# Die Suche nach den Quellen der kosmischen Strahlung

*Hans Blümer und Karl-Heinz Kampert*

**Kaum eine Frage fundamentaler Bedeutung hat die Astrophysiker vor so große Probleme gestellt, wie diejenige nach dem Ursprung der kosmischen Strahlung. Ihre Energiedichte ist vergleichbar mit der des sichtbaren Sternenlichts oder der 3 K Hintergrundstrahlung, sie zeigt sich verantwortlich für elektromagnetische Kontinuumstrahlungen vom Radio- bis zum hochenergetischen γ-Bereich, und das Energiespektrum scheint sich zu beliebig hohen Werten fortzusetzen. In der Tat stammen die höchsten jemals auf der Erde beobachteten Teilchenenergien aus der kosmischen Strahlung. Eine Klärung des über 80-jährigen Problems verspricht die Untersuchung zweier markanter Energiebereiche des Strahlungsspektrums bei etwa $4\cdot10^{15}$ eV und $10^{20}$ eV. Sie werden insbesondere mit den Luftschauerexperimenten KASCADE und AUGER untersucht. Dieser Artikel beschreibt die aktuelle Situation und berichtet über erste Ergebnisse.**

Im Jahre 1912 entdeckte der Österreicher Victor Hess auf einer Reihe von Ballonflügen bis in 5000 m Höhe, daß die Ionisation der Luft nach Durchlaufen eines flachen Minimums bei etwa 1000 m zu größeren Höhen deutlich anstieg. Zwischen 4000 und 5000 m war sie schließlich mehr als doppelt so hoch wie am Erdboden. Er schloß daraus, daß es sich hierbei um eine extraterrestrische Strahlungsquelle handeln müsse und erhielt für seine Entdeckung 1936 den Nobelpreis für Physik. Während man zunächst vermutete, daß es sich bei der Höhenstrahlung vornehmlich um hochenergetische Elektronen und Gammastrahlung handele, wissen wir inzwischen, daß die kosmische Strahlung vorwiegend aus Protonen, leichten und schweren Kernen besteht. Elektronen tragen dagegen nur etwa 1% bei. Die Strahlung überdeckt einen Energiebereich von etwa $10^6$ eV bis $\gtrsim 3\cdot10^{20}$ eV. Der Fluß fällt allerdings oberhalb von ≈ 1 GeV steil mit der Energie nach einem Potenzgesetz $E^{-\gamma}$ ab, wobei $\gamma\simeq2{,}7\pm0{,}1$ ist. Teilchen mit Energien unterhalb 1 GeV sind vorwiegend solaren Ursprungs, noch bis zu etwa 10 GeV wird der an der Erde gemessene Fluß durch die Sonnenaktivität moduliert und bei noch höheren Energien schließlich zeigt sich direkt das Spektrum der galaktischen und möglicherweise extragalaktischen Strahlung.

**Abb. 1: Energiespektrum der kosmischen Strahlung oberhalb 100 MeV. Die Daten entstammen einer größeren Anzahl unterschiedlicher Messungen und die Zahlen an der Kurve geben die integralen Teilchenflüsse oberhalb der jeweils markierten Stellen an (nach S. Swordy, Univ. Chicago).**

Das gesamte Strahlungsspektrum ist in Abbildung 1 zusammengefasst und es erklärt zum Teil die großen Schwierigkeiten des experimentellen Nachweises; der Fluß sinkt im Beobachtungsbereich mit steigender Energie um mehr als 30 Dekaden von etwa 1 Teilchen/cm$^2$/s oberhalb 100 MeV bis unter 1 Teilchen/km$^2$/Jahrhundert oberhalb $10^{20}$ eV. Bis zu Energien von etwa $10^{12}$ eV gestattet der vergleichsweise hohe Fluß eine direkte Identifizierung der Teilchen auf hochfliegenden Ballons oder Satelliten. Die hierbei gewonnenen element- und isotopenspezifischen Energieverteilungen gestatten wichtige Schlußfolgerungen über die Herkunft und Propagationseigenschaften der Teilchen in der Galaxis (siehe Artikel von M.Simon in dieser Ausgabe).

Wie aber kommt es zur Beschleunigung der Teilchen bis zu Energien von über $10^{20}$ eV, d.h. etwa $10^8$-fach höherer Energien als der weltweit leistungsfähigste Beschleuniger LHC (Large Hadron Collider; $E_p=8\cdot10^{12}$ eV) ab 2006 zu erzeugen vermag? Unmittelbar verknüpft mit dieser Frage ist auch die Erklärung des beobachteten Potenzgesetzes, das bereits auf nichtthermische Enstehungsmechanismen hinweist. Eine erstmals befriedigende und in wesentli-

chen Grundzügen bis heute favorisierte Erklärung wurde von E. Fermi geliefert. Sie beruht auf einer Teilchenbeschleunigung durch stochastische Reflexionen der geladenen Teilchen an sich bewegenden magnetischen Plasmawolken [1]. Die notwendige Leistung und Effizienz erreicht dieser Prozeß allerdings erst – wie man in den 70er Jahren erkannte – im Bereich kosmischer Schockfronten. Diese entstehen im Universum zwar in großer Vielfalt und mit unterschiedlichsten Größen, jedoch scheinen innerhalb unserer Galaxis nur Supernovahüllen die notwendige Beschleunigungsleistung erbringen zu können.

## Das Knie der kosmischen Strahlung

Um die schon erwähnte Energiedichte der kosmischen Strahlung von etwa 1 eV/cm$^3$ aufrechtzuerhalten, ist im Volumen der Galaxis eine Erzeugungsleistung von $\gtrsim 10^{33}$ W nötig (vgl. $L_\odot = 3{,}8 \cdot 10^{26}$ W). Supernovae können diese Leistung erbringen, sobald nur einige Prozent der kinetischen Hüllenenergie in Beschleunigungsenergie umgesetzt werden, ein Wert der nach Computersimulationen leicht erreichbar scheint. Indirekte Hinweise auf die Beschleunigung von Elektronen im Supernova-Überrest SN1006 konnten kürzlich aus Röntgenbeobachtungen des Forschungssatelliten ASCA abgeleitet werden. Das Energiespektrum wurde hierbei als Synchrotronstrahlung von TeV-Elektronen interpretiert. Zudem konnten von dieser Quelle TeV $\gamma$-Quanten nachgewiesen werden. Sie entstehen in sogenannten „inversen Compton-Stößen" mit 3K-Hintergrundphotonen.

Trotz dieser indirekten Hinweise fehlt bislang ein Beweis für die Beschleunigung hochenergetischer Hadronen am gleichen Ort. Die gegenwärtig im Aufbau befindlichen Cherenkov-Teleskope (Krawczynki et al., in dieser Ausgabe) könnten dazu beitragen, wenn der zweifelsfreie Nachweis von $\pi^0$-Zerfallsphotonen gelänge, die in hadronischen Reaktionen innerhalb des Beschleunigers entstehen. Einen direkten Zugang aber könnten die Hadronen selbst liefern. Eine einfache dimensionale Abschätzung zeigt, daß die maximal erreichbare Energie, $E_{max} \approx z \cdot B \cdot r$, ($z$: Ladung des beschleunigten Teilchens, $B$: Magnetfeldstärke, $r$: Ausdehnung der Beschleunigungsregion) etwa $10^{15}$ eV beträgt und unter besonders günstigen Voraussetzungen sogar $10^{16}$ eV erreicht [2]. Im Energiespektrum (Abb. 1) zeigt sich gerade im Bereich dieser Maximalenergie ein markanter Knick, das sogenannte „Knie", an dem sich der Steigungsindex von $\gamma \simeq 2{,}7$ nach $\gamma \simeq 3{,}1$ ändert. Markiert das Knie somit die Grenzenergie der angenommenen Supernovae-Beschleuniger? Eine Schlüssel zur Überprüfung dieses „Standardmodells" besteht in der Vermessung der Elementzusammensetzung und des Energiespektrums im Bereich des Knies. In Analogie zu einem Magnetspektrometer erwartet man mit zunehmender Ordnungszahl z des beschleunigten Teilchens eine Verschiebung des Knies zu höheren Energien und damit unmittelbar verknüpft eine zunehmend schwerer werdende Massenzusammensetzung oberhalb der Knie-Energie. Es wird auch diskutiert, daß sich das Sonnensystem z.Zt. möglicherweise selbst innerhalb einer ‚aktiven' Supernovaschale befindet und das Energiespektrum im Bereich des Knies dadurch markante Strukturen aufweisen sollte. Spekulative teilchenphysikalische Erklärungsversuche schließlich versuchen das Knie durch die Wechselwirkung der kosmischen Strahlung mit massebehafteten Neutrinos zu erklären. Auch zur Beschleunigung wurden alternative Modelle vorgeschlagen, so z.B. durch Wechselwirkungen mit elektrischen und magnetischen Feldern von Pulsaren. Hierbei zeigen sich jedoch Schwächen in der Erklärung des beobachteten Potenzgesetzes. Teilchenenergien oberhalb $10^{17}$ eV erfordern schließlich noch exotischere Quellen. Versuche zur Klärung der Herkunft dieser mysteriösen Teilchen werden weiter unten diskutiert.

