

Das KASCADE-Grande-Experiment

H. Ulrich, A. Haungs, J. Wochele, IK;
J. R. Hörandel, Institut für Experimentelle Kernphysik, Universität Karlsruhe

Einleitung

Der Fluss der kosmischen Strahlung nimmt mit zunehmender Energie der Teilchen sehr stark ab und folgt in guter Näherung einem Potenzgesetz (Abb. 1). Oberhalb einer Energie von 10^6 GeV ändert sich plötzlich der gleichmäßige Abfall dieses Spektrums, es wird steiler. Diese Änderung wird als das „Knie“ der kosmischen Strahlung bezeichnet. Obwohl es seit fast 50 Jahren bekannt ist, ist sein Ursprung noch immer ungeklärt.

Vorherrschende theoretische Modelle sehen das Knie als energetische Obergrenze der Teilchenbeschleunigung in Supernova-Schockfronten. Alternativ ist aber auch eine Änderung des Transportmechanismus von den Quellen bis zum Nachweis denkbar. Hierbei entspricht der Kniebereich einer notwendigen Minimalenergie, ab der die Teilchen nicht mehr in der Galaxis gehalten werden können und beginnen, aus der Milchstraße zu entweichen. Da der betrachtete Energiebereich Energien entspricht, die oberhalb bestehender Beschleunigerexperimente liegen, wird auch eine Änderung der Wechselwirkungen zur Erklärung des Knies vorgeschlagen. Beim Teilchennachweis durch Luftschauermessungen (siehe unten) treten neue Prozesse auf, durch die Energie „ungesehen“ verloren geht. Die Teilchen würden zu niederenergetischer rekonstruiert, und ein Abknicken im Energiespektrum vorgetäuscht.

Alle Modelle sagen eine Variation der Massenzusammensetzung der kosmischen Strahlung voraus. Unterhalb des Knies dominieren leichte Elemente die Zusammensetzung.

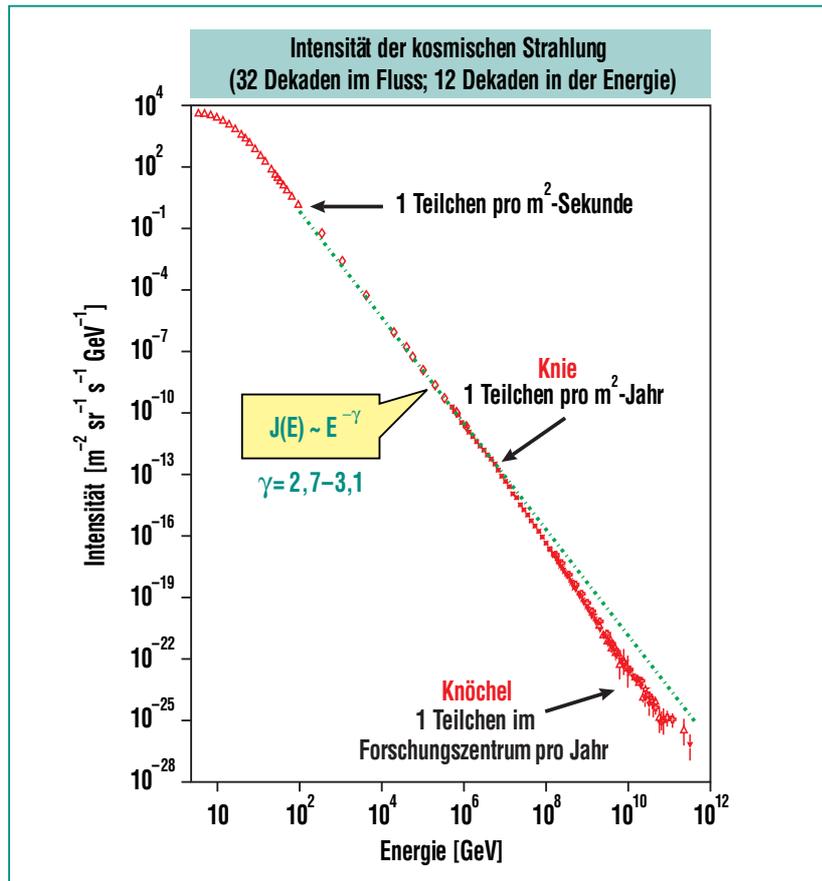


Abb. 1: Energiespektrum der kosmischen Strahlung oberhalb 100 MeV. Die Daten stammen von verschiedenen Experimenten. Zahlen an der Kurve geben integrale Teilchenflüsse oberhalb der markierten Energie an (nach S. Swordy, Univ. Chicago).

