

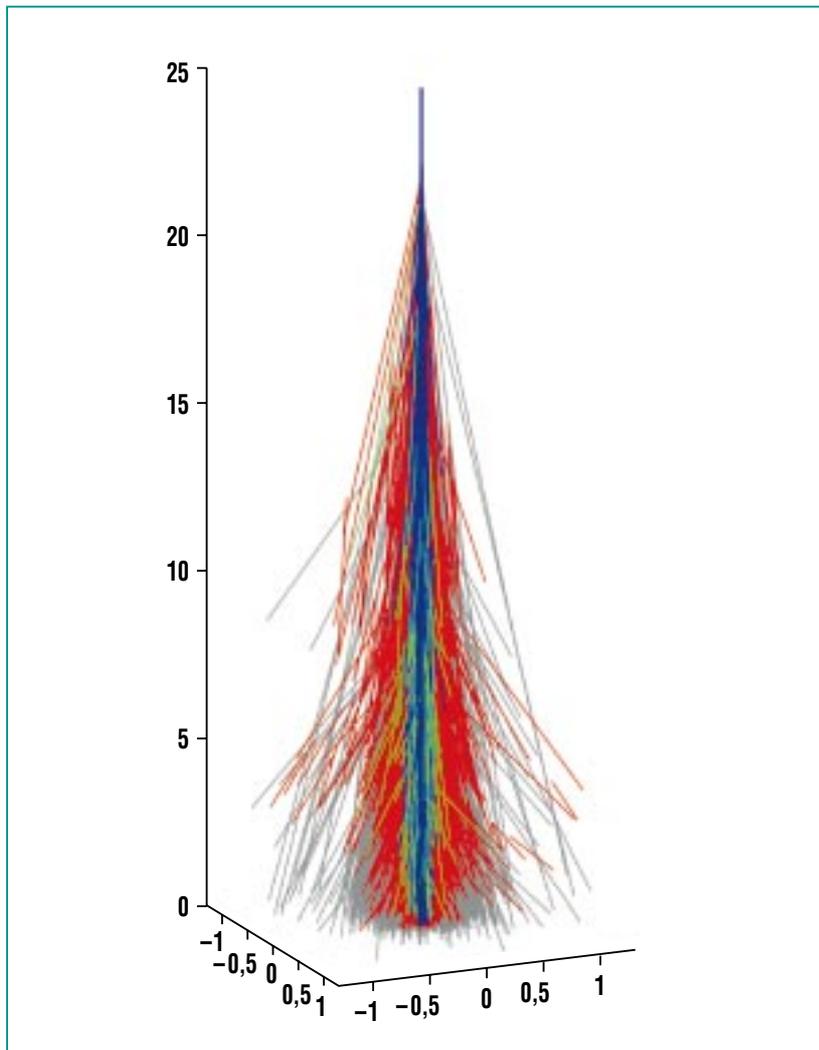
# Modellierung gigantischer Luftschauer mit CORSIKA und CONEX – Von mikroskopischen Teilchenerzeugungsprozessen zu makroskopischen Teilchenkaskaden

R. Engel, D. Heck, T. Pierog, IK;  
S. Ostapchenko, Institut für Experimentelle Kernphysik, Universität Karlsruhe

## Einleitung

Wenn hochenergetische Teilchen der Kosmischen Strahlung in die Erdatmosphäre eindringen, kollidieren sie mit den Atomkernen der Luftbestandteile. Die in diesen Kollisionen erzeugten Sekundärteilchen sind meist kurzlebige Hadronen. Ein Teil der Sekundärteilchen hat eine so hohe Energie, dass wiederum neue Teilchen durch Kollisionen mit Luftbestandteilen erzeugt werden, andere zerfallen aufgrund ihrer kurzen Lebensdauer. Die Prozesse der Teilchenerzeugung führen zu einer Teilchenkaskade, die sich in der Atmosphäre zu größeren Tiefen hin fortsetzt, bis die Teilchen so viel Energie verloren haben, dass Zerfallsprozesse und Energieverluste durch Ionisierung der Atome der Luft gegenüber neuer Teilchenerzeugung dominieren. Die Teilchenkaskade eines typischen Luftschauers ist in Abb.1 gezeigt. Die einzelnen Linien stellen die Teilchenbahnen in einem durch ein Proton mit  $10^{16}$  eV erzeugten, vertikalen Schauer dar.

