

Der Experimentalphysiker an der Bergischen Universität Wuppertal, Prof. Dr. Karl-Heinz Kampert, leitet das weltweit größte Observatorium für Teilchenstrahlungen aus dem Kosmos, das Pierre Auger Observatorium in Argentinien. Er berichtet über das Observatorium und erläutert einige Messergebnisse.

Eine Jahrhundertfrage der Physik

Vor genau 100 Jahren, in den frühen Morgenstunden des 7. August 1912, stieg der österreichische Physiker Franz Viktor Hess in Begleitung eines Ballonführers und Meteorologen in einem mit Wasserstoff gefüllten Ballon von Aussig a.d. Elbe bei klarem Wetter bis in eine Höhe von 5350 m auf. Gegen Mittag landeten sie in Pieskow bei Berlin. Ziel dieses aus heutiger Sicht legendären Ballonfluges war die Messung der Strahlungsintensität der Luft in Abhängigkeit von der Flughöhe.

Die Wissenschaftler waren bis zu diesem Zeitpunkt davon ausgegangen, dass die ionisierende Strahlung in der Luft von der Radioaktivität des Erdbodens ausgehe und daher mit wachsender Entfernung vom Erdboden abnehmen müsse. Anders als erwartet, stellte Viktor Hess aber fest, dass die Strahlungsintensität beim Aufstieg zwar zunächst ein wenig abnahm, dann aber oberhalb von etwa 2000 m rapide anstieg, um in 5000 m das Mehrfache des Wertes vom Erdboden zu erreichen. Eine bis dahin unbekannte Strahlung aus dem Kosmos musste seiner Meinung nach hierfür verantwortlich sein und er prägte hierfür den Begriff der „Höhenstrahlung“, der später durch den Begriff „kosmische Strahlung“ ersetzt wurde.

Werner Kolhörster, ein gerade promovierter Physiker an der Universität Halle bestätigte die Messungen und Schlussfolgerungen eindrucklich, indem er 1914 sogar bis in Höhen von 9300 m aufstieg. Viktor Hess erhielt für seine Entdeckung 1936 den Nobelpreis für Physik. Seit dieser Entdeckung sind 100 Jahre vergangen, die Frage nach dem Ursprung der kosmischen Strahlung bleibt aber bis heute unbeantwortet und ist aktueller denn je. In einer Reihe von Ballon-, Satelliten- und bodengestützten Experimenten wurden inzwischen viele Daten über deren Zusammensetzung, Energie- und Richtungsverteilung gesammelt.

Die Strahlung besteht demnach vorwiegend aus Protonen, den Atomkernen des Wasserstoffatoms. Es werden aber auch schwere Atomkerne bis zur Ordnungszahl des Eisens und sogar darüber beobachtet. Der Fluss der Strahlung fällt mit jeder Dekade der Energie um etwa drei Größenordnungen ab, d.h. er folgt einem Potenzgesetz der Gestalt $dJ/dE \sim E^{-3}$. Oberhalb von ca. 1000 TeV^{1*} sinkt er auf 1 Teilchen pro Quadratmeter und Jahr ab und

am Ende des derzeit bekannten Spektrums sogar auf nur 1 Teilchen pro Quadratmeter und Jahrhundert! Die Teilchen erreichen hier Energien von über 10^{20} eV, d.h. 100 millionenfach höhere Energien als die Teilchenstrahlen des weltweit größten Teilchenbeschleunigers, des Large Hadron Colliders am CERN.

Angesichts der Komplexität des LHC und der herausragenden internationalen Ingenieurleistungen, die zum Bau dieses 27 km langen unterirdischen Kreisbeschleunigers aus supraleitenden Magneten erforderlich waren, ist es um so erstaunlicher, was die Natur uns

hier präsentiert. Wie ist es der Natur möglich, Teilchen derart hoher Energien zu erzeugen? Die Energie eines einzelnen Atomkerns entspricht hierbei etwa der Energie eines Tennisballs, der mit über 100 km/h aufgeschlagen wird. Eine nähere Betrachtung des Problems macht deutlich, dass diese Teilchen die derzeit bekannte Physik und Astrophysik an ihre Grenzen stoßen lassen und Gültigkeitstests fundamentaler physikalischer Prinzipien ermöglichen. Umso spannender ist daher die Frage, wie die Quellen dieser Teilchen funktionieren und wo sie im Universum zu finden sind.