Über den Kniebereich erwartet man jetzt einen Wechsel hin zu einer schwereren Zusammensetzung. Ferner könnten aus der Form der Energiespektren einzelner Elementgruppen weitere Rückschlüsse zur Unterscheidung zwischen den Modellen gewonnen werden.

Ausgedehnte Luftschauer

Für Energien oberhalb 10^5 GeV ist die Intensität der kosmischen Strahlung soweit abgefallen, dass eine direkte Messung durch Bal-

lone oder Satelliten nicht mehr praktikabel ist. Als einzige Möglichkeit verbleibt der indirekte Nachweis mittels des Phänomens der „ausgedehnten Luftschauer“.

Tritt ein Teilchen der kosmischen Strahlung in die Erdatmosphäre ein, stößt es in einer Höhe von 10 bis 30 km mit dem Kern eines Luftmoleküls zusammen. Bei diesem Zusammenstoß wird der Kern zertrümmert, und eine Vielzahl an neuen Teilchen entsteht. Erhalten die entstehenden Reaktionsprodukte (hauptsächlich Pionen) genügend Energie, erzeugen sie ihrer-

seits bei Stößen mit Kernen der Luft weitere Sekundärteilchen. Durch ständige Wiederholung dieses Prozesses bildet sich in einer Art Kettenreaktion eine Teilchenlawine, die sich durch die Atmosphäre zum Erdboden hin bewegt. Es hat sich ein „Luftschauer“ gebildet. Erst wenn die mittlere Energie der entstandenen Teilchen einen kritischen Wert unterschreitet, überwiegt Absorption in der Atmosphäre gegenüber der Teilchenproduktion, und die Teilchenzahl im Schauer beginnt abzunehmen. Aufgrund ihres Transversalimpulses bei der Entstehung und vielfacher Streuprozesse beim Weg durch die Atmosphäre entfernen sich die Schauerteilchen immer mehr von der Schauerachse (die gedachte Flugbahn des ursprünglichen Primärteilchens), wodurch der Luftschauer an Ausdehnung gewinnt. Es bildet sich eine leicht gekrümmte Teilchenscheibe von

wenigen Metern Dicke, aber einer seitlichen Ausdehnung von bis zu mehreren Hundert Metern aus. Erreicht der Schauer den Erdboden, kann er je nach Energie des Primärteilchens aus mehreren Millionen niederenergetischer Sekundärteilchen bestehen und eine Fläche von mehreren Hundert Quadratmetern abdecken. Eine stichprobenartige Messung der Teilchendichten ermöglicht es dann, sowohl die Gesamtzahl der Teilchen innerhalb der Schauerfront, als auch deren Ausdehnung und Form zu bestimmen (Abb. 2).

Etwa 85 % der am Boden ankommenden Teilchen sind Elektronen und Positronen, knapp 10 % Myonen. Den kleinsten Anteil (ca. 2 %) machen hochenergetische Hadronen aus. Neben der Gesamtteilchenzahl ist das Verhältnis von Elektronen zu Myonen von besonderem Interesse, da es sensitiv auf

die Masse des eigentlichen Primärteilchens ist. Die Myonenzahl alleine dient hingegen als guter „Schätzer“ für die ursprüngliche Primärenergie.

Das KASCADE-Experiment

Der Aufbau des KASCADE-Experiments wurde in früheren Ausgaben der Nachrichten beschrieben, so dass hier nur eine kurze Übersicht folgt.

