

# Test hadronischer Wechselwirkungsmodelle bei hohen Energien

J. Engler, M. Risse, IK; J.R. Hörandel, Institut für Experimentelle Kernphysik, Universität Karlsruhe

## Einleitung

Die kosmische Strahlung wurde im Jahre 1912 durch Viktor Franz Hess entdeckt. In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts stellten die in ihr vorkommenden hochenergetischen Teilchen die einzige Möglichkeit dar, die Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen zu untersuchen. In Pionierexperimenten – beispielsweise mit Nebelkammern – wurden eine Reihe von bahnbrechenden Entdeckungen gemacht. So konnten zuvor unbekannte Teilchen nachgewiesen werden, die heute Physikern als Positronen, Myonen und Pionen bekannt sind. Hier hat die moderne Teilchenphysik ihren Ursprung, zu deren Hauptinstrumenten jedoch später künstliche Beschleuniger wurden.

Trotz der enormen Fortschritte bei Experimenten an Beschleunigern muss nach wie vor ein Teil der teilchenphysikalischen Forschung mit der kosmischen Strahlung durchgeführt werden. Denn zum einen sind die Fragestellungen komplementär, zum anderen bleiben die Energien der kosmischen Teilchen auch auf absehbare Zeit mit von Menschenhand erbauten Instrumenten unerreichbar. Die Maximalenergien mit derzeit betriebenen Beschleunigern liegen bei  $10^{15}$  eV<sup>1)</sup>. Dagegen kommen in der kosmischen Strahlung Teilchen mit Energien von mehr als  $10^{20}$  eV vor, siehe hierzu auch den Beitrag von H. Blümer et al. in diesem Heft. Auch teilchenphysikalische Ursachen des Knies im

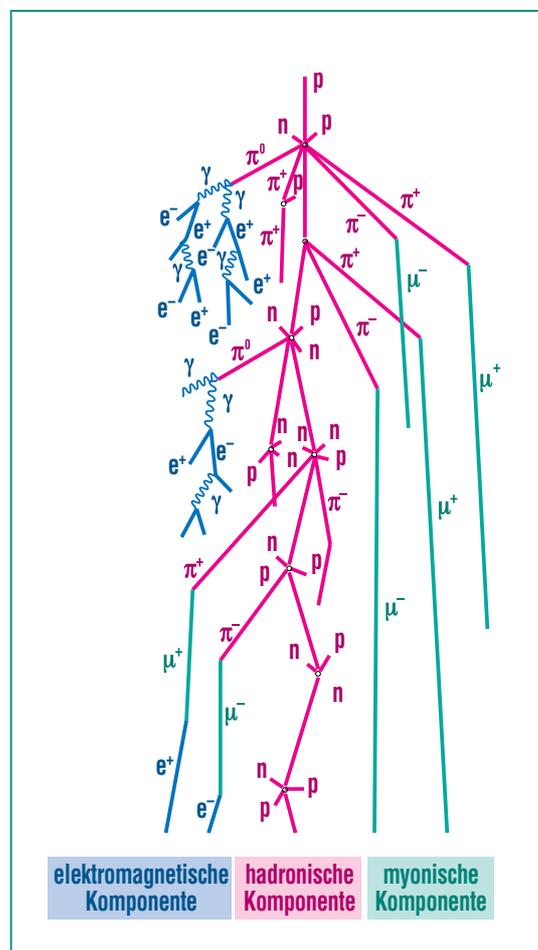
Energiespektrum der kosmischen Strahlung – siehe hierzu auch den Beitrag von K.-H. Kampert et al. in diesem Heft – können noch nicht vollständig ausgeschlossen werden. Im folgenden wird über die Ergebnisse des KASCADE-Experimentes zur Erforschung der Wechselwirkungen der Elementarteilchen bei hohen Energien berichtet. Zunächst wird erläutert, warum im Zusammenhang mit ausgedehnten Luftschauern besonders die hadronischen Wechselwirkungen von Interesse sind. Der Beschreibung des KASCADE-Experimentes schließen sich Beispiele von Ergebnissen an. Die Auswirkungen auf unser teilchenphysikalisches Verständnis werden diskutiert.

## Die hadronische Wechselwirkung in ausgedehnten Luftschauern

Beim Eintritt eines hochenergetischen Teilchens der kosmischen Strahlung in die Atmosphäre erfährt es Stöße mit den Atomkernen der Luft. Dabei entsteht eine Vielzahl von Sekundärteilchen, die sich zu einem "ausgedehnten Luftschauer" entwickeln. In diesem kommen praktisch alle heute bekannten Elementarteilchen vor. Sie können in zwei Gruppen eingeteilt werden. Leptonen, zu denen die Elektronen und Myonen zählen, und Hadronen, deren prominenteste Vertreter die Bausteine der Atomkerne wie Protonen und Neutronen sind, aber zu denen auch Pionen und Kaonen gehören. Unter Hadronen werden Teilchen zusammengefasst, die

aus Quarks aufgebaut sind. Leptonen und Quarks sind fundamentale Teilchen, d.h. es werden in ihnen keine Substrukturen beobachtet.

