

Das Südexperiment des Pierre-Auger-Projekts

H. O. Klages, J. Kleinfeller, IK

Einleitung

Die Untersuchung der kosmischen Strahlung bei den allerhöchsten Energien erfordert wegen des sehr niedrigen Teilchenflusses von nur wenigen Ereignissen pro km^2 und Jahrhundert Detektorsysteme mit großer Akzeptanz. Nachgewiesen werden ausgedehnte Luftschauer, die von den hochenergetischen Primärteilchen in der Atmosphäre ausgelöst werden.

Das bisher weltweit größte Detektorfeld, das AGASA-Experiment in Japan [1], überdeckt eine Fläche von 100 km^2 und erreicht damit eine Rate von etwa einem Ereignis pro Jahr bei Energien oberhalb 10^{20} eV . Es besteht aus über 100 Szintillationszählern, die Elektronen und Myonen im Schauer erfassen, die den Erdboden erreichen. Ein anderes Messprinzip wird vom „HIRES“-Experiment [2] in der Wüste nahe Salt Lake City, Utah, USA angewandt. Dieses Experiment besteht aus einem System von Spiegelteleskopen zur Beobachtung des Fluoreszenzlichts, das Stickstoffmoleküle in der Atmosphäre abstrahlen, die durch die Lawine von Sekundärteilchen angeregt werden. In diesen Messungen wird die zeitliche Entwicklung des Luftschauers bestimmt und darüber hinaus eine „kalorimetrische“ Energiebestimmung möglich. Da diese Messungen nur in mondlosen, klaren und dunklen Nächten durchgeführt werden können, ist die effektive Messzeit lediglich 10 – 15 %.

Das Auger-Experiment [3] ist als eine Hybridanordnung geplant, in der die Vorteile beider Beobach-

tungstechniken vereint werden sollen. Die Pierre Auger Kollaboration besteht zur Zeit aus mehr als 40 Institutionen in 16 Staaten. Schon bei dem jetzt im Aufbau befindlichen Südexperiment werden ein 3000 km^2 großes Array von Teilchendetektoren und ein System von dreißig Fluoreszenzteleskopen die gesamte Akzeptanz aller bisherigen Experimente um etwa den Faktor 20 übertreffen. Umfangreiche Information zu den 3 Experimenten kann von den im Literaturverzeichnis aufgeführten Internetstartseiten abgerufen werden. Eine sehr umfassende Sammlung von Internetadressen für die „Astroteilchenphysik“ bietet [4].

Die Wahl des Standortes

Die Größe des benötigten Areals und die Forderung nach einem Gebiet mit dunklem Nachthimmel

und klarer Luft (großer Transparenz) schränkt die Auswahl der möglichen Standorte ein. Um mit zwei Observatorien, die jeweils bis zu etwa 60 Grad Zenitdistanz empfindlich sind, eine völlige Überdeckung des Himmels sicherzustellen, ist eine mittlere geographische Breite erforderlich. Aus experimentellen Gründen ist eine Meereshöhe von ca. 1500 m optimal.

In umfangreichen Voruntersuchungen wurden zwei Standorte ausgewählt: Millard County in Utah, USA auf etwa 40 Grad Nord und El Nihuil in der Provinz Mendoza, Argentinien auf etwa 35 Grad Süd. In beiden Gebieten ist ein Mindestmaß an Infrastruktur vorhanden. Da die bisherigen experimentellen Daten überwiegend auf der Nordhalbkugel gemessen wurden, soll das Südexperiment in Argentinien vorrangig aufgebaut werden (Abb. 1).



Abb. 1: Der Standort des Südexperiments des Pierre-Auger-Projekts in Argentinien.

Das Detektorarray

Zum Nachweis der Elektronen und Myonen in den ausgedehnten Luftschauern werden 1600 Detektorstationen auf einem hexagonalen Gitter mit 1.5 km Abstand eingesetzt. Bei einem Schauer mit einer Energie von 10^{20} eV sprechen im Mittel etwa 16 Detektoren in einem Gebiet von mehr als 6 km Durchmesser an.

