

Partikel in der Pampa

Das Pierre-Auger-Observatorium detektiert die energiereichsten Teilchen im Universum.

Stefan Jorda

Seit Stunden fahre ich bereits von der argentinischen Großstadt Mendoza aus nach Süden, meist führt die Straße schnurgeradeaus. Zu beiden Seiten der Straße erstreckt sich die Pampa mit ihrer niedrigen Vegetation aus Gras und Büschen. Zur Rechten begleiten mich in einiger Entfernung die schneebedeckten Gipfel der Anden, doch hier in der Ebene ist es heiß und trocken. Bis zu meinem Ziel, der Kleinstadt Malargüe, fehlen noch immer fast hundert Kilometer, als ich den ersten „Tank“ sehe: Am Straßenrand steht ein runder, beigefarbener Behälter, etwa einen Meter hoch und drei Meter im Durchmesser. Obendrauf befinden sich ein Solarmodul sowie eine Richtfunk-Antenne. Das soll ein Teilchendetektor sein? Bei der Weiterfahrt tauchen etwa alle zwei Kilometer links und rechts der Straße baugleiche Tanks auf. Wenn ich den Blick in die Ferne schweifen lasse, kann ich bis zum Horizont kleine Pünktchen erahnen. Doch das ist nur ein Bruchteil der insgesamt über 1600 Detektoren, die hier ab dem Jahr 2000 aufgestellt wurden. Sie alle gehören zum Pierre-Auger-Observatorium, dessen Hauptquartier in Malargüe ich nach einer weiteren Stunde erreiche. Dieses weltweit größte Observatorium weist Teilchen der kosmischen Strahlung nach, deren Energie bis zu 100 Millionen Mal höher ist als die Strahlenergie des Large Hadron Colliders (LHC). Ein Proton mit diesen 100 Exa-Elektronenvolt⁺⁾ hat eine ähnliche kinetische Energie wie ein Tennisball beim Aufschlag. „Das ist die höchste Teilchenenergie, die wir in der Natur überhaupt kennen. Wir wollen die Quellen dieser Teilchen finden und verstehen“, sagt Karl-Heinz Kampert. Der Wuppertaler Physikprofessor wurde im Herbst als Sprecher der



Vor der Kulisse der Anden bilden über 1600 dieser Bodendetektoren das zentra-

le Element des Pierre-Auger-Observatoriums in der argentinischen Pampa.

Auger-Kollaboration wiedergewählt, der etwa 500 Wissenschaftler aus 19 Ländern angehören.

Wenn kosmische Teilchen – primär Protonen und schwerere Atomkerne – in die Erdatmosphäre eindringen, werden sie an den Atomkernen der Luft gestreut, sodass sie selbst die Erdoberfläche nicht erreichen können – zum Glück für unsere Gesundheit. Bei den Stößen entstehen aber neue Teilchen, die weiter erzeugen usw., sodass eine ganze Lawine von Millionen bis Milliarden von sekundären Teilchen entsteht, die auf die Erdoberfläche zurasen. Befindet sich dort ein verteiltes Feld von Detektoren, so registrieren diese beim Eintreffen des Schauers Signale, die Rückschlüsse auf die Eigenschaften des primären Teilchens erlauben. Der französische Physiker und Namenspatron für das Observatorium Pierre Auger wies auf diese Weise bereits Ende der 1930er-Jahre Luftschauer auf dem Jungfraujoch in der Schweiz nach.