Die Entwicklung eines ausgedehnten Luftschauers ist in Abb.1 schematisch dargestellt. Bei den hochenergetischen Kernstößen entstehen vor allem Pionen, die leichtesten Hadronen. Sie kommen in der Natur als geladene



**Abb. 1: Schematische Darstellung eines ausgedehnten Luftschauers. Durch Stöße von hochenergetischen Teilchen der kosmischen Strahlung mit den Atomkernen der Atmosphäre entsteht eine Vielzahl von Sekundärteilchen, die einen ausgedehnten Luftschauer bilden.**

<sup>1)</sup> Ein Elektronenvolt (eV) ist die Energie, die ein Elektron beim Durchlaufen einer Beschleunigungsspannung von 1 V aufnimmt (1 eV entspricht  $1.6 \cdot 10^{-19}$  J).

und neutrale Teilchen vor. Die neutralen Pionen zerfallen unmittelbar in Gammaquanten. Diese generieren im weiteren Verlauf Elektron-Positron-Paare, welche durch Bremsstrahlung wiederum Gammaquanten erzeugen. Die genannten Prozesse wiederholen sich und es bildet sich die elektromagnetische Schauerkomponente aus wie in Abb.1 skizziert. Die geladenen Pionen dagegen führen entweder weitere Kernstöße durch, oder sie zerfallen in Myonen. Hochenergetische Myonen haben eine sehr große Reichweite, erreichen also auch aus großen Höhen den Erdboden und bilden die myonische Schauerkomponente. Die in weiteren Wechselwirkungen der geladenen Pionen entstehenden sekundären, tertiären u.s.w. Pionen, Neutronen und Protonen bilden die hadronische Schauerkomponente, die im Zentrum eines Luftschauers konzentriert bleibt.

Die Wechselwirkungen der Leptonen werden durch die Quantenelektrodynamik gut beschrieben und sind durch Experimente vor allem an Beschleunigern überprüft worden. Reaktionen der in ausgedehnten Luftschauern sehr zahlreichen Elektronen lassen sich dementsprechend sehr genau berechnen. Diese Kenntnisse macht man sich in Simulationsprogrammen zunutze; bei ihnen wird im Rechner der komplexe Vorgang der Teilchenvervielfachung im Luftschauer mit Hilfe des im Institut für Kernphysik entwickelten Programms CORSIKA berechnet, siehe hierzu auch den Beitrag von D. Heck in diesem Heft. Ebenfalls zufriedenstellend sind Teilchenzerfälle zu beschrei-

ben, etwa eines Myons in ein Elektron (sowie zwei Neutrinos). Die zugehörige Theorie der schwachen Wechselwirkung ist gut verifiziert.

Anders verhält es sich jedoch mit den Hadronen. Mit der zugrundeliegenden Theorie der starken Wechselwirkung, der Quantenchromodynamik, sind Extrapolationen in von Beschleunigerexperimenten nicht abgedeckte Bereiche nur begrenzt möglich. Extrapolationen sind jedoch notwendig, denn zum einen sind die in den Luftschauern vorkommenden Energien zum Teil deutlich größer als die an Beschleunigern bisher realisierten, und zum anderen kann nicht der gesamte kinematische Bereich untersucht werden. In diesen Experimenten, bei denen beispielsweise zwei energiereiche Protonen zur Kollision gebracht werden, können nur Reaktionsprodukte außerhalb des Strahlrohres beobachtet werden. Diese entstehen zumeist in Kollisionen, bei denen eine besonders große Anzahl von Sekundärteilchen erzeugt werden ("harte Prozesse"). Am häufigsten, und somit für die Luftschauerentwicklung von großer Bedeutung, sind aber Reaktionen, bei denen vergleichsweise wenig geschieht ("weiche Prozesse") und deren Sekundärprodukte das Strahlrohr nicht verlassen. Diese weichen Prozesse entziehen sich bisher auch einer genauen theoretischen Beschreibung, während für die harten Prozesse die Quantenchromodynamik zumindest eine genäherte Lösung zulässt.

In den Simulationsrechnungen von Luftschauern kommen daher

Algorithmen zum Einsatz, die die hadronische Wechselwirkung nur phänomenologisch beschreiben. Diese Wechselwirkungsmodelle basieren auf unterschiedlichen Annahmen über die Natur der hadronischen Prozesse. Daher unterscheiden sich die Vorhersagen und somit auch die in den Modellrechnungen generierten Schauer. Es ist deshalb notwendig, die unterschiedlichen Vorhersagen mit gemessenen Werten zu vergleichen und somit das Verständnis der hadronischen Wechselwirkungen zu erweitern. Von besonderer Bedeutung ist dabei eine genaue Vermessung der hochenergetischen Hadronen im Zentrum der Luftschauer.

### Aufbau des Detektorsystems

Zur Vermessung der hochenergetischen kosmischen Strahlung wurde auf dem Gelände des Forschungszentrums die Detektoranlage KASCADE aufgebaut [1]. Mit ihr werden ausgedehnte Luftschauer nachgewiesen. Das Experiment zeichnet sich durch die gleichzeitige Messung der elektromagnetischen, myonischen und hadronischen Schauerkomponente aus. Für die in diesem Artikel behandelten Fragestellungen sind die folgenden Komponenten von Bedeutung.

