

Das Energiespektrum und die Massenzusammensetzung der hochenergetischen kosmischen Strahlung

K.-H. Kampert, Institut für Experimentelle Kernphysik, Universität Karlsruhe; H. Rebel, M. Roth, IK

Einleitung

Das Energiespektrum der kosmischen Strahlung kann über viele Zehnerpotenzen durch ein steil abfallendes Potenzgesetz beschrieben werden, das Zeugnis gibt von dem nicht-thermischen Charakter der Prozesse, welche die hochenergetischen Teilchen erzeugen. Der gleichmäßige Abfall in der Intensität mit der Energie wird unterbrochen durch eine mehr oder weniger abrupte Änderung des Index des Potenzgesetzes etwas oberhalb der Energie von 10^{15} eV. Der Ursprung dieses Abknickens, üblicherweise als „Knie“ bezeichnet, ist bislang ungeklärt. Die vorherrschenden theoretischen Modelle beschreiben das Knie als Ergebnis der energetischen Grenze der Teilchenbeschleunigung in Supernova-Schocks. Je nach Ladung der vollständig ionisierten Teilchen ergibt sich eine Obergrenze $E_{\max} \propto Z \times (r \times B)$, die von der Umgebung der Schocks abhängt. Die Größen r und B entsprechen der Ausdehnung und dem Magnetfeld der Beschleunigungsregion. Als alternative Interpretation des Knies wurde eine Änderung der Transportmechanismen der kosmischen Strahlung von der Quelle bis zum Nachweis vorgeschlagen. Während Teilchen unterhalb der Knie-Energie aufgrund der in der Galaxis vorherrschenden Magnetfelder effektiv innerhalb unserer Galaxis gefangen sind, können Teilchen mit ausreichender Energie aufgrund ihrer magnetischen Steifigkeit aus ihr entweichen. Auch hier ergibt sich eine ladungsabhängige Maximalenergie $E_{\max}^{\text{gal}} \propto Z$. Ein weiterer Modellansatz postuliert eine Ände-

rung der Wechselwirkung bei solch hohen Energien, bei der ein neuartiges schweres Teilchen vom Detektor ungesehen erzeugt würde und somit ein Abknicken im Energiespektrum vortäuschte.

Alle Modelle dieser Art sagen eine Variation der Massenzusammensetzung der kosmischen Strahlung voraus mit einem Wechsel von einer leichten („Proton“) Zusammensetzung hin zur Dominanz der schweren („Eisen“) Komponente, die über den Kniebereich anwächst. Eine experimentelle Feststellung dieses Trends und eine detaillierte Messung der Änderungen der Massenzusammensetzung würde die Vorstellungen und Einsichten bezüglich der Beschleunigung, des Transports sowie des Nachweises stark erweitern.

Die Bestimmung der Massenzusammensetzung der hochenergetischen kosmischen Strahlung mit Energien größer als ungefähr 10^{15} eV ist bekanntermaßen eine sehr schwierige Aufgabe. Eine direkte Messung mit Detektoren, die von Satelliten oder Ballons getragen werden, erfordert wegen der geringen Intensität unannehmbar lange Flugzeiten und große Detektor-Volumina. Daher ist die einzige (indirekte) Methode die Beobachtung der Wechselwirkung der Teilchen aus dem All mit der Erdatmosphäre. Dies geschieht durch den Nachweis ausgedehnter Luftschauer mit Hilfe von großflächigen Detektoranlagen auf dem Erdboden. Luftschauer sind Teilchenlawinen, die sich in kaskadenartigen Wechselwirkungsprozessen in der Luft hülle entwickeln und welche die große Energie des einfallenden

primären Teilchen auf eine große Anzahl (Millionen) relativ niederenergetischer Teilchen (Elektronen-Photonen, Myonen und Hadronen) verteilen.

In dem folgenden Beitrag berichten wir über Luftschauer-Untersuchungen und den Stand der Ergebnisse des KASCADE (Karlsruhe Shower Core and Array Detector) Experimentes [1], das als Multidetektor Anlage im Forschungszentrum Karlsruhe aufgebaut wurde. Primäres Ziel von KASCADE ist die Bestimmung des Energiespektrums und der Massenzusammensetzung der kosmischen Strahlung im Energiebereich des Knies.

Luftschauer

Der Nachweis kosmischer Teilchen oberhalb $E \sim 5 \cdot 10^{14}$ eV erfordert Detektorflächen und Messzeiten, die sich nur in großen erdgebundenen Experimenten realisieren lassen. Hierbei werden allerdings nicht mehr die primären Teilchen selbst, sondern die in der Atmosphäre erzeugten Reaktionsprodukte, sog. ausgedehnte Luftschauer, erfasst. Der vielstufige Prozess eines Luftschauers ist schematisch in Abb. 1 skizziert. Aufgrund der Vielzahl entstehender Teilchen genügt eine stichprobenartige Vermessung der verschiedenen Teilchenkomponenten am Erdboden. Beim KASCADE-Experiment z.B. beträgt die Messfläche der Detektoren etwa 2% der Nachweisfläche des Experiments. Neben Teilchendetektoren am Erdboden können auch optische Nachweismethoden für Luftschauer verwendet werden.

Bei Primärenergien oberhalb $\sim 10^{17}$ eV kann insbesondere Fluoreszenzlicht im Wellenlängenbereich zwischen 300 – 400 nm beobachtet werden. Diese Technik soll im Pierre Auger-Experiment Verwendung finden [2].

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 welt-

weit verwendete Luftschauersimulationsprogramm CORSIKA [3] erfüllt diesen Zweck. Simulationen zeigen, 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 Lateralverteilungen der jeweiligen Teilchensorten, die rekonstruierten Myon-Produktionshöhen, die Struktur des hadronischen Schauerkerne, das Zeitprofil der Schauerfront, oder Fluktuationsbreiten einzelner Messgrößen.

