

BUW OUTPUT

Forschungsmagazin *Research bulletin* der Bergischen Universität Wuppertal · I / 2009 · buw-output.de



BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL

Auf der Suche nach den
kosmischen Beschleunigern

*Ultra high energy particles –
Searching for their cosmic source*

von / by Karl-Heinz Kampert

Neutrinojagd am Südpol

Hunting neutrinos at the South Pole

von / by Anna Franckowiak

Nach 100 Trillionen Rechenoperationen
beim historischen Ergebnis

Quarks, gluons and QCD

von / by Zoltan Fodor und Christian Hoelbling

Empirie und Mathematik in den Naturwissen-
schaften – historisch und philosophisch

*Empiricism and Mathematics in the Natural
Sciences – an Historical and Philosophical View*

von / by Friedrich Steinle

Gesundheit der Zukunft –
Zukunft der Gesundheit

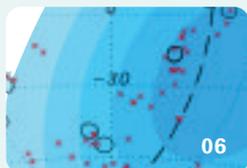
Health of the future – future of health

von / by Rainer Wieland und Kerstin Schneider

INHALT / CONTENTS

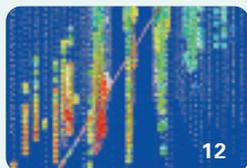
04

Editorial von / by Michael Scheffel



06

Die höchstenergetischen Teilchen des Universums
Auf der Suche nach den kosmischen Beschleunigern
Ultra high energy particles – searching for their cosmic source
von / by Karl-Heinz Kampert



12

Über die Geheimnisse hochenergetischer Teilchen aus astrophysikalischen Quellen
Neutrinojagd am Südpol
Hunting neutrinos at the South Pole
von / by Anna Franckowiak



16

Quarks, Gluonen und die QCD –
Nach 100 Trillionen Rechenoperationen beim historischen Ergebnis
Quarks, gluons and QCD
von / by Zoltan Fodor und Christian Hoelbling



22

Das interdisziplinäre Zentrum für Wissenschafts- und Technikforschung
Empirie und Mathematik in den Naturwissenschaften – historisch und philosophisch
Empiricism and Mathematics in the Natural Sciences – an Historical and Philosophical View
von / by Friedrich Steinle



30

Das Bergische Kompetenzzentrum für Gesundheitsmanagement und Public Health
Gesundheit der Zukunft – Zukunft der Gesundheit
Health of the future – future of health
von / by Rainer Wieland und Kerstin Schneider

36

Research News

40

Forschungseinrichtungen / Research Centers

42

Forschungsförderung / Kontakt / Research Funding Management / Contact

42

Impressum / About this Publication

Die höchstenergetischen Teilchen des Universums



von / by

Prof. Dr. Karl-Heinz Kampert

kampert@uni-wuppertal.de

Abb. 1: Eine der 1.600 Detektorstationen des Pierre Auger Observatoriums zum Nachweis der Teilchen am Erdboden und eines der 24 Teleskope zum Nachweis des Fluoreszenzlichtes in der Atmosphäre

Fig. 1: One of 1600 detector stations at the Pierre Auger Observatory in Argentina measuring cosmic particle impact on the earth's surface, and one of 24 telescopes for observation of atmospheric fluorescent light.



Moderne astronomische Teleskope versorgen uns mit einer Vielzahl brillanter Himmelsaufnahmen, die immer wieder überraschende neue Einblicke in kosmische Prozesse gewähren. Die verschiedenartigen Teleskope vermessen hierbei das elektromagnetische Spektrum vom Radiobereich bis zur hochenergetischen Gamma-Strahlung und ihre Bilder üben eine starke Faszination aus. Vergleichsweise unmerklich geblieben ist hingegen der Schwarm hochenergetischer Teilchen, der unablässig auf die Atmosphäre trifft. Auch wenn diese so genannte kosmische Strahlung nicht direkt sichtbar ist, so beeinflusst sie uns Menschen doch in vielerlei Hinsicht. Die energiereichen Protonen, Alpha-Teilchen und schweren Atomkerne können zum Beispiel DNS-Stränge des Erbguts aufbrechen und zu Mutationen führen und somit letztlich zur Entwicklung des Lebens beigetragen haben. Neuen Modellrechnungen zufolge fördert die kosmische Strahlung auch die Wolkenbildung und ist damit für unser Klima mit verantwortlich.

