

Teilchenphysik

Der Large Hadron Collider – die Entdeckungsmaschine

THOMAS MÜLLER

Am Europäischen Zentrum für Teilchenphysik CERN läuft demnächst der größte und leistungsfähigste Teilchenbeschleuniger der Welt an: der Large Hadron Collider, LHC. Er soll Protonen oder schwere Ionen bei höchsten Energien gegeneinander kollidieren lassen, um Zustände wie im frühesten Universum zu schaffen und die Suche nach neuen Teilchen und Kräften aufzunehmen.

Unser heutiges Weltbild von den Strukturen der Materie und der Kräfte (Abbildung 1) beschreibt das Standardmodell [1] sehr genau. Demzufolge gibt es drei Generationen von fundamentalen Fermionen: Quarks und Leptonen, die durch den Austausch von Bosonen der Elektromagnetischen, Schwachen und Starken Kraft in Wechselwirkung treten. Die Gravitation dagegen wird bei kosmischen Längenskalen durch die Allgemeine Relativitätstheorie beschrieben. Analog zu den anderen Wechselwirkungen wird das Graviton als Austauschteilchen postuliert, ist aber bisher nicht nachgewiesen.

Nur Fermionen der ersten Generation existieren in der heutigen Welt, zusätzlich ist das Universum mit Neutrinos der drei Generationen, Lichtquanten der Kosmischen Hintergrundstrahlung und der Sterne sowie noch unbekannt Formen von Materie und Energie angefüllt. Letztere konnten bislang nur durch ihre gravitative Wirkung beobachtet werden. Da sie keine elektromagnetische Strahlung emittieren oder absorbieren, werden sie Dunkle Materie und

Dunkle Energie genannt. Die schwereren Fermionen sind während der Abkühlung des frühen Universums in leichtere übergegangen und müssen zum Nachweis ihrer Existenz in hochenergetischen Teilchenkollisionen erzeugt werden.

Unser heutiges Wissen: das Standardmodell

Das Standardmodell beschreibt die Eigenschaften der Teilchen und Wechselwirkungen durch 21 Naturkonstanten und Parameter [2]. Bislang ließ sich experimentell keine signifikante Abweichung von ihm finden. Nur eine Aussage des Standardmodells konnte bislang noch nicht überprüft werden: Wodurch kommen die Teilchenmassen zustande?

Die Fermionen besitzen Massen zwischen höchstens $2 \text{ eV}/c^2$ (oberer Grenzwert für das Elektron-Neutrino) und $174 \text{ GeV}/c^2$ (Top-Quark, Abbildung 1). Damit ist das Top-Quark 180-mal schwerer als das Proton. 1 Elektronvolt (eV) entspricht der kinetischen Energie eines Elektrons, das in einem elektrischen Potential von 1 V beschleunigt worden ist; nach $E = mc^2$ ist die Masseneinheit als $1 \text{ eV}/c^2$ definiert.

Das Standardmodell macht zwar keine Vorhersage über das Massenspektrum, aber es beinhaltet einen vorhergesagten Mechanismus, der den Fermionen und den Trägern der Schwachen Wechselwirkung eine Ruhemasse verleiht. Dies geschieht durch die Wechselwirkung mit einem skalaren Feld. Dessen Quant, das Higgs-Boson, ist nach dem Theoretiker Peter Higgs benannt, der diesen Mechanismus postuliert hat. Die Eigenschaften dieses Higgs-Bosons sind genau festgelegt – mit Ausnahme von dessen Masse. Über sie sind derzeit nur indirekte Aussagen möglich. Bislang wurde das Higgs-Boson mit Teilchenbeschleunigern nicht gefunden, weil es eine sehr große Masse und einen geringen Erzeugungsquerschnitt besitzen sollte.

Die Suche nach dem Higgs-Boson und die Messung seiner Eigenschaften sind das wichtigste Nahziel der modernen Teilchenphysik. Der LHC und seine Experimente sind so konzipiert, dass ein Higgs-Boson des Standardmodells sicher gefunden oder aber seine Existenz widerlegt werden kann. Es ist übrigens nicht auszuschließen, dass es mehr als ein Higgs-Teilchen gibt. Auch in diesem Falle sollten die meisten oder alle gefunden werden können.