Die Berechnung hochenergetischer Luftschauer ist sehr aufwändig und die Ergebnisse weisen erhebliche Unsicherheiten auf. Die sehr große Zahl von Teilchen in einem Luftschauer, welche von mehreren Millionen bis über 100 Milliarden reichen kann, macht eine direkte Berechnung der Schauereigenschaften sehr schwierig, da insbesondere der stochastische Charakter der Teilchenerzeugungs- und Zerfallsprozesse zu starken Fluktuationen der Schauereigenschaften bei gleichem Primärteilchen führt. Hinzu kommt, dass die Eigenschaften der Wechselwirkung und



**Abb. 1: Teilchenbahnen eines typischen Luftschauers [1] (blau und grün: Hadronen, rot: Elektronen und Positronen, grau: Myonen, Entfernungen in km).**

Erzeugung von Teilchen bei den hohen Energien der Kosmischen Strahlung, welche die an Beschleunigern erreichbaren äquivalenten Energien um mehr als einen Faktor 100 übersteigen, gegenwärtig nicht theoretisch berechnet werden können und phänomenologische Modelle zu Hilfe genommen werden müssen.

Moderne Lösungsansätze für die Berechnung von Luftschauern ba-

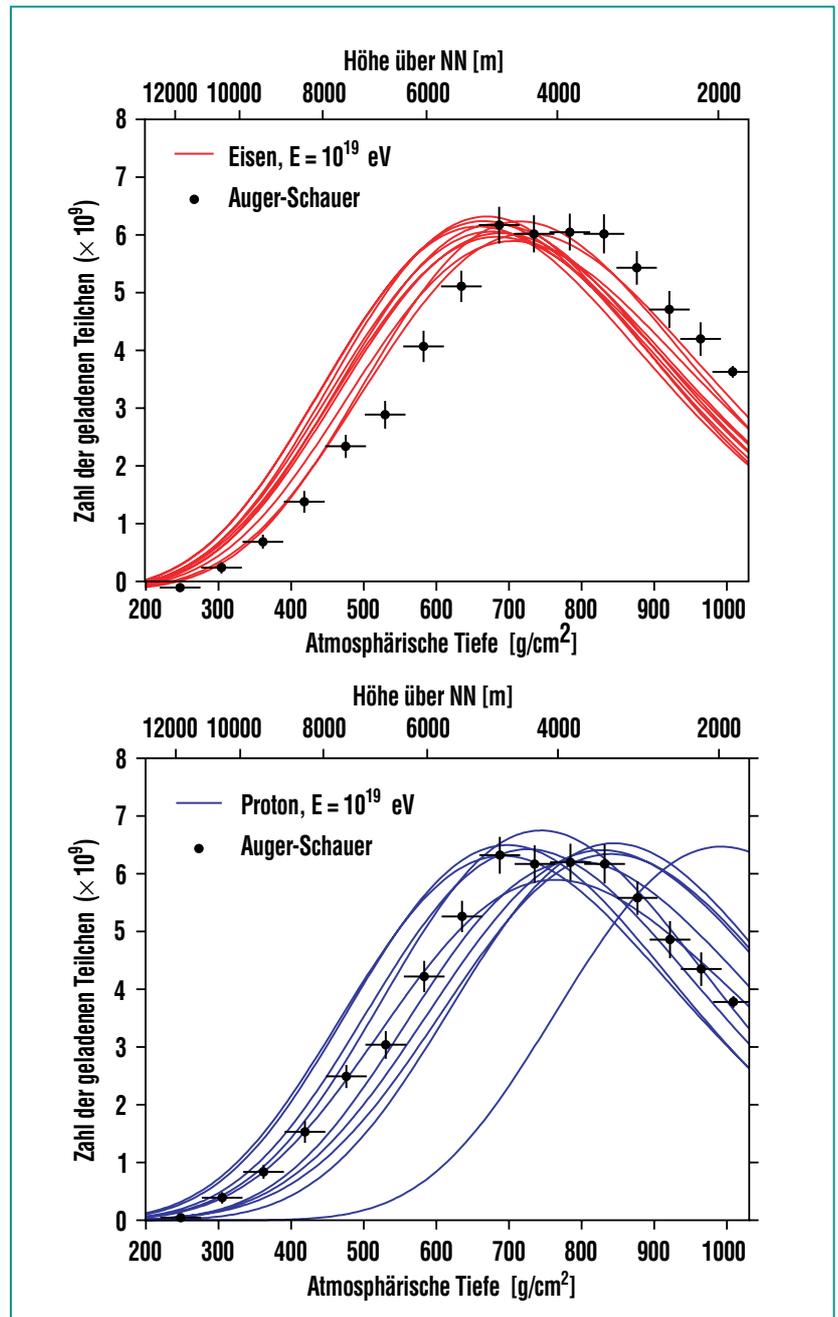
sieren auf der Monte-Carlo-Methode, die es erlaubt, auch sehr komplexe Vorgänge mit vielen Freiheitsgraden und großen Fluktuationen realistisch zu simulieren. Ein typisches Programmpaket dieser Art ist CORSIKA [2], das seit 1987 am Forschungszentrum Karlsruhe und an der Universität Karlsruhe entwickelt wird und heute weltweit in fast allen Experimenten zur Kosmischen Strahlung für die Interpretation der Daten An-