## Luftschauer

Der Nachweis kosmischer Teilchen oberhalb $E \sim 5 \cdot 10^{14}$ eV erfordert Detektorflächen und Meßzeiten (siehe Abb. 1), die sich nur in erdgebundenen Experimenten realisieren lassen.

Hierbei werden aber nicht die primären Teilchen selbst, sondern die in der Atmosphäre erzeugten Reaktionsprodukte, sog. ausgedehnte Luftschauer, erfasst. Der vielstufige Prozeß eines Luftschauers ist schematisch in Abb. 2 skizziert. Aufgrund der Vielzahl entstehender Teilchen genügt eine stichprobenartige Vermessung der verschiedenen Teilchenkomponenten am Erdboden. Darüber hinaus stehen optische Nachweismethoden zur Verfügung. Bei Primärenergien oberhalb ~$10^{17}$ eV kann insbesondere Fluoreszenzlicht im Wellenlängenbereich zwischen 300 – 400 nm beobachtet werden. Es entsteht vorwiegend durch Wechselwirkung geladener Teilchen mit Stickstoffmolekülen der Atmosphäre und kann, wie weiter unten beschrieben, mit Hilfe abbildender Spiegelsysteme in klaren Nächten bis in über 30 km Entfernung beobachtet werden. Die Atmosphäre übernimmt hierbei also die Rolle eines aktiven Kalorimeters. Während z.B. beim KASCADE Experiment[1] der Nachweis der Teilchen am Erdboden auf dem Gelände des Forschungszentrums Karlsruhe realisiert ist, plant das Pierre Auger Experiment[2] in Mendoza (Argentinien) einen erstmals kombinierten Nachweis der Teilchen am Boden und des Fluoreszenzlichtes in der Atmosphäre (Hybrid-Technik).

Die eigentlich interessierenden Größen, nämlich Richtung, Energie und Masse der Primärteilchen müssen jeweils aus den Eigenschaften der Luftschauer abgeleitet werden. Die Schwierigkeit der Messung steigt hierbei in Reihenfolge der genannten Observablen, d.h. während die Richtung unmittelbar aus den Meßdaten abgelesen werden kann, erfordert die Bestimmung der Masse mehr oder minder aufwendige Luftschauersimulationen. Das in Karlsruhe entwickelte und inzwischen von vielen Gruppen weltweit verwendete Luftschauersimulationsprogramm CORSIKA [3] erfüllt diesen Zweck. Es beinhaltet verschiedene optional wählbare hadronische Wechselwirkungsmodelle und behandelt u.a. Teilchenzerfälle, die Simulation der elektromagnetischen Komponente (EGS4), den Landau-Pomeranschuk Effekt, Vielfachstreuungen der Myonen, Cherenkovlicht-Produktion, und es erlaubt die Wahl verschiedener atmosphärischer Schichtungen. Abbildung 2 (rechts) zeigt das Ergebnis einer Luftschauersimulation mit CORSIKA. Man erkennt, daß hochenergetische Hadronen relativ eng (~ 30 m) um die Schauerachse konzentriert sind, Elektronen, Positronen und Photonen (i.allg. unter dem Begriff „Elektronen“ zusammengefasst) den zahlenmäßig größten Anteil ausmachen, und Myonen noch einige 100 m (bei $10^{14}$ eV) bis zu mehreren km (bei $10^{19}$ eV) entfernt von der Schauerachse nachweisbar sind. Die Anzahl der Myonen steigt bei fester Gesamtenergie nur geringfügig mit der Masse des Primärteilchens und erlaubt daher eine erste Abschätzung seiner Energie. Die am Erdboden beobachtete Elektronen- und insbesondere auch die Hadronenzahl sinkt dagegen mit zunehmender Masse des Primärteilchens. Ursache hierfür ist u.a. der höhere Wirkungsquerschnitt des Fe-Kerns, der zu einer früheren atmosphärischen Entwicklung des Schauers und damit zu einer stärkeren Absorption der elektromagnetischen und hadronischen Komponente in der Atmosphäre führt. Das Verhältnis der Elektron- oder Hadronzahl relativ zur Myonzahl ermöglicht somit eine Abschätzung der Masse des Primärteilchens. Ergänzende Meßgrößen sind die Formen der Lateralenverteilungen der jeweiligen Teilchensorten, die rekonstruierten Myon-Produktionshöhen, die Struktur des hadronischen Schauerkerns, das Zeitprofil der Schauerfront, oder Fluktuationsbreiten einzelner Meßgrößen.

**Abb. 2: Schematische Ansicht eines Luftschauers und seines Nachweises (links). Das rechte Schaubild zeigt das Ergebnis einer CORSIKA Simulation für ein Fe-Primärteilchen mit einer Energie von $10^{14}$ eV ($e^{\pm}$,$\gamma$: rot; Myonen: grün; Hadronen: blau). Höhe und Breite entsprechen einer Fläche von 28×14 km$^2$.**

Mit Ausnahme der hadronischen Wechselwirkung sind die Prozesse in einem Luftschauer hinreichend gut verstanden. Anzumerken ist, daß schon im Energiebereich des Knies die erste Wechselwirkung bei einer Schwerpunktsenergie $\sqrt{s} \approx$ 2 GeV (pp-Stoß), d.h. bei Tevatron Energien erfolgt. Bis zu dieser Energie haben die verwendeten Wechselwirkungsmodelle ihre

[1] http://ik1au1.fzk.de/~kascade/kascade_home.html
[2] http://www.auger.org/

Zuverlässigkeit durch umfangreiche Vergleiche mit Beschleunigerdaten bewiesen. Entscheidend wichtig für die Aspekte der Luftschauerentwicklung ist jedoch nicht der in Speicherringexperimenten vermessene zentrale Rapiditätsbereich, sondern vielmehr der bislang nur unzureichend untersuchte extreme Vorwärtsbereich einer Reaktion. Hinsichtlich der Kenntnis hadronischer Wechselwirkungen bewegen sich daher Luftschauerexperimente jenseits des Knies auf physikalischem Neuland. Eine Überprüfung und wenn möglich auch Verbesserung der Wechselwirkungsmodelle sowie eine kritische Bewertung der experimentellen Abhängigkeiten von den Modellen erscheint daher unerlässlich. Das nachfolgend beschriebene KASCADE Experiment wurde daher so konzipiert, daß es neben der Bestimmung astrophysikalisch interessanter Größen auch zur Verbesserung der Kenntnis hadronischer Wechselwirkungen bei hohen Energien beitragen kann.

## KASCADE: Aufbau und erste Ergebnisse

Das auf dem Gelände des Forschungszentrums Karlsruhe aufgebaute und mit ersten Komponeten 1996 in Betrieb genommene Großexperiment KASCADE (Karlsruhe Shower Core and Array Detector) wurde auf eine detaillierte Untersuchung des Knie-Energiebereichs optimiert und besteht aus mehreren nahezu unabhängigen Detektorkomponenten. Ein Gitter von 252 Detektorstationen im Abstand von 13 m auf einer Fläche von 200×200 $m^2$ enthält Szintillationszähler für den Nachweis der weitverteilten Elektronen und Myonen. Im Zentrum der Anlage befindet sich ein kompaktes (20×16 $m^2$) Detektorsystem bestehend aus einem 4000 t Eisen-TMS/TMP Kalorimeter, Vieldraht Proportionalkammern (MWPC) und Szintillationszählern zur Vermessung der Hadronen, Myonen und Elektronen im Kernbereich des Schauers. Nördlich des Zentraldetektorsystems werden in einem 50 m langen Detektortunnel die Spuren von durchdringenden Myonen gemessen. Abbildung 3 zeigt eine Gesamtansicht der Detektoranordnung. Die zur Energie- und Massenbestimmung erforderliche Auflösung wird durch eine vergleichsweise hohe Flächenbelegung und Qualität der Detektoren erreicht; Elektronen werden in 674 Detektoren (550 $m^2$) und Myonen in 648 Detektoren (826 $m^2$) gezählt, zusätzlich wird die Richtung der Myonen auf einer Gesamtfläche von 280 $m^2$ vermessen, und schließlich der Ort, die Richtung und Energie hochenergetischer Hadronen auf einer Fläche von 300 $m^2$ bestimmt. Weitere Details des experimentellen Aufbaus sind in [4] beschrieben.

**Abb. 3: Das KASCADE Experiment auf dem Gelände des Forschungszentrums Karlsruhe.**

Aufbau und Betrieb erfolgen unter Federführung des Forschungszentrums und der Universität Karlsruhe in Kollaboration mit Arbeitsgruppen aus Rumänien, Polen und Armenien sowie der Universität Tübingen (bis 1998). Ein typisches von KASCADE beobachtetes Luftschauerereignis im Energiebereich des Knies ist in Abbildung 4 gezeigt. Man erkennt das prägnante Schauerzentrum und die mit zunehmendem Abstand vom Schauerzentrum abfallenden Teilchenintensitäten. Die Richtung des ursprünglichen Teilchens kann unmittelbar aus den dargestellten Ankunftszeiten rekonstruiert werden. Die beobachteten Energiedepositionen geben weiterhin Auskunft über die Anzahl der registrierten Elektronen (bzw. Myonen), so daß sich ihre Gesamtzahl $N_e$, $N_\mu$ eines Luftschauers nach Bestimmung des radialen Profils leicht aus einer entsprechenden Flächenintegration ermitteln läßt. Die Spur eines einzelnen 21.5 TeV Hadrons im KASCADE Kalorimeter ist im Titelbild dargestellt.