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 $\sqrt{s} = 2$ GeV (pp-Stoß), d.h. bei Tevatron Energien erfolgt. Bis zu dieser Energie haben die verwendeten Wechselwirkungsmodelle ihre 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 Luft-

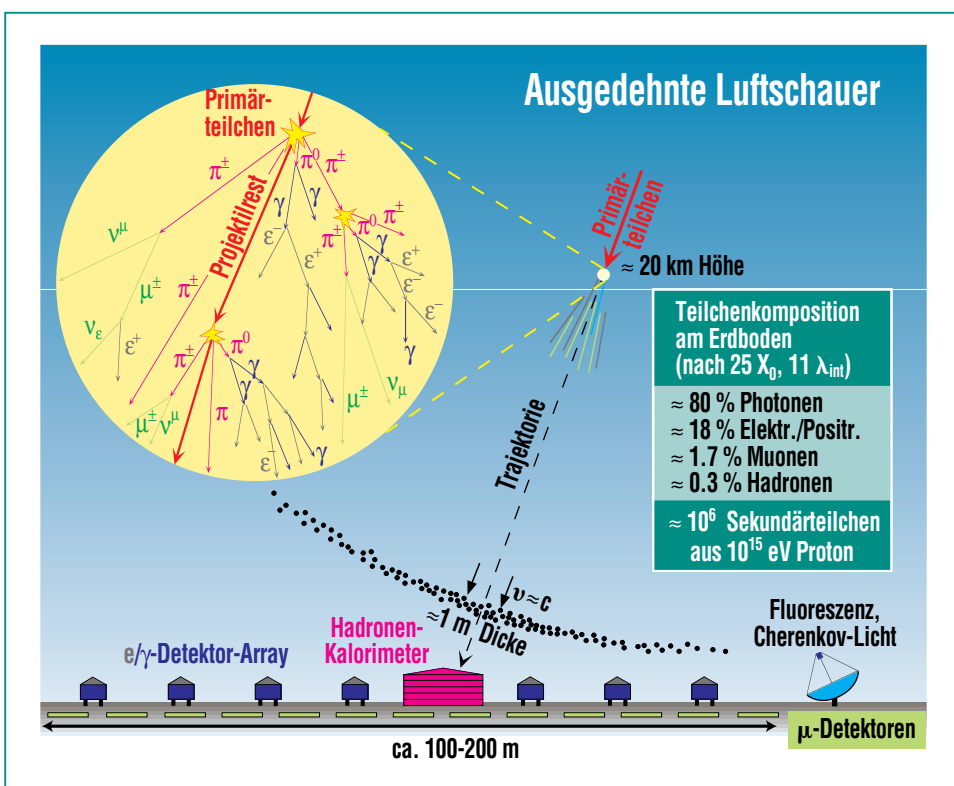


Abb. 1: Schematische Ansicht eines Luftschauers und seines Nachweises.

schauerexperimente 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 Karlsruher Luftschauer-Experiment KASCADE wurde daher so konzipiert, dass es neben der Bestimmung astrophysikalisch interessanter Größen auch zur Verbesserung der Kenntnis hadronischer Wechselwirkungen bei hohen Energien beitragen kann (siehe auch Beitrag von Engler *et al.* in dieser Ausgabe).

Das KASCADE-Experiment

Der Aufbau der Multidetektor-Anlage KASCADE wurde bereits ausführlich in einer früheren Ausgabe der FZK-Nachrichten beschrieben [4], so dass wir uns im folgenden auf eine kurze Zusammenfassung der wichtigsten Aspekte beschränken.

Die Nachweisfläche des Gesamtexperiments wird durch die Abmessungen des Detektorfeldes bestimmt. Auf einer von Fläche von $200 \times 200 \text{ m}^2$ befinden sich schachbrettartig angeordnet 252 Detektorstationen im Abstand von 13 m zueinander. Die inneren 60 Stationen beinhalten jeweils 4 Szintillationsdetektoren mit einer Nachweisfläche von 0.8 m^2 . Sie dienen zum Nachweis der Elektronen und Photonen eines Luftschauers (e/γ -Detektoren). Die äußeren 192 Stationen sind aus Kostengründen jeweils mit nur zwei e/γ -Detektoren ausge-

stattet, beinhalten aber zudem eine Abschirmung aus 10 cm Blei und 4 cm Eisen, unter der sich ein 4-fach segmentierter Plastikszintillationsdetektor (3.2 m^2) als so genannter Myon-Detektor befindet. Im Zentrum der Anlage befindet sich ein kompaktes $20 \times 16 \text{ m}^2$ großes Detektorsystem bestehend aus einem 4000 t Eisen-TMS/TMP-Sampling-Kalorimeter welches von 40000 Ionisationskammern ausgelesen wird, zwei Ebenen aus Vieldraht-Proportio-

nalkammern (MWPC), eine weitere Ebene aus Streamertube-Detektoren mit Pad-Auslese sowie einer Triggerebene aus Szintillationszählern. Das komplexe Detektorsystem dient zur Vermessung der Hadronen, Myonen und Elektronen im Kernbereich des Luftschauers. Nördlich des Zentraldetektorsystems werden in einem 50 m langen Detektor-tunnel die Spuren von durchdringenden Myonen in drei horizontalen und einer vertikalen Ebene