In den 1960er-Jahren gelang es mit solchen Detektorfeldern, die Zahl der pro Fläche und Zeit auf die Erde prasselnden kosmischen Teilchen zu vermessen. Dieser

Fluss fällt im Wesentlichen mit der dritten Potenz der Energie ab. Daher trifft pro Quadratmeter und Minute etwa ein Teilchen auf die Erde, dessen Energie bei der LHC-Energie oder darüber liegt, während bei einer Grenzenergie von einem 1 EeV nur noch mit einem Teilchen pro Quadratkilometer und Jahr zu rechnen ist. Wenn man den Teilchenfluss bei höchsten Energien vermessen möchte, führt also kein Weg an möglichst großen Detektorfeldern vorbei – daher verteilen sich die Tanks des Pierre-Auger-Observatoriums auf eine Fläche von 3000 Quadratkilometern, größer als Luxemburg. Ungeachtet davon gelang es aber bereits in den 1960er-Jahren, mit einem kleinen Messfeld ein einzelnes Ereignis mit sogar 100 EeV zu registrieren. „Die hatten einfach unglaubliches Glück“, sagt Kampert.

Glück, das allerdings schon damals die bis heute nicht beantwortete Frage aufwarf, welche kosmischen Objekte und physikalischen Prozesse überhaupt in der Lage sind, so hohe Energien zu erzeugen. Zusätzliches Kopfzerbrechen bereitete eine Vorhersage des Amerikaners Kenneth Greisen

^{+) 1 EeV = 10¹⁸ eV}

#) Anregung der Delta-Resonanz beim Proton bzw. Photodesintegration bei Atomkernen

sowie der Russen Georgi Zatsepin und Wadim Kuzmin. Unabhängig voneinander hatten sie 1966 erkannt, dass kosmische Teilchen bei Energien jenseits von rund 60 EeV rasch Energie verlieren sollten, wenn sie mit den Photonen der Mikrowellen-Hintergrundstrahlung wechselwirken, die in ihrem Ruhesystem zu harter Gammastrahlung „blauverschoben“ sind. Erstaunlicherweise ist diese Grenze für ein Proton und einen schweren Kern praktisch gleich, obwohl die involvierten Prozesse^{#)} völlig verschieden sind. Diese treten auf einer räumlichen Skala von rund 30 Millionen Lichtjahren auf. Falls uns dennoch Teilchen mit höherer Energie erreichen, folgt daraus, dass deren Quelle nicht weiter als rund 300 Millionen Lichtjahren von uns entfernt sein kann. „Auf kosmologischer Skala ist das quasi unser Vorgarten“, erläutert Kampert.

So weit die Theorie. Bricht das gemessene Spektrum der kosmischen Strahlung aber bei dieser GZK-Grenze von 60 EeV tatsächlich ab oder gilt das Potenzgesetz auch darüber hinaus?

Anfang der 1990er-Jahre gab es dazu widersprüchliche Ergebnisse



Karl-Heinz Kampert vor dem zentralen Gebäude des Observatoriums in Malargüe

von einem japanischen und einem amerikanischen Schauerexperiment. „Dies war für uns eine starke Motivation, das Auger-Observatorium zu konzipieren und zu bauen“, erinnert sich Kampert, der von Anfang an der Kollaboration angehört. Neben Malargüe waren zunächst weltweit mehrere andere Standorte im Rennen. Dabei galt es nicht nur, eine ausreichend große Fläche zu finden, diese muss auch eben sein, da die einzelnen Tanks ihre Ergebnisse per Richtfunk übertragen und eine direkte Sichtverbindung zu den Kommunikationsmasten benötigen. Außerdem muss die Höhe passen: Liegt der Standort

zu niedrig, klingen die Luftschauer ab, bevor sie die Tanks erreichen, liegt er zu hoch, haben sich die Schauer noch nicht voll entwickelt. In dieser Hinsicht hat Malargüe mit 1400 Metern eine ideale Höhe. Hinzu kamen die Infrastruktur sowie die politische Unterstützung. „Wir hatten das Glück, dass wir einflussreiche und weitsichtige Leute getroffen haben, die sofort erkannt haben, welche Chance sich hier für ihr Land bietet“, sagt Johannes Blümer vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT), der die mit Abstand größte Institutsgruppe innerhalb der Kollaboration leitet. Neben dem Bürgermeister und dem Gouverneur setzte sich sogar der damalige argentinische Staatspräsident Carlos Menem persönlich für das Projekt ein.