Nachweisteknik des Pierre Auger Observatoriums

Das weltweit größte Experiment für den Nachweis kosmischer Teilchenstrahlen, das Pierre Auger Observatorium, soll Antworten auf diese Fragen liefern und damit auch die Jahrhundertfrage nach dem Ursprung der kosmischen Strahlung beantworten. Es befindet sich in der Provinz Mendoza in Westargentinien auf einer Hochebene (ca. 1400 m über NN) am Rande der Kleinstadt Malargüe am Fuß der Anden. Nach mehrjähriger Vorbereitungs- und Aufbauzeit wurde es 2008 erfolgreich fertiggestellt und zeichnet seither Messdaten von bislang unerreichter Qualität und Statistik auf. Die Messfläche des Observatoriums beträgt 3000 km² (die Fläche des Saarlandes beträgt zum Vergleich 2570 km²).

Das Nachweisprinzip ist in Bild 1 illustriert: Das auf die Erdatmosphäre treffende kosmische

Das Pierre Auger Observatorium Für Teilchenstrahlungen aus dem Kosmos

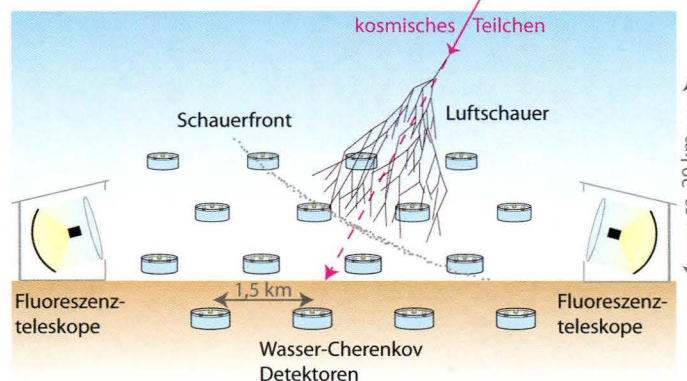


Bild 1: Nachweisteknik von ausgedehnten Teilchenschauern in der Atmosphäre mit dem Pierre Auger Observatorium

Teilchen erzeugt durch Zusammenstöße mit den Atomkernen der Lufthülle Sekundärteilchen, die ihrerseits wieder mit Atomkernen zusammenstoßen und weitere Sekundärteilchen erzeugen. Auf diese Weise wird eine atmosphärische Teilchenlawine ausgelöst, die Milliarden Teilchen umfassen kann und am Erdboden eine Ausdehnung von mehreren Quadratkilometern erreicht.

Das Phänomen der so genannten ausgedehnten Luftschauer wurde 1939 von dem französischen Physiker und Namensgeber des Observatoriums, Pierre Auger, beobachtet und erstmals korrekt interpretiert. Ein Netzwerk von Teilchendetektoren am Erdboden registriert beim Auftreffen eines solchen Schauers nahezu gleichzeitig eine starke Erhöhung der Zählraten. Aus der zeitlichen Abfolge der Signale zwischen den jeweils 1.5 km voneinander entfernten Teilchendetektoren kann auf die Richtung des ursprünglich einlaufenden Teilchens und aus der Gesamtzahl der Teilchen in den Detektoren auf dessen Energie geschlossen werden. Als Nachweismedium in den insgesamt 1.660 Teilchendetektoren dient jeweils 12.000 Liter entkeimtes Wasser, welches vor Ort aus den Flüssen entnommen wurde. Geladene Teilchen erzeugen beim Durchlaufen des Wassers schwache Lichtblitze (Cherenkov-Strahlung), die mit hoch empfindlichen Sensoren (Sekundärelektronenvervielfacher) nachgewiesen werden.