Die Vermessung der Luftschauerfront erfolgt durch das 200 x 200 m² große Detektorfeld. Es besteht aus 252 Stationen mit einem Abstand von 13 m zueinander mit Szintillationsdetektoren für den Nachweis von Elektronen und Myonen. Im Zentrum des Feldes befindet sich der Zentraldetektor. Herzstück ist das 20 x 16 m² große Eisen-Sampling-Kalorimeter. Unterhalb des Kalorimeters sind zwei Ebenen aus Vieldraht-Proportionalkammern und eine Lage aus Streamertube-Detektoren installiert. Dieses System ist zur Vermessung von Hadronen und Myonen im Zentrum eines Luftschauers gedacht. Nördlich des Zentraldetektors werden im 50 m langen Myonspurdetektor die Flugbahnen einzelner Myonen in drei horizontalen und einer vertikalen Ebene aus Streamertube-Detektoren vermessen.

Weltweit verfügen nur sehr wenige Experimente über solch komplexe Detektoranordnungen. KASCADE konnte dadurch als erstes Experiment das Knie in allen drei Schauerkomponenten (Elektronen, Myonen, Hadronen) nachweisen. Im Folgenden werden exemplarisch Ergebnisse des Kalorimeters und des Detektorfeldes vorgestellt.

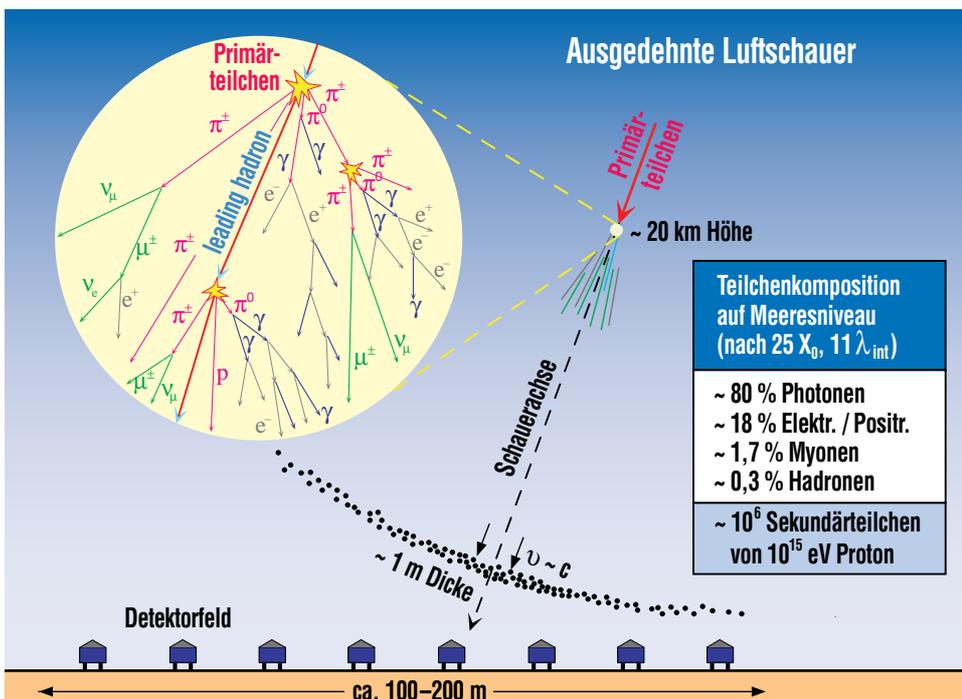


Abb. 2: Schematische Ansicht eines Luftschauers und seiner Messung.

Ergebnisse des KASCADE-Kalorimeters

Das KASCADE-Kalorimeter kann Energie, Einfallsrichtung und Auftreffort einzelner Hadronen in Luftschauern messen. Dies erlaubt genaue Studien der hadronischen Schauerkomponente, sowie Untersuchungen von Korrelationen mit den elektromagnetischen und myonischen Schauerkomponenten. Solche Korrelationen werden benutzt, um Modelle zur Beschreibung hadronischer Wechselwirkungen in der Atmosphäre zu verifizieren.

Für die Untersuchung der Wechselwirkungsmodelle werden aus detaillierten Simulationsrechnungen vorhergesagte Korrelationen verschiedener Beobachtungsgrößen mit Messdaten verglichen. Hierbei haben sich teilweise Abweichungen zwischen Vorhersage und Messung ergeben. Bestimmte Modelle konnten hierdurch falsifiziert werden. Die Analysen erlauben auch eine quantitative Beurteilung der Qualität der Beschreibung von Wechselwirkungen in den Modellen. Abweichungen zwischen Messungen und Modellvorhersagen liegen im Bereich von 10 bis 15%.