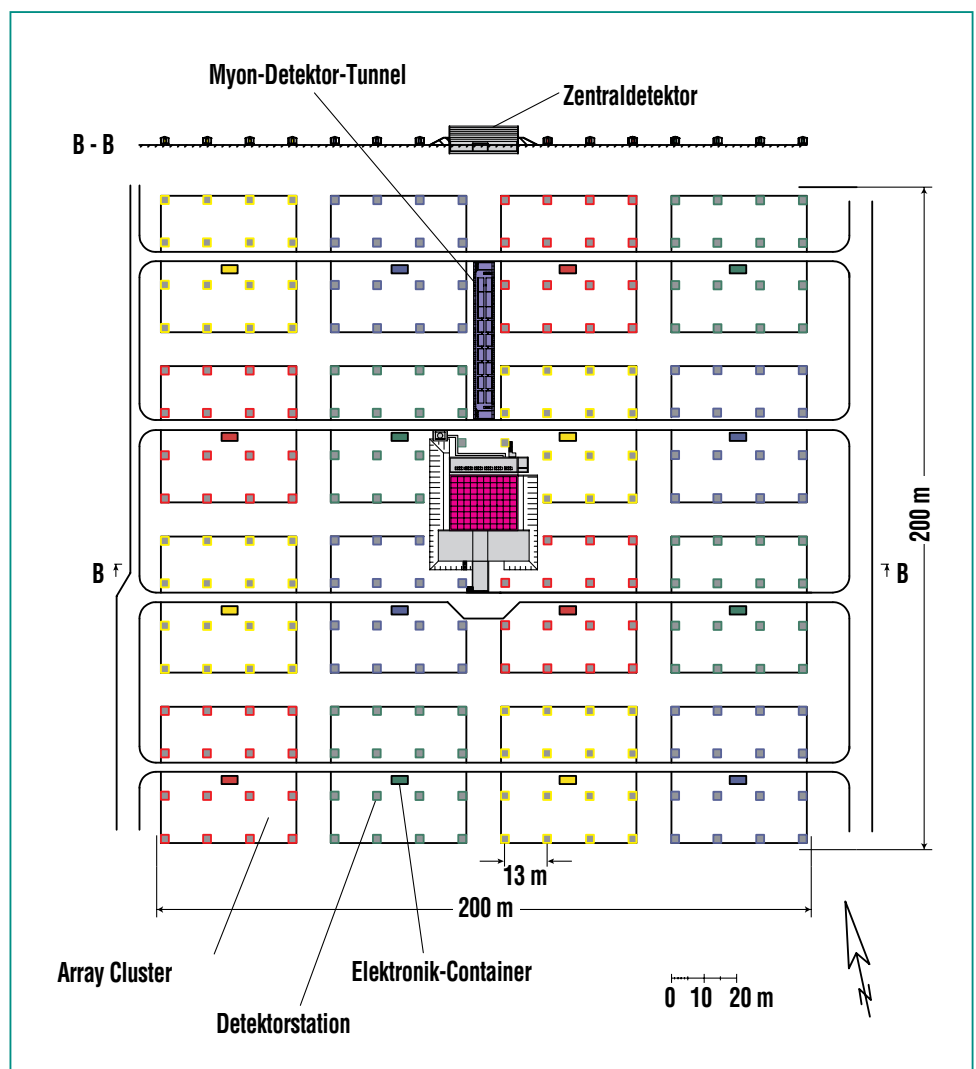


Abb. 2: Schematische Ansicht des KASCADE-Experiments mit den einzelnen Detektorkomponenten.

aus Streamertube-Detektoren gemessen. Abb. 2 zeigt eine Ansicht der gesamten KASCADE-Detektoranordnung. Die zur Energie- und Massenbestimmung der Primärteilchen erforderliche Detektoraufösung wird durch vergleichsweise hohe Flächenbe-

legung und Qualität der Detektoren erreicht; Elektronen werden in 674 Detektoren (550 m²) und Myonen in 648 Detektoren (826 m²) gezählt, zusätzlich wird die Richtung der Myonen auf einer Gesamtfläche von 280 m² vermessen und schließlich der Ort,

die Richtung und Energie hochenergetischer Hadronen auf einer Fläche von 300 m² bestimmt.

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). Der Messbetrieb begann Mitte 1996 mit ersten Detektorkomponenten. Seit dieser Zeit wurde der Aufbau weiter vervollständigt, so wurden u.a. der Myon-Spurdetektor im Tunnel und die Streamertube-Detektoren im Keller des Zentraldetektorgebäudes während des Jahres 2000 in Betrieb genommen. Eine weitere Lage aus Flüssigionskammern (Top-Lage) wird im Frühjahr 2001 vollständig in Betrieb gehen und das Experiment komplettieren.

Analyse

Konzept

Ziel der Analyse ist es, aus den Beobachtungen am Erdboden auf Energie und Natur der Primärteilchen zu schließen. Das generelle Konzept einer solchen Analyse zeigt Abb. 3. Die Messergebnisse werden mit Muster-Verteilungen verglichen, die durch umfangreiche und möglichst realistische Monte-Carlo-Simulationen der Luftschauerentwicklung und Detektorantwort erzeugt werden.

Dabei realisieren wir zwei Schwierigkeiten: Die Entwicklung der Teilchenkaskaden in der Atmosphäre unterliegt stochastischen Prozessen, die zu erhebli-