{ Ultra high energy particles – searching for their cosmic source }

High energy cosmic radiation, responsible for some basic biological and meteorological processes, has been known for 100 years, but where does it come from? The 3,000 sq km Pierre Auger Observatory in Argentina catches these rare particles, more than 100 million times more powerful than those produced in CERN's Large Hadron Collider. Its combined array of particle detectors and electronic telescopes records air showers released by the impact of the particles in the atmosphere, generating data that indicates the distance and situation of their source.

Some are thought to originate within our galaxy, but the highest energy particles must come from deeper in the universe. Confirmation of the 1964 GZK prediction on the filter-effect of background cosmic microwaves was singled out as one of 2007's three leading scientific breakthroughs, and the discovery of a so-called "ankle" in high energy particle trajectories, suggesting a transition from galactic to extragalactic origin, was ranked among the top ten scientific events of 2008. 



Trotz nahezu 100-jähriger Forschung blieben die Quellen der Strahlung bislang im Dunklen verborgen. Erst seit wenigen Jahren ist die Wissenschaft nun in der Lage, den Bereich der höchstenergetischen Teilchen systematisch zu erschließen. Es ist sehr bemerkenswert, dass die Energien der höchstenergetischen kosmischen Teilchen die Teilchenenergien des in Kürze in Betrieb gehenden größten irdischen Teilchenbeschleunigers (Large Hadron Collider (LHC) am europäischen Forschungszentrum in Genf) mehr als 100-millionenfach übertreffen! Wo im Kosmos befinden sich diese enormen Teilchenbeschleuniger, wie funktionieren sie, was verraten sie uns über bislang unbekannte Prozesse im Universum und über Teilchenphysik bei höchsten Energien? Dies sind die Fragen, die mit Hilfe des Pierre Auger Observatoriums in Argentinien beantwortet werden sollen. Der österreichische Physiker Victor Hess entdeckte 1912 die kosmische Strahlung auf Freiballonflügen bis in 5.000 m Höhe. Er konnte nachweisen, dass die elektrische Leitfähigkeit der Luft, hervorgerufen durch energiereiche geladene Teilchen, in Höhen oberhalb von etwa 1.000 m sehr stark zunimmt. Da dieses Phänomen nicht durch die Radioaktivität der Erde erklärt werden konnte, schloss Victor Hess folgerichtig auf einen außerirdischen Ursprung der energiereichen Teilchen. Heute ist bekannt,

dass die kosmische Strahlung überwiegend aus Protonen und Atomkernen unterschiedlicher Energie besteht und sie aus verschiedenen Quellen innerhalb und außerhalb der Milchstraße stammen müssen.

Im Gegensatz zur elektromagnetischen Strahlung, die mit den bereits erwähnten Teleskopen nachgewiesen wird, ist die kosmische Strahlung auf ihrem Weg von der Quelle zur Erde Ablenkungen in Magnetfeldern ausgesetzt. Ihre Ankunftsrichtung enthält daher keinerlei Informationen über den Standort ihrer Quellen im Universum. Es ist vor allem dieses Problem, welches die Suche nach den Quellen der kosmischen Strahlung so schwierig gestaltet und seit fast 100 Jahren auch verhindert hat. Als sicher gilt nur, dass die niederenergetische Strahlung ($E < 10^9$ eV) überwiegend von der Sonne stammt. Der Ursprung der höherenergetischen Teilchen liegt nach bisherigen Erkenntnissen in fernen Regionen unserer Heimatgalaxie, vermutlich in den Überresten von Supernova-Explosionen. Die Teilchen mit Energien oberhalb von einigen 10^{16} eV können aber selbst durch diese spektakulären Prozesse nicht mehr erklärt werden. Auch reicht die magnetische Bindungskraft unserer Milchstraße nicht aus, geladene Teilchen oberhalb dieser Energie einzuschließen. Die Quellen der höchstenergetischen Teilchen werden daher außerhalb unserer Milchstraße vermutet. Vielversprechende Kandidaten »

Auf der Suche nach den kosmischen Beschleunigern

» sind so genannte aktive Galaxien (AGN), d.h. Galaxien in deren Zentren ein äußerst massereiches schwarzes Loch ($M > 10^9$ Sonnenmassen) größere Materiemengen verschlingt. Auch so genannte Gamma-Ray Bursts (siehe den Artikel von Anna Franckowiak in dieser Ausgabe), vermutlich verschmelzende Neutronensterne oder schwarze Löcher, werden diskutiert. Niemand kann bisher jedoch sicher sagen, wie es diese oder auch andere Objekte schaffen, Teilchen auf über 100-millionenfache LHC-Energie zu beschleunigen. Eine andere Gruppe von Theoretikern vermutet daher, dass die höchstenergetischen kosmischen Teilchen vielmehr aus dem Zerfall schwerer Reliktteilchen des frühen Universums stammen, d.h. aus Teilchen die ca. 10^{-35} Sekunden nach dem Urknall entstanden sind und vielleicht einen wichtigen Beitrag zur dunklen Materie des Universums liefern.