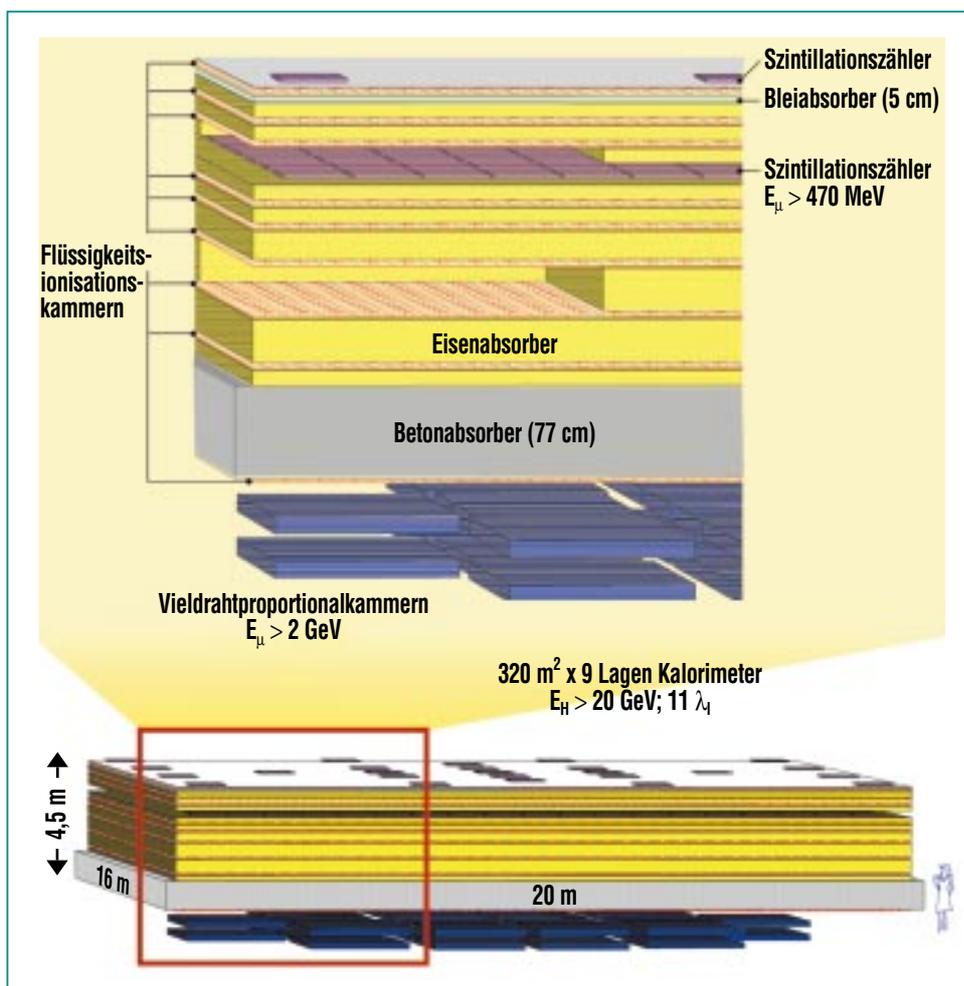
In einem großflächigen Messfeld werden die Elektronen und Photonen sowie die Myonen nachgewiesen. Hierzu sind 252 Detektorstationen auf einer Fläche von 200 m x 200 m in einem rechtwinkligen Gitter angeordnet. Die Detektorstationen enthalten Szintillationszähler mit einem Durch-

messer von 100 cm, welche als aktives Medium eine 5 cm dicke Schicht einer im Forschungszentrum entwickelten Szintillatorflüssigkeit enthalten. Diese Detektoren stehen auf einer Absorberplatte aus 10 cm Blei und 4 cm Stahl. Nur sehr hochenergetische Teilchen können diese Platte durchdringen, vor allem sind dies Myonen, die unter der Platte in Plastikszintillatoren von 3 cm Dicke nachgewiesen werden. Die Szintillationszähler werden mit Photomultipliern ausgelesen. Mit diesen Detektorstationen wird das Zentrum eines Luftschauers sowie seine Auftreffrichtung und die Zahl der Elektronen und Myonen im Schauer bestimmt.

In der Mitte des Detektorfeldes befindet sich der Zentraldetektor, Herzstück ist ein 16 m x 20 m großes Hadronkalorimeter [2]. Als Kalorimeter bezeichnet man in der Teilchenphysik Messinstrumente, in denen hochenergetische Teilchen vollständig absorbiert werden und bei denen ein Teil der dissipierten Energie nachgewiesen wird. Das in Abb. 2 skizzierte Kalorimeter besteht aus mehreren Lagen von Absorberplatten mit einem Gesamtgewicht von 4000 t. Die Dicke des Absorbers entspricht 11 nuklearen Wechselwirkungslängen und damit etwa der Dicke der Erdatmosphäre. Oberhalb, zwischen und unterhalb der Absorberplatten sind insgesamt 9 Lagen von Ionisationskammern zum Nachweis der deponierten Energie installiert. Die Flüssigkeitsionisationskammern sind eine Entwicklung des Institutes für Kernphysik und enthalten als aktives Medium die Flüssigkeiten Tetramethylsilan

und Tetramethylpentan. Diese Flüssigkeiten besitzen eine gute Leitfähigkeit für Überschuss-Elektronen und ergeben damit schnelle Signale, die sich zum Nachweis von Koinzidenzen eignen. Durchdringt ein Teilchen eine Ionisationskammer, so werden in der Flüssigkeit Moleküle ionisiert und die freigesetzten Elektronen in einem direkt angeschlossenen