Diese Detektoren sind große Wassertanks aus Polyäthylen mit einer Fläche von 10 m^2 und einer Höhe von etwa 1.5 m, gefüllt mit 12 m^3 ultrahochreinem Wasser. Drei empfindliche Photoelektronenvervielfacher (PMTs) von 20 cm Durchmesser weisen Lichtblitze nach, die von hochenergetischen Teilchen im Wasser ausgelöst werden. Geladene Teilchen, die sich in Wasser mit größerer Geschwindigkeit bewegen als mit etwa 70% der Vakuum-Lichtgeschwindigkeit, senden blaues bis ultraviolettes Licht aus,

die charakteristische „Cherenkov“-Strahlung (ähnlich dem Mach'schen Kegel bei einem Überschallknall). Das Wasservolumen ist von einem wasserdichten Behälter aus PE-Gewebe (TYVEK) umgeben. Dieses Material reflektiert Licht auch im UV Bereich sehr effizient und diffus.

Mit diesen Detektoren ist bei großen Abständen vom Kern des Luftschauers ein separater Nachweis von Elektronen und Myonen im Luftschauer über die sehr unterschiedliche mittlere Energie dieser Sekundärteilchen möglich.

Wegen der immensen Ausdehnung des Experiments und der großen Zahl von Detektortanks können diese nicht miteinander verkabelt und gemeinsam versorgt werden. Die Detektoren arbeiten als elektronisch unabhängige und völlig autarke Einheiten. Die Energieversorgung wird bei jedem Tank durch zwei Solarzellen mit Pufferbatterien sichergestellt. Die Elektronik zur Datenaufnahme, zur Ereigniserken-

nung (Trigger) und zur Kommunikation mit der zentralen Datenerfassung ist deshalb auf sehr geringen Energieverbrauch ausgelegt (Abb. 2).

Die Identifikation von Signalen verschiedener Detektoren, die zu einem Ereignis gehören, erfolgt über eine von GPS-Signalen gesteuerte Uhr an jedem Detektor. Damit ist eine zeitliche Datenkorrelation mit einer Genauigkeit von etwa 10 nsec möglich. Dies ist weit genauer als vom Experiment gefordert. Für die Kommunikation der Detektoren und den Datentransfer wird leicht modifizierte Mobiltelephontechnik eingesetzt. Auf dem Gelände ist nicht auf allen Strecken direkte Sichtverbindung gewährleistet. Daher müssen einige Zwischenstationen auf hohen Türmen errichtet werden.

Für die Installation und die Wartung der Detektoren ist die Logistik von besonderer Bedeutung. Große Teile des Detektorfeldes sind auf Grund der unwegsamen Pampa nur mit Geländefahrzeugen und mit langen Fahrzeiten von mehreren Stunden zu erreichen. Die Anfahrt der Detektortanks, die Befüllung mit jeweils 12 Tonnen Reinstwasser und die Inbetriebnahme der Elektronik und Kommunikation müssen so geplant und durchgeführt werden, dass pro Jahr etwa 400 Detektorstationen neu in das Experiment integriert werden können, um den Aufbau in 4 Jahren abzuschließen.

Die Detektoren sollen Serviceintervalle größer als 3 Jahre haben. Daher ist die Zuverlässigkeit der PMTs und der Elektronik sehr wichtig. Störungen für den Be-



Abb. 2: Installationsarbeiten an einem Detektortank des Prototyparrays.

trieb können sich ergeben aus der Alterung der Pufferbatterien, aus der Stabilität der Wasserqualität, und infolge von Schäden durch Hitze, Frost, Sturm oder Tiere und durch Vandalismus.

Das Detektorarray – Aufgaben und Eigenschaften

Das Detektorarray wird die Dichteverteilung der Elektronen und Myonen im Luftschauer in Raum und Zeit stichprobenartig messen. Durch Vergleich der relativen Ankunftszeiten der Schauerpartikel an den verschiedenen Detektoren kann man die Richtung des Schauers und damit des Primärteilchens auf etwa 1-2 Grad genau rekonstruieren. Auch die zeitliche „Dicke“ des Schauers ist eine wichtige Observable. Durch Messung der Lateralverteilung kann man das Schauerzentrum und die integrale Teilchenzahl bestimmen und damit auf die Energie des Primärteilchens schließen. Das Verhältnis von Elektronenzahl zu Myonenzahl im Schauer ist ein Indikator für die Art und Masse des Primärteilchens. Für die Bestimmung von Masse und Energie ist es notwendig, die gemessenen Daten mit „Pseudodaten“ aus sehr aufwendigen Schauer- und Detektorsimulationen zu vergleichen.

