

Kosmische Strahlung – ein neues Fenster zum Universum

J. Blümer, IK und Institut für Experimentelle Kernphysik der Universität Karlsruhe

Galaktische und Extragalaktische kosmische Strahlung

Hochenergetische Teilchen aus dem Kosmos treffen die Erde ständig aus allen Richtungen, wobei die Intensität mit steigender Energie rasch abnimmt. Es handelt sich überwiegend um Protonen und Atomkerne, die wahrscheinlich mit Hilfe von Schockwellen und Magnetfeldern in Supernova-Explosionen beschleunigt wurden. Die Teilchen durchqueren im Laufe von ca. 10 Millionen Jahren die Milchstraße mit ihrem Magnetfeld von einigen Mikrogauss mehrfach auf chaotischen Bahnen; sie verhalten sich auf dieser Längenskala wie ein diffundierendes Plasma, sodass die Ankunftsrichtungen auf der Erde isotrop sind und die Identifizierung der Quellen nicht möglich ist. Man vermutet bei Energien von 10^{18} eV das Ende der Supernova-Beschleuniger und einen Übergang zu extragalaktischen Teilchen, die mit steigender Energie immer weniger abgelenkt werden.

In mehreren Experimenten wurden kosmische Teilchen mit Energien von mehr als 10^{20} eV beobachtet. Die Intensität beträgt bei diesen Energien nur noch ein Teilchen pro Quadratkilometer und Jahrhundert. Ihre Natur, Herkunft, Beschleunigung und Ausbreitung sind ungelöste Rätsel der Astroteilchenphysik. Selbst konventionelle Interpretationen erfordern, dass man die physikalischen Gesetze bei Extremwerten von Energie, Magnetfeldstärke, Gravitation und bei Geschwindigkeiten ganz nahe der Lichtgeschwindigkeit anwenden muss. Man diskutiert hier

die Schockwellenbeschleunigung in der Umgebung von supermassiven Schwarzen Löchern mit 100 Millionen Sonnenmassen ebenso wie alternative Szenarien mit „neuer Physik“, z. B. topologische Defekte der Raum-Zeit, Zerfälle von Reliktteilchen aus der Urknallphase oder die Vernichtung supersymmetrischer Teilchen [1, 2].

Direkte Messungen mit hoch fliegenden Ballonen und Satelliten sind auf Energien kleiner als 10^{14} eV beschränkt, wo der Fluss noch einige Teilchen pro Quadratmeter und Minute beträgt. Bei höheren Energien muss man die Kaskaden von Sekundärteilchen ausnutzen, die von den Primärteilchen in großer Höhe erzeugt werden. Diese so genannten ausgedehnten Luftschauer wurden 1938 von Pierre Auger entdeckt und korrekt interpretiert. Sie können Hunderte von Milliarden Teilchen enthalten und sich über viele Quadratkilometer erstrecken.

Galaktische kosmische Strahlung: KASCADE-Grande

Das KASCADE-Grande-Instrument auf dem Gelände des Forschungszentrums Karlsruhe umfasst einen $200 \times 200 \text{ m}^2$ großen zentralen Teil mit 250 relativ dicht positionierten Detektoren, der von 38 weiteren Messstationen umgeben ist, die auf $0,5 \text{ km}^2$ verteilt sind. Damit lassen sich kosmische Teilchenschauer im Energiebereich von 10^{14} eV bis hin zu fast 10^{18} eV nachweisen. Dieses Intervall ist interessant, weil die Intensitätskurve hier eine bemerkenswerte Änderung aufweist, das so genannte „Knie“ im Energiespektrum der kosmischen Strahlung. Die Daten von KASCADE-Grande zeigen, dass zunächst die leichten Teilchen (Protonen, Heliumkerne) verloren gehen und erst bei höheren Energien die schwereren Kerne bis hin zum Eisen folgen: sowohl die Beschleunigung als auch der Verbleib im Magnet-



Abb. 1: Teilchendetektoren des KASCADE-Grande-Experiments und Radioantennen des LOPES-Projekts sind integriert, um galaktische kosmische Strahlung zu studieren und neue Technologien zu entwickeln.