**Abb. 4: Luftschauer beobachtet von KASCADE. Die dargestellten Flächen entsprechen jeweils der Größe des Detektorfeldes (200×200 $m^2$). Die Säulen stellen die in jeder der 252 e/γ-Stationen beobachtete Energiedeposition (oben) und Ankunftszeit (unten) dar.**

Die derzeitigen Analysen konzentrieren sich insbesondere auf drei Themenbereiche: Überprüfung und Optimierung hadronischer Wechselwirkungsmodelle, Bestimmung des Primärenergiespektrums und Analyse der Elementzusammensetzung.

Unsicherheiten der hadronischen Wechselwirkungsmodelle treten insbesondere in hadronischen Luftschauerobservablen hervor. Das großflächige Hadronenkalorimeter bietet daher in Kombination mit dem Detektorfeld ideale und weltweit einmalige Bedingungen für derartige Untersuchungen. Im Energiebereich bis ~$10^{14}$ eV können z.B. die Ergebnisse direkter Messungen mit Daten am Erdboden verglichen werden. Bei korrekter Beschreibung der Wechselwirkungen in der Atmosphäre sollten sich dann insbesondere die Triggerraten für Myonen und Hadronen im Zentraldetektor vorhersagen lassen. Der Vergleich mit den experimentellen Daten offenbart hierbei große Unterschiede zwischen verschiedenen hadronischen Wechselwirkungsmodellen und eine starke Empfindlichkeit sowohl auf den inelastischen Wirkungsquerschnitt $\sigma_{p\text{-}p}$ bzw. $\sigma_{p\text{-Luft}}$, als auch auf die Behandlung diffraktiver Reaktionen. In Übereinstimmung mit neueren Daten vom Tevatron wurde aufgrund dieser Messungen der pp-Wirkungsquerschnitt bei $\sqrt{s}$=1,8 TeV um 7 mb auf 80 mb erhöht. Bei höheren Energien ($10^{15}$ – $10^{16}$ eV) werden Daten- und Simulationsereignisse anhand ihrer Schauergrößen ($N_e$, $N_\mu$) klassifiziert, um sie dann in verschiedensten hadronischen Observablen zu vergleichen. Auch hier zeigen sich große Unterschiede zwischen den Modellen, die bereits zu klaren Bewertungen und entsprechenden Revisionen der Modelle geführt haben [5].

**Abb. 5: Primärenergiespektrum aus KASCADE Daten im Vergleich zu Literaturwerten. Die eingezeichneten Linien repräsentieren das Ergebnis einer Entfaltung der Elektron- und Myon-Schauergrößenverteilungen unter Zulassung einer sich ändernden Massenzusammensetzung aus p und Fe. Die gestrichelt gezeichneten Linien sind Extrapolationen außerhalb des Meßbereichs.**

Die Bestimmung des Primärenergiespektrums ist eng mit derjenigen der Elementzusammensetzung verknüpft. Dies hat seine Ursache darin, daß die Primärenergie aus der Anzahl der Myonen und Elektronen bzw. Hadronen am Erdboden bestimmt wird, die ihrerseits aber jeweils neben der Primärenergie auch von der Masse des Primärteilchens abhängen. Glücklicherweise ist der Effekt aber nicht sehr groß; bereits die Myonzahl allein erweist sich als guter Energieindikator und die Korrekturen aus den masseabhängigen Elektronen- oder Hadronzahlen bleiben gering. Bemerkenswert ist, daß sich das Knie des Primärspektrums, je nach Art der Massenänderung der Primärteilchen, in charakteristisch unterschiedlicher Weise auf die Schauergrößenverteilungen der Myonen, Elektronen und Hadronen überträgt. Steigt die Masse oberhalb des Knies an, so sollte (siehe Abschnitt Luftschauer) das Knie im Schauergrößenspektrum der Myonen nur relativ schwach, in dem der Elektronen und Hadronen dagegen umso stärker ausgeprägt sein. Genau dieser Effekt wurde erstmals bei KASCADE in allen drei Komponenten beobachtet. Die hierbei auf eine schwerer werdende Zusammensetzung oberhalb des Knies hindeutenden Überlegungen sind sehr allgemein und beruhen auf fundamentalen Eigenschaften der p-Kern und Kern-Kern Wechselwirkungen. Detaillierte Untersuchungen bestätigen diese Überlegungen und die farbigen Linien in Abb. 5 kennzeichnen das rekonstruierte Proton- und Eisenspektrum. Besonders interessant ist die Beobachtung, daß das Knie im Gesamtspektrum (schwarze Linie) ausschließlich von der p-Komponente (hier als Repräsentant der leichten Elemente) verursacht wird. Innerhalb des verfügbaren Datenbereichs (durchgezogene Linien) zeigt sich dagegen keinerlei Struktur in der Fe-Komponente (Repräsentant der schweren Elemente). Dieses Ergebnis müsste zwangsweise zu widersprüchlichen Ergebnissen führen, sofern nicht die Fe-Komponente auch ein Knie bei $E_k \gtrsim 10^{17}$ eV aufwiese. Genau aber das erwartet man in den zuvor beschriebenen konventionellen Beschleunigungsmodellen, d.h. $E_{k,Fe} = z_{Fe} \cdot E_{k,p} \simeq 26 \times 4 \cdot 10^{15} \simeq 10^{17}$ eV. Das vorhandene Datenmaterial erlaubt leider bislang noch keine Überprüfung dieser interessanten Andeutung. Auch müssen in weitergehenden Analysen die Beiträge mittlerer Massengruppen berücksichtigt werden.

**Abb. 6: $\log(N_\mu)/\log(N_e)$ Häufigkeitsverteilung experimenteller Daten bei $4{,}5 \cdot 10^{15}$ eV. Die farbigen Linien zeigen die rekonstruierten Verteilungen verschiedener Elemente basierend auf CORSIKA Simulationen.**

Eine vorläufige Entfaltung der experimentellen Daten in verschiedene Elementgruppen ist in Abb. 6 gezeigt. Den experimentellen Daten (offene Symbole) unterlegt sind Simulationsergebnisse einzelner Elemente (farbige Linien), wobei lediglich deren relative Normierung, nicht jedoch die jeweiligen Mittelwerte und Breiten zur Beschreibung der Daten optimiert wurden. Die Summe aller Elemente ist als schwarze Linie dargestellt. Hervorzuheben ist hierbei die erstmalige direkte Verifikation mehrerer Elementgruppen. Die inzwischen erzielte Zuverlässigkeit der Modellvorhersagen zeigt sich zudem an der sehr guten Beschreibung der linken Flanke durch Protonen und der rechten durch Eisen. Auch diese Analyse bestätigt die zunehmende Masse der Primärteilchen oberhalb des Knies.

Neben den hier vorgestellten Untersuchungen der Massenzusammensetzung werden qualitativ ähnliche Ergebnisse aus den Daten des Zentraldetektors (Energie- und Ortsverteilung der Hadronen, Ortsstruktur der hochenergetischen Myonen, etc.) abgleitet. Der Trend zu schweren Elementen oberhalb des Knies erscheint jedoch deutlich ausgeprägter. Die Ursachen hierfür konnten noch nicht abschließend geklärt werden, jedoch hängen sie vermutlich mit Unsicherheiten in den Wechselwirkungsmodellen zusammen. Experimentelle Hinweise hierzu liefern vergleichende Untersuchungen bei verschiedenen Zenitwinkeln. Auf diese Weise kann die effektive Atmosphärendicke variiert werden, ohne daß sich das experimentelle Ergebnis der abgeleiteten Primärverteilungen ändern sollte. Parallel werden in Zusammenarbeit mit Theoretikern und unter Zuhilfenahme der vorliegenden Luftschauerdaten die hadronischen Wechselwirkungsmodelle ständig verbessert und ihre Vorhersagekraft zu höheren Energien ausgeweitet.

Weitere experimentelle Verbesserungen sind bei KASCADE schon in naher Zukunft durch Rekonstruktion der Myonproduktionshöhe aus den Daten des Myontunnels sowie aus weiteren Ergänzungen des Zentraldetektors zu erwarten. Ein eindeutiger Nachweis eines Fe-Knies erfordert schließlich eine Ausdehnung des Meßbereichs bis auf mindestens $5 \cdot 10^{17}$ eV. Eine ökonomische Realisierung dieses Ziels ließe sich durch eine Kombination des KASCADE und EAS-TOP Experiments auf dem Gelände des FZK realisieren. Ein entsprechendes Proposal wurde eingereicht. Die Fülle dieser Ergebnisse wird hoffentlich das mehr als 40-jährige Problem des Knies der kosmischen Strahlung endgültig lösen und damit Antworten auf die Fragen nach deren Herkunft und Beschleunigung geben.