wendung findet. Einen weiteren Lösungsansatz zur effizienten Berechnung von Luftschauern stellt das Hybridsimulationsverfahren dar, welches seit 2002 in Karlsruhe verfolgt wird und zur Entwicklung des Programms CONEX [3] geführt hat.

Im Folgenden werden die wichtigsten Eigenschaften hochenergetischer Luftschauer vorgestellt und die zwei Verfahren für ihre Berechnung kurz diskutiert. Als Ausgangspunkt dient hierfür die Simulation von Luftschauern mittels CORSIKA.

### Teilchenerzeugungsprozesse

Den Kern eines typischen Luftschauers bildet eine hadronische Kaskade. Ein Atomkern der Kosmischen Strahlung, typischerweise mit einer Kernladungszahl zwischen 1 (Wasserstoff) und 26 (Eisen), erzeugt in einer Kollision in der oberen Atmosphäre bis zu mehrere Hundert neue Teilchen. Dies sind hauptsächlich Pionen (80 %) und Kaonen (15 %), aber auch Proton-Antiproton- oder andere Baryon-Antibaryon-Paare können entstehen. Neutrale Pionen haben eine sehr kurze Lebensdauer und zerfallen unmittelbar nach ihrer Erzeugung in zwei Photonen. Die Lebensdauer von geladenen Pionen hingegen ist lang genug, sodass sie bei Energien oberhalb von ca.  $10^{11}$  eV erneut in Kollisionen neue Teilchen erzeugen. Unterhalb dieser Energieschwelle zerfallen geladenen Pionen meist in Myonen und Myonneutrinos. Die Situation ist ähnlich für Kaonen mit einer typischen Energieschwelle von  $6 \times 10^{11}$  eV.