Dabei ist ein Problem zu beachten: Die Wechselwirkungen der Teilchen sind bei diesen hohen Energien, die millionenfach höher sind als an irdischen Beschleunigern erreichbar, nicht experimentell bekannt, sondern nur durch theoretische Modelle vorhergesagt. Hier liegt eine systemati-

sche Unsicherheit der Analyse, die sich zum Teil auch in leicht unterschiedlichen Vorhersagen verschiedener Modelle ausdrückt.

Diese Unsicherheit kann durch Messung von mehreren unabhängigen Observablen reduziert werden. Besonders die longitudinale Entwicklung des Schauers, d.h. die Entwicklung der Zahl der Sekundärteilchen mit der Tiefe in der Atmosphäre ist eine wichtige und charakteristische Messgröße. Die maximale Teilchenzahl N_{\max} ist ein sehr guter und nahezu modellunabhängiger Energieparameter, während die atmosphärische Tiefe X_{\max} , bei der die Teilchenzahl maximal wird, ein guter Massenindikator ist. Für die Messung dieser Größen wird die Fluoreszenz der Stickstoffmoleküle der Lufthülle beim Durchgang der geladenen Teilchen des Luftschauers ausgenutzt.

Die Fluoreszenzteleskope

Zur Beobachtung des Luftraums oberhalb des Detektorarrays werden in drei Stationen am Rand und einer Station im Zentrum des Experiments insgesamt 30 Fluoreszenzteleskope aufgebaut. Jede Station am Rand des Areals enthält 6 Teleskope mit einem Gesichtsfeld von jeweils 30 x 30 Grad, so dass das gesamte Blickfeld nach „innen“ vom Horizont bis zu einer Höhe von etwa 30 Grad abgedeckt ist. Diese Teleskopgebäude befinden sich auf kleinen Hügeln, die ca. 100 m höher sind als die umliegende Pampa. Das „zentrale Auge“ wird

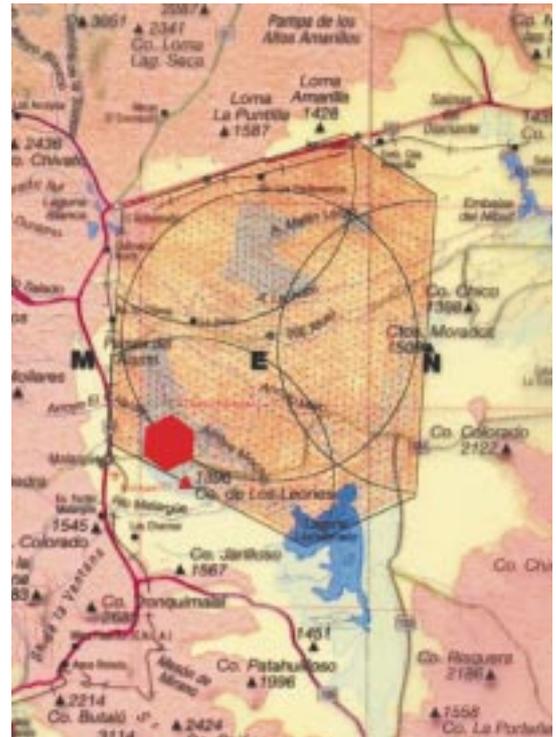


Abb. 3: Das Auger-Experiment bei Malar-güe mit den Positionen der 1600 Wassertanks. Das Gesichtsfeld der Fluoreszenzteleskope wird durch Kreislinien angedeutet. Der rote Bereich zeigt das zur Zeit installierte Prototypexperiment von 60 km².

12 Teleskope enthalten und damit eine azimutale Rundumsicht erlauben (Abb. 3).

Für das Layout der Teleskope wurde aus Kostengründen das Prinzip der „Schmidt-Kamera“ übernommen. Dies ermöglicht ein sehr großes Gesichtsfeld mit noch vertretbaren optischen Abbildungsfehlern. Das Teleskop besteht aus einem großflächigen (14 m²) sphärischen Spiegel mit einem Krümmungsradius von 3.4 m, aus einer PMT-Matrix-„Kamera“ die vor dem Spiegel angebracht ist, sowie einer Eingangsblende mit einem Durchmesser von 1.7 m. Diese Größe der Teleskope wird durch die Forderung

festgelegt, Schauer mit einer Energie von 10^{19} eV bis zu einem Abstand von 30 km noch mit guter Qualität messen zu können (Abb. 4).