Die Detektoren

Die Detektoren (Bild 2) müssen autonom arbeiten und sollten möglichst über mehrere Jahre keine Servicearbeiten erfordern. Solarzellen erzeugen die erforderliche elektrische Energie und Batterien sichern den Betrieb bei Nacht und auch bei längeren Schlechtwetterperioden. Die auf einen geringen Stromverbrauch optimierte Elektronik erzeugt die



Bild 2: Teilchendetektor in der argentinischen Pampa mit einem der vier Fluoreszenzteleskop-Gebäuden auf einem Hügel im Hintergrund

Hochspannung (1.5 kV) für die drei Sekundärelektronenvervielfacher eines Wassertanks, digitalisiert die Impulse kontinuierlich mit einer Abtastrate von 40 MHz und analysiert die Signalspuren auf interessante Ereignisse, um entsprechende Triggersignale mit ihren Zeitmarken über GSM-Technik an die zentrale Datenerfassung im Campusgebäude am Rand des Observatoriums zu senden. Gehen dort mehrere zeitgleiche Triggersignale von benachbarten Detektorstationen ein, so wird eine Anforderung zur Übermittlung der vollständigen Signalspuren an die entsprechenden Stationen zurückgesendet. Die lokalen Speicher in den Detektorstationen können diese Spuren bis zu ca. 5 Minuten speichern. Sollte bis dahin keine Datenanforderung aus der Zentrale eingehen, werden sie durch neue Daten im Ringspeicher überschrieben. Eine kontinuierliche Übertragung der vollständigen Signalspuren wäre mit der aktuell zur Verfügung stehenden Bandbreite nicht möglich. Neben den Signalspuren werden automatisch in regelmäßigen Abständen Kalibrations- und Wetterdaten an die Zentrale übermittelt. Eine Besonderheit des Pierre Auger Observatoriums ist der so genannte Hybrid-Nachweis der Luftschauer, der hier erstmals konsequent zur Anwendung

gekommen ist. Die hohe Anzahl der ionisierenden Teilchen regen die Stickstoffmoleküle der Erdatmosphäre zur Emission von Fluoreszenzlicht an. Die Intensität dieses isotrop abgestrahlten Lichtes ist zwar gering und entspricht bei höchsten Energien etwa der Intensität einer 60 Watt Glühlampe, sie kann aber mit großflächigen Spiegelteleskopen (Bild 3)

bis zu Entfernungen von über 40 km nachgewiesen werden. Der Vorteil dieser Technik ist, dass man die gesamte Entwicklung des Luftschauers in der Atmosphäre verfolgen kann und die Energie des Primärteilchens quasi modellunabhängig aus der Lichtintensität ablesen kann. Ihr Nachteil ist, dass die Methode nur in klaren mondlosen Nächten zum Einsatz kommen kann und daher auf 15 % der Gesamtmesszeit begrenzt ist. Diese Zeit reicht jedoch aus, die Energiemessung aus den Teilchendetektoren zu eichen und systematische Unterschiede im Detail zu studieren, so dass die Kombination beider Nachweismethoden eine ideale Ergänzung darstellt und eine gleichbleibend hohe Qualität der Daten sichert [1].

Die Ergebnisse werfen neue Fragen auf

Schon während der Aufbauphase des Observatoriums wurden Messdaten aufgezeichnet und