Durch Korrelation von verschiedenen hadronischen Observablen (wie Hadronzahl oder Hadronenergie) mit der gemessenen Myonenzahl konnte die mittlere Masse der kosmischen Strahlung als Funktion der Energie im Bereich 10^6 bis 10^7 GeV abgeleitet werden. Hierbei zeigt sich, dass die mittlere Masse im Bereich des Knies im Gesamtspektrum mit der Energie ansteigt. Wie erwähnt, ist dies eine wesentliche Information zum Verständnis des Kniesprungs.

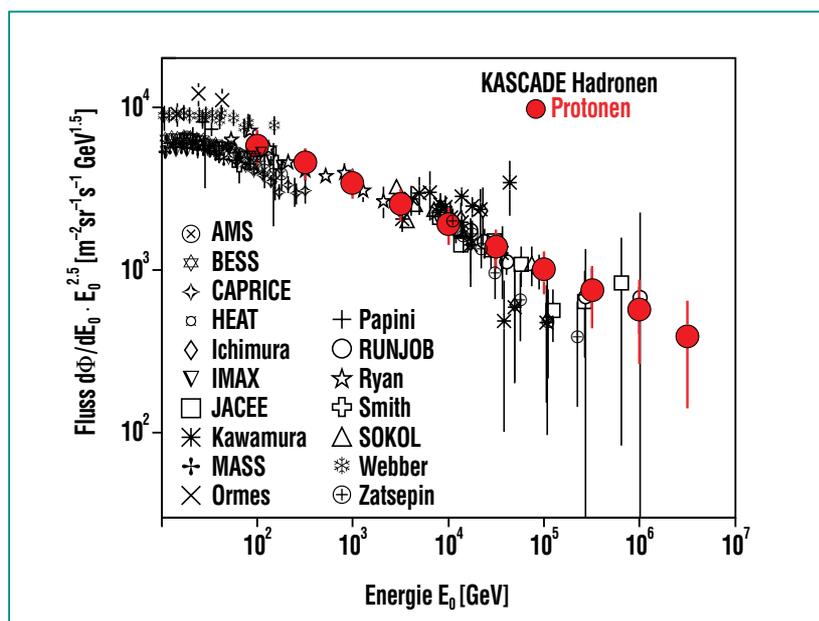


Abb. 3: Fluss von Protonen in der kosmischen Strahlung als Funktion der Energie. Die KASCADE Daten (rot) werden mit Ergebnissen direkter Messungen oberhalb der Atmosphäre (schwarz) verglichen.

Die gemessene Rate von einzelnen Hadronen am Erdboden ist eng mit dem Fluss primärer Protonen oberhalb der Atmosphäre korreliert. Aus den Messungen wurde das Spektrum primärer Protonen im Energiebereich 100 bis 10^6 GeV bestimmt. Ergebnisse sind in Abb. 3 dargestellt. Die gefundene Intensität stimmt gut mit direkten Messungen von Ballon- und Satellitenexperimenten oberhalb der Atmosphäre überein. Die Messwerte lassen sich über 4 Dekaden in der Energie durch ein einzelnes Potenzgesetz beschreiben.

Ergebnisse des KASCADE-Detektorfelds

Hauptmessgrößen des KASCADE-Detektorfelds sind Ankunftsrichtung des Primärteilchens sowie Anzahl der Elektronen und Myonen im Schauer. Observable wie Ener-

gie und Masse des Primärteilchens müssen aus Vergleichen mit Luftschauersimulationen bestimmt werden. Ergebnisse solcher Analysen hängen allerdings teilweise in hohem Maße von den Eigenschaften der Simulationsrechnungen ab (siehe Beitrag von R. Engel et al.).

