten viel zu gering sind. Sie entsteht wahrscheinlich durch eine Ungleichverteilung der extragalaktischen Quellen kosmischer Strahlung. Hier stellt sich die Frage, welche Objektklasse die dazu passende räumliche Verteilung hat.

Nun gilt es, die aktuellen Ergebnisse mit weiteren Untersuchungen zur Elementzusammensetzung und zur Ablenkung kosmischer Strahlung in der Milchstraße zu verbinden, um ihrem wahren Ursprung noch näher zu kommen.

Martin Pohl

Prof. Dr. Martin Pohl, Institut für Physik & Astronomie, Universität Potsdam, Karl-Liebknecht-Straße 24/25, 14476 Potsdam

- [1] J. Linsley, Phys. Rev. Lett. **10**, 146 (1963)
- [2] A. Aab et al. (The Pierre Auger Collaboration), Science **357**, 1266 (2017)
- [3] P. Abreu et al., Astropart. Phys. **34**, 314 (2010)
- [4] R. Jansson und G. R. Farrar, Astroph. J. **757**, 14 (2012)
- [5] M. G. Aartsen et al. (IceCube Collaboration), Astroph. J. **866**, 220 (2016); K.T. Antoni et al. (KASCADE Collaboration), Nucl. Part. Phys. Proc. **279-281**, 56 (2016)

KURZGEFASST

■ Schneller Fall mit Falten

Forscher der TU München haben die Strömungsdynamik des Sprungs des österreichischen Extremsportlers Felix Baumgartner aus fast 39 km Höhe untersucht. Dieser hatte 2012 nicht nur die Schallgeschwindigkeit von etwa 1200 km/h erreicht, sondern war sogar um 25 Prozent schneller. Eigentlich sollte der Springer nicht schneller fallen als ein glatter symmetrischer Körper. Eingesetzt in die theoretische Analyse zeigten die aufgenommenen Daten wie Druck und Temperatur aber, dass gerade die Dellen und Falten des Sprunganzugs den Luftwiderstand fast halbiert haben. Das lässt sich zukünftig vielleicht im Flugzeugbau anwenden. M. Guerster und U. Walter, PLoS ONE, doi: 10.1371/journal.pone.0187798 (2017)

■ Ultrakalte Neutronen en masse

Der Forschungsreaktor TRIGA der Universität Mainz produziert seit etwa zehn Jahren ultrakalte Neutronen für die Grundlagenforschung. Nach einem Upgrade der Anlage ist es nun gelungen, die Ausbeute um den Faktor 3,5 zu steigern. Damit liegen bis zu 8,5 ultrakalte Neutronen (UCN) pro Kubikzentimeter vor – ein Spitzenwert im internationalen Vergleich. Die UCN erlauben es, mithilfe von Hochpräzisionsmessungen die Eigenschaften freier Neutronen exakt zu bestimmen. Insbesondere für die Lebensdauer war bisher die Intensität der UCN ein limitierender Faktor. Das sollen zukünftige Messungen am Mainzer TRIGA-Reaktor ändern. J. Kahlenberg et al., Eur. Phys. J. A **53**, 226 (2017)