Der Grad der Ungewissheit über den Ursprung der kosmischen Strahlung und damit das Ausmaß der Spekulationen steigt also mit der Energie der kosmischen Strahlung an. Ironischerweise besteht aber gerade bei höchsten Energien eine berechtigte Hoffnung, den Rätseln auf die Spur zu kommen. Bei Energien oberhalb von einigen 10^{19} eV ändern sich die Bedingungen in entscheidender Weise: Zum einen erleiden Protonen oberhalb einer Schwellenenergie von $5 \cdot 10^{19}$ eV Wechselwirkungen mit der Mikrowellenhintergrundstrahlung des Universums, einem Relikt aus Zeiten kurz nach dem Urknall. Dieser so genannte GZK-Effekt wurde schon in den 60er Jahren vorhergesagt. Werden also Teilchen oberhalb dieser Schwelle beobachtet, muss sich ihr Ursprungsort in unserer unmittelbaren kosmologischen Nachbarschaft (Entfernung unter ~ 300 Millionen Lichtjahre) befinden. Dies schränkt die möglichen Vieldeutigkeiten bei der Quellsuche entscheidend ein. Der zweite Grund, warum das

Rätsel der kosmischen Strahlung gerade bei höchsten Energien gelöst werden könnte, liegt darin, dass die magnetische Steifigkeit (d.h. das Verhältnis aus Impuls und Ladung) der geladenen Teilchen bei hohen Energien so groß wird, dass galaktische und intergalaktische Magnetfelder kaum imstande sind, sie von ihrer Bahn abzulenken. Anders als bei niedrigeren Energien verrät uns die Ankunftsrichtung der höchst-energetischen kosmischen Teilchen somit doch etwas über die Position der Quelle am Himmel. Beide Prozesse zusammengenommen schaffen daher ideale Bedingungen, den Quellen der Strahlung auf die Spur zu kommen und damit ein neues Fenster zum Universum zu öffnen.

Wie so oft, verlangen Idealbedingungen ihren Preis: der Fluss der Teilchen oberhalb von einigen 10^{19} eV sinkt auf lediglich ein Teilchen pro Quadratkilometer und Jahrhundert! Um mindestens eines der extrem hochenergetischen Teilchen pro Woche in einem Observatorium nachzuweisen, ist daher eine Messfläche von ca. 3.000 km² erforderlich (z.Vgl.: das Saarland hat eine Fläche von ca. 2.570 km²). Ein geeigneter Standort wurde in der argentinischen Hochebene Pampa Amarilla in der Provinz Mendoza am Rande der Anden gefunden. Die Region ist nur sehr dünn besiedelt, nahezu flach mit Erhöhungen nur am Rande und sie bietet sehr gute atmosphärische Bedingungen für optische Beobachtungen.

Nach einer mehrjährigen Designstudie und etwa 6-jähriger Bauzeit wurde das Pierre Auger Observatorium im Juni 2008 fertig gestellt. Die Bergische Universität Wuppertal hat mit Unterstützung des Bundesministeriums hierzu wesentliche Beiträge geleistet. Da die Wechselwirkung der Teilchen in der Atmosphäre nur sehr unzureichend bekannt ist, wurde ein Konzept entwickelt, bei dem der Teilchennachweis gleichzeitig über zwei ver-

{ Ultra high energy particles – searching for their cosmic source }

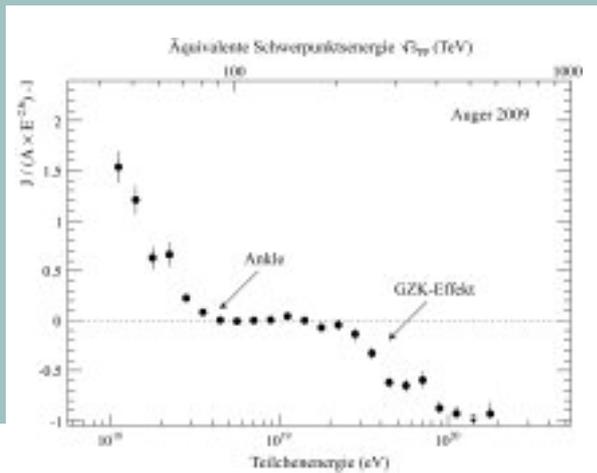


Abb. 2: Das obere Ende des Energiespektrums der kosmischen Strahlung [1]. Der erstmalige zweifelsfreie Nachweis der GZK-Signatur wurde als Top-Ten Ergebnis der Physik im Jahre 2008 gewertet.