**Abb. 2: Longitudinale Schauerprofile für simulierte Proton- und Eisenschauer. Die Messpunkte zeigen einen mit dem Pierre-Auger-Experiment gemessenen Schauer [4].**

Der hadronische Kern eines Luftschauers erzeugt hochenergetische Photonen, Myonen und Neutrinos. Durch ihre große Masse und geringe Wechselwirkungswahr-

scheinlichkeit durchqueren die meisten der hochenergetischen Myonen die Atmosphäre und erreichen die Erdoberfläche. Hochenergetische Photonen erzeugen

in den elektrischen Feldern der Elektronenhüllen und Kerne der Luft Elektron-Positron-Paare. Diese emittieren ihrerseits Photonen durch Bremsstrahlungsprozesse und verlieren Energie durch Ionisation der Atome entlang ihrer Teilchenbahn. Schon nach den ersten Wechselwirkungen bilden Photonen, Elektronen und Positronen die Mehrzahl der Schauerteilchen.

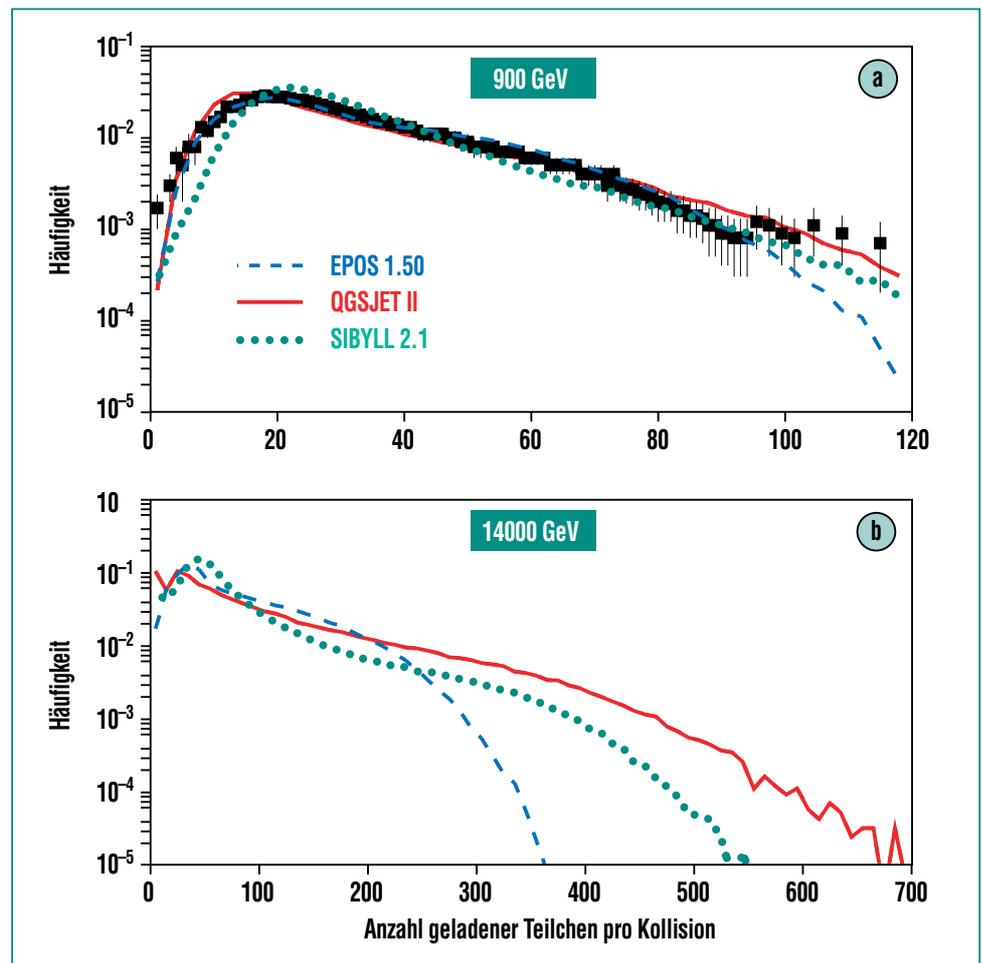
Aus den Wechselwirkungseigenschaften des Primärteilchens ergeben sich unterschiedliche Schauercharakteristiken. Abb. 2 zeigt jeweils zehn mit CONEX berechnete Schauerprofile für Proton und Eisen als Primärteilchen und ein mit den Auger-Fluoreszenzteleskopen gemessenes Schauerprofil. Proton-induzierte Schauer weisen deutlich größere Fluktuationen als die von Eisenkernen auf und erreichen ihre maximale Teilchenzahl tiefer in der Atmosphäre.