Bisherige Messungen lassen erwarten, dass das Higgs-Boson mit großer Wahrscheinlichkeit nicht schwerer als circa $150 \text{ GeV}/c^2$ ist [3] (Abbildung 2). Andererseits muss es

INTERNET

LHC-Beschleuniger und Experimente
lhc.web.cern.ch/lhc/
user.web.cern.ch/User/Welcome.asp

Deutsche Informationsseiten zur Elementarteilchenphysik
www.teilchenphysik.org

Das Higgs-Boson
www.weltderphysik.de/de/933.php

schwerer als $114 \text{ GeV}/c^2$ sein (gelber Bereich in Abbildung 2), da es sonst am LEP-Beschleuniger des CERN gefunden worden wäre.

Allerdings macht das Standardmodell keine Aussagen über die Ursache des mehr als elf Größenordnungen umfassenden Massenspektrums der Teilchen. Diese werden als Parameter eingegeben, die den Kopplungskonstanten des Higgs-Bosons an die entsprechenden Fermionen entsprechen. Unter anderem wegen der Vielfalt der Parameter gehen wir davon aus, dass das Standardmodell lediglich eine effektive Feldtheorie ist, der bei sehr viel höheren Energien eine fundamentalere Beschreibung zugrunde liegt. Darauf deuten auch die folgenden nicht vom Standardmodell beantworteten Fragen hin.

Gibt es einen einheitlichen Ursprung aller drei Kräfte des Standardmodells?

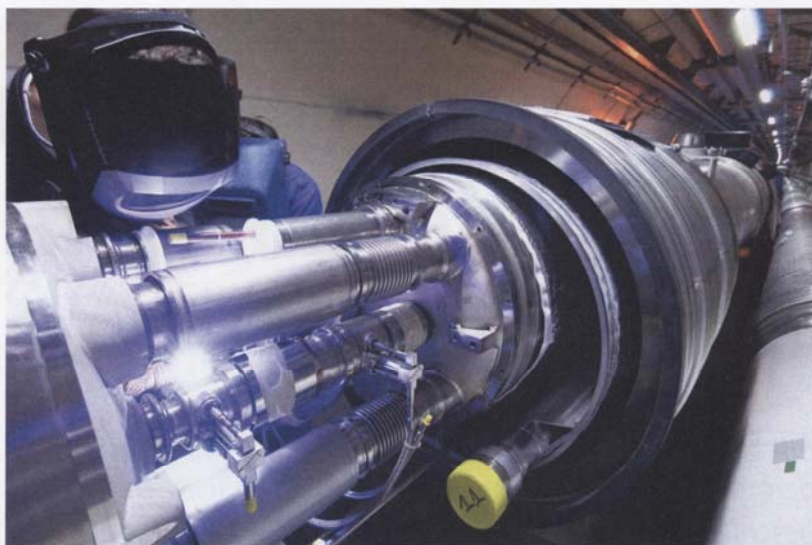
Mehrere Gründe deuten darauf hin, dass kurz nach dem Urknall alle Kräfte vereinheitlichte Manifestationen einer Urkraft waren und erst bei niedrigeren Energien die beobachteten großen Unterschiede auftraten. Die präzise aufeinander abgestimmten elektrischen und schwachen Ladungen von Leptonen und Quarks (das aus drei Quarks zusammengesetzte Proton hat genau denselben Ladungsbetrag wie das Elektron) deuten auf einen solchen Zusammenhang hin.

Die Grundkräfte besitzen zudem wegen Quantenkorrekturen eine Energieabhängigkeit. Eine Extrapolation zu hohen Energien führt aber nicht zu einer Übereinstimmung bei einem einzigen Energiewert (Abbildung 3). Erst durch Hinzufügen eines weiteren Satzes von Teilchen und Kräften, die zahlenmäßig eine Symmetrie zwischen Fermionen und Bosonen herbeiführen, lässt sich eine Vereinheitlichung bei Energien von circa 10^{16} GeV herstellen. Diese so genannte Supersymmetrie (SUSY) sagt voraus, dass wiederum im frühen Universum eine regelrechte Schattenwelt neben der uns vertrauten Natur existierte, die inzwischen bis auf das leichteste Supersymmetrische Teilchen zerfallen ist. Diese Lightest Supersymmetric Particles (LSP) wären stabil und exzellente Kandidaten für die Dunkle Materie. Die Supersymmetrische Theorie haben Julius Wess und Bruno Zumino in den siebziger Jahren in Karlsruhe entwickelt [5].