feld sind für die höher geladenen Partikel effizienter. Die möglichst genaue Messung der Energiespektren für ausgewählte Gruppen von leichten, mittelschweren und schweren Kernen ist die zentrale Aufgabe des KASCADE-Grande-Experiments [3]. Die Interpretation der Daten erfordert sehr detaillierte und aufwändige Modellrechnungen für die Luftschauer in Energiebereichen, die für irdische Beschleuniger nicht zugänglich sind. Die in Karlsruhe entwickelten Programmpakete CORSIKA und CONEX sind weltweit die Standardwerkzeuge dazu.

In den letzten Jahren wurden Radioantennen in das KASCADE-Grande-Detektorfeld zum Nachweis der Radiostrahlung von Luftschauern im Frequenzbereich bis zu 100 MHz integriert. Mit dem

Projekt LOPES gelang ein technologischer Durchbruch: Luftschauer sind für wenige Nanosekunden die hellsten Radioblitze am Himmel, und ihre Messung ist eine viel versprechende Alternative zu den Teilchendetektoren [4]. Die Forschungen dazu werden in Karlsruhe weitergeführt und auf das Auger-Observatorium zu noch weit höheren Teilchenenergien übertragen.

Das Pierre-Auger-Observatorium

Das Pierre Auger-Observatorium soll mit einem neuen Konzept, kosteneffektiver Technologie und voller Himmelsabdeckung Klarheit über den Ursprung der höchstenergetischen kosmischen Strahlung schaffen.

In der argentinischen Pampa der Provinz Mendoza entsteht seit 1999 eine Detektoranlage mit 3000 km² Fläche: 1600 Detektoren im Abstand von 1,5 km weisen die Luftschauer nach, die bei Energien des Primärteilchens oberhalb von 10¹⁸ eV mindestens drei Detektoren gleichzeitig treffen. Hierbei kommen Wassertanks mit 12 Kubikmeter Reinstwasser zum Einsatz, die mit Photosensoren das Cherenkovlicht der Schauerteilchen registrieren. In klaren, dunklen Nächten werden die Schauer gleichzeitig auch optisch beobachtet: Insgesamt 24 Teleskope an vier Standorten am Rand des Detektorfeldes weisen die Leuchtspur des Stickstoff-Fluoreszenzlichts nach, das die Teilchen in der Luft anregen. Die Anlage wird im Jahr 2007 fertig gestellt sein und