### Schauersimulation mit CORSIKA

Das in Karlsruhe entwickelte Simulationsprogramm CORSIKA (Cosmic Ray Simulation for KASCADE) ist das derzeit am weitesten entwickelte Programmpaket zur Berechnung von ausgedehnten Luftschauern. Es berechnet die Trajektorien der Luftschauerteilchen unter Berücksichtigung von Energieverlusten und der Ablenkung durch das Erdmagnetfeld und bestimmt die Orte für Wechselwirkungen bzw. simuliert den Teilchenzerfall mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode. Die Wechselwirkung von Hadronen und Kernen wird mit Hilfe von externen Monte-Carlo-Simulationsprogrammen berechnet.

Für die Simulation der Teilchenerzeugung in Kollision mit hoher Energie (typischerweise mehr als  $2 \times 10^{11}$  eV) stehen die Programme DPMJET [5], EPOS [6], QGSJET [7] und SIBYLL [8] zur Verfügung. Die Grundlage dieser Programme bilden Annahmen zur Analytizität von Streuamplituden, die zur so genannten Gribov-Regge-Theorie führen, und die störungstheoretische Berechnung der Erzeugung von Hadronen innerhalb der Quantenchromodynamik (QCD). Da nur ein kleiner Teil der für Luftschauer

wichtigen Hadronerzeugungsprozesse im Rahmen der QCD berechnet werden kann, müssen Vereinfachungen und phänomenologische Modellannahmen gemacht werden, um eine möglichst vollständige Simulation der Kollisionen von Hadronen zu ermöglichen. Jedes der oben genannten Modelle hat eine gewisse Zahl freier Parameter, die durch Vergleich mit Messungen der Teilchenerzeugung an Beschleunigern bestimmt werden. Allerdings ist die Extrapolation der Vorhersagen zu hohen Energien



**Abb. 3:** Verteilung der Anzahl geladener Teilchen, die in Proton-Antiproton-Kollisionen erzeugt werden. Modellrechnungen werden mit Messpunkten vom SPS-Beschleuniger am CERN verglichen [9] (a). Vorhersagen für den Large Hadron Collider (LHC) sind im unteren Teil (b) gezeigt.

und in unvermessene Phasenraumbereiche der Sekundärteilchen dementsprechend modellabhängig. Zur Illustration ist in Abb. 3 (a) die Verteilung der Zahl von geladenen Sekundärteilchen gezeigt, wie sie in Proton-Antiproton-Kollisionen bei einer Schwerpunktsenergie von 900 GeV am CERN SPS Speicherring in Genf gemessen wurde. Diese Schwerpunktsenergie entspricht der in einer Kollision von einem Proton der Kosmischen Strahlung von  $4 \times 10^{14}$  eV mit einem Kern der Luft freigesetzten Energie. Die große Modellunsicherheit der Extrapolation zu höheren Energien ist exemplarisch in Abb. 3 (b) gezeigt, in der die Modellvorhersagen für die Schwerpunktsenergie des sich im Bau befindlichen LHC-Beschleunigerings des CERN, welche etwa Protonen der Kosmischen Strahlung mit  $10^{17}$  eV entspricht, gegenübergestellt sind.

Aufgrund der größeren Zahl von Beschleunigungsmessungen sind die Unsicherheiten bei der Simulation niederenergetischer Wechselwirkungen deutlich geringer. In CORSIKA stehen hierfür die Programme FLUKA [10], GHEISHA [11] und UrQMD [12] zur Verfügung.