## Das Rätsel der höchsten Energien

Die höchsten beobachteten Teilchenenergien liegen nochmals um 3-4 Größenordnungen jenseits des bisher diskutierten Energiebereiches. In den letzten zwanzig Jahren wurden Luftschauerexperimente in Haverah Park (Großbritannien), Akeno (Japan), Yakutsk (Sibirien) und Utah (USA) durchgeführt, die Ereignisse mit Energien bis oberhalb von $10^{20}$ eV registrierten [6]. Das „Fliegenauge“ Fly’s Eye in Utah war ein reiner Fluoreszenzdetektor, dessen Nachfolger High Resolution Fly's Eye (HiRes) gerade in Betrieb geht. In den anderen Experimenten wurden Cherenkovzähler oder Szintillatoren am Erdboden verwendet. Einzig die japanische AGASA-Anlage (Akeno Giant Air Shower Array) ist noch in Betrieb, mit etwa 100 km$^2$ Flächenabdeckung zur Zeit der größte Detektor dieser Art. Das mit $3 \cdot 10^{20}$ eV bislang energiereichste Teilchen wurde vom Fly’s Eye Detektor nachgewiesen. Es hat die makroskopische Energie von 50 Joule transportiert, was etwa der kinetischen Energie eines Tennisballs bei einer Geschwindigkeit von 160 km/h entspricht!

**Abb. 7: Im sog. Hillas-Diagramm wird die charakteristische Größe eines Objektes gegen die dort herrschende oder vermutete Feldstärke aufgetragen. Objekte unterhalb der gestrichelten Linie können keine Protonen auf $E \geq 10^{20}$ eV beschleunigen.**

Ein erstes Problem in der Erklärung dieser Teilchen wird deutlich, wenn man die zur konventionellen Beschleunigung erforderlichen Magnetfeldstärken und Ausdehnungen astrophysika-

lischer Objekte betrachtet. Selbst unter idealen Bedingungen erfordert die Beschleunigung von Protonen auf $10^{20}$ eV eine Überschreitung der gestrichelten Linie in Abb. 7. Der Wert $\beta_s = v_s/c$ gibt hierbei die Geschwindigkeit der beschleunigenden Schockwelle an. Realistische Werte liegen im Bereich $\beta_s = 1/300$. Offensichtlich erfüllen aber selbst für $\beta_s = 1$ nur wenige Objekte im Universum die notwendigen Bedingungen eines Beschleunigers. Weitere Einschränkungen ergeben sich bei Berücksichtigung von Synchrotronstrahlungs- und Energieverlusten in kompakten, bzw. ausgedehnten Quellen, so dass nach gegenwärtigen Vorstellungen lediglich Jets aus Radiogalaxien [8] alle notwendigen Bedingungen zu erfüllen scheinen. Da genügend leistungsfähige Quellen dieser Art aber nur in relativ großen Entfernungen ($\gtrsim$ 100 Mpc) bekannt sind, ergibt sich ein zweites Problem in der Erklärung dieser Teilchen.

Schon bald nach der Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung durch Penzias und Wilson (1964) wiesen Greisen, Zatsepin und Kuzmin darauf hin, daß Protonen mit einer Energie oberhalb $5 \cdot 10^{19}$ eV sehr effektiv mit den ~0,7 meV Photonen der 3 K Strahlung wechselwirken. Oberhalb dieser Grenzenergie steht genügend Energie im Schwerpunktsystem zur Verfügung, um die $\Delta$-Resonanz anzuregen. Diese zerfällt unmittelbar wieder in Pionen und Nukleonen ($p + \gamma_{3K} \rightarrow \Delta(1232) \rightarrow p + \pi^0$, bzw. $n + \pi^+$), so daß das ursprüngliche Proton entweder einen wesentlichen Anteil seiner Energie abgegeben hat oder sogar umgewandelt wurde. Die Prozesse entziehen dem Primärteilchen Energie, bis schließlich die Resonanzenergie unterschritten wird. Aus der mittleren Dichte von 412 Photonen/cm$^3$ und dem bekannten $p\gamma$-Wirkungsquerschnitt errechnet man, daß nahezu unabhängig von der Anfangsenergie des Protons seine Energie innerhalb einer Strecke von höchstens 100 Mpc auf $5 \cdot 10^{19}$ eV sinkt (GZK-Effekt) [9]. Schwere Kerne erleiden im 3 K Photonenbad bei etwa gleicher Energie ebenfalls einen selbstzerstörerischen Prozeß; durch Anregung von Riesenresonanzen kommt es zur Photodissoziation. Der GZK-Effekt bewirkt also in Abhängigkeit von der Wegstrecke eine Energiebegrenzung, eine Anreicherung leichter Kerne, sowie eine charakteristische Produktion hochenergetischer Neutrinos aus dem Pionzerfall.

**Abb. 8: AGASA-Energiespektrum und Winkelverteilung [10]. Die Kreise und Quadrate zeigen die Richtungen gemessener Ereignisse in galaktischen Koordinaten für $E = (4\text{-}10) \cdot 10^{19}$ eV, bzw. $\geq 10^{20}$ eV. Die galaktische und super-galaktische Ebene sind durch die rote bzw. blaue gestrichelte Linie markiert. Der graue Bereich (einschließlich des galaktischen Zentrums) ist dem Experiment unzugänglich.**

Das obere Ende des Spektrums aus dem AGASA-Experiment ist in Abb. 8 gezeigt. Es weist zumindest mit der verfügbaren Statistik kein Abbrechen des $E^{-3}$-Verlaufs auf. Der Schluß auf relativ nahe konventionelle Quellen verbietet sich aber aufgrund des bereits diskutierten Hillas-Diagramms. Klärende Hinweise könnten sich aus der Richtungsverteilung der Teilchen ergeben. Trotz einer überraschenden Beobachtung von richtungskorrelierten Ereignispaaren und einer nahezu isotropen Gesamtverteilung, kann letztlich nur eine erheblich verbesserte Statistik Aufschluß darüber geben, ob die scheinbare Quellenverteilung der bekannten Materieverteilung, derjenigen von Dark-Matter Halo Modellen, oder der aus nachfolgend erläuterten „top-down" Modellen erwarteten Isotropie folgt.

Findet überhaupt eine Beschleunigung von Teilchen statt („bottom-up-Szenario")? Als Alternativen und aus Mangel an konventionellen Erklärungsmöglichkeiten werden sogenannte „top-down-Szenarien" diskutiert, in denen die beobachteten Teilchen bereits mit hoher Energie entstehen. Einige dieser Modelle sind X-Bosonfragmentation von topologischen Defekten, der $Z^0$-Zerfall an kosmologischen Neutrinos oder zerfallende massive Reliktteilchen aus der Urknallphase [11]. Als Quellen werden auch supersymmetrische Neutralteilchen diskutiert und sogar Neutronen, deren vorzeitiger Zerfall durch eine Verletzung der Lorentzinvarianz unterdrückt ist [12]. Diese Modelle führen auf primäre Energiespektren, die wesentlich härter verlaufen als für Schockwellenbeschleunigung. Zusammen mit dem GZK-Effekt ergeben sich

in vielen Fällen überprüfbare Vorhersagen für die Form des Energiespektrums und die Winkelverteilung der Quellen.

## Das Pierre Auger-Projekt

Das Pierre Auger-Projekt entstand in ein einer Reihe von Workshops in den letzten acht Jahren aus dem Bestreben, einen sehr großen, preisgünstigen und robusten Detektor zu entwerfen, der die verfügbare Statistik der höchstenergetischen Ereignisse um mindestens eine Größenordnung verbessern sollte. Ein Hybriddetektor kombiniert erstmalig die Fluoreszenzlichtmessung in der Luft mit dem Schauernachweis am Boden für individuelle Ereignisse. Die Fluoreszenztechnik läßt sich natürlich nur in klaren mondlosen Nächten anwenden, so dass nur etwa 1/10 der Luftschauerereignisse gemeinsam in Fluoreszenzdetektor und Schauerdetektor registriert werden. Die daraus gewonnene Energiekalibration ist aber auf den gesamten Datensatz übertragbar.

Idealerweise sollte der gesamte Himmel mit je einem Observatorium auf der Nord- und Südhalbkugel beobachtet werden können. Die wichtigsten Anforderungen an den Standort war eine ca. 50 km durchmessende Ebene ohne störende Einrichtungen, ein klarer Nachthimmel, Infrastruktur am Rande des Geländes und Projektförderung durch das Sitzland. Die Wahl fiel auf Millard County in Utah und auf die Pampa Amarilla in der argentinischen Provinz Mendoza. Die begrenzten Resourcen führten zunächst zu einer Konzentration auf den südlichen Detektor, der im Folgenden näher beschrieben wird.

Der Schauerdetektor besteht aus 1600 Wasser-Cherenkovzählern, die auf einem hexagonalen Gitter mit 1,5 km Abstand angeordnet sind und insgesamt 3000 km$^2$ abdecken. Zylindrische Tanks von 3,40 m Durchmesser und 1,20 m Höhe enthalten 10 m$^3$ Reinstwasser, das in einem diffus reflektierenden Kunststoffsack eingeschlossen ist. An der Oberfläche registrieren drei 8”-Photomultiplier typischerweise 100 Photoelektronen für ein vertikal durchdringendes Myon. Die Signale werden kontinuierlich mit 10 MHz digitalisiert und in einem Ringpuffer gespeichert. Alle Tanks sind durch die Versorgung mit Solarstrom und einer Pufferbatterie autonom. Die Kommunikation erfolgt durch „Handy-Technik“ und die Daten werden per Mikrowellenrichtfunk über vier Konzentratorstationen an das Kontrollzentrum übertragen. Zur Synchronisation der Signalzeiten wird GPS verwendet. Die Datenauslese wird gestartet, sobald 5 Tanks eine Schwellenwert innerhalb von 20 μs überschreiten, wodurch eine Nachweiswahrscheinlichkeit von 98% bei $10^{19}$ eV erzielt wird. Durch die mit der Primärenergie zunehmende Schauerfläche werden bei $10^{20}$ eV bereits 20 Tanks getroffen.