Verstärker nachgewiesen. Solche Flüssigkeitsionisationskammern eignen sich infolge des großen dynamischen Bereiches als Nachweisgeräte in einem Kalorimeter [3], können aber auch in der Nuklearmedizin eingesetzt werden – siehe hierzu den Beitrag von J. Engler et al. in diesem Heft. Insgesamt sind 12000 Kammern installiert, wobei jede vier unab-



**Abb. 2:** Schematische Ansicht des Zentraldetektors des KASCADE-Experimentes (Detailzeichnung – oben – und Gesamtausschnitt – unten –). In Absorberlagen von Blei, Eisen und Beton werden Hadronen absorbiert und in neun Lagen von Flüssigkeitsionisationskammern nachgewiesen. Zwei Lagen von Szintillationszählern dienen zum Festlegen des Auslesezeitpunktes. Die Vieldrahtproportionalkammern unterhalb des Kalorimeters dienen dem Nachweis hochenergetischer Myonen.

hängige Kanäle (Elektrodengröße 25 cm x 25 cm) enthält. Alle 48000 aktiven Elemente werden einzeln über eine Verstärkerkette ausgelesen und anschließend digitalisiert. Die feine Segmentierung erlaubt die getrennte Messung einzelner Hadronen auch im Zentralbereich ausgedehnter Luftschauer, wo die Dichte der Teilchen sehr groß ist. Zwei Hadronen können im Detektor unterschieden werden, wenn sie einen Abstand von mindestens 50 cm voneinander haben. Hadronen mit Energien bis zu 15 TeV werden im Kalorimeter vollständig ab-

sorbiert. Es werden die Energie, der Auftreffort und die Richtung der einzelnen Hadronen gemessen.

Der Zentraldetektor enthält zusätzlich auf dem Dach und unterhalb der dritten Eisenabsorberlage jeweils eine Ebene von Plastikszintillationszählern. Mit diesen Detektoren werden vor allem Elektronen und Myonen nachgewiesen und – da sie den Nachweis von Koinzidenzen im Bereich von wenigen ns erlauben – die Signalauslese der Ionisationskammern gestartet. Unterhalb

des Kalorimeters sind Vieldrahtproportionalkammern zum Nachweis hochenergetischer Myonen installiert.

### Untersuchung der hadronischen Struktur von Luftschauern

Die Hadronen in einem Luftschauer sind sehr eng um die Schauerachse konzentriert. Die Untersuchung der Struktur dieses Schauerkerns liefert Erkenntnisse über die hadronische Wechselwirkung. Eine geeignete Beobachtungsgröße hierfür ist beispielsweise das Verhältnis der Energie jedes einzelnen Hadrons zur Energie des höchstenergetischen Hadrons. Abb. 3 zeigt Häufigkeitsverteilungen dieser Messgröße, d.h. es ist aufgetragen, wie oft ein bestimmtes Verhältnis im Mittel in einem Schauer vorkommt. Zum Vergleich mit den KASCADE-Messwerten sind Vorhersagen unter Verwendung der hadronischen Wechselwirkungsmodelle QGSJET und SIBYLL eingetragen. Die Häufigkeitsverteilung der Energiebruchteile hängt von der Natur des den Schauer auslösenden Primärteilchens ab. In der kosmischen Strahlung kommen hauptsächlich Protonen vor, bei ansteigender Energie gewinnen aber zunehmend auch schwere, vollständig ionisierte Atomkerne bis hin zum Eisen an Bedeutung. Die genaue Zusammensetzung der kosmischen Strahlung ist aber im hier untersuchten Energiebereich nicht bekannt. In den Modellrechnungen wurden deshalb zwei Extremfälle für die Natur des Primärteilchens angenommen, zum einen Protonen, also Was-