Bislang wurde kein SUSY-Teilchen gefunden. Dies erklärt man sich damit, dass diese Teilchen bedeutend schwerer sind als die Teilchen des Standardmodells. Am LHC stehen die Chancen sehr gut, solche Teilchen zu erzeugen und zu finden, sofern sie nicht schwerer als etwa $3 \text{ TeV}/c^2$ sind.

Warum gibt es im heutigen Universum keine Antimaterie?

Bei allen uns bekannten Prozessen, bei denen Energie in Materie umgewandelt wird, geschieht dies durch die paarweise Erzeugung von Teilchen und Antiteilchen. Deshalb erwarten wir, dass im frühesten Universum gleiche Mengen von Materie und Antimaterie existiert haben. Warum gibt



Letzte Arbeiten am LHC, der in den kommenden Monaten anlaufen soll (Foto: CERN).

es dann im heutigen Universum nur noch Materie (siehe Physik in unserer Zeit 2007, 38 (4), 168)?

Bereits 1967 schlug Andrej Sacharow einen Mechanismus vor, wie das Fehlen der Antimaterie in der heutigen Welt auf eine sehr kleine Asymmetrie in Reaktionen von Materie mit Antimaterie bei extrem hohen Energien zurückgeführt werden kann. Daraus resultiert eine Differenz zwischen der Zahl der Leptonen und Quarks einerseits und deren Antiteilchen andererseits, die allerdings nur von der Größenordnung eines Milliardstel ist. Im sich abkühlenden Universum vernichteten sich schließlich bis auf diese Differenz alle Teilchen und deren Antiteilchen in Strahlung.




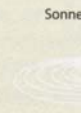
An Teilchenbeschleunigern wurde eine vergleichbare Asymmetrie gefunden (CP-Verletzung genannt). Die ist allerdings nicht groß genug, um das Fehlen der Antimaterie im Universum allein zu erklären. Wir hoffen, dass wir in den kommenden Jahren durch Präzisionsmessungen am LHC ein besseres Verständnis dieser Asymmetrie bekommen werden oder uns sogar eine neue Symmetrieverletzung überrascht. Hierfür gibt es aber keine theoretischen Vorhersagen.

Wie lässt sich die Gravitation einbeziehen?

Die drei genannten Kräfte weisen ähnliche Stärken auf, und es gibt glaubhafte Szenarien, wie diese vereinheitlicht werden können. Die Gravitation fällt indes aus dem Rahmen. Sie ist um etwa 40 Größenordnungen schwächer als die Starke Wechselwirkung, und es existiert für sie bislang keine Quantenfeldtheorie (Näheres siehe kommendes Heft).

Ein Kandidat für eine umfassende Beschreibung aller Kräfte ist die Superstringtheorie, in der Teilchen nicht mehr punktförmig sind, sondern winzigen schwingenden Saiten entsprechen, die sich in einer zehndimensionalen Raumzeit bewegen. Wenn einige der zusätzlichen Dimensionen makroskopische Größe besitzen, könnte dies ein Grund für die Schwäche der Gravitation sein, denn anders als die anderen Kräfte wirkt die Gravitation auch in den zusätzlichen Dimensionen. Der quadratische Abfall der Gravitationskraft

ABB. 1 FERMIONEN UND BOSONEN

	Leptonen		Quarks	
Generation 1	Elektron Masse 0,0005 GeV	Elektron-Neutrino Masse unbekannt	Up Masse 0,004 GeV	Down Masse 0,007 GeV
Generation 2	Myon Masse 0,1 GeV	Myon-Neutrino Masse unbekannt	Charm Masse 1,5 GeV	Strange Masse 0,15 GeV
Generation 3	Tau Masse 1,8 GeV	Tau-Neutrino Masse unbekannt	Top Masse 174 GeV	Bottom Masse 4,7 GeV
	Atomkern 	Atom 	Radioaktivität 	Sonnensystem 
	Maßgebliches Kraftteilchen:			
	Gluon Masse 0	Photon Masse 0	W- und Z-Boson Masse 80,3 GeV (W) 91,2 GeV (Z)	Gravitation Masse 0