Für die Beschreibung der Wechselwirkung von Photonen, Elektronen und Positronen wird die Quantenelektrodynamik genutzt, die es erlaubt, die für Luftschauer relevanten Prozesse störungstheoretisch zu berechnen. In CORSIKA werden elektromagnetische Wechselwirkungen mit Hilfe des Programms EGS 4 [13] simuliert, welches zu höheren Energien erweitert und um weitere Wechselwirkungsprozesse ergänzt wurde.

### Simulation sehr großer Teilchenzahlen

Ein wesentliches Problem bei der Simulation von Schauern ist die sehr große Zahl von Teilchen, die für jeden Schauer berechnet werden muss. Derzeit werden weltweit zwei Lösungsansätze verfolgt. Zum einen kann die Zahl der zu verfolgenden Teilchen reduziert werden, indem nur ein kleiner, repräsentativer Teil aller Schauerteilchen explizit simuliert wird und dann von dieser Untermenge auf die Schauereigenschaften geschlossen wird. Dieses auf der Methode des statistischen Ausdünnens basierende Verfahren ist in CORSIKA implementiert. Es erlaubt die Simulation von Schauern mit einer Energie von  $10^{20}$  eV mit vertretbarem Zeitaufwand (ca. 20 Stunden pro Schauer). Allerdings werden durch diese Methode die Fluktuationen der Schauer nicht realistisch beschrieben, da einzelne Teilchen in der Simulation typischer Weise  $10^3$  bis  $10^4$  echte Teilchen repräsentieren.

Einen anderen Lösungsansatz stellt die Hybridsimulation dar, welche z.B. im Programm CONEX implementiert ist. In CONEX wird ausgenutzt, dass Fluktuationen in ultra-hochenergetischen Luftschauern hauptsächlich durch die Fluktuationen der ersten, hochenergetischen Wechselwirkungen verursacht werden. Es ist also ausreichend, nur die ersten Wechselwirkungen in einem Luftschauer explizit mit dem Monte-Carlo-Verfahren zu simulieren. Die Sekundärteilchen dieser Wechselwirkungen bilden eine Anfangsverteilung von Schauerteilchen, deren weitere Entwicklung mit Hilfe eines

Integro-Differentialgleichungssystems berechnet werden kann. Dieses Verfahren bietet sich besonders an, wenn nur das longitudinale Schauerprofil oder totale Teilchenzahlen berechnet werden sollen und somit die Simulation der Teilchen entlang der Schauerachse ausreichend ist. Auf diese Weise kann die Schauersimulation bei  $10^{20}$  eV um den Faktor 100 beschleunigt werden. Detaillierte Vergleiche der mit CORSIKA und CONEX gewonnenen Vorhersagen für Luftschauer bestätigen die Anwendbarkeit von Hybridsimulationen.

### Schauereigenschaften

Im Folgenden werden zwei typische Schauercharakteristiken diskutiert, die für die Bestimmung der Elementzusammensetzung in den Experimenten KASCADE-Grande und Pierre Auger ausgenutzt werden.

Die mittlere Tiefe des Teilchenzahlmaximums von Proton- und Eisenschauern ist in Abb. 4 in Abhängigkeit von der Energie des Primärteilchens dargestellt. Die Modellvorhersagen wurden mit CORSIKA und CONEX berechnet. Die bisher verfügbaren Luftschauermessungen der mittleren Tiefe des Schauermaximums sind als Datenpunkte eingetragen. Obwohl die Interpretation der Daten vom zugrunde gelegten Wechselwirkungsmodell abhängt, kann festgestellt werden, dass die Elementzusammensetzung der Kosmischen Strahlung im Bereich unmittelbar oberhalb des Knies ( $3 \times 10^{15}$  eV) sich zu schwereren Kernen verschiebt und bei höherer Energie wieder leichtere Elemente dominieren.