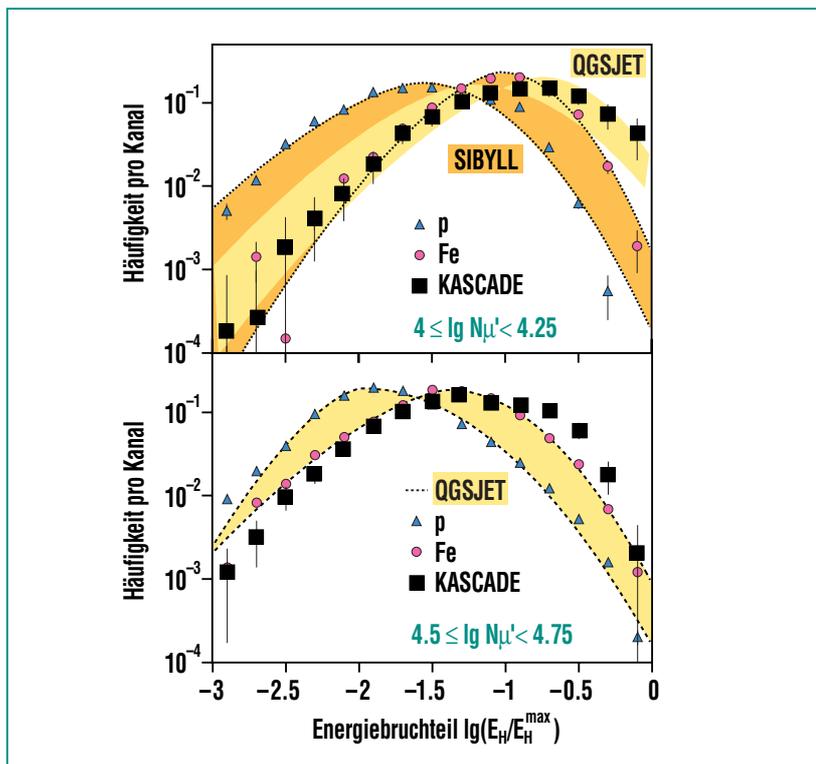
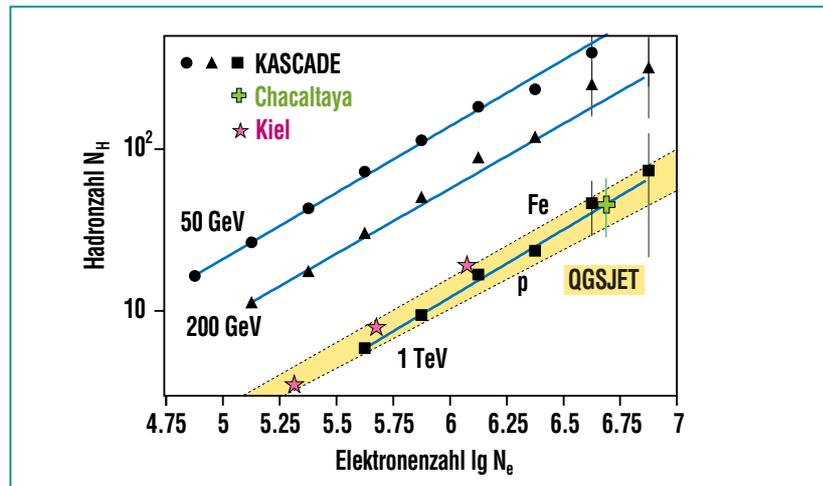


Abb. 3: Häufigkeitsverteilung für den Bruchteil der Energie  $E_H$  der Hadronen in einem Luftschauer, bezogen auf die Energie  $E_H^{\max}$  des jeweils höchstenergetischen Teilchens. KASCADE-Messergebnisse werden mit Vorhersagen der hadronischen Wechselwirkungsmodelle QGSJET (gelb) und SIBYLL (orange) für primäre Protonen (p) und Eisenkerne (Fe) verglichen. Im oberen und unteren Teilbild sind jeweils Luftschauer eingetragen, deren Myonzahlen  $N_\mu$  im angegebenen Intervall liegen.

serstoffkerne und zum anderen Eisenkerne. Für ein gutes Modell sollten die mit KASCADE gemessenen Daten zwischen diesen beiden Extremen in dem gelb markierten Band liegen.

In die beiden Teilbilder wurden jeweils Luftschauer eingetragen, die einer bestimmten Myonzahl, gemessen mit dem großen Detektorfeld, entsprechen. Aus diesen Myonzahlen kann die Primärenergie abgeschätzt werden. Die Luftschauer im oberen Teilbild entsprechen Primärenergien von ungefähr  $3.5 \cdot 10^{15}$  eV, die im unteren ungefähr  $1.2 \cdot 10^{16}$  eV. Man erkennt, dass die Vorhersagen des Modells QGSJET im oberen Teilbild, also bei kleinen Energien, gut mit den Messergebnissen verträglich sind. Mittels der ebenfalls eingetragenen Vorhersagen des Modells SIBYLL können die Daten dagegen nicht beschrieben werden. Durch diese und ähnliche Analysen konnte gezeigt werden, dass das Modell SIBYLL zur Beschreibung der Luftschauer nicht geeignet ist [4]. Es wurden noch weitere Modelle untersucht, die im Luftschauersimulationsprogramm CORSIKA zur Verfügung stehen. Es ergab sich, dass das Modell QGSJET die KASCADE-Daten am besten beschreibt. Jedoch ergeben sich auch bei diesem Modell Probleme bei sehr großen Primärenergien, wie beispielsweise im unteren Teilbild der Abb. 3 zu erkennen ist, wo Unterschiede zwischen den Messdaten und den Vorhersagen von QGSJET beobachtet werden.

Für die Beschreibung der Entwicklung der Luftschauer in der Atmosphäre ist nicht nur die



**Abb. 4:** Zahl der gemessenen Hadronen in einem Luftschauer als Funktion der Zahl der Elektronen für verschiedene Energieschwellen der Hadronen ( $E_H > 50$  GeV,  $E_H > 200$  GeV und  $E_H > 1000$  GeV). Neben den KASCADE-Messdaten sind Ergebnisse zweier weiterer Experimente [6, 7] sowie Vorhersagen des Modells QGSJET (gelbes Band) aufgetragen.