Die Suche nach Anisotropien bzw. bevorzugten Ankunftsrichtungen ist von Simulationsrechnungen praktisch unabhängig. Aufgrund der Magnetfelder innerhalb der Milchstraße werden die geladenen Teilchen der kosmischen Strahlung vielfach abgelenkt und verlieren jede Information über ihre Herkunft. Abweichungen von einer erwarteten Gleichverteilung der Ankunftsrichtungen wären ein Indiz für sehr nah gelegene Beschleuniger, oder würden unter der Annahme von neutralen Primär-

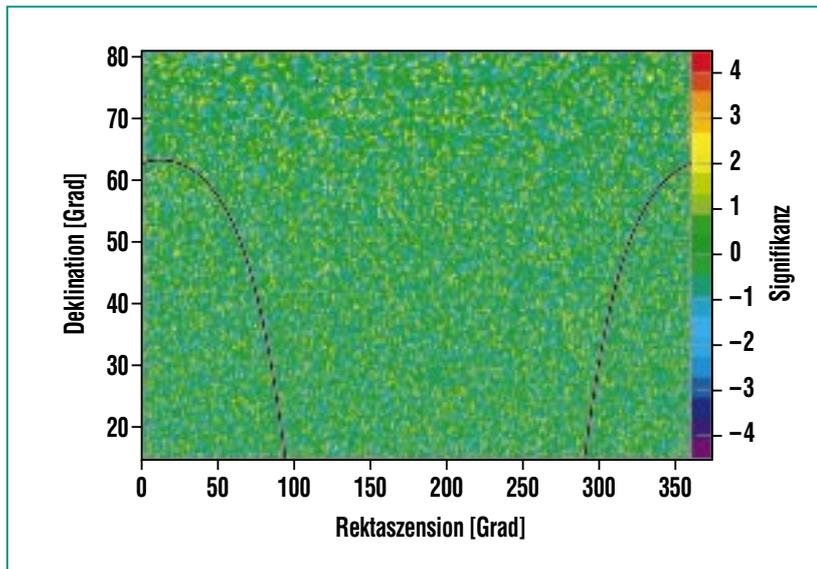


Abb. 4: Verteilung der Signifikanzen für die Abweichung der gemessenen Luftschauerhäufigkeit von der Erwartung einer Gleichverteilung der Ankunftsrichtungen. Die Linie stellt den Verlauf der galaktischen Ebene dar.

teilchen (z. B. hochenergetische Gammaquanten) direkt auf die Quellen zeigen. Abb. 4 zeigt die Ergebnisse einer solchen Himmelsdurchmusterung. Abweichungen zwischen gemessener und erwarteter Schauerzahl sind farblich kodiert dargestellt. Zahl und Größe auftretender Abweichungen befinden sich im Einklang mit statistischen Fluktuationen, sodass im Rahmen der experimentellen Genauigkeit die erwartete Gleichverteilung der Ankunftsrichtungen bestätigt wird.

Hauptfragestellung von KASCADE ist die Bestimmung von Energiespektren einzelner Massengruppen. Hierzu wird unter Einsatz von Entfaltungsmethoden die Häufigkeit gemessener Schauer mit bestimmten Werten von Elektronen- und Myonenzahl in die Häufigkeit von primären Teilchen einer bestimmten Energie und Masse übersetzt. Dabei werden sowohl Kor-

relationen zwischen den Messgrößen als auch Fluktuationen in der Schauerentwicklung berücksich-

tigt. Die benötigten Zusammenhänge zwischen Energie und Masse sowie Elektronen- und Myonenzahl werden durch Simulationsrechnungen bestimmt, wodurch das Ergebnis von den verwendeten Modellen abhängig wird. Abb. 5 zeigt die rekonstruierten Energiespektren für Protonen, Heliumkerne und alle Kerne schwerer als Helium sowie das resultierende Gesamtspektrum. Die Rechnungen verwendeten dabei das Modell QGSJet. Zur Verdeutlichung auftretender Strukturen ist die Ordinate mit dem Faktor $E^{2.5}$ skaliert. Die Spektren der Protonen und Heliumkerne zeigen eine deutliche Kniestruktur, wobei für Helium die Knieposition zu höherer Energie hin verschoben ist. Diese Knie in den Spektren der leichten Elemente sind damit für das Auftreten des Knies im Gesamtspektrum verantwortlich. Gleichzeitig stimmen die