**Abb. 9: Wassertank mit Photomultipliern als Cherenkovdetektor**

Das Luftvolumen oberhalb des Detektorfeldes wird von drei Fluoreszenzdetektoren am Rande und einem zentralen „Auge” mit 360°-Rundumsicht beobachtet. Die ionisierenden Schauerteilchen erzeugen im Luftstickstoff eine kurze isotrope Lichtemission von 4-5 Photonen pro Meter Teilchenspur. Die Leuchtspur wird in den Teleskopen auf eine Photomultiplier-Matrix abgebildet, um die Schauerentwicklung als Funktion der Tiefe $X$ in der Atmosphäre zu bestimmen und die Richtung zu rekonstruieren. Die integrierte Lichtmenge ergibt eine direkte kalorimetrische Messung der Energie des Primärteilchens. Die Form der Schauerentwicklung und die Höhe des Maximums $X_{\max}$ in der Atmosphäre hängen von der Masse des Primärteilchens ab. Das Schauermaximum soll mit einer Genauigkeit von $\Delta X_{\max} \approx 10$ g cm$^{-2}$ rekonstruiert werden. Eiseninduzierte Schauer beginnen in größerer Höhe als protoninduzierte Schauer und $X_{\max}^{Fe}$ weist geringere Fluktuationen auf als $X_{\max}^{P}$.

Der große Winkelbereich der 4 Fluoreszenzaugen wird von insgesamt 30 Einzelteleskopen abgedeckt. Jedes dieser Teleskope besteht aus 25 Spiegelsegmenten mit einer Gesamtfläche von 11 m$^2$, die das einfallende Licht mit einer sphärischen Schmidt-Optik auf eine Kamera

mit 20×22 Photomultipliern abbilden. Der Krümmungsradius der Spiegelfläche beträgt 3,40 m und die Einlaßöffnung hat entsprechend einen Durchmesser von 1,70 m. Eine ringförmige Korrekturlinse verbessert die Lichtsammlung bei gleichmäßig kleinen Abbildungsfehlern der Schmidt-Optik. Das Gesichtsfeld beträgt 30°×30° bei einer Pixelgröße von 1,5°×1,5°.

**Abb. 10: Schmidt-Teleskop mit Photomultiplier-Kamera zur zeitaufgelösten abbildenden Messung der Fluoreszenzleuchtspuren von Luftschauern. Ein „Auge" am Rand des Detektorfeldes besteht aus sechs Einzelteleskopen, die 180° in Azimuth und 0°-30° im Zenithwinkel abdecken.**

Auch unter den guten Beobachtungsbedingungen in der argentinischen Pampa ist der Nachthimmel nie wirklich dunkel. Man erwartet Störsignale von 200 Hz Rate pro Photomultiplier-Pixel, die aber nicht die zeitliche und örtliche Charakteristik der gesuchten Leuchtspuren aufweisen. Alle Pixel werden kontinuierlich bei 10 MHz Abtastrate mit 12 Bit digitalisiert. Die Daten werden lokal gepuffert und in einer FPGA-Triggerlogik auf interessante Leuchtspuren untersucht, die sich durch relativ kurze Dauer von weniger als 100 µs und durch die richtige Abfolge benachbarter Pixel auszeichnen. Bei einer positiven Entscheidung oder auf Anforderung der Schauerdetektoren werden die Daten ausgelesen und der lokalen Datenverarbeitung übergeben. Die kombinierten Informationen der Fluoreszenz-Augen werden ebenfalls in den Mikrowellenrichtfunk eingespeist und in der Zentralstation mit den Wasser-Cherenkovdaten zusammengeführt und gespeichert.

Die Datenmenge der Luftschauer wird nur einige hundert Gigabyte pro Jahr betragen und vermutlich von Kalibrationsmessungen der Atmosphäre z.B. mit Hilfe von Lasern und absolut geeichten Lichtquellen weit übertroffen werden. Eine Schauermessung in 20 km Distanz bedingt spektral unterschiedliche Lichtabschwächungen um eine Größenordnung, die auf wenige Prozent genau korrigiert werden sollen. Ziel ist eine Energieauflösung von ±10%.

## Die nächsten Schritte

Am 17. März 1999 wurde anlässlich der Grundsteinlegung in Mendoza ein internationaler Rahmenvertrag von zunächst fünf Ländern unterschrieben: Argentinien, Deutschland, Grossbritannien, Slovenien und USA. Aus Europa und Südamerika sind inzwischen weitere Beiträge zu den Gesamtkosten von etwa 50 Millionen Dollar zugesagt worden. Während die Schauerdetektoren überwiegend von den nord- und südamerikanischen Partnern geliefert werden, sind die Fluoreszenzdetektoren ein hauptsächlich europäisches Teilprojekt unter Federführung von Deutschland und Italien. Die Photomultiplierkameras sowie die Analogelektronik werden in mehreren italienischen Instituten entwickelt und gebaut. Der starke deutsche Beitrag wird von drei Instituten des Forschungszentrums Karlsruhe und der Universität Karlsruhe (TH) geliefert, die u.a. für die Optik, Teleskopmechanik, Digitalelektronik und Datenerfassung verantwortlich sind. Bis zum Sommer 2000 soll ein Detektorfeld aus 40 Tanks und ein einzelnes Fluoreszenzteleskop demonstrieren, daß die gewählte Technik die physikalischen Anforderungen erfüllt. Der weitere Aufbau erfolgt bei laufender Datennahme stufenweise, bis gegen Ende des Jahres 2003 die vollständige Konfiguration erreicht ist und die Akzeptanz um etwa eine Größenordnung über dem HiRes Experiment liegen wird.

Bis es soweit ist, werden umfangreiche Simulationsrechnungen zur Schauerentwicklung in der Erdatmosphäre durchgeführt, die auf den im KASCADE-Experiment gewonnenen Erfahrungen bei niedrigerer Energie basieren. Die erforderliche Rechenzeit skaliert mit der Primärenergie, so daß auch hier neue methodische Ansätze nötig sind.

**Abb. 11: Simulierte Himmelskarte der kosmischen Strahlung für $E \geq 10^{19}$ eV. Zehn zufällig verteilte Punktquellen (AGN) jeweils gleicher Stärke wurden auf einem isotropen Untergrund entsprechend einer 3-jährigen Meßstatistik angenommen.**

Die Hybridtechnik liefert gegenüber dem HiRes-Experiment eine zehnfach bessere Statistik bei ebenso guter Energieeichung so daß der GZK-Effekt im Energiespekteum leicht nachweisbar wird. Die Winkelauflösung von etwa 0,5° erlaubt zudem astronomische Messungen mit geladenen Teilchen, deren Ablenkung in galaktischen und intergalaktischen Magnetfeldern je nach Kohärenzlänge und Stärke der Felder nur wenige Grad beträgt (Abb. 11). Direkte Blicke auf hochinteressante und unverstandene Prozesse im Hochenergie-Universum erlaubt sonst nur die Neutrinoastronomie (Ch. Spiering in dieser Ausgabe). Durch den Nachweis horizontaler Luftschauer wird auch das Auger Experiment zum Neutrinodetektor und erreicht ein Akzeptanzvolumen von 2-50 $km^3$ Wasser-Äquivalent bei $10^{17}$-$10^{19}$ eV. Dies wird eine weitere Überprüfung verschiedener top-down Szenarien gestatten.

Der nächste Schritt schließlich ist eine möglichst vollständige Abdeckung des Himmels durch das nördliche Pierre Auger-Observatorium, möglicherweise ergänzt durch ein großes Feld von Fluoreszenzteleskopen (Telescope Array-Projekt). Diese Art der Luftschauermessung ließe sich in einem übernächsten Schritt mit Hilfe von Satellitenbeobachtung auf die ganze Erdatmosphäre ausdehnen (OWL, Airwatch). Erste Pilotstudien hierzu wurden bereits gestartet.