Struktur der hadronischen Komponente von Bedeutung, sondern auch die Korrelationen zwischen der hadronischen, der elektromagnetischen und der myonischen Schauerkomponente müssen vom Modell korrekt wiedergegeben werden. Als Beispiel für die Untersuchung solcher Korrelationen ist in Abb. 4 die Zahl der Hadronen als Funktion der Zahl der Elektronen in einem Luftschauer aufgetragen. Die Zahl der Hadronen wurde dabei unter Verwendung verschiedener Energieschwellen von  $50 \text{ GeV}^2$ ,  $200 \text{ GeV}$  und  $1 \text{ TeV}^3$  berechnet. Die Zahl der Hadronen oberhalb einer bestimmten Energie in einem Schauer nimmt mit steigender Energie ab. Der Logarithmus der Hadronenzahl ist proportional zum Logarithmus der Elektronenzahl, wie man der Abbildung entnimmt. Die höchsten eingetragenen Elektro-

nenzahlen entsprechen Primärenergien um  $2 \cdot 10^{16}$  eV. Bei diesen Energien werden mehr als 200 Hadronen und mehr als 70 TeV Hadronenergie im Kalorimeter nachgewiesen. Wie die Abbildung zeigt, verhalten sich die Logarithmen der Elektron- und Hadronenzahl auch bei höchsten Energien proportional zueinander, d.h. es sind keine Sättigungseffekte zu beobachten. Die KASCADE-Ergebnisse sind mit den Resultaten zweier weiterer Experimente in Kiel [6] und Bolivien [7] verglichen und stimmen mit diesen gut überein. Das gelb unterlegte Band gibt die Vorhersagen des Modells QGSJET wieder, wiederum für primäre Protonen und Eisenkerne. Für diese Beobachtungsgröße können die Messdaten bis zu höchsten Energien gut mit diesem Modell beschrieben werden.

<sup>2)</sup> Gigaelektronenvolt  $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ .

<sup>3)</sup> Teraelektronenvolt  $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$ .

## Untersuchung von Ereignisraten

Eine grundlegende Größe eines jeden Luftschauerexperimentes sind Ereignisraten. Darunter versteht man die Häufigkeit, mit der ein Luftschauer, oder allgemeiner eine bestimmte Kombination von Detektorsignalen, registriert wird. Mit dem Zentraldetektor werden beispielsweise die Trigger- und Hadronrate untersucht. Die Triggerrate gibt an, wie oft im Mittel eine Koinzidenz von mehr als acht der Szintillationsdetektoren im Hadronkalorimeter registriert wird. Ist dies der Fall, werden sämtliche KASCADE-Detektoren ausgelesen. Insbesondere wird im Kalorimeter versucht, ein Hadron zu rekonstruieren. Die Häufigkeit, mit der Hadronen mit Energien von mehr als 100 GeV gefunden werden, ergibt die Hadronrate. Die Triggerrate ist in Abb. 5 gegen die Hadronrate auf-

getragen. Der mit KASCADE bezeichnete Punkt stellt den Messwert dar. Im Mittel werden bei KASCADE etwa 3 Hadronen pro Minute registriert, d.h. mehr als eine Million Hadronen pro Jahr. Dabei handelt es sich überwiegend um Luftschauer, die von kosmischen Teilchen mit Energien von weniger als  $10^{15}$  eV ausgelöst werden, wie man aus den Messungen des Detektorfeldes ableiten kann.

Unter Verwendung des Programms CORSIKA wird versucht, die gemessenen Raten durch Simulationsrechnungen mit unterschiedlichen hadronischen Wechselwirkungsmodellen zu reproduzieren und hieraus Erkenntnisse über die hadronische Wechselwirkung abzuleiten. Für die Simulationen wird dabei eine Massenzusammensetzung der kosmischen Strahlung angenommen, wie sie bei niedrigen Energien aus direk-

ten Messungen bekannt ist. In Abb. 5 sind die Resultate dieser Simulationen für sechs Wechselwirkungsmodelle gezeigt. Mit keinem Modell lässt sich die Messung zufriedenstellend beschreiben. Überdies unterscheiden sich die Modelle auch untereinander. Dies unterstreicht zum einen die Notwendigkeit, die hadronische Wechselwirkung besser zu verstehen. Zum anderen ist das Potential ersichtlich, mit Messungen unterschiedliche Wechselwirkungsmodelle zu bewerten.

## Folgerungen über die hadronische Wechselwirkung

Wir haben gesehen, dass die Vorhersagen der hadronischen Wechselwirkungsmodelle mit KASCADE-Daten mehr oder weniger gut verträglich sind. Am Beispiel der Trigger- und Hadronrate sei erläutert, wie Folgerungen