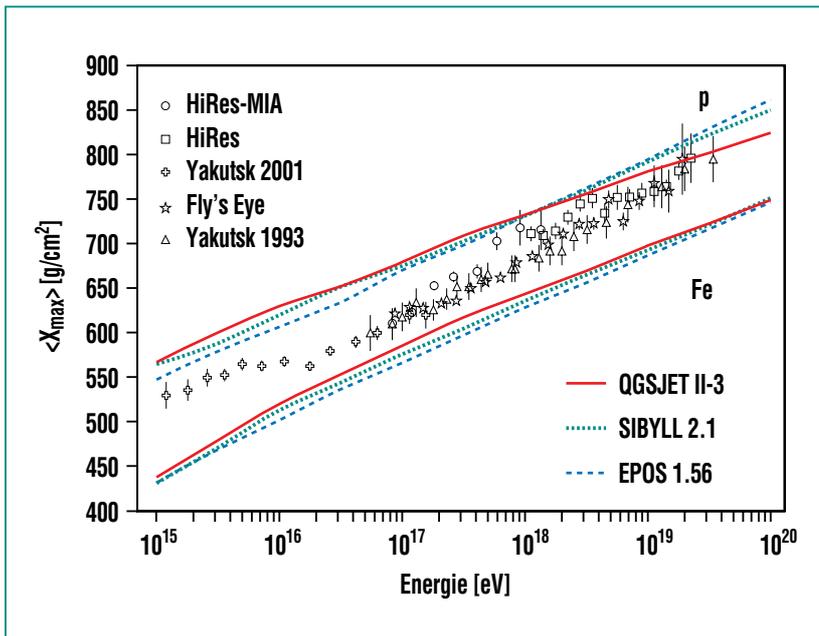


Abb. 4: Mittlere atmosphärische Tiefe des Schauermaximums. Die mit verschiedenen Wechselwirkungsmodellen berechneten Vorhersagen für Proton- und Eisenschauer sind zusammen mit Messpunkten verschiedener Experimente gezeigt [14].

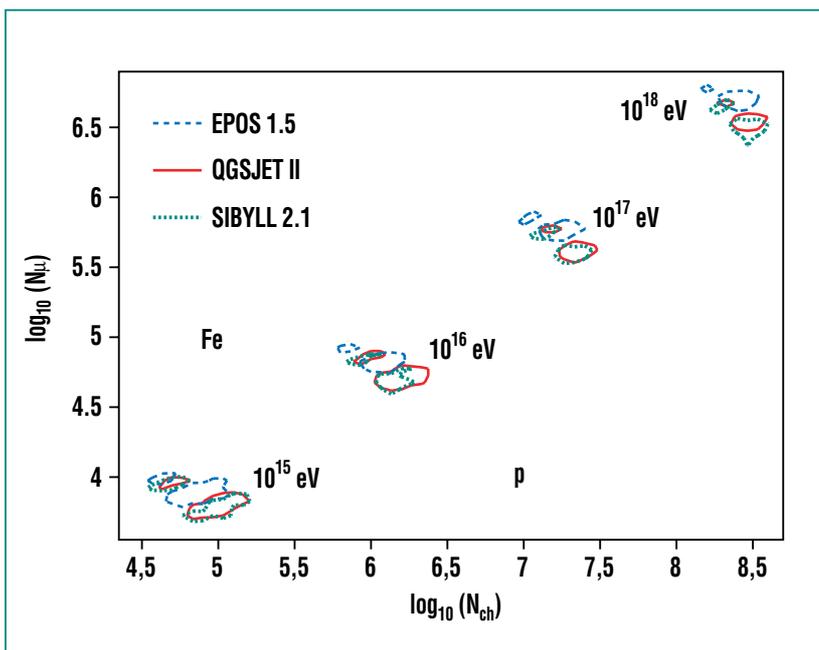


Abb. 5: Korrelation zwischen der erwarteten Anzahl von geladenen Teilchen und Myonen in einem senkrechten Luftschauer auf Meeresebene. Für jedes Modell sind jeweils die Vorhersagen für Eisen- (obere Ellipsen) und Protonschauer (untere Ellipsen) eingezeichnet.