Eine solche Anordnung hat eine sphärische Aberration von ca. 0.5 Grad, d.h. ein Stern wird auf die scheinbare Größe des Vollmonds abgebildet. Diese Auflösung ist für das experimentelle Ziel völlig ausreichend. Prinzipiell ist es möglich, mit Hilfe einer speziellen Korrekturlinse in der Aperturöffnung die optischen Eigenschaften zu verbessern. Der Aufwand für eine Linse mit 1.7 m Durchmesser ist hier allerdings nicht gerechtfertigt. Dagegen erscheint es sinnvoll die Blendenöffnung größer zu machen, um die Empfindlichkeit des Teleskops zu erhöhen, wenn es gelingt, die zusätzliche sphärische Aberration zu korrigieren. Dies wird durch eine modulare ringförmige Linse

aus UV transparentem Plexiglas erreicht. Damit kann die effektive Aperturfläche ohne Verschlechterung der Abbildungseigenschaften etwa verdoppelt werden.

Eine weitere Verbesserung des Signal-zu-Rauschverhältnisses lässt sich erreichen, wenn man ein schmalbandiges optisches Filter einsetzt, das den Untergrund vom Streulicht der Sterne am Nachthimmel sehr viel stärker abschwächt als das gesuchte Signal. Das Fluoreszenzlicht der Stickstoffmoleküle liegt überwiegend im nahen UV (300 – 420 nm), während sich das Streulicht von Sternen, Mond und künstlichen Lichtquellen zu sehr viel größeren Wellenlängen erstreckt. Als gut geeignetes Material wird im Experiment das in Bräunungslampen eingesetzte Glas M-UG6 der Fa. Schott verwendet. Es weist zwischen 320 und 400 nm eine Transmission von etwa 85%

auf, während zwischen 450 und 650 nm völlige Absorption des atmosphärischen Streulichts erfolgt.

Die für ein Teleskop benötigte Spiegelfläche von etwa 14 m^2 lässt sich wirtschaftlich nur in segmentierter Form herstellen. Daher wird ein Spiegelsystem aus 36 Einzelspiegeln bestehen. Jedes Spiegelement kann durch eine justierbare Aufhängung exakt ausgerichtet werden. Diese sphärischen Spiegel werden in rein mechanischer Weise aus vorgebogenen Platten einer speziellen Aluminiumlegierung mit hoher Qualität diamantgefräst und dann elektrochemisch durch eine Aluminiumoxydschicht geschützt. Diese neuartige Methode der Spiegelfertigung ist kostengünstiger als die „klassische“ Herstellung hochwertiger Glasspiegel durch sehr langwierige Schleiftechniken und anschließendes Bedampfen mit Aluminium und einer Schutzschicht aus Quarz.

Im Wellenlängenbereich des nahen UV kann mit Aluminiumspiegeln etwa 90% Reflektivität erreicht werden. Die optische Qualität der in Karlsruhe entwickelten, aus massivem AlMgSi0.5 gefrästen Spiegel ist sehr viel besser als für die Anwendung erforderlich. Sie sind extrem robust und bei Bedarf leicht zu reinigen (Abb. 5).

Vor dem Spiegel befindet sich die aus 440 hexagonalen PMTs bestehende „Kamera“ des Teleskops. Die in einer Matrix von 20 Reihen und 22 Spalten angeordneten Lichtsensoren überdecken jeweils 1.5×1.5 Grad des Him-