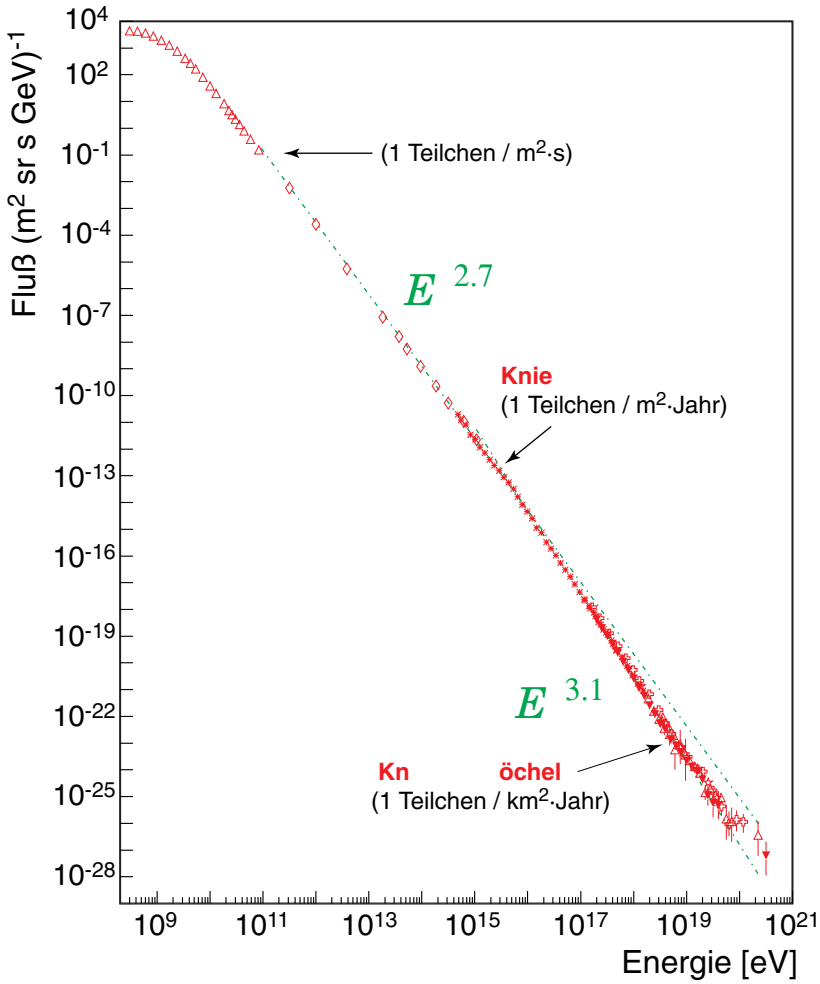
## Zusammenfassung

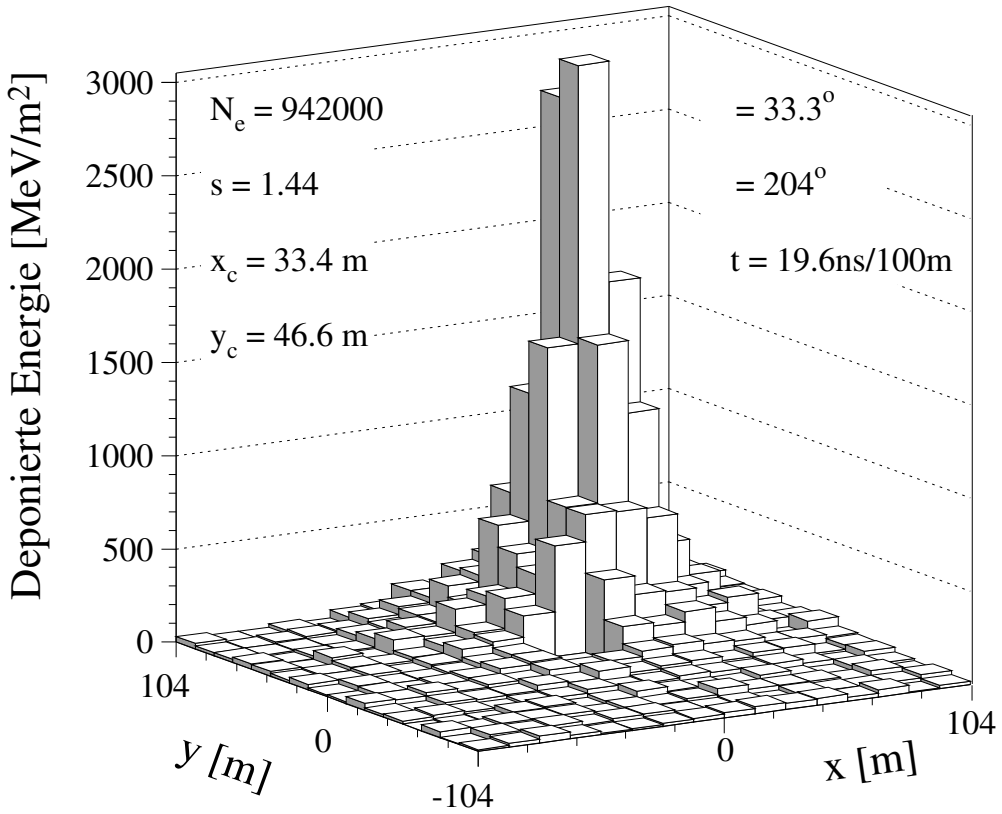
Die Untersuchung der kosmischen Strahlung, ihrer Zusammensetzung, Herkunft und Energie bis in Bereiche, die hundertmillionenfach über den irdischen Beschleunigern liegen, bleibt ein spannendes und zukunftsweisendes Unternehmen. Unser Verständnis von der Struktur der Materie und dem Wirken der fundamentalen Kräften profitiert enorm von den interdisziplinären Synergien in der Teilchenastrophysik, die alle Wellenlängenbereiche und alle Teilchen aus dem Kosmos ausnutzt.