Das hätte aber auch nichts genutzt ohne die Zustimmung der betroffenen 120 Landeigentümer, denn das gesamte Gebiet ist privates Farmland. „Die haben natürlich gefragt, warum wir gerade hierher wollen und ob mehr Strahlen ankommen, wenn wir unsere Apparate aufstellen“, erinnert sich Blümer, der ebenfalls von Anfang an dabei ist. Jeder Eigentümer erhält vertraglich vereinbart eine Pacht dafür, dass „wir ihre Ziegen aufscheuchen“. Zudem wurden Straßen und Brücken verbessert, viele Farmen erhielten erstmals einen Stromanschluss. Auch die Unterstützung der Bevölkerung ist bei einem Projekt dieser Größenordnung, das sich nicht wie astro-



Die 1600 Bodendetektoren (rote Punkte) sind auf einer Fläche von 3000 Quadratkilometern angeordnet. Von vier Stand-

orten am Rand aus decken jeweils sechs Fluoreszenzteleskope ein Blickfeld von 180 Grad ab (grüne Linien).



Ein Bodendetektor und die Teleskopstation Leones im Süden des Detektorfelds

nomische Observatorien weitab der Zivilisation befindet, unabdingbar. Zur Identifikation mit dem Observatorium und zur Vorbeugung gegen Vandalismus durften die Schüler vor Ort die Tanks taufen, sei es auf den eigenen Namen oder auf den von Angehörigen. Erst als die Ideen ausgingen, kamen Mitglieder der Kollaboration zum Zug. So kommt es, dass heute eine Luisa oder eine Alaide ebenso verewigt sind wie Phil Collins.

Gegenseitige Unterstützung

Das gute Verhältnis zur Bevölkerung geht aber noch weit darüber hinaus. Mit Spendengeldern entstand eine Schule, die den Namen des Nobelpreisträgers Jim Cronin trägt, einer der Initiatoren des Observatoriums und langjähriger Sprecher. Andere Schulen werden unterstützt, Wissenschaftler halten Vorträge oder bringen Kleidung für bedürftige Kinder in ihrem Reisegepäck mit. Während sich zu Beginn der 1990er-Jahre selten ein Ausländer nach Malargüe verirrt, hat sich die Bevölkerung inzwischen an die ausländischen Wissenschaftler gewöhnt, von denen viele zweimal im Jahr die weite Anreise auf sich nehmen, um an den Kollaborationstreffen teilzunehmen. Eines der Treffen findet immer um den 16. November statt, dem Gründungstag der Provinz Mendoza. Dann reihen sich die Physiker bei der traditionellen Parade auf

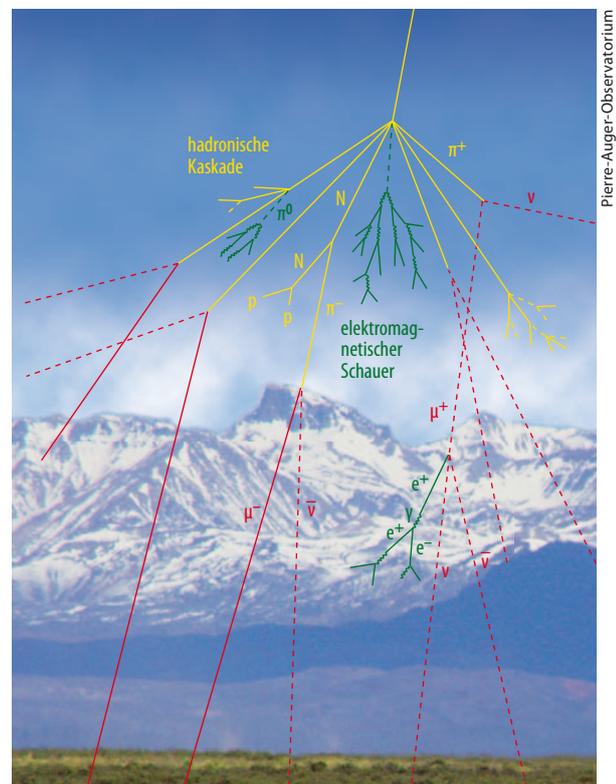
der Avenida San Martín zwischen Schüler, Gaúchos und andere Gruppen ein und bedanken sich auf diese Weise für die Unterstützung.