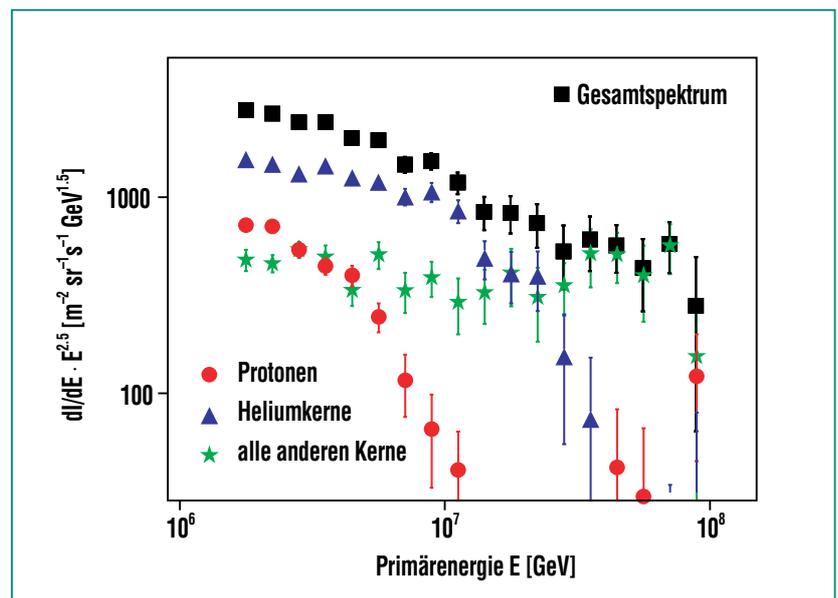


Abb. 5: Mit KASCADE gemessene Energiespektren für Protonen, Heliumkerne und Kerne schwerer als Helium, sowie das resultierende Energiespektrum aller Teilchen der kosmischen Strahlung. Zur Verdeutlichung von Strukturen sind die Flusswerte mit $E^{2.5}$ skaliert.

Intensitäten der einzelnen Massen-
gruppen gut mit Extrapolationen di-
rekter Messungen bei niedrigeren
Energien überein. Es bleibt aber zu
betonen, dass die in Simulationen
verwendeten Wechselwirkungs-
modelle nicht den gesamten Da-
tenbereich konsistent beschreiben
können.

Die „Grande“- Erweiterung

Aus den Ergebnissen des origina-
len KASCADE-Experiments erge-
ben sich weitere astrophysikali-
sche Fragestellungen bezüglich
des Spektrums der kosmischen
Strahlung. Folgt man der Abhän-
gigkeit der Knieposition für die ver-
schiedenen Massengruppen, lä-
ge ein zu erwartendes Eisenknie
bei ca. 10^8 GeV. Darüber hinaus
prognostizieren astrophysikalische

Modelle für Energien oberhalb die-
ses Eisenknies den Übergang von
kosmischer Strahlung galaktischen
Ursprungs zu einer extragalakti-
schen Strahlung. Dieser Übergang
würde ebenfalls zu einer Änderung
der Elementzusammensetzung
führen. Beide erwarteten Struktu-
ren konnten bisher nicht nachge-
wiesen werden.

Um diesen höheren Energiebe-
reich zugänglich zu machen, wur-
de das Experiment KASCADE im
37 neue Detektorstationen zu
KASCADE-Grande erweitert. Luft-
schauer höherer Primärenergie
sind in ihrer Ausdehnung größer, in
ihrer Häufigkeit aber seltener. Ein
Detektorfeld muss daher eine grö-
ßere Fläche abdecken, wodurch
eine Ausdehnung fast über das
gesamte Forschungszentrums-
gelände notwendig wird (Abb. 6).

Das „Grande“-Feld deckt nun
eine Fläche von $700 \times 700 \text{ m}^2$ ab.
Jede der neuen Stationen bein-
hältet 10 m^2 an Szintillationsde-
tektoren, die die geladenen Schau-
erteilchen messen. Grande besitzt
eine eigene Datenaufnahme, ist
aber so konzipiert, dass für jeden
Luftschauer alle Komponenten des
ursprünglichen KASCADE Experi-
ments ausgelesen werden.