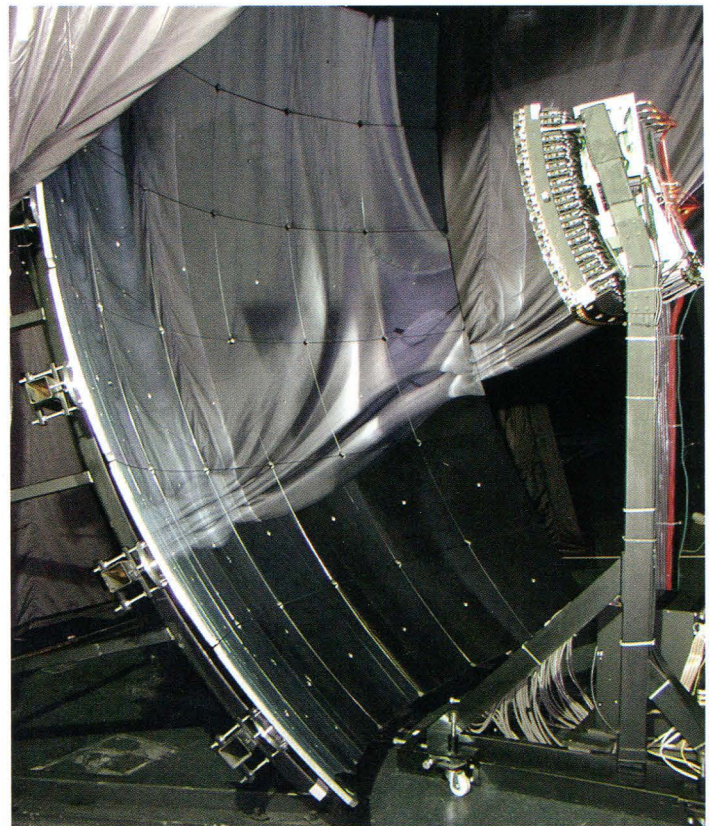


Bild 3: Eines der 27 Fluoreszenzteleskope mit 12 m² Spiegelfläche. Die Kamera aus 440 Sekundärelektronenvervielfachern ist am rechten Bildrand zu erkennen.

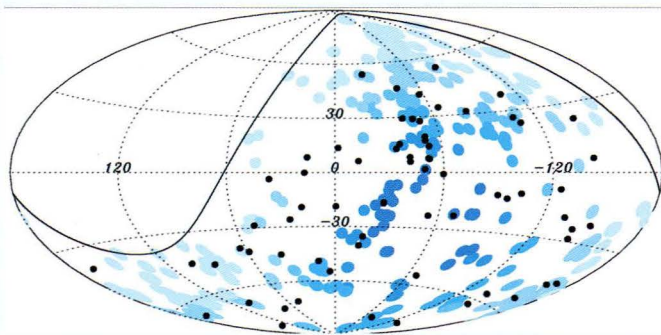


Bild 4: Himmelskarte (in galaktischen Koordinaten) der höchstenergetischen Teilchen, die mit dem Pierre Auger Observatorium nachgewiesen wurden [2]. Die schwarzen Punkte markieren die Ankunftsrichtungen der Teilchen und die blauen Kreise die Himmelskoordinaten der nahen AGN. Der geographische Standort des Observatoriums begrenzt den Blick auf den dargestellten Bereich des Universums.

sie sorgten für eine erste Überraschung: Die Richtungen der höchstenergetischen Teilchen zeigten eine auffällige Richtungskorrelation zu den Positionen naher aktiver Galaxien (AGN) [2].

AGN sind Galaxien, in deren Zentren sich ein schwarzes Loch mit einer Masse von mehreren Milliarden Sonnenmassen befindet und Materie aus seiner Umgebung förmlich absaugt. Die Materie verschwindet aber nicht spurlos im schwarzen Loch, sondern es entstehen sogenannte Jets aus heißen Plasmen, die diametral und eng gebündelt in das intergalaktische Medium hinausgeschleudert werden. Sie erreichen Ausdehnungen, welche die Größe unserer eigenen Galaxie um ein vielfaches übertreffen können. Die Kerne dieser Galaxien, in denen es zur Verdrillung der Raumzeit kommt, oder deren Jets könnten die Quellen der höchstenergetischen Teilchen des Universums sein. Bevor diese Frage abschließend beantwortet werden kann, muss die Statistik der Messdaten weiter verbessert werden.

Die auffällige Anhäufung der Ereignisse aus Richtung der nächsten aktiven Galaxie Centaurus A (in Bild 4 bei $-51^\circ / 19^\circ$) wirft zudem die Frage auf, ob hier eine Hauptquelle der höchstenergetischen Teilchen

ist. Markante Strukturen zeigen sich auch in der Energieverteilung der Teilchen (Bild 5). Oberhalb einer Energie von $5 \cdot 10^{19}$ eV fällt das Spektrum steil ab. Ein solches Verhalten wurde in der Tat vorhergesagt, da Teilchen oberhalb dieser Energie auf ihrem Weg durchs Universum förmlich abgebremst werden. Die Ursache hierfür liegt in ihrer Wechselwirkung mit der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung, einem Relikt aus der Zeit unmittelbar nach dem Urknall. Die Wissenschaftler des Pierre Auger Observatoriums sind dennoch nicht überzeugt, dass dies die Ursache für die Flussunterdrückung bei höchsten Energien ist und werfen ein, dass die Ursa-

che in den Teilchenbeschleunigern selbst liegen könnte. Diese Interpretation wird durch die Beobachtung gestützt, dass bei höchsten Energien ein zunehmender Anteil schwerer Atomkerne zu finden ist. Luftschauer schwerer Kerne entwickeln sich weiter oben in der Atmosphäre und es fällt ihnen aufgrund ihrer höheren Ordnungszahl leichter, in den elektrischen und magnetischen Feldern der Quellen auf hohe Energien beschleunigt zu werden.