Fig. 2: Top end of the cosmic ray energy spectrum [1]. The first firm evidence for the observation of the GZK-effect was ranked one of 2008's ten leading scientific breakthroughs.

schiedene und weitgehend unabhängige Methoden erfolgt: Einer Art Fangnetz aus 1.600 Teilchendetektoren am Boden zum Nachweis der in der Atmosphäre erzeugten Luftschauer (d.h. Teilchenlawinen, die durch die, in die Atmosphäre eindringenden, hochenergetischen kosmischen Teilchen ausgelöst werden) und einem System aus insgesamt 24 großflächigen elektronischen Spiegelteleskopen, die die Leuchtspur der Luftschauer in der Atmosphäre oberhalb der Bodendetektoren aufzeichnen. Die Leuchterscheinung wird durch die geladenen Schauerteilchen hervorgerufen, welche die Stickstoffmoleküle zur Emission von Fluoreszenzlicht anregen. Abbildung 1 zeigt eine der 1.600 Detektorstationen und eins der 24 Teleskope.

Die optischen Beobachtungen der Luftschauer sind nur in klaren mondlosen Nächten möglich. Dies reduziert die Messzeit auf ca. 15 % der Gesamtdauer. Mit den Bodendetektoren wird dagegen 24 Stunden am Tag gemessen. Die reduzierte Messzeit der Teleskopsysteme wird aber kompensiert durch die einzigartige Qualität der Messdaten: Die Leuchtspuren geben ein vollständiges geometrisches Abbild der Luftschauerentwicklung und erlauben u.a. eine kalorimetrische Bestimmung der Energie des Primärteilchens, basierend auf ausschließlich im Labor bestimmten Messgrößen. Annahmen über Wechselwirkungsprozesse der Teilchenphysik bei höchsten Energien erübrigen sich somit. Die gleichzeitig mit den Teleskopen und den Bodenstationen aufgezeichneten Ereignisse erlauben eine Kalibration der Bodendetektoren, die dann auf die gesamten 100% der Messdaten angewendet werden kann. Dieses erstmals im Pierre Auger Observatorium entwickelte Hybrid-Messprinzip ergänzt in idealer Weise die Vor- und Nachteile verschiedener experimenteller Nachweismethoden und wird

inzwischen von anderen kleineren Experimenten kopiert.

Die Daten des Pierre Auger Observatoriums erfüllen alle gesteckten Ziele und übertreffen diese z.T. sogar. Schon nach dem Aufbau von 100 der 1.600 Bodendetektoren und einem der 24 Teleskope wurde mit dem routinemäßigen Messbetrieb und der Datenanalyse begonnen, um Erfahrungen zu sammeln und Verbesserungen direkt umsetzen zu können.

Neueste Ergebnisse zur Energieverteilung der kosmischen Strahlung sind in Abbildung 2 gezeigt. Man beobachtet zwei markante Strukturen: die so genannte Ferse (Ankle), die vermutlich den Übergang von der galaktischen zur extragalaktischen Strahlung markiert, und einen Abbruch des Spektrums bei einigen 10^{19} eV. Die Position und Form dieser Struktur legt nahe, dass es sich um den o.g. GZK-Effekt handelt, d.h. um die Beobachtung der Wechselwirkung von kosmischer Strahlung und dem Mikrowellenhintergrund des Universums. Dieser erstmals zweifelsfreie Nachweis der Signatur [1] wurde im vergangenen Jahr zu den Top-Ten Ergebnissen der Physik gezählt. Er erlaubt – quasi als Nebenprodukt – die bisher genaueste Bestätigung der Lorentz-Invarianz, einem Grundpfeiler der Physik.