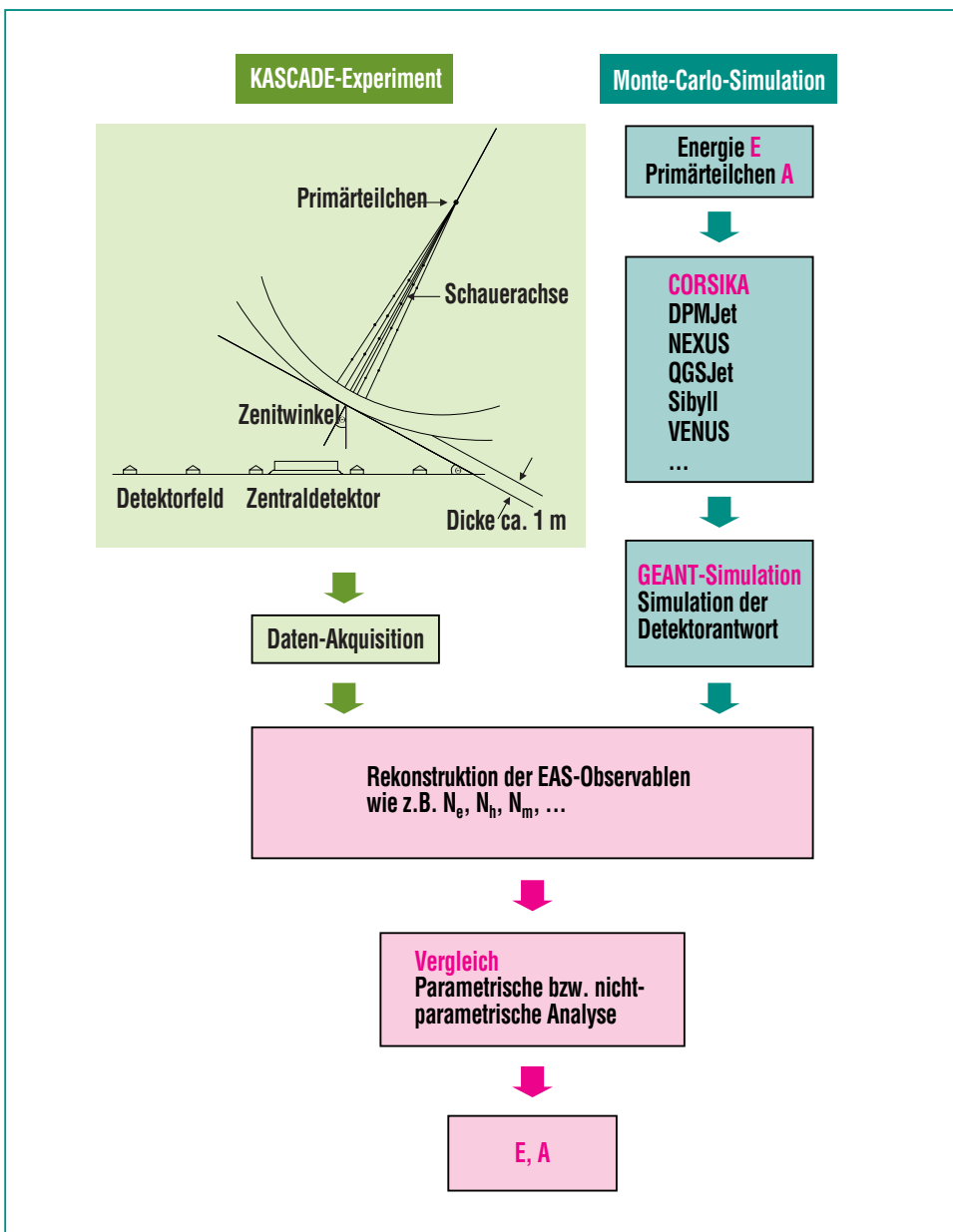


Abb. 3: Schema der Analyse. Simulationen und Messungen von Luftschauern werden verglichen, um Aussagen über Massenzusammensetzung und Energiespektrum treffen zu können.

chen intrinsischen Fluktuationen der Beobachtungsparameter führen und die Deutung verdunkeln. Die Entwicklung der Luftschauer hängt zudem von der hadronischen Wechselwirkung ab, d.h. von den bei Monte-Carlo Simulationen als Generator verwendeten Modellen. Es sollte nochmals betont werden, dass das Interesse einem Energiebereich gilt, der über den Energiebereich künstlicher Beschleuniger hinausgeht.

Zur Erstellung der Musterverteilungen wurde – wie bereits erwähnt – das Simulationsprogramm CORSIKA verwendet, das optional verschiedene fortgeschrittene (QCD inspirierte) Modelle der ultra-hochenergetischen Wechselwirkung als Monte-Carlo Generatoren zu Verfügung stellt. Der Vergleich von Theorie und Experiment kann nun zunächst so durchgeführt werden, dass die Voraussagen der Monte-Carlo Si-

mulation für a-priori vorgegebene Massen und Energien über parametrisierte Formen der Observablenabhängigkeiten verglichen werden. Voll zum Tragen kommt das KASCADE-Konzept in multivarianten Analysen, die nicht-parametrische Mustererkennungsverfahren wie Bayes Klassifizierer oder neuronale Netze benutzen.

Direkte Luftschauerobservablen

In der Diskussion der Messergebnisse ist es sinnvoll, zunächst zwischen direkten und indirekten Observablen zu unterscheiden. Zur erstgenannten Kategorie werden Messgrößen gezählt, die unmittelbar aus den Detektordaten abgeleitet werden können. Hierzu gehören insbesondere die Anzahl der Elektronen, Myonen und Hadronen am Erdboden, die Ankunftsrichtung des Primärteilchens und seine Schauerachse. Indirekte Observablen werden

nachfolgend aus diesen Messgrößen abgeleitet, indem man Mustervergleiche mit Luftschauersimulationen durchführt. Als wichtigste Beispiele hierfür sind die Masse und Energie des Primärteilchens zu nennen.

Als Beispiel direkter Messgrößen werden zunächst die integralen Teilchenzahlverteilungen der Elektronen am Boden diskutiert. Sie werden aus den beobachteten Teilchenzahldichten in den e/γ -Detektoren des Arrays bestimmt. Im ersten Schritt der Analyse wird Ereignis für Ereignis die lokale Elektronenzahldichte am Ort der Detektoren bestimmt und daraus das Schauerzentrum und die laterale Teilchendichteverteilung $r_e(r)$ rekonstruiert [5]. Aus der Integration dieser Verteilung erhält man schließlich die integrale Elektronenzahl $N_e = 2\pi \int r \cdot \rho(r) dr$ des Luftschauers am Erdboden. Abb. 4a zeigt die so gewonnenen N_e -Verteilungen nach Akkumulati-

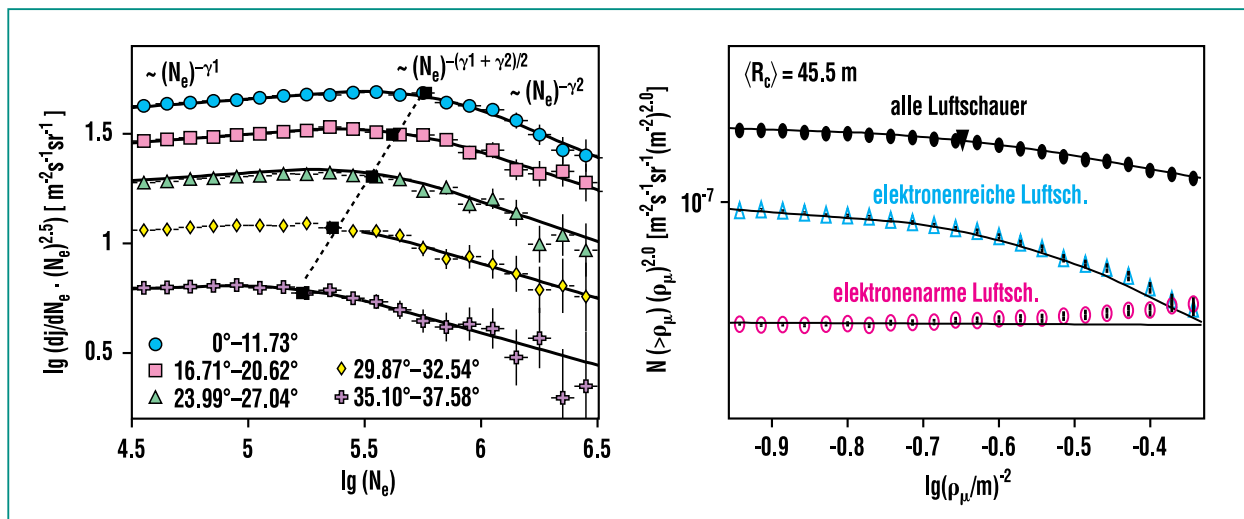


Abb. 4: (a) Doppellogarithmische Auftragung der von KASCADE gewonnen Elektronenzahlen N_e für Luftschauer unter verschiedenen Zenitwinkeln. Zur Hervorhebung der Knie-Struktur sind die Verteilungen mit $N_e^{2.4}$ multipliziert. (b) Dichteverteilung der Myonen mit $E_\mu \geq 0.49 \text{ GeV}$ in Luftschauern bei einem mittleren Abstand von 45.5 m vom Schauerzentrum. Das Dreieck im Gesamtdichtespektrum markiert die Position des Knies.