Die Korrelation zwischen der Zahl der Elektronen/Positronen und Myonen in Luftschauern ist eine weitere Größe, aus der sich Erkenntnisse über die Elementzusammensetzung der Kosmischen Strahlen gewinnen lassen. Die theoretischen Vorhersagen für diese Korrelation sind in Abb. 5 für drei Wechselwirkungsmodelle zusammengestellt. Die Zahl der Myonen in Eisenschauern ist etwa 1,4-mal größer als in Protonschauern. Sie steht in unmittelbarem Zusammenhang mit der Modellierung der hadronischen Vielteilchenproduktion, weshalb die Vorhersagen eine sehr starke Modellabhängigkeit zeigen.

### Ausblick

Gegenwärtig wird CORSIKA durch die Implementierung von Teilchen mit Charm-Quarks, die z. B. für die Simulation von neutrino-induzierten Luftschauern benötigt werden, weiterentwickelt. Das Hybridsimulationsprogramm CONEX, das bisher auf die eindimensionale Berechnung der Teilchenzahlen entlang der Schauerachse beschränkt ist, wird für dreidimensionale Schauersimulationen erweitert und längerfristig mit CORSIKA verbunden werden. Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten am Forschungszentrum und der Universität Karlsruhe ist die kontinuierliche Weiterentwicklung und Überprüfung von Wechselwirkungsmodellen. Dies erfolgt im Rahmen einer Reihe von Aktivitäten, die von der engen Zusammenarbeit mit anderen Arbeitsgruppen bis zur direkten Beteiligung an Beschleunigerexperimenten reichen.

## Literatur

- [1] J. Oehlschläger,  
*persönliche Mitteilung (2007)*
- [2] D. Heck, J. Knapp, J.N. Capdeville,  
G. Schatz, T. Thouw,  
*Forschungszentrum Karlsruhe  
FZKA Bericht 6019 (1998)*
- [3] T. Bergmann et al.,  
*Astropart. Phys.* 26 (2007) 420
- [4] J. Blümer et al.  
(*Pierre Auger Kollab.*), *Proc. of the  
28th International Cosmic Ray  
Conference (Tsukuba)* p. 415 (2003)
- [5] J. Ranft,  
*Phys. Rev. D* 51 (1994) 64
- [6] K. Werner, F.M. Liu, T. Pierog,  
*Phys. Rev. C* 74 (2006) 044902;  
T. Pierog, K. Werner,  
*astro-ph/0611311 (2006)*
- [7] S. Ostapchenko,  
*Phys. Lett. B* 636 (2006) 40; *Phys.  
Rev. D* 74 (2006) 014026
- [8] R.S. Fletcher, T.K. Gaisser, P. Lipari,  
T. Stanev,  
*Phys. Rev. D* 50 (1994) 5710;  
R. Engel, T.K. Gaisser, P. Lipari,  
T. Stanev,  
*Proc. of the 26th International  
Cosmic Ray Conference (Salt Lake  
City)* vol. 1, p. 415 (1999)
- [9] R.E. Ansorge et al.  
(*UA5 Kollab.*), *Z. Phys.* C43 (1989)  
357
- [10] A. Fasso, A. Ferrari, J. Ranft,  
P.R. Sala,  
*Proc. of Int. Conf. on Advanced  
Monte Carlo for Radiation Physics,  
Particle Transport Simulation and  
Applications (MC 2000)*, p. 955  
(2000)
- [11] H. Fesefeldt,  
*RWTH Aachen PITHA-85/02 (1985)*
- [12] M. Bleicher et al.,  
*J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 25  
(1999) 1859
- [13] W.R. Nelson, H. Hirayama,  
D.W.O. Rogers,  
*Stanford Linear Accelerator Center  
SLAC 265 (1985)*
- [14] J. Knapp, D. Heck, S.J. Sciutto,  
M.T. Dova, M. Risse,  
*Astropart. Phys.* 19 (2003) 77