Bei den Kollaborationstreffen stehen nicht nur neue Daten und deren Interpretation auf der Agenda, sondern auch die Finanzen. Der Bau des Observatoriums hat 50 Millionen Euro gekostet, die Betriebskosten betragen 1,5 Millionen Euro pro Jahr, die die Kollaborationsmitglieder aufbringen müssen. Grundsätzlich zahlt jeder Seniorwissenschaftler davon rund 7000 Euro, die er über seine nationale Förderorganisation einwerben muss. Während sich früher häufiger Mitglieder aus Mexiko oder Brasilien wegen Zahlungsverzug rechtfertigen mussten, sind derzeit eher Südeuropäer die Sorgenkinder. Einige Institute haben nicht nur verzögert, sondern auch weniger Geld erhalten und mussten daher sogar die Zahl ihrer Kollaborationsmitglieder reduzieren. Verwaltet werden die gesamten Finanzen am KIT, wo sich seit Sommer 2013 die administrative Zentrale des Observatoriums befindet.

Seither arbeitet Jonny Kleinfeller als Projektmanager vor Ort. Der Karlsruher Physiker war bereits am Aufbau beteiligt und kennt das gesamte Observatorium wie seine Westentasche. Mit ihm fahre ich über Schotterpisten rein in die Pampa, zu einigen Tanks sowie weiteren Teilen des Observatoriums. „Mit meinem eigenen Auto würde ich nicht zu jedem Detektor fahren“,

sagt er, Allrad hin oder her. Das Problem sind die scharfen Dornen, die mehrere Zentimeter lang sind und ohne weiteres einen Autoreifen durchbohren können. Die Wartungsmannschaften, die jeden zweiten Tag in der Pampa unterwegs sind, haben daher spezielle Reifen an ihren Pickups.

Jeder Tank enthält zwölf Kubikmeter hochreinen Wassers. Wenn ihn geladene Teilchen durchqueren, entsteht Cherenkov-Licht, das Photomultiplier nachweisen. Eine Elektronik zeichnet das Signal auf und überträgt es per Richtfunk. Ein GPS-Empfänger liefert ein auf 20 Nanosekunden genaues Zeitsignal, und Solarmodul sowie Batterie stellen die Energieversorgung der autarken Tanks sicher. Wenn nun ein kosmisches Teilchen über dem Detektorfeld in die Atmosphäre eindringt, erreichen die sekundären Teilchen wie ein viele Kilometer großer Pfannkuchen die Erde, wo mehrere Detektoren die Teilchenzahl als Funktion der Zeit erfassen. Die Einfallsrichtung ergibt sich unmittelbar aus den unterschiedlichen Ankunftszeiten und den Positionen der Detektoren. Auch die Energie



Teilchen der kosmischen Strahlung dringen in die Atmosphäre ein und erzeugen Kaskaden von Millionen bis Milliarden Sekundärteilchen.



Blick über die Teleskopstation Coihueco (vorne rechts) in die Ebene, in der sich bis zu den Bergen am Horizont Bodendetektoren befinden.

des primären Teilchens lässt sich recht sicher bestimmen: Dazu wird ein Dichteprofil an die gemessenen Teilchenzahlen gefittet – der „Pfannkuchen“ wird dünner, je größer der Abstand zur Schauerachse ist. Daraus ergibt sich die Zahl aller sekundären Teilchen, ein direktes Maß für die gesuchte Energie. War das Teilchen aber ein Proton, ein Kohlenstoff- oder ein Eisenkern? Unterscheiden sich die Flüsse dieser Teilchen vielleicht sogar je nach Energie? Dies wäre ein wichtiger Hinweis auf die Beschleunigungsmechanismen, die den Teilchen ihre enorme Energie verleihen.