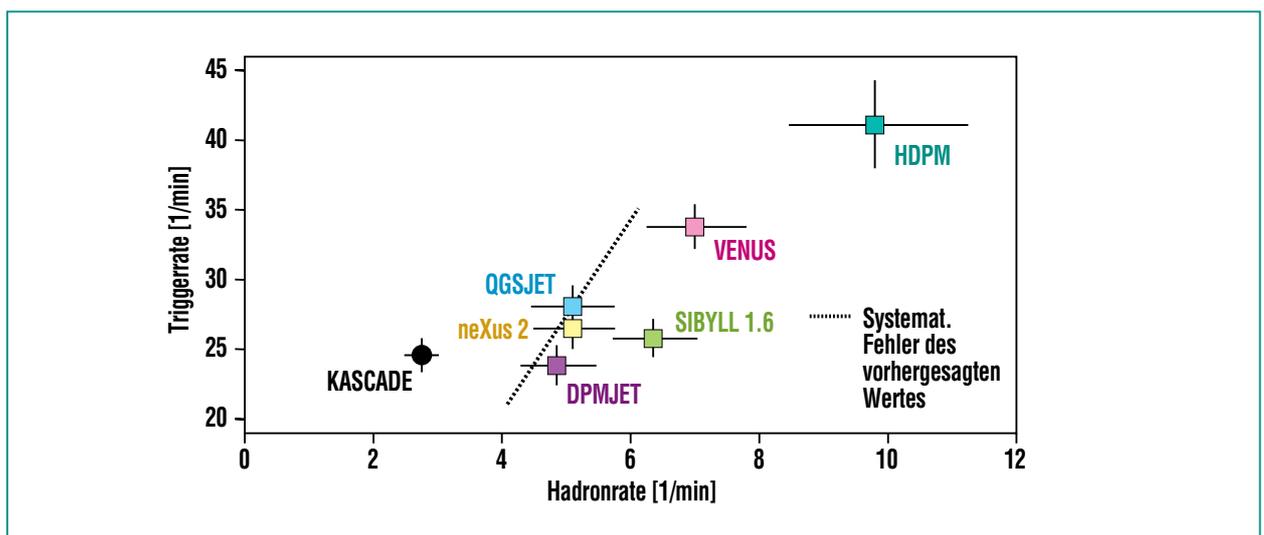


Abb. 5: Die Triggerrate ist gegen die Hadronrate aufgetragen. Neben dem KASCADE-Messwert sind Simulationenvorhersagen unter Verwendung verschiedener hadronischer Wechselwirkungsmodelle dargestellt. Die Messung ist mit dem totalen Fehler, die Vorhersagen sind mit dem statistischen Fehler angegeben. Am Beispiel der Simulation mit QGSJET ist die systematische Unsicherheit einer jeden Vorhersage beim Vergleich mit dem Messwert aufgezeigt.

über die hadronische Wechselwirkung selbst möglich sind.

Bei den Simulationsrechnungen stellt sich heraus, dass bei den meisten der beitragenden Ereignisse nur wenige Kollisionen mit großen Energieverlusten der einfallenden Teilchen stattgefunden haben. Daher erreichen zu viele Hadronen in der Simulation den Detektor, mit der Folge einer zu hohen Hadronrate. Dies lässt sich prinzipiell auf zwei Weisen bei der Simulation ändern. Einerseits kann die Anzahl der Kollisionen erhöht werden, was durch Anheben des inelastischen Wirkungsquerschnittes ( $\sigma_{inel}$ ) geschieht. Andererseits kann der Energieverlust pro Kollision vergrößert werden. Dies wird durch Verkleinerung des Anteils diffraktiver Prozesse ( $\sigma_{diff}$ ) erreicht. Bei diesen Prozessen kommt es nur zu geringen Energieverlusten, und sie besitzen in Vorwärtsrich-

tung ein der elastischen Streuung ähnliches Beugungsmuster.

Diese Überlegungen lassen sich durch entsprechende Modifikation der Modellparameter verifizieren. Zum einen wird, vom ursprünglichen Modell ausgehend, der inelastische Wirkungsquerschnitt  $\sigma_{inel}$  um 5% bzw. um 10% erhöht, zum anderen wird der diffraktive Wirkungsquerschnitt  $\sigma_{diff}$  um 3,5% - 10%, bezogen auf  $\sigma_{inel}$ , reduziert. In Abb. 6 sind die mit diesen Änderungen in den Wirkungsquerschnitten mit QGSJET vorhergesagten Raten mit den KASCADE-Ergebnissen verglichen. Der Einfluss dieser Änderungen vor allem auf die vorhergesagte Hadronrate ist deutlich erkennbar. Beide Modifikationsarten wirken in vergleichbarer Weise, was den Schluss zulässt, dass letztlich der inelastische Wirkungsquerschnitt von nicht-diffraktiven Wechselwirkun-

gen die entscheidende Größe darstellt [5]. Die Folgerung ist daher, dass der Anteil dieser Wechselwirkungen in den Modellen unterschätzt wird. Bezogen auf die diffraktiven Prozesse bedeutet dies, dass ihr Anteil um bis zu einem Faktor zwei in den Modellen zu korrigieren ist. Mit großer Sensitivität können in dieser Weise Aussagen über einen mit Beschleunigern kaum erforschten Bereich getroffen werden. Dort ist die Messung von diffraktiven Reaktionsprodukten nahe am Strahlrohr nur sehr eingeschränkt möglich.