Eine weitere zentrale Beobachtungsgröße liegt in der Richtungsverteilung der höchstenergetischen Teilchen. Bei niedrigeren Energien konnten von anderen Experimenten bislang keine Abweichungen von der Isotropie der Strahlung nachgewiesen werden. Die Pierre Auger Kollaboration hat daher verschiedene einschlägige Untersuchungen durchgeführt. Insbesondere wurde der Frage nachgegangen, ob die Richtungsverteilung der höchstenergetischen Teilchen eine Korrelation zu den Himmelspositionen bekannter naher aktiver Galaxien aufweist. Dies konnte in der Tat nachgewiesen werden. »

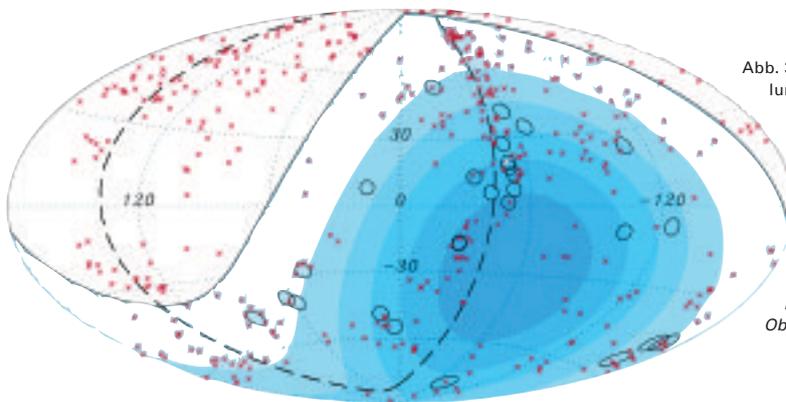


Abb. 3: Himmelskugel in galaktischen Koordinaten mit Darstellung der Ankunftsrichtungen der 27 höchstenergetischen Ereignisse des Pierre Auger Observatoriums und der Positionen aktiver Galaxien im Umkreis von 250 Millionen Lichtjahren. Der farbige Bereich zeigt die Himmelsabdeckung des Observatoriums und die Sterne die Positionen der nahen AGNs.

Fig. 3: Sky-plot in galactic coordinates showing trajectories of 27 highest energy events at the Pierre Auger Observatory and the position of active galaxies within a range of 250 million light years. Colored area shows the Observatory's coverage; stars show position of nearby AGNs.

» Die stärkste Korrelation der Ereignisse fand sich für Energien oberhalb $5 \cdot 10^{19}$ eV mit den AGNs in einem Umkreis von 250 Millionen Lichtjahren [2]. Von den 27 höchstenergetischen Ereignissen weisen 20 eine Richtungskorrelation innerhalb einer Winkelöffnung von 3.1° auf. Unterhalb dieser Energieschwelle sind die Ereignisse dagegen nahezu isotrop am Himmel verteilt. Das außerordentlich überraschende Ergebnis legt den Schluss nahe, dass der GZK-Effekt als Filter auf nahe AGNs wirkt und die Ablenkung der Strahlung durch kosmische Magnetfelder hinreichend gering wird. Eine Himmelsverteilung der Ereignisse und der AGNs innerhalb eines Umkreises von 250 Mio. Lichtjahren ist in Abbildung 3 gezeigt. Ob die AGNs nun die eigentlichen Quellen der höchstenergetischen Ereignisse sind, lässt sich derzeit noch nicht abschließend beurteilen, denn die AGNs folgen ihrerseits der großräumigen Struktur des Universums, so dass sie nur „Spurengeräte“ sein könnten. Dies zu untersuchen, ist Gegenstand verschiedener Analysen mit immer besser werdender Datenstatistik. Das im Science Magazin veröffentlichte Ergebnis hat jedoch schon ein enormes Echo ausgelöst und wurde nach der Gen- und Stammzellenforschung auf Platz drei der größten wissenschaftlichen Durchbrüche des Jahres 2007 gezählt.

Neben der Bestimmung des Energiespektrums und der Richtungsverteilung werden eine Vielzahl weiterer Analysen durchgeführt, so u.a. die Bestimmung der Massenzusammensetzung der Strahlung, die Suche nach hochenergetischen Neutrinos und Photonen, oder auch die Untersuchung der Eigenschaften hochenergetischer Teilchenwechselwirkungen. Die Wuppertaler Arbeitsgruppe ist an mehreren Analysen z.T. sogar federführend beteiligt und hat umfangreiche Verantwortungen im Betrieb des Observatoriums und im Management übernommen. Die nächsten Jahre werden zweifellos spannend, da die Statistik der Daten rasch ansteigt und bereits verschiedene Erweiterungen des Südobservatoriums aufgebaut und in Betrieb genommen werden und die Vorbereitungen für ein noch größeres Nord-Observatorium in Colorado (USA) begonnen haben. ☉

Literaturhinweise

- [1] J. Abraham et al., [Pierre Auger Collaboration], Phys. Rev. Lett. 101 (2008) 061101
- [2] J. Abraham et al., [Pierre Auger Collaboration], Science 318 (2007) 938