on vieler Ereignisse. Die Daten sind für verschiedene Zenitwinkelintervalle der einlaufenden Teilchen dargestellt. Die Kniestruktur ist in allen Verteilungen klar erkennbar. Man beobachtet weiterhin, dass sich die Position des Knies mit steigendem Zenitwinkel zu kleineren Teilchenzahlen bewegt. Dieser Effekt ist leicht verständlich, da die Elektronen mit steigendem Zenitwinkel einer zunehmenden Absorption in der Erdatmosphäre unterliegen. Eine quantitative Auswertung dieser Abhängigkeit erlaubt die Bestimmung der so genannten atmosphärischen Abschwächungslänge von Elektronen [6]. Aus Vergleichen mit Luftschauersimulationen ergibt sich hierbei ein Zugang zum inelastischen p-Luft-Wirkungsquerschnitt in Energiebereich jenseits der Beschleunigerenergien.

Analog zur Elektronenzahl N_e werden die integralen Teilchenzahlen der Myonen (N_μ) und Hadronen (N_h) bestimmt. Im Falle von Myonen, die sich durch eine relativ flache Lateralverteilung auszeichnen, wird jedoch meist auf eine Integration bis hin zu sehr kleinen und zu großen Schauerabständen außerhalb des Messbereichs verzichtet. Die so ermittelte „gestutzte“ (*truncated*) Myonzahl N_μ^{tr} zeichnet sich insbesondere durch geringe systematische Unsicherheiten aus.

In einer bei KASCADE entwickelten Methode der Datenanalyse konnte die Kniestruktur sogar unter Verzicht der oben erläuterten Integration lateraler Teilchendichtefunktionen nachgewiesen werden. Hierzu wurden lediglich die bei verschiedenen Schauerab-

ständen beobachteten Teilchendichteverteilungen analysiert (Abb. 4b). Eine weitergehende Untersuchung zeigt zudem, dass die Kniestruktur ausschließlich in elektronenreichen, nicht dagegen in elektronenarmen Luftschauern beobachtet wird [7]. Da jedes sinnvolle Modell der Teilchenwechselwirkungen in der Atmosphäre elektronenreiche (arme) Luftschauer im Falle von Protonen (Eisen) als Primärteilchen vorhersagt, können die Messungen als erstes Indiz gedeutet werden, dass das Knie des Primärspektrums im wesentlichen von der leichten Primärteilchenkomponente verursacht wird. Dieses Ergebnis wird von den nachfolgend beschriebenen Analysen quantitativ bestätigt.

Signaturen der Masse und Energie des Primärteilchens

Die bislang untersuchten und gezeigten Spektren basieren auf direkt gemessenen bzw. rekonstruierten Schauergrößen. Im folgenden soll nun versucht werden, anhand verschiedener Methoden aus den direkten Observablen die eigentlich gesuchten indirekten Messgrößen, nämlich die Masse und Energie des ursprünglichen Teilchens zu erschließen. Hierzu werden Muster individueller Luftschauer benötigt, die zum Vergleich mit gemessenen Daten herangezogen werden. Solche Muster werden für die gängigsten Massegruppen erzeugt, die in der kosmischen Strahlung nachweisbar sind. Typischerweise sind dies Protonen, Helium, die C-N-O-Gruppe, Silizium, bzw. die Eisen-Gruppe. Es genügt, nur eine geringe Anzahl von Gruppen zu

studieren, da an eine Auflösung einzelner Elemente oder gar Isotope nicht zu denken ist. Anhand simulierter Luftschauer-Ereignisse lässt sich belegen, dass die Extrema, nämlich Protonen bzw. Eisenkerne als leichteste bzw. schwerste Elemente der kosmischen Strahlung, im Mittel deutliche Unterschiede z.B. in der Zahl der nachgewiesenen Elektronen (N_e) oder Myonen (N_μ^{tr}) bei gleicher primärer Energie produzieren. Durch die stochastische Natur der beteiligten Prozesse aber überlagern sich selbst die Verteilungen dieser Extrema.

Um nun das Energiespektrum und die Elementzusammensetzung der kosmischen Strahlung zu bestimmen, werden entsprechende Methoden benötigt, die sowohl den Fluktuationen experimentell zugänglicher Größen, als auch den Korrelationen zwischen diesen einzelnen Observablen Rechnung tragen. Wie Simulationen zeigen, besitzt die Zahl nachgewiesener Elektronen die stärkste Abhängigkeit von der Masse des induzierenden Primärteilchens. In recht guter Näherung kann die Zahl der rekonstruierten Myonen als Schätzer der Primärenergie angesehen werden, sodass ausgehend von diesen beiden Messgrößen eine energieabhängige Elementzusammensetzung bestimmt werden kann. Abb. 5 zeigt ein Ergebnis einer solchen Untersuchung [8]. Dargestellt ist die Häufigkeit einzelner Ereignisse als Funktion des Verhältnisses von logarithmierter Zahl der Myonen bzw. Elektronen $\log(N_\mu^{\text{tr}})/\log(N_e)$. Neben den gemessenen Datenpunkten und der angepassten Gaußverteilung

(schwarz), sind die angepassten Gaußverteilungen simulierter Primärteilchen zu sehen. Einzig die Normierungen, d.h. letztlich die relativen Beiträge einzelner Elementgruppen zur gemessenen Verteilung, gehen in eine Anpassungsprozedur ein, um die Elementzusammensetzung eines festen Energiebereichs zu bestimmen (hier $E \sim 3 \cdot 10^{15}$ eV). Deutlich sind die Auswirkungen der Fluktuation als starker Überlapp der verschiedenen Elementgruppen zu erkennen. Bemerkenswert ist die sehr gute Übereinstimmung der Flanken gemessener Daten und simulierter Extrema (p, Fe). Schon geringe Unterschiede in den Mittelwerten und den Breiten simulierter Verteilungen würden diese Übereinstimmung zerstören.