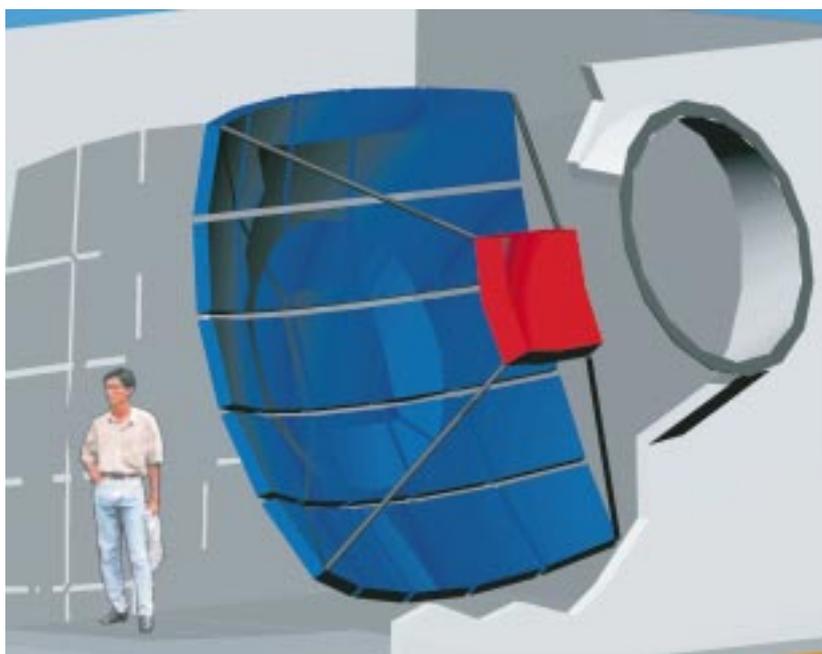


Abb. 4: Schematische Darstellung eines Spiegelteleskops mit „Schmidt-Optik“.

mels. Die bereits erwähnte sphärische Aberration entspricht etwa einem Drittel des Durchmessers eines PMTs. Zur Vermeidung von nicht empfindlichen Flächen am Rand der PMTs werden speziell geformte Reflektoren eingesetzt. Da die Kamera nahezu 1 m^2 groß ist, muss der Kamerakörper ebenfalls (mit einem Radius von ca. 1.7 m) gekrümmt sein, um für alle Beobachtungsrichtungen eine optimale Abbildung zu gewährleisten.

Die Signale der PMTs werden durch eine spezielle Analogelektronik aufbereitet und dann mit einer Rate von 10 MHz digitalisiert. Dabei wird ein sehr großer dynamischer Bereich und ein extrem niedriges Rauschen angestrebt. Misst ein Kanal in einer gleitenden Summe über zehn Intervalle von jeweils 100 nsec eine Ladung, die über dem für einen dunklen Nachthimmel erwarteten Wert von etwa 25 Photoelektronen liegt, wird er als aktiv registriert.

Wenn mehr als 4 aneinander grenzende Pixel aktiv sind, gibt es einen gültigen „Spurtrigger“, der zur Auslese aller Daten der gesamten Kamera führt. Die erforderliche schnelle und intelligente Methode zur Mustererkennung wurde vom HPE des Forschungszentrums Karlsruhe entwickelt und gefertigt.

Wenn die Datenauslese erfolgt ist kann in einem weiteren Schritt eine Vorauswertung der Spuren online erfolgen und daraus gegebenenfalls Trigger-Information für die Steuerung der Datenerfassungssysteme des Detektorarrays abgeleitet werden. Anschlie-

ßend erfolgt über Richtfunk die Übertragung aller relevanten Daten zur Zentrale in Malargüe.

Die Datenaufnahme, Triggererkennung und die Übertragung der Informationen, sowie die Überwachung und Steuerung des Experiments und die Kontrolle der Gebäude- und Umgebungsparameter, besonders auch die Steuerung der Sicherheitseinrichtungen müssen automatisch ablaufen und fernüberwacht werden. Dazu wird ein in Karlsruhe entwickeltes Kontrollsystem auf Industrie-PCs in Verbindung mit einem Profibus-Netzwerk eingesetzt.

Messung atmosphärischer Parameter

Eine Reihe von Schritten sind notwendig, um aus den gemessenen Lichtspuren auf die Anzahl der Schauerteilchen zurückzuschließen. Dazu gehört neben der Bestimmung des Absolutwerts der Detektoreffizienz die genaue Rekonstruktion der geometrischen Verhältnisse zwischen dem Luftschauer und der Beobachtungsrichtung aus den Messdaten. Der Abstand und der Relativwinkel bestimmen die effektive Spurlänge in jedem Pixel.