Um diese Fragen sicher beantworten zu können, muss nicht nur die Statistik sondern auch die Datenqualität weiter gesteigert werden. Hierzu sind neben einer Verlängerung der Messzeit bis über 2015 hinaus auch weitere technische Verbesserungen, insbesondere der Datenaufnahmeelektronik, geplant. Es bleibt also spannend. Die Zwischenbilanz zeigt einmal mehr, dass die Physik und Astrophysik experiment-, bzw. beobachtungsgetriebene Wissenschaften sind. Die Fortschritte stammen maßgeblich aus neuen oder verbesserten Technologien, die es ihrerseits wiederum ermöglichen, gänzlich neue Beobachtungsgrößen zu erschließen.

Ein Beispiel hierfür ist die neuerlich geglückte Beobachtung von Luftschauern durch den Nachweis der von ihnen erzeugten Radio- und Mikro-

wellenstrahlung [3]. Hiermit lassen sich anders als durch optische Beobachtungen Luftschauer auch am Tag über ihre vollständige Longitudinalentwicklung beobachten und es kann für den Bau der Empfangsinstrumente vielfach auf kommerzielle Produkte aus der Kommunikationselektronik zurückgegriffen werden.

Inwieweit diese Techniken die bisherigen ersetzen können, kann zwar erst in wenigen Jahren abschließend beurteilt werden, aber sie eröffnen schon jetzt neue Ansätze in geophysikalischen Fragestellungen, wie etwa über den Zusammenhang von Blitzbildung und Luftschauern. Auch konnten mit den Fluoreszenzteleskopen zufällig so genannte Elfen mit bislang unerreichter Präzision beobachtet werden. Hierbei handelt es sich um kaum verstandene atmosphärische Phänomene in der unteren Ionosphäre in ca. 80-100 km Höhe, die von Gewittern in der Troposphäre ausgelöst werden.

Wann immer hoch empfindliche Messinstrumente in freier Natur zum Einsatz kommen, sind Überraschungen sicher, die die eigentlichen Zielsetzungen eines Observatoriums durch interessante Naturforschungen ergänzen. Interdisziplinäre Wissenschaften spielen daher beim Pierre Auger Observatorium eine wichtige Rolle.

Referenzen:

- [1] J. Abraham et al (Pierre Auger Collaboration), Nucl. Instr. Meth. A523, 50 (2004).
- [2] J. Abraham et al (Pierre Auger Collaboration), Science 318, 938 (2007).
- [3] H. Falcke et al (LOPES Collaboration), Nature 435, 313 (2005).
- [4] J. Abraham et al (Pierre Auger Collaboration), Phys. Lett. B685, 239 (2010).

Autor: Prof. Dr. Karl-Heinz Kampert, Bergische Universität Wuppertal

kampert@uni-wuppertal.de

<http://www.auger.de>

<http://astro.uni-wuppertal.de>

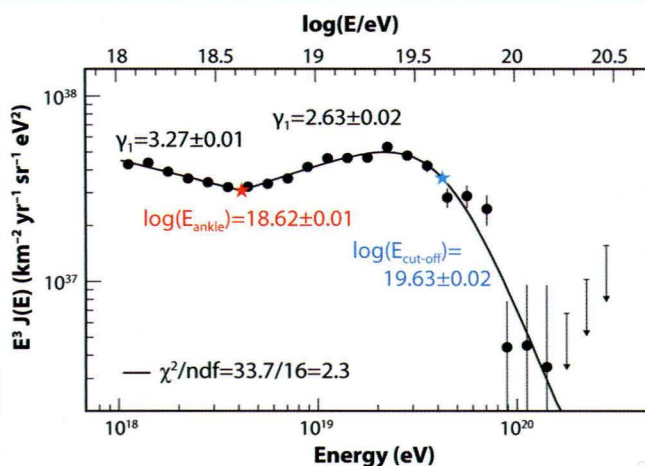


Bild 5: Energieverteilung der höchstenergetischen Teilchen [4]. Oberhalb von $E \approx 5 \cdot 10^{19}$ eV bricht das Spektrum ab. Die Ursache hierfür ist noch nicht eindeutig geklärt.