„Periodensystem“ der bekannten fundamentalen Fermionen und Bosonen.

mit dem Abstand nimmt mit jeder zusätzlichen Raumdimension um eine Potenz zu. Zu kleinen Abständen von dem Massekörper hin würden gravitative Kräfte deutlich schneller anwachsen als in einem dreidimensionalen Raum. Je nach Zahl der Dimensionen könnte die Gravitation bei 10^{-19} m Abstand als neue starke Wechselwirkung manifest werden. Diese Abstände können bei Stößen im Energiebereich von 1 TeV abgetastet werden und liegen somit im Bereich des LHC.

Der Large Hadron Collider

In diesem Jahr soll der Large Hadron Collider beim Forschungszentrum CERN in Genf in Betrieb gehen. Diese Anlage ist voller Superlative (Tabelle 1): In zwei getrennten 26,7 km langen evakuierten Rohren werden gegenläufig Strahlen von Protonen oder Blei-Ionen zirkulieren, die durch 1232 jeweils 8,4 T starke und 14,3 m lange Dipolmagnete auf Kreisbahnen gehalten werden. An vier Orten kreuzen sich die Strahlen und werden nach Erreichen der Endenergie zur Kollision gebracht (Abbildung 4). Der Beschleuniger

TAB. 1 DATEN DES LHC

Umfang: 26,7 km
Magnete: 1232 supraleitende Dipole und 858 Quadrupole, auf 1,9 K gekühlt
Magnetfeld der Dipole (für 7-TeV-Strahlen): 8,4 T
Schwerpunktenergie: 14 TeV für Protonen, bis 1144 TeV für Blei-Ionen
Protonstrahlen: jeweils 2808 Pakete zu je 10^{11} Protonen
maximale Luminosität: $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Kollisionsrate: nominell 40 Millionen pro Sekunde

und die Experimentierhallen befinden sich in einer Tiefe von 50 bis 175 m unter dem Gelände.

Die am CERN entwickelten Dipol- und Quadrupolmagnete, die zur Fokussierung der Teilchenstrahlen notwendig sind, werden bei einer Temperatur von 1,9 K betrieben, der Rest des Beschleunigers bei 4,5 K. Damit wird das größte supraleitende System der Welt aufgebaut – 700 000 l flüssiges Helium und 14 Millionen l flüssiger Stickstoff sind zur Kühlung von insgesamt 31 000 t Material nötig. 9300 Magnete halten die Teilchenstrahlen auf der Bahn.

Eine Energiesteigerung um einen Faktor sieben gegenüber dem derzeit stärksten Beschleuniger der Welt, dem Tevatron im Fermilab bei Chicago, reicht allerdings allein nicht aus, um die genannten Fragen anzugehen. Wegen der Seltenheit der Prozesse müssen die Kollisionsraten ebenfalls deutlich gesteigert werden. Die Luminosität, ein Maß für Wechselwirkungsraten, wird mit einem maximalen Wert von $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 100-mal höher sein als am Tevatron. Beim LHC erreicht man diese hohe Luminosität, indem die beiden Vakuumröhren mit je 2808 Protonenpaketen gefüllt werden, wobei jedes Paket 10^{11} Protonen beinhaltet. Im Abstand von 25 ns kreuzen sich zwei Pakete. An diesen Stellen werden die Strahlen auf Durchmesser im Bereich von 10 μm fokussiert, so dass bei maximaler Luminosität in den Großdetektoren ATLAS und CMS je etwa 600 Millionen Kollisionen pro Sekunde stattfinden.

Die im Strahl gespeicherte Energie von 360 MJ entspricht der kinetischen Energie eines Schnellzuges und der thermischen Energie einer schweren Granate. Es wurden deswegen besondere Vorkehrungen getroffen, um den Strahl bei einer Instabilität gefahrlos in einem großen Graphitblock zu „entsorgen“. Die Protonenpakete werden für ungefähr zehn Stunden in der Anlage gespeichert, bis die Zahl der Wechselwirkungen durch Protonenverluste so weit abgesunken ist, dass ein Nachfüllen erforderlich ist. Technische Möglichkeiten, die Luminosität substanziell zu steigern, werden im Rahmen des Programms Super-LHC untersucht.