Verfährt man nun nach diesem Prinzip für verschieden Bereiche der Primärenergie, so lässt sich die Elementhäufigkeit in Abhängigkeit der Energie angeben, wie in Abb. 6 dargestellt [8]. Der Einfachheit halber sind nicht die relativen Anteile der Elementhäufigkeiten, sondern die daraus berechnete mittlere logarithmische Masse $\langle \ln A \rangle = \sum \omega_i \ln A_i$ angegeben. Es zeigt sich ein deutlicher Anstieg hin zu einer schwereren Zusammensetzung nach dem Knie. Dies gibt Anlass zur Diskussion der astrophysikalischen Ursache des Knies im Energiespektrum der kosmischen Strahlung.

Ebenso auffällig ist die gute Übereinstimmung der Ergebnisse die aus Datensätzen mit Ereignissen unterschiedlicher Einfallrichtungen resultieren. Die Modellierung der Luftschauer ist demnach so detailliert verstanden, dass die

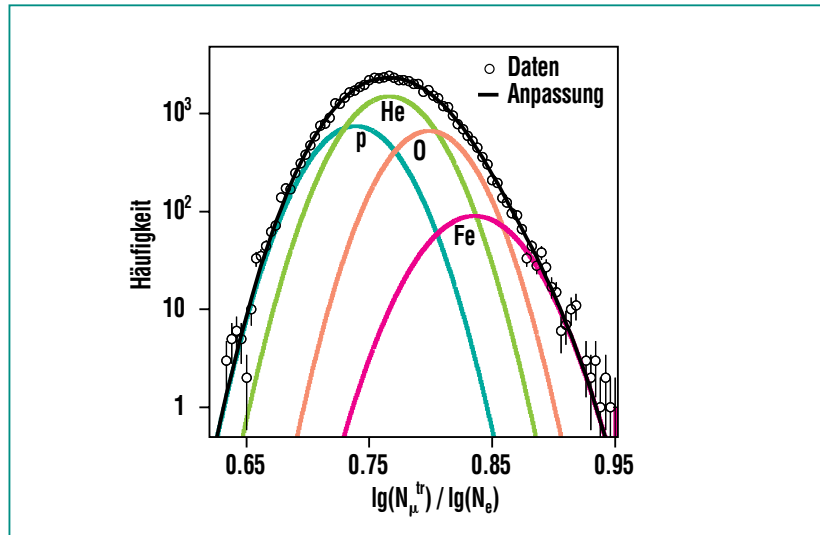


Abb. 5: Beispiel einer Verteilung des Verhältnisses $\log(N_{\mu}^{tr})/\log(N_e)$ wie es bei KASCADE gemessen wird [8]. Die Primärenergie der Ereignisse entspricht der Energie im Bereich des Knies $4 \cdot 10^{15}$ eV. Die gemessenen Häufigkeiten sind als Datenpunkte sowie mit einer angepassten Gaußverteilung gezeigt. Die Gaußverteilungen simulierter Daten sind farblich markiert.

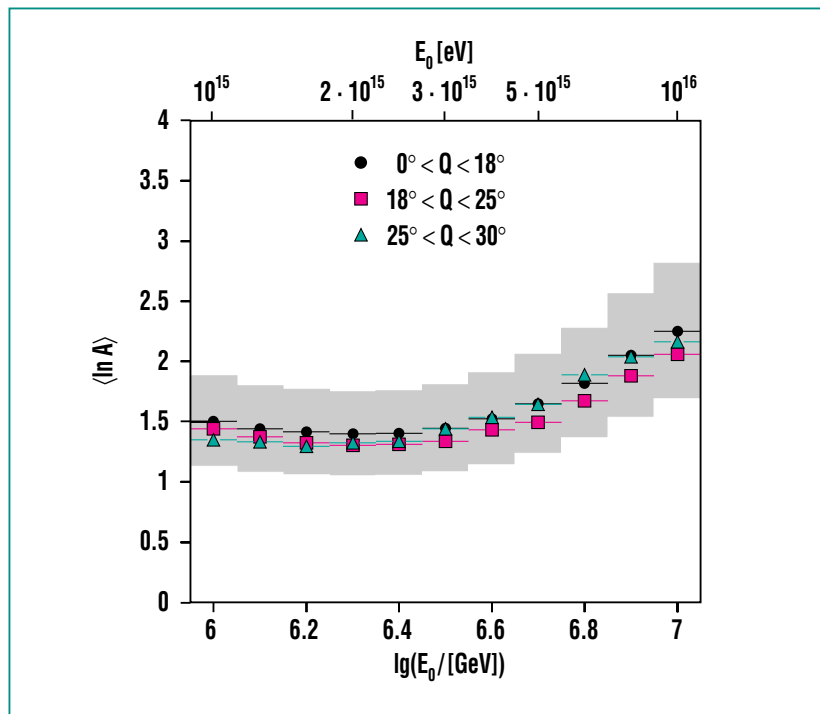


Abb. 6: Mittlere logarithmische Masse $\langle \ln A \rangle$ als Funktion der Primärenergie. Deutlich steigt $\langle \ln A \rangle$ ab einer Energie von $4 \cdot 10^{15}$ eV an. Bemerkenswert ist die Übereinstimmung der Resultate für verschiedene Zenitwinkelbereiche.

Untersuchung bei unterschiedlichen Eindringtiefen und auch bei einer unterschiedlichen Schichtung der Atmosphäre zu den selben Resultaten führt. Denn mit zunehmendem Zenitwinkel nimmt nicht nur die effektive Dicke der Atmosphäre zu, sondern zusätzlich verändert sich noch die Dichteverteilung entlang der Einfallrichtung des sich ausbildenden Luftschauers, woraus sich unterschiedliche Entwicklungen der Luftschauerkaskade ergeben.

Zenitwinkelbereiche

Neben dieser intuitiv fassbaren Methode zur Bestimmung der Elementzusammensetzung kommen noch weitere Verfahren bei KASCADE zum Einsatz, mit dem Ziel methodische Unsicherheiten und Unzulänglichkeiten zu untersuchen. Es werden z.B. „nichtpa-

rametrische“ Algorithmen verwendet, die nicht anhand parametrisierter Verteilungen von Simulationen den Messdaten angepasst werden, sondern die auf der Basis einzelner Ereignisse durch Vergleich der Signaturen simulierter mit gemessenen Ereignissen einen Rückschluss auf die Zugehörigkeit zu einer bestimmten Elementgruppe (bzw. auf die primäre Energie) zulassen. D.h. in Form von Wahrscheinlichkeitsaussagen wird jedem Ereignis individuell eine Masse und/oder eine Primärenergie zugewiesen. Qualitativ und quantitativ werden mit solchen Untersuchungen die oben genannten Ergebnisse der Massenzusammensetzung der kosmischen Strahlung bestätigt, womit systematische Unsicherheiten durch Verwendung verschiedener Analysemethoden reduziert werden. Ein Resultat einer sol-