Abb. 7 zeigt die gemessenen Teil-
chendichten eines einzelnen Schau-
ers. Durch die Kombination der
Dichtemessungen der Grande-De-
tektoren mit denen des KASCA-
DE-Feldes wird die Rekonstruktion
von Luftschauern bis zu Primär-
energien von 10^9 GeV in ähnlicher
Qualität wie bei KASCADE mög-
lich. Mit der zusätzlichen Informa-
tion aller KASCADE-Komponenten kön-
nen die in den Analysen benutzten



Abb. 6: Das Detektorfeld von KASCADE-Grande im Forschungszentrum Karlsruhe mit Blick in eine der 37 Stationen. KASCADE-Grande besteht aus dem ursprünglichen KASCADE-Experiment, den über das Zentrums-gelände verteilten Grande-Stationen, einer Datenaufnahmestation (DAQ) und einem schnellen Triggerarray (Piccolo).

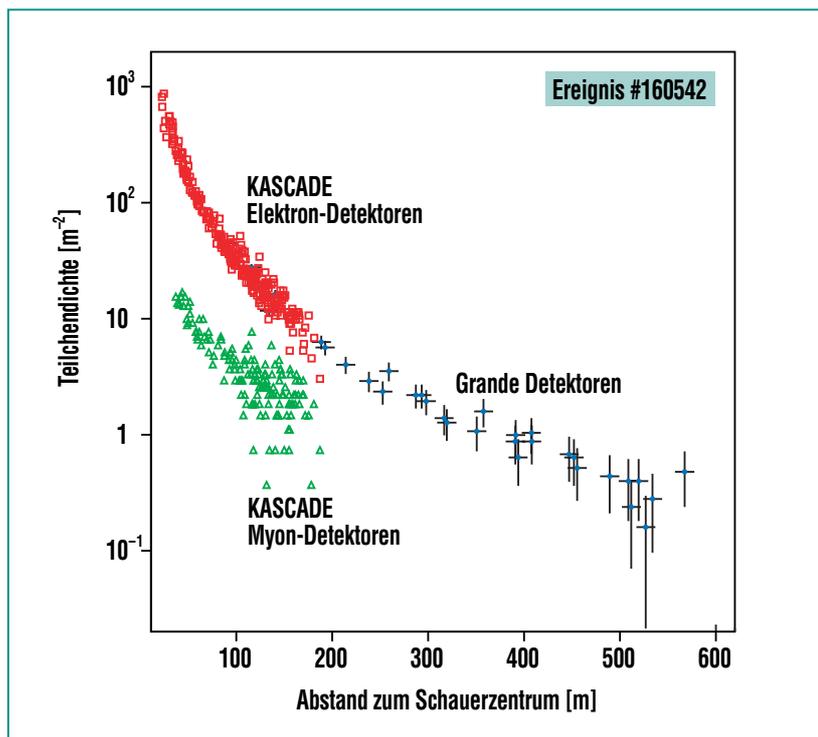


Abb. 7: Mit den verschiedenen Detektorkomponenten des KASCADE-Grande-Experiments gemessene Teilchendichten eines einzelnen Schauers in Abhängigkeit vom Abstand zum Schauerzentrum.

Wechselwirkungsmodelle nun bei höheren Energien und größeren Abständen zum Schauerzentrum getestet werden. Im nächsten Schritt

wird sich eine Entfaltungsanalyse (analog zu der des KASCADE-Feldes) für den erweiterten Energiebereich anschließen.

Ausblick

KASCADE-Grande wird voraussichtlich bis Ende 2008 weiter messen. Dies bedeutet über zwölf Jahre Messzeit für die KASCADE-Detektoren und fünf Jahre Messzeit für die Grande-Erweiterung. Bis dahin wird für die höchsten Energien genügend Statistik gesammelt sein, um detaillierte Analysen durchzuführen zu können. Damit werden wir zur Lösung der wichtigsten astrophysikalischen Fragestellung nach dem Ursprung der kosmischen Strahlung einen wichtigen Beitrag leisten.

Danksagung

KASCADE-Grande ist ein deutsch-italienisch-rumänisch-polnisches Experiment an dem acht Institute beteiligt sind. Die Autoren danken allen Beteiligten im wissenschaftlichen und technischen Bereich für ihre unermüdliche Mitarbeit am Experiment. Ohne dieses Engagement wären die hier gezeigten Ergebnisse nicht möglich gewesen.

Literatur

Weitere Informationen und wiss. Veröffentlichungen finden Sie unter: <http://www-ik.fzk.de/KASCADE-Grande/>