Mit einer geplanten Proton-Proton-Schwerpunktenergie von 14 TeV wird der LHC für lange Zeit der weltweit leistungsfähigste Teilchenbeschleuniger sein und Bedingungen für Reaktionen erzeugen, wie sie etwa 10^{-13} s nach dem Urknall stattgefunden haben. Da Protonen aus Quarks und Gluonen zusammengesetzte Objekte sind, steht allerdings nur ein Bruchteil der Gesamtenergie für die elementare Reaktion zwischen Quarks oder Gluonen zur Verfügung. Energiebereiche bis zu 5 TeV im Subsystem können aber abgedeckt werden.

Bei Blei-Kollisionen beträgt die Schwerpunktenergie sogar 1150 TeV – 30-mal mehr als am bislang leistungsfähigsten Schwerionenbeschleuniger RHIC in Brookhaven (USA). Damit können Zustände, wie sie etwa 10^{-6} s nach dem Urknall existierten, geschaffen werden. Zu diesem Zeitpunkt gab es noch keine zu Hadronen gebundene Quarksysteme, sondern es existierte ein heißes Gas aus Quarks und Gluonen, das Quark-Gluon-Plasma, das bislang in La-

bors noch nicht sicher nachgewiesen werden konnte (siehe Physik in unserer Zeit 2005, 36 (3), 126).

Die Detektoren ATLAS und CMS

SUSY-Teilchen und Higgs-Bosonen sind instabil. Man kann sie also nicht direkt nachweisen, sondern nur anhand charakteristischer Zerfallssignaturen identifizieren. Bei solchen Zerfällen oder Reaktionen entsteht eine Vielzahl von Teilchen, die selbst oder deren längerlebige Zerfallsprodukte mit Detektoren nachgewiesen und vermessen werden können. Aus einer solchen Messung kann man dann beispielsweise die Masse des zerfallenden Objektes rekonstruieren.

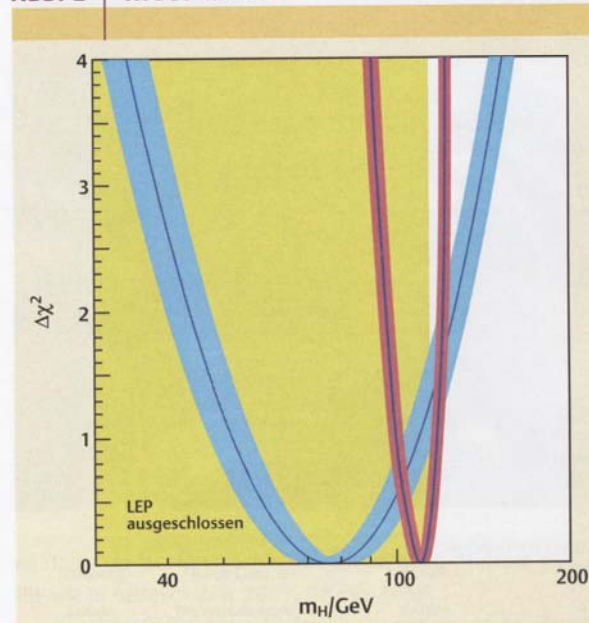
Allerdings besitzen viele Prozesse wie Streuungen zweier Quarks ähnliche Signaturen (Untergrund genannt), die zu allem Überfluss auch noch viel häufiger stattfinden als die gesuchten Ereignisse. So wird man etwa 10^{14} Proton-Proton-Kollisionen benötigen, um ein einziges $150 \text{ GeV}/c^2$ schweres Higgs-Boson sicher nachzuweisen! Es werden aber mindestens zehn Nachweise benötigt, um ein signifikantes Signal zu erhalten - vorausgesetzt, dass nach allen Selektionsschritten die Zahl von möglichen Untergrundereignissen deutlich kleiner ist. So erklärt sich, dass ein Detektor einerseits Teilchen sehr präzise vermessen muss und andererseits eine sehr hohe Ereignisrate aufnehmen muss, damit sich die interessanten Ereignisse sicher herausfiltern lassen. Wenn das Higgs-Boson eine Nadel wäre, so wäre der Heuhaufen zehn Millionen Tonnen schwer.