Daher ist es essenziell, neben der Energie auch die Masse zu bestimmen. Dies ist am direktesten möglich mithilfe von speziellen Teleskopen, die am Rand des Messfelds stehen und nachts den Himmel darüber beobachten. Ihre Aufgabe besteht darin, das schwache tiefblaue Fluoreszenzlicht aufzuzeichnen, zu dem die geladenen sekundären Teilchen den Stickstoff der Luft anregen. Dessen Intensität nimmt in dem Maße, wie sich der Teilchenschauer entwickelt, zunächst zu und nach Erreichen eines Maximums wieder ab – quasi wie eine Sternschnuppe, die mit Lichtgeschwindigkeit zur Erde rast. Da schwere Kerne weniger tief in die Atmosphäre eindringen als Protonen, beginnen die „Lichtschläuche“ bereits weiter oben, sodass sich aus der gemessenen Höhe des Lichtmaximums die Masse extrahieren lässt. Die Teilchenenergie

ergibt sich bei dieser Methode aus der gesamten Lichtmenge. Der große Nachteil dieser Teleskope besteht allerdings darin, dass sie nur in klaren, mondlosen Nächten beobachten können und damit nur in etwa einem Zehntel der Zeit zum Einsatz kommen. „Zudem ist die Atmosphäre Teil des Detektors, und die kann sich Nacht für Nacht ändern“, sagt Kleinfeller.

Ein rätselhaftes Ergebnis

Bereits während des Aufbaus des Observatoriums, der 2008 abgeschlossen wurde, begann die Datennahme. Bei der Energieschwelle von 1 EeV registrieren die Tanks alle drei Minuten einen Schauer, viel seltener, nur noch alle zwei Wochen, zeichnen sie ein Ereignis mit 100 EeV auf. Damit war nicht nur die Existenz von Teilchen dieser Energie jenseits aller Zweifel nachgewiesen, sehr schnell hat sich auch gezeigt, dass das Spektrum tatsächlich bei der vom GZK-Effekt vorhergesagten Energie abbricht. Obendrein wiesen die Teilchen der höchsten Energie eine starke Richtungskorrelation zu nahen aktiven Galaxien auf, in deren Zentrum sich ein sehr massereiches Schwarzes Loch mit Milliarden Sonnenmassen befindet. „Das war eine riesengroße Überraschung“, sagt Kampert. Das aufsehenerregende Ergebnis wurde 2007 in *Science* veröffentlicht.⁸⁾ Sind die Quellen der höchstenergetischen

kosmischen Strahlung also aktive Galaxienkerne?

Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass diese Korrelation zufällig ist, betrug etwa ein Prozent – viel zu hoch, um von einer Entdeckung zu sprechen.⁹⁾ Wie immer hieß es daher, mehr Daten zu sammeln. Doch seither ist die Korrelation zu den Quellen geringer geworden, der statistische Fehler ebenfalls, sodass es hinsichtlich der Signifikanz zur Enttäuschung der Kollaboration keinen Fortschritt gegeben hat. Dies hängt möglicherweise mit einem weiteren Ergebnis zusammen: Obwohl vor 15 Jahren „alle darauf gewettet hätten“ (Blümer), dass die energiereichsten Teilchen Protonen sind – schließlich ist Wasserstoff das häufigste Element im Universum –, scheint bei den höchsten Energien die überwältigende Mehrheit der Schauer von schweren Atomkernen zu stammen und nicht von Protonen. Aufgrund ihrer größeren elektrischen Ladung (26 bei Eisen) lenken die intergalaktischen Magnetfelder diese Kerne aber viel stärker ab. Daher weist ihre Ankunftsrichtung – im Gegensatz zu Protonen – nicht auf ihre Quelle zurück.