chen nicht-parametrischen Untersuchung bezüglich des Energiespektrums der kosmischen Strahlung zeigt Abb. 7 [9]. Zur Verdeutlichung wurde die Ordinate mit einem Faktor $E^{2.75}$ skaliert, um die Knie-Struktur deutlicher hervortreten zu lassen. Die Signaturen N_e und N_{μ}^{tr} wurden zur Analyse verwendet. Der differentielle Fluss der kosmischen Strahlung, d.h. der Teilchenfluss als Funktion der Energie, bricht deutlich bei einer Energie von etwa $4 \cdot 10^{15}$ eV ab. Der Exponent der Potenzfunktion $I(E) \propto E^{\gamma}$ fällt von -2.77 ab auf -3.11. Offensichtlich stimmen auch hier innerhalb der statistischen Unsicherheiten die Resultate für verschiedene Zenitwinkelbereiche gut überein.

In einer weiteren unabhängigen Untersuchung zur Bestimmung der Energiespektren einzelner Elementgruppen kommt eine Ent-

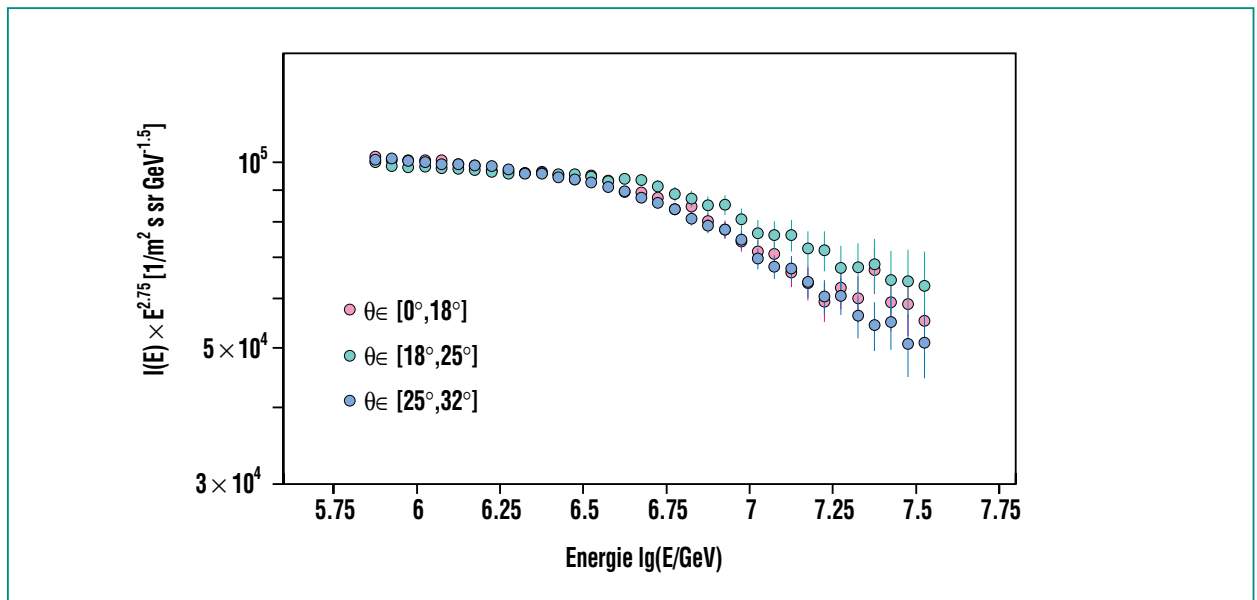


Abb. 7: Das differentielle Energiespektrum der kosmischen Strahlung als Funktion der Energie. Zur Verdeutlichung wurde die Ordinate mit einem Faktor $E^{2.75}$ skaliert, um die Knie-Struktur bei $4 \cdot 10^{15}$ eV deutlich werden zu lassen [9]. Die drei Energiespektren zeigen bei verschiedenen Zenitwinkelbereichen jeweils innerhalb der statistischen Genauigkeit eine gute Übereinstimmung.

faltungsmethode zum Einsatz. Quantitativ decken sich die Resultate mit denen der Methode der regularisierten Entfaltung. Hierbei werden sowohl die Elektronenzahl-Spektren als auch Myonenzahl-Spektren simulierter Elementgruppen mit ihren Fluktuationen simultan den gemessenen Schauergößen-Spektren in allen o.g. Zenitwinkelbereichen angepasst, sodass eine größtmögliche Übereinstimmung erzielt wird. Auf diese Weise gelang es erstmals, Energieverteilungen einzelner Massengruppen aus den Daten zu extrahieren. Das noch vorläufige aber sehr viel versprechende Ergebnis ist in Abb. 8 dargestellt [10]. Mit Ausnahme der Eisen-Komponente beobachtet man in allen Verteilungen ein eindeutiges Knie, deren Position in guter Näherung proportional zur Ladungszahl der Elementgruppe ansteigt. Die entsprechend erwartete Knie-Position des Eisen-Spektrums liegt derzeit am oberen Rand des KASCADE-Messbereichs. Detailliertere Untersuchungen [10] belegen, dass die Form der jeweiligen Verteilungen bei einer Auftragung als Funktion der magnetischen Steifigkeit (Rigidität; $R = pc/Ze$) innerhalb der Messfehler identisch sind. Es erscheint daher die Aussage schlüssig, dass das Knie im Energiespektrum der kosmischen Strahlung durch eine Überlagerung einzelner ladungsspezifischer Verteilungen mit ihrer jeweils charakteristischen „Knie-Energie“ entsteht. Da Protonen und Helium bis zu Energien von $\sim 10^{15}$ eV das Gesamtspektrum dominieren, findet man das Knie des Gesamtspektrums etwa im Bereich des p bzw. He-Knies.