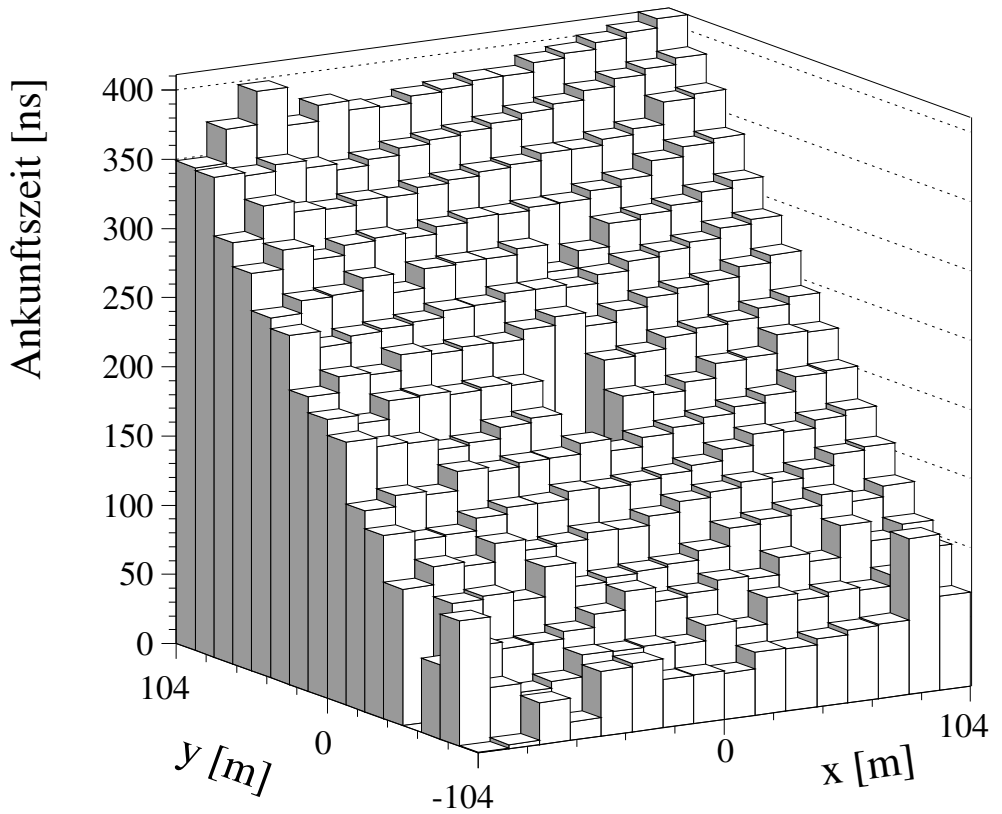
### Literatur

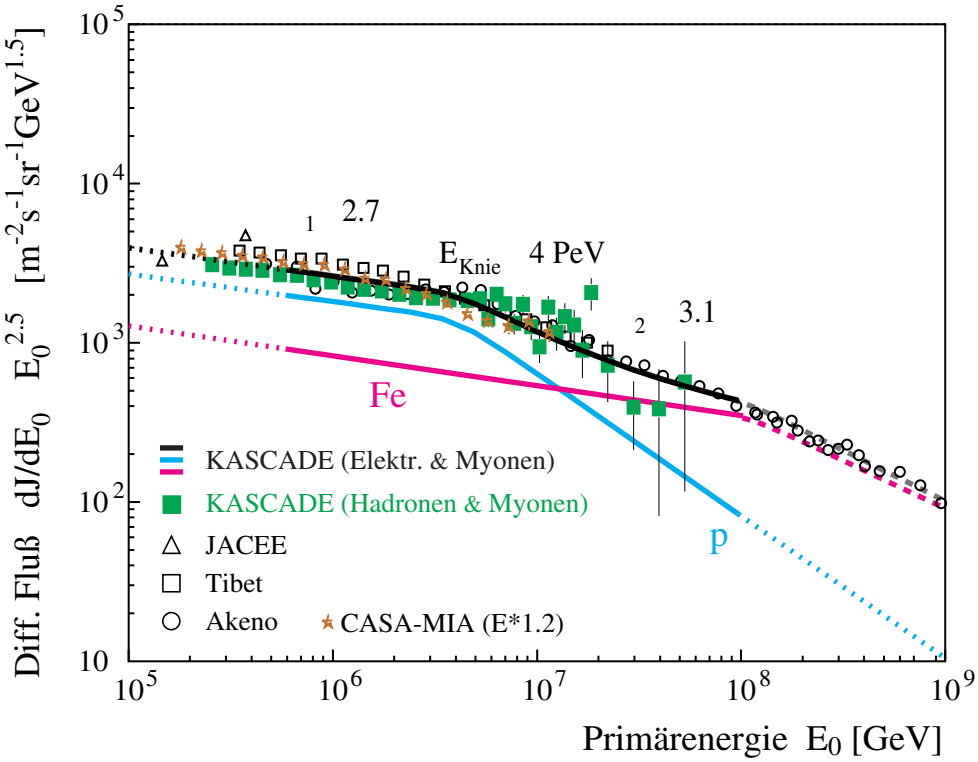

[1] R. Blandford und D. Eichler, Phys. Rep. 154 (1987) 1; L. O'C. Drury, Contemp. Phys. 35 (1994) 231
[2] H.J. Völk und P.L. Biermann, Astrophys. J. 333 (1988) L65; B. Wiebel-Sooth, Peter L. Biermann, Landolt-Börnstein, vol. VI/3c, Springer Publ. Comp., 1999, p. 37 - 90
[3] D. Heck et al., Wissenschaftlicher Bericht FZKA 6019, (1998)
[4] H.O. Klages et al., (KASCADE Coll.), Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 52B (1997) 92
[5] T. Antoni et al., (KASCADE Coll.), J. Phys. G25 (1999) 2161
[6] J. Cronin, Rev. Mod. Phys. 71 (1999) 165; S. Yoshida,H. Dai, J. Phys. G24 (1998) 905
[7] M. Hillas, Ann. Rev. Astron. Astrophys. 22 (1984) 425
[8] G.R. Farrar, P.L. Biermann, Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 3579
[9] K. Greisen, Phys. Rev. Lett. 16 (1964) 748
[10] M. Takeda, et al. (AGASA Coll.), Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 1163, astro-ph/9902239
[11] G. Sigl, S. Lee, P. Bhattacharjee, S. Yoshida, Phys. Rev. D59 (1999) 43504
[12] S. Coleman und S.L. Glashow, Phys.Rev.D59 (1999)116008

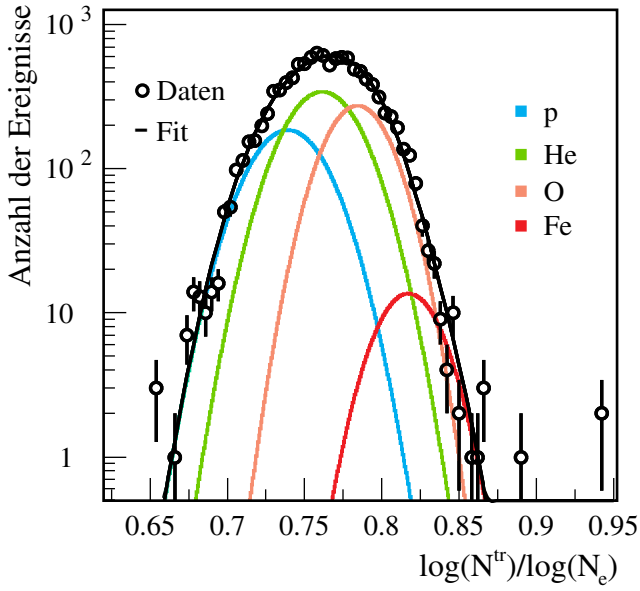

**Vorschlag für ein Element des Titelbildes: (titelbild.eps):**
**Spur eines 21.5 TeV Hadrons im KASCADE Kalorimeter** (Bezug erfolgt im Text)

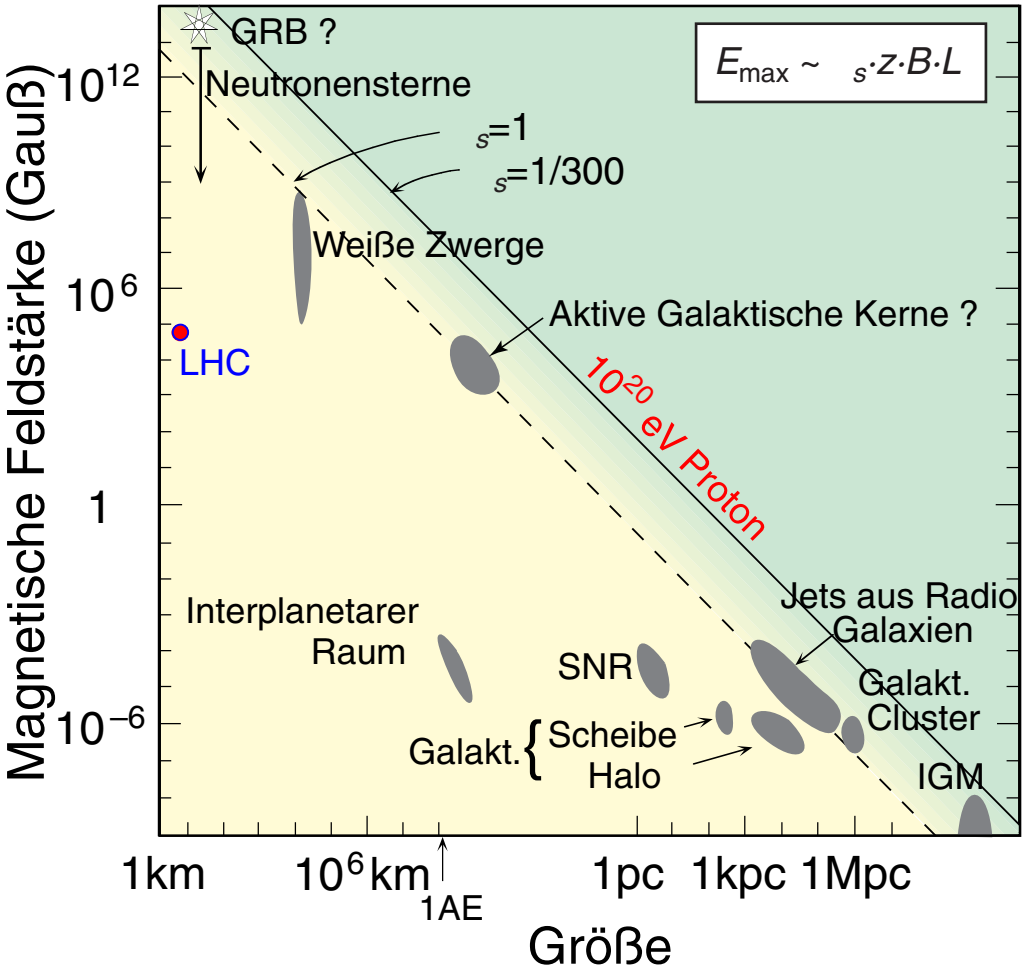

Fluß (m2 sr s GeV)-1
10^4
10^2
10^-1
10^-4
10^-7
10^-10
10^-13
10^-16
10^-19
10^-22
10^-25
10^-28
(1 Teilchen / m2·s)
E 2.7
Knie
(1 Teilchen / m2·Jahr)
E 3.1
Kn öchel
(1 Teilchen / km2·Jahr)
10^9
10^11
10^13
10^15
10^17
10^19
10^21
Energie [eV]

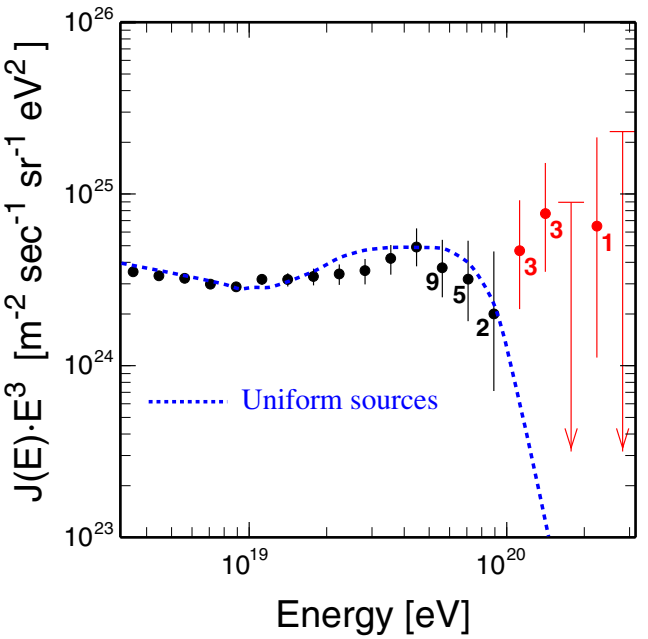

Deponierte Energie [MeV/m²]
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
N_e = 942000
s = 1.44
x_c = 33.4 m
y_c = 46.6 m
= 33.3°
= 204°
t = 19.6ns/100m
104
0
-104
y [m]
0
104
x [m]