### Zusammenfassung

Mit dem Luftschauerexperiment KASCADE wird die hochenergetische kosmische Strahlung im Energiebereich von  $10^{13}$  eV bis  $10^{17}$  eV untersucht. Hierzu werden die in der Erdatmosphäre entstehenden Folgeprodukte der primären

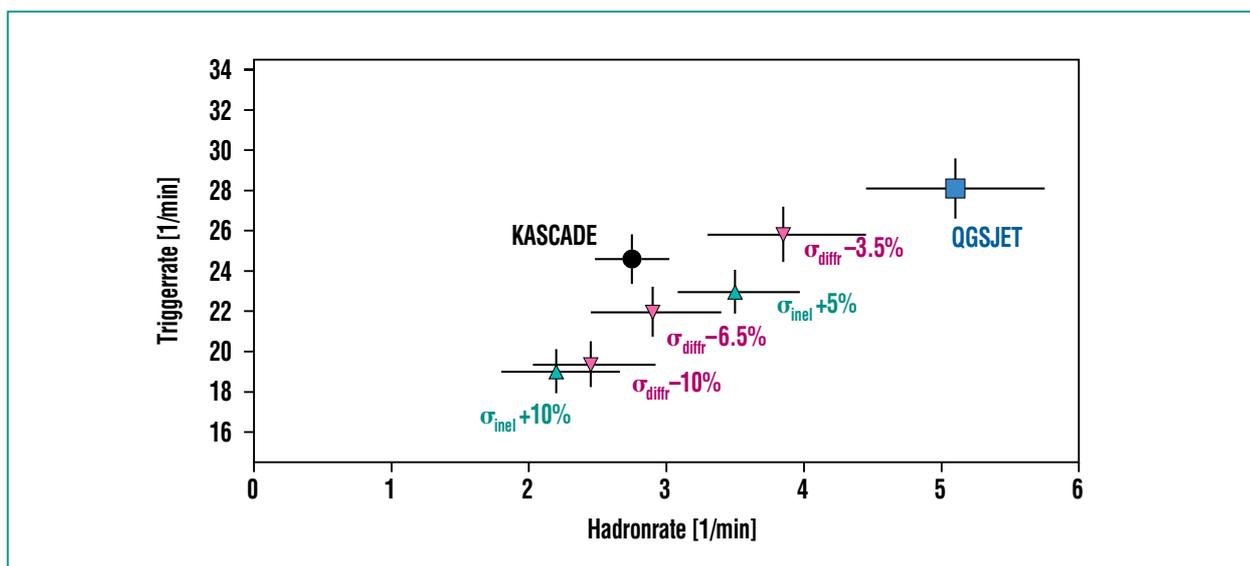


Abb. 6: Triggerrate gegen Hadronrate. Der KASCADE-Messwert und die ursprüngliche Vorhersage mit dem Modell QGSJET sind wie in Abb. 5 dargestellt. Zusätzlich sind die Resultate nach verschiedenen Änderungen im Modell QGSJET eingetragen, die den inelastischen Wirkungsquerschnitt und den Anteil diffraktiver Prozesse betreffen (siehe Text).

Teilchen am Erdboden nachgewiesen. Mittels eines großen Kalorimeters können insbesondere die Hadronen in Luftschauern vermessen werden. Diese Untersuchungen erlauben Rückschlüsse auf die hochenergetische hadronische Wechselwirkung und den Test von hadronischen Wechselwirkungsmodellen. Es können Energie- und kinematische Bereiche untersucht werden, die von gegenwärtigen Experimenten an Beschleunigern nicht abgedeckt werden. Hierzu wird die Luftschauerent-

wicklung in Simulationen nachgebildet und die Resultate werden mit den Messergebnissen verglichen. Die im Luftschauer-simulationsprogramm CORSIKA enthaltenen Wechselwirkungsmodelle wurden untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass das Modell SIBYLL nicht zur Beschreibung der Messdaten geeignet ist. Weiterhin ergab sich, dass das Modell QGSJET die Daten im wesentlichen gut beschreibt, jedoch ergeben sich auch für dieses Modell Abweichungen zwischen Messungen und Modell-

vorhersagen bei Energien oberhalb  $10^{16}$  eV. Es zeigte sich, dass der Anteil von diffraktiven Prozessen in der inelastischen Hadron-Kern-Streuung in den Modellen um bis zu einem Faktor zwei überschätzt ist.

Die Untersuchungen werden in enger Zusammenarbeit mit den Autoren der Modelle fortgeführt.

## Literatur

- [1] H.-O. Klages et al.,  
*Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)*  
52B (1997) 92  
H.-O. Klages,  
*Nachrichten Forschungszentrum*  
Karlsruhe 30 1/98 S. 10
- [2] J. Engler et al.,  
*Nucl. Instr. Meth. A* 427 (1999) 528
- [3] J. Engler,  
*J. Phys. G Nucl. Part. Phys.* 22  
(1996) 1
- [4] T. Antoni et al.,  
*J. Phys. G Nucl. Part. Phys.* 25  
(1999) 2161  
J. Hörandel,  
*Wissenschaftlicher Bericht FZKA*  
6015, Forschungszentrum  
Karlsruhe, 1998
- [5] T. Antoni et al.,  
*eingereicht bei*  
*J. Phys. G Nucl. Part. Phys.*  
M. Risse,  
*Wissenschaftlicher Bericht FZKA*  
6493, Forschungszentrum Karlsruhe,  
2000
- [6] R. Fritze et al.,  
*Acta Phys. Sci. Hung. Suppl.* 29  
(1969) 439
- [7] C. Aguirre et al.,  
*Institute of Cosmic Ray Research,*  
*University of Tokyo*  
*Report 434-98-30, 17*