Von besonderer Bedeutung sind die atmosphärischen Bedingungen zum Zeitpunkt des Ereignisses. Die Abschwächlänge von UV Licht in trockener Wüstenluft infolge der Rayleigh-Streuung an Luftmolekülen beträgt etwa 10 km , ist allerdings von der Lichtwellenlänge abhängig. Dies gilt in noch stärkerem Maße für die Streuung an Aerosolen, die durch



Abb. 5: Prototypaufbau eines gemischten Spiegelsystems im Institut für Kernphysik. Es besteht aus 18 Aluminiumspiegeln und 40 hexagonalen Glasspiegeln.

Pflanzen- und Tierausscheidungen entstehen und durch Wind auch in höhere Luftschichten transportiert werden können. Dieser Effekt ist zeitabhängig und muss im Experiment regelmäßig gemessen werden. Dazu werden z.B. festinstallierte Monitore für die horizontale Abschwächung des Lichts eingesetzt und die Aerosolschichtung wird durch Rückstreuung von intensiven Laserpulsen indirekt gemessen.

Da die Fehler der atmosphärischen Parameter direkt in die Messgrößen eingehen, wird angestrebt, durch gleichzeitige Beobachtung eines hochenergeti-

schen Schauers mit zwei Teleskopen aus verschiedenen Entfernungen (STEREO) diese Fehler zu eliminieren. Daher wurde die Empfindlichkeit der einzelnen Teleskope auf eine Sichtweite bis zu etwa 40 km gesteigert und die Geometrie des gesamten Experiments auf Stereo-Beobachtung optimiert.

Vereinzelte tiefliegende Wolken verursachen ebenfalls Probleme. Deshalb überwachen eine große Zahl von Infrarotmonitoren an den Wassertanks, fahrbare LIDAR-Systeme auf dem Detektor-

array sowie Infrarotkameras am Ort der Fluoreszenzteleskope den Himmel.

Mit zusätzlichen Kalibrationsmessungen für die PMTs wird es möglich sein, aus den Beobachtungen der Fluoreszenzspuren die Schauerenergie auf 20% genau zu rekonstruieren. Die Richtung der Schauerachse kann bei 10^{20} eV genauer als 1 Grad bestimmt werden und die Messung von X_{\max} wird mit einer Unsicherheit von weniger als 25 g/cm^2 möglich sein (Abb. 6).



Abb. 6: Das erste Teleskopgebäude auf dem Hügel „Los Leones“ am Südrand des Experiments mit dem Richtfunkturn für die Datenübertragung.

Status des Experiments

Mit dem Aufbau des Experiments wurde im Jahre 2000 begonnen. Auf dem zentralen Campus in Malargüe wurde eine große Montagehalle für die technische Vorbereitung der Wassertanks fertiggestellt. Daneben entsteht zur Zeit die Datenerfassungszentrale. Die Installation von Wassertanks im Gelände hat begonnen. Bis Mai 2001 soll ein Testarray von 37 Tanks in Betrieb genommen werden. Auf dem Hügel „Los Leones“ etwa 12 km östlich Malargüe wurde das erste Teleskopgebäude fertiggestellt. Dort werden zur Zeit zwei Prototyp-Teleskope aufgebaut. Die Installation der Teleskope und der zugehörigen Infrastruktur soll ebenfalls bis Mai 2001 erfolgt sein. Diese Teleskope überdecken den Luftraum oberhalb des etwa 10 km entfernten Testarrays. Mit dieser Anordnung sollen noch bis zum Jahresende 2001 umfangreiche Testmessungen durchgeführt werden.

Die Aufbauphase des Südexperiments des Pierre-Auger-Projekts wird die Jahre 2002 bis 2005 umfassen. Ab dem Sommer 2003 werden bereits aussagekräftige Messungen der kosmischen Strahlung bei höchsten Energien mit dem fertiggestellten Teil des Experiments möglich sein.

Literatur

- [1] www-akeno.icrr.u-tokyo.ac.jp/AGASA,
“Cluster analysis of extremely high energy cosmic rays in the northern sky”, Y. Uchihori et al., *Astropart. Phys.* 13 (2000) 151-160
- [2] <http://hires.physics.utah.edu>
- [3] www.auger.org
- [4] www-hfm.mpi-hd.mpg.de/CosmicRay/CosmicRaySites