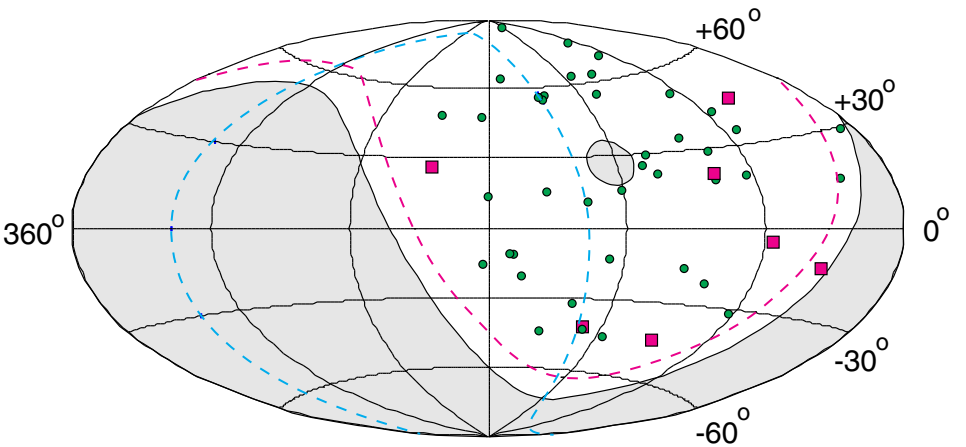

Ankunftszeit [ns]
400
350
300
250
200
150
100
50
0
104
0
-104
y [m]
0
104
x [m]

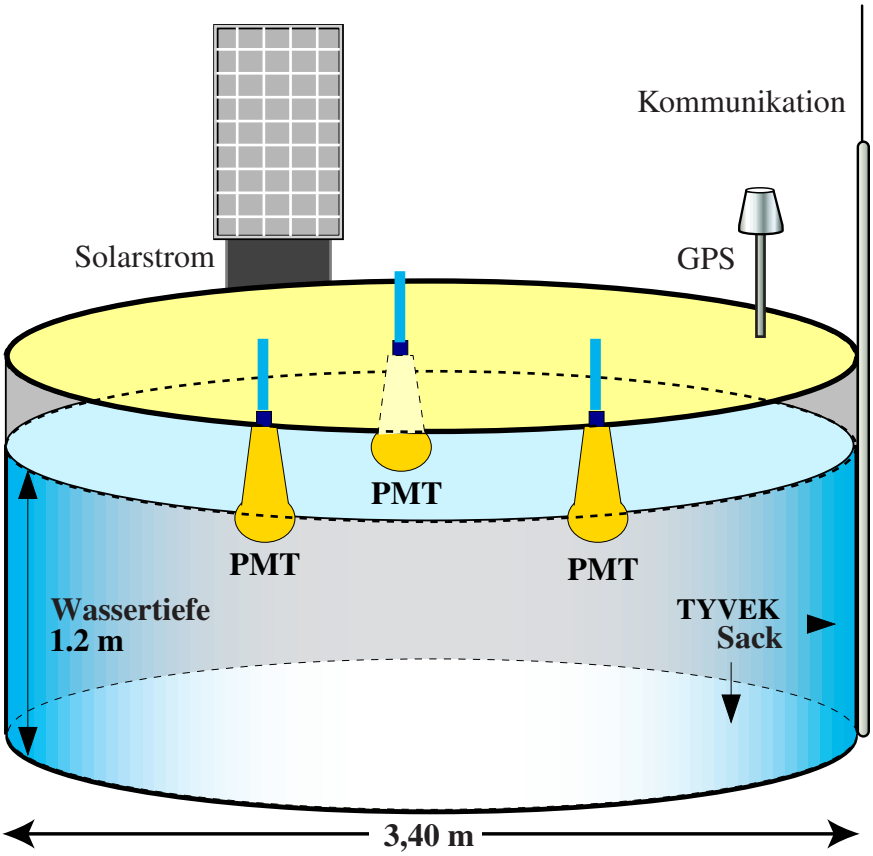

Diff. Fluß dJ/dE0 E0^2.5 [m^-2s^-1sr^-1GeV^1.5]
Primärenergie E0 [GeV]
2.7
1
EKnie
4 PeV
2
3.1
Fe
p
KASCADE (Elektr. & Myonen)
KASCADE (Hadronen & Myonen)
JACEE
Tibet
Akeno
CASA-MIA (E*1.2)

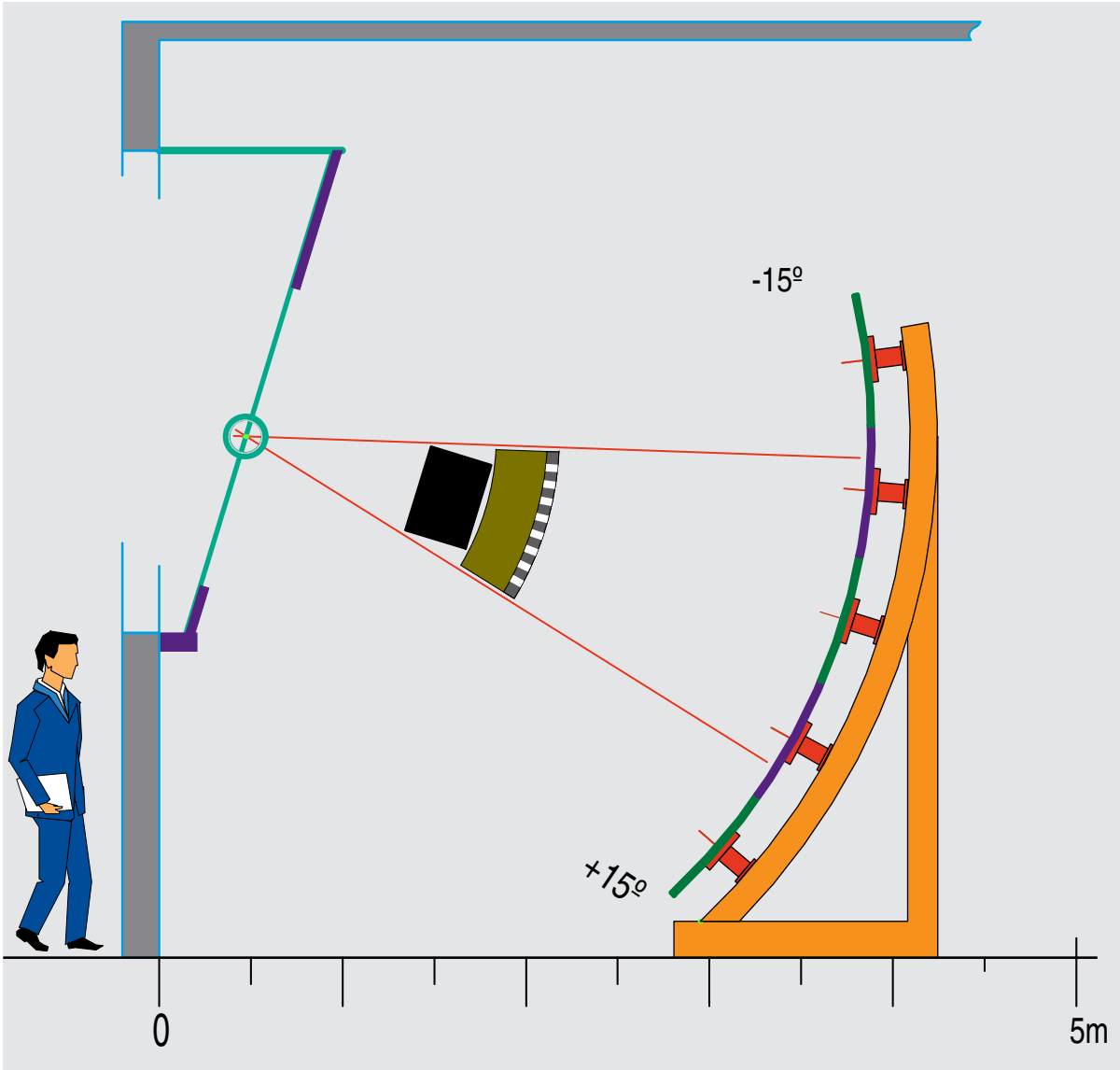

Anzahl der Ereignisse
10 3
10 2
10
1
Daten
Fit
p
He
O
Fe
0.65
0.7
0.75
0.8
0.85
0.9
0.95
log(N^tr)/log(N_e)


GRB ?
Neutronensterne
$E_{max} \sim {}_s \cdot z \cdot B \cdot L$
$_s$=1
$_s$=1/300
Weiße Zwerge
Aktive Galaktische Kerne ?
LHC
$10^{20}$ eV Proton
Interplanetarer Raum
SNR
Jets aus Radio Galaxien
Galakt. Cluster
Galakt. Scheibe Halo
IGM
Magnetische Feldstärke (Gauß)
$10^{12}$
$10^{6}$
1
$10^{-6}$
1km
$10^{6}$km
1AE
1pc
1kpc
1Mpc
Größe


$10^{26}$
$10^{25}$
$10^{24}$
$10^{23}$
$J(E)\cdot E^3$ [$m^{-2}$ $sec^{-1}$ $sr^{-1}$ $eV^2$]
Uniform sources
9
5
2
3
3
1
$10^{19}$
$10^{20}$
Energy [eV]


+60°
+30°
360°
0°
-30°
-60°


Kommunikation
Solarstrom
GPS
PMT
PMT
PMT
Wassertiefe
1.2 m
TYVEK
Sack
3,40 m


-15º
+15º
0
5m