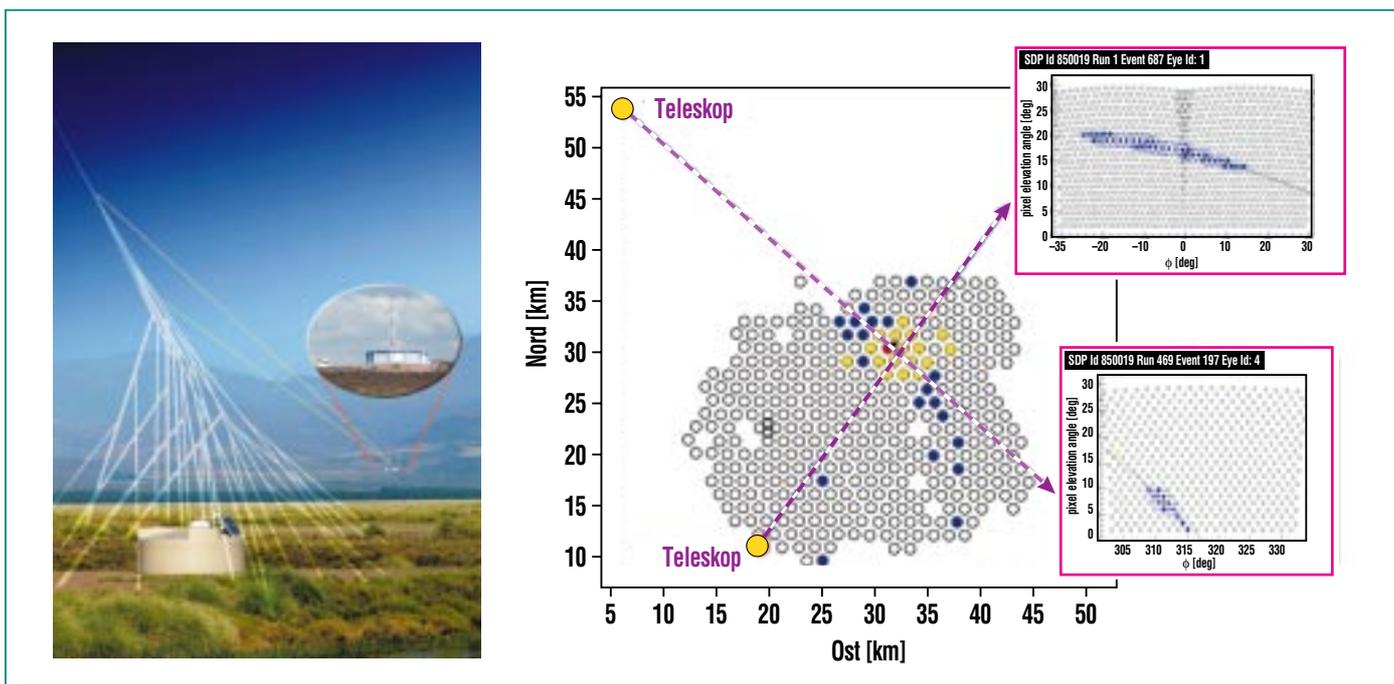


Abb. 2: Links: Luftschauermessung mit dem Auger-Observatorium: Wassertanks als Cherenkovdetektoren registrieren Schauerteilchen am Erdboden, während elektronische Digitalteleskope die Leuchtspur des in der Luft emittierten Fluoreszenzlichts abbilden. Rechts: stereoskopische Beobachtung eines großen Luftschauerereignisses.

liefert bereits seit Januar 2004 Daten von ausgezeichneter Qualität [5]. Die Kalibration, Überwachung und Interpretation ist eine gewaltige Aufgabe für die internationale Auger-Kollaboration, die cirka 350 Wissenschaftler und Ingenieure aus 17 Ländern umfasst. Der deutsche Anteil ist mit etwa 20 Prozent sehr sichtbar und das Forschungszentrum Karlsruhe leistet mit den Universitäten Aachen, Karlsruhe, Siegen und Wuppertal mehrere Schlüsselbeiträge zur Technologie und Analyse.

Teilchen-Astronomie

Es deutet sich an, dass bei den höchsten Energien ein neues Fenster zum Universum geöffnet werden könnte, die Teilchenastronomie. Protonen mit ultrahohen Energien werden in den intergalaktischen Magnetfeldern nur wenig abgelenkt und können Informationen liefern, die komplementär zu anderen Informationsträgern wie Licht und hochenergetische Gammastrahlung sind. Dies ergänzt sich hervorragend mit der Neu-

trinoastronomie, die derzeit mit dem Detektor IceCube von unserem Helmholtzpartner „DESY“ am Südpol aufgebaut wird. Diese neuartige Multi-Messenger-Astronomie soll in Zukunft weiter ausgebaut werden, unter anderem mit dem Nord-Observatorium, das die Auger-Kollaboration ab 2008/9 in Colorado, USA, mit einer Fläche von 10 000 km² aufbauen möchte, um den gesamten Himmel im Lichte kosmischer Strahlung beobachten zu können.

Literatur

- [1] Komitee für Astroteilchenphysik (KAT), <http://www.astroteilchenphysik.de>
- [2] M. Boratav, G. Sigl (Ed.), *Comptes Rendus Physique* 5/4 (2004) 417
- [3] T. Antoni et al., *Astropart. Phys.* 24 (2005) 1
- [4] H. Falcke et al. (LOPES Collaboration), *Nature* 435 (2005) 313
- [5] J. Abraham et al. (Pierre Auger Collaboration), *Nucl. Instrum. Meth. A* 523 (2004) 50