Warum aber überwiegen die schweren Kerne bei den höchsten Energien? Eine natürliche Erklärung könnte der Beschleunigungsmechanismus liefern. Wie immer der auch im Detail funktioniert, zweifellos spielen dabei Magnetfelder eine Rolle, die an die elektrische Ladung koppeln. Ein „kos-

8) J. Abraham et al., *Science* **318**, 938 (2007); vgl. J. Blümer, *Physik Journal*, Juni 2010, S. 31

9) Von einer Entdeckung spricht man bei einer statistischen Signifikanz von 5σ , dann beträgt die Wahrscheinlichkeit für eine zufällige Fluktuation nur noch 0,000057 Prozent.

mischer Beschleuniger“ mit fester Größe und gegebenem Magnetfeld kann daher Eisenkerne zu höheren Energien beschleunigen als Protonen. Dann hätte der beobachtete Abbruch im Spektrum gar nichts mit dem bei der Propagation auftretenden GZK-Effekt zu tun, sondern damit, dass die Beschleuniger ihre Grenzenergie erreicht haben. „Beobachten wir das eine oder das andere oder sogar eine Mischung von beidem? Das ist für uns jetzt das große Rätsel“, sagt Kampert.

Um das Rätsel zu lösen, geht kein Weg daran vorbei, bei den höchsten Energien mehr Ereignisse zu detektieren und die zugehörige Masse zu bestimmen. Daher gibt es verschiedene Ideen innerhalb der Kollaboration, wie dies mit umgebauten Bodendetektoren möglich ist. Da bei schweren Kernen viel mehr Myonen am Boden ankommen als bei Protonenschauern, zielen alle Ideen darauf ab, Elektronen und Myonen besser voneinander zu trennen, sei es durch den Einbau von Zusatzdetektoren über oder unter den Tanks oder durch Segmentieren der Tanks. Einige Prototyp-Detektoren sind bereits in der Erprobung, bei anderen stecken Teile seit Monaten beim argentinischen Zoll im fernen Buenos Aires fest.

Beim Kollaborationstreffen im November war das Upgrade ein zentraler Punkt auf der Agenda, Vor- und Nachteile der fünf konkurrierenden Ideen wurden ausführlich diskutiert. Aber wie kommt eine demokratisch organisierte Kollaboration, die keinen Chef hat, zu einer Entscheidung? Nach langen Diskussionen hat sie sich darauf geeinigt, ein Komitee von angesehenen Seniorwissenschaftlern einzusetzen, das bis zum Sommer einen Kompromiss vorschlagen soll. „Die Herausforderung besteht darin sicherzustellen, dass die Kollaboration gemeinsam in eine Richtung marschiert und nicht zerbricht, ohne hierbei den Ideenreichtum zu unterdrücken“, erläutert Kampert das Dilemma. Für das Upgrade sind etwa 20 Prozent der ursprünglichen Baukosten veranschlagt, also 10 Millionen. Ein

internationales Gutachterkomitee hat das Upgrade stark befürwortet, die Finanzierung ist zwar noch nicht gesichert, aber Kampert ist zuversichtlich: „Jetzt zeigt sich natürlich meine Obsession, aber das würde einen ja wahnsinnig machen, wenn wir den Abbruch im Spektrum sehen und in den nächsten Jahrzehnten nicht herausfänden, welche Ursache er hat.“ Ziel ist es, mit dem umgebauten Observatorium weitere zehn Jahre zu messen. Mit den zusätzlichen Daten sollte sich dann nicht nur die

Frage beantworten lassen, ob der Abbruch im Spektrum durch den GZK-Effekt zustande kommt oder ob er der Grenzenergie der kosmischen Beschleuniger entspricht. Dann sollten sich auch getrennte Himmelskarten für Protonen und schwere Kerne erstellen lassen. Wenn die Protonenkarte klare Korrelationen zu Quellen zeigt, die Eisenkarte aber nicht, wäre das physikalische Bild stimmig. „Dann könnten wir sagen: mission accomplished“, ist Blümer überzeugt.