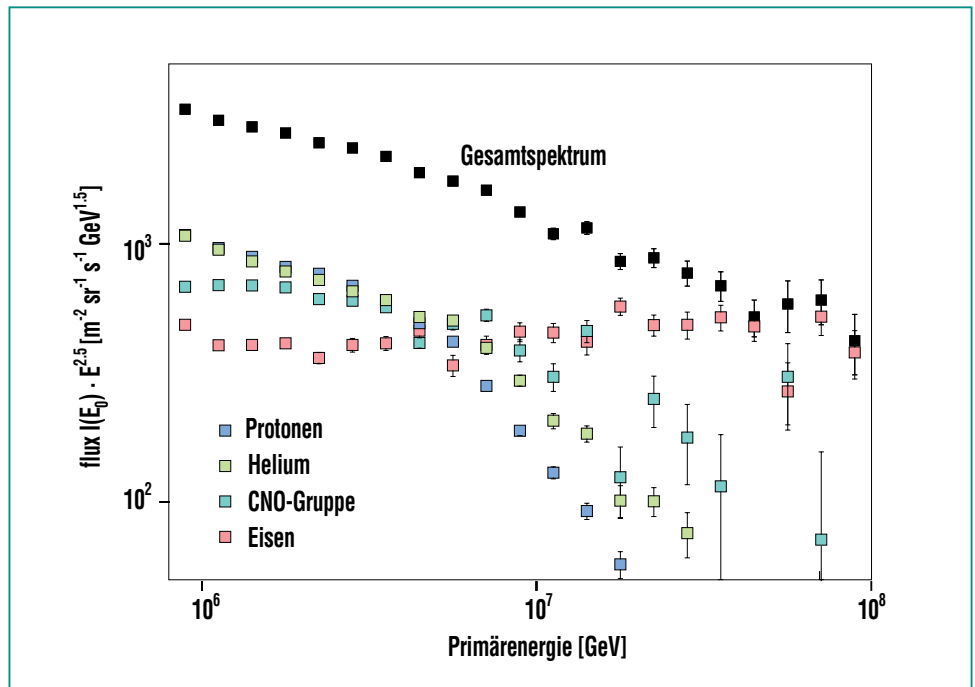


Abb. 8: Gesamtteilchenfluss sowie Energiespektren einzelner Elementgruppen (p, He, CNO, Fe) [10]. Die noch vorläufigen Spektren zeigen jeweils eine Knie-Struktur, die proportional zur Ladungszahl der Elemente ansteigt. Die bisherige Akzeptanz des KASCADE-Experiments erlaubt jedoch noch keine klare Schlussfolgerung über eine Knie-Struktur im Eisen-Spektrum.

Diese außerordentlich wichtigen – aber noch vorläufigen – Ergebnisse führen in natürlicher Weise und in Übereinstimmung mit den oben diskutierten Analysen zu einer schwerer werdenden Massenkomposition oberhalb des Knies im Gesamtspektrum.

Zusammenfassung

Die hier vorgestellten Resultate des KASCADE-Experiments lassen erstmals den Schluss zu, dass das Knie im Energiespektrum der kosmischen Strahlung durch die leichte Teilchen-Komponente hervorgerufen wird. Diese Beobachtung konnte unabhängig und in konsistenter Weise aus verschiedenen Datensätzen und Analysetechniken abgeleitet

werden. Vorläufige Daten der Energiespektren einzelner Massengruppen zeigen darüber hinaus, dass das Knie linear mit der Ladungszahl der Primärteilchen skaliert. Für die Gruppe der schwersten Elemente konnte im Energiebereich bis $5 \cdot 10^{16}$ eV bislang keine eindeutige Struktur beobachtet werden. Der Vergleich mit Gesamtenergiespektren anderer Experimente erzwingt aber eine solche, um nicht zu gravierenden Inkonsistenzen zu gelangen. Die KASCADE-Daten sind daher in guter Übereinstimmung mit Modellen magnetischer Teilchenbeschleunigung. Um zwischen den verschiedenen Szenarien zur Erklärung des Knies definitiv zu unterscheiden, bedarf es aber noch weiterer Un-

tersuchungen der Massenzusammensetzung vom Bereich des „Proton-Knies“ bei etwa $2 \cdot 10^{15}$ eV bis zu Energien, bei denen auch schwere Elemente ein Abknicken zeigen sollten. Das Experiment KASCADE wird zu diesem Zweck derzeit auf eine Gesamtfläche von ca. 0.6 km^2 ausgedehnt. Innerhalb einer Messzeit von 3-4 Jahren lassen sich die Untersuchungen dann mit guter Statistik bis zu Energien von $5 \cdot 10^{17}$ eV ausdehnen.

Letztlich bleibt noch zu bemerken, dass alle Anstrengungen bei der

Untersuchung der höchsten Energien der kosmischen Strahlung von bis zu 10^{21} eV (siehe Beitrag zum AUGER-Experiment in dieser Ausgabe) nur dann erfolgreich sein können, wenn die verwendeten Modelle zur Simulation von Luftschauern zuverlässige Resultate liefern. Hierzu werden von KASCADE und der Erweiterung KASCADE-Grande essentielle Beiträge in Form von Massenzusammensetzung, Energiespektren einzelner Elementgruppen und damit zusammenhängenden Tests der Wechselwirkungsmodelle geliefert werden.

Danksagung

Die hier diskutierten und z.T. noch vorläufigen Daten repräsentieren die Analyseergebnisse vieler einzelner Mitarbeiter, insbesondere von Doktoranden und Diplomanden. Die Autoren danken den technischen und wissenschaftlichen Mitarbeitern des KASCADE Experiments für ihren motivierten Einsatz und für die fruchtbare Zusammenarbeit.

Literatur

- [1] P. Doll et al.,
The Karlsruhe Cosmic Ray Projekt KASCADE, KfK-Report 4686, Kernforschungszentrum Karlsruhe (1990)
- [2] Auger Collaboration,
Design Report, 2nd edition, erhältlich am Fermilab, siehe auch Beitrag von H. Blümer und C. Guérard in dieser Ausgabe
- [3] D. Heck et al.,
FZKA-Report 6019, Forschungszentrum Karlsruhe 1998, in deutsch; siehe auch Beitrag von D. Heck in dieser Ausgabe
- [4] H.O. Klages,
FZK Nachrichten 30 (1998) 10-17
- [5] T. Antoni et al.,
(KASCADE Collaboration), Astropart. Phys. 14 (2001) 245
- [6] G. Maier,
Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 1999
- [7] T. Antoni et al.,
(KASCADE Collaboration), Astropart. Phys. (2001) im Druck
- [8] J. Weber,
FZKA-Report 6339, Forschungszentrum Karlsruhe 1999, in deutsch
- [9] M. Roth,
FZKA-Report 6262, Forschungszentrum Karlsruhe 1999, in deutsch
- [10] H. Ulrich,
Doktorarbeit, Universität Karlsruhe / FZK (2001), in Vorbereitung