Das erklärt die enorm hohen erforderlichen Kollisionsraten. Am LHC kreuzen sich alle 25 ns zwei Strahlpakete. Bei hohen Luminositäten finden bei einer solchen Kreuzung im Mittel 20 Kollisionen statt. Bei jeder Kollision werden etwa 200 geladene und ebenso viele neutrale Teilchen erzeugt. Pro Sekunde muss der Detektor also gut 10^{11} Teilchen mit Datenraten in der Größenordnung von 100 Terabyte pro Sekunde verarbeiten. Zusammen mit der damit verbundenen Materialschädigung, verursacht durch bis zu 10^{15} hochenergetischen Teilchen pro Quadratmeter im Verlauf des LHC-Betriebes, ergeben sich extrem hohe Anforderungen an die Detektoren.

Insgesamt werden fünf Detektoren zum Einsatz kommen. Ich konzentriere mich hier auf die beiden Großdetektoren ATLAS und CMS [7], die komplexesten Instrumente, die je gebaut wurden (siehe „Die Detektoren und ihre Forschungsschwerpunkte“, Seite 85).

Die Komponenten sind zylindersymmetrisch um das Strahlrohr herum gruppiert. Direkt in der Nähe des Kollisionspunktes befinden sich Spurendetektoren zur Vermessung der Bahn elektrisch geladener Partikel. Die sie umgebenden Detektoren (Kalorimeter) absorbieren geladene und neutrale Teilchen (mit Ausnahme von Myonen und Neutrinos) und vermessen deren Energie. Außen sind nochmals Spurenkammern zur Vermessung von Myonen angeordnet, die das Detektormaterial durchfliegen. Mit Magnetfeldern werden die geladenen Teilchen abgelenkt, was eine Impulsmessung erlaubt. Während der Datennahme umschließt

ABB. 2 HIGGS-MASSE



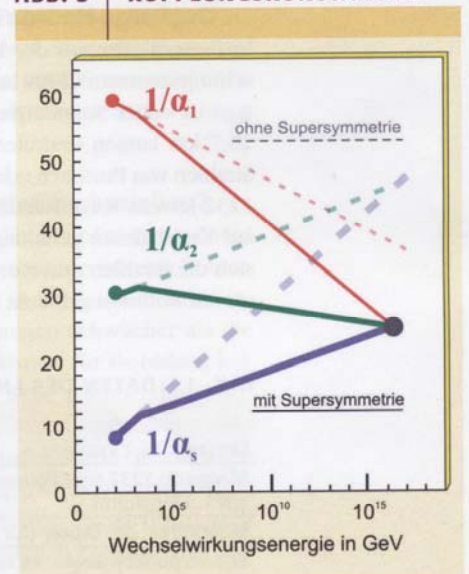
Experimentell ermittelte Wahrscheinlichkeiten für die Masse des Higgs-Bosons. Die blaue Kurve legt die Gültigkeit des Standardmodells zugrunde, die rote Kurve berücksichtigt zusätzlich eine supersymmetrische Erweiterung des Standardmodells [4].

der Detektor den Kollisionsort in allen Raumrichtungen, um Ereignisse möglichst vollständig rekonstruieren zu können. Neutrinos sowie möglicherweise Lightest Supersymmetric Particles lassen sich anhand des Fehlbetrages in der Impulsbilanz nachweisen.

Die Konzepte von ATLAS und CMS sind sehr unterschiedlich, was eine Überprüfung von wissenschaftlichen Resultaten, vor allem aber die Bestätigung oder Widerlegung von Entdeckungen ermöglicht.

ATLAS besitzt einen supraleitenden Solenoidmagneten mit einer Feldstärke von 2 T (Abbildung 5). Hochauflösende Halbleiterstreifen- und -pixel-detektoren sowie Übergangsstrahlungsdetektoren erlauben eine auf circa $15 \mu\text{m}$ genaue Bahnvermessung sowie eine Unterscheidung unterschiedlich geladener Teilchen. Außerhalb vom Solenoid befindet sich ein Flüssig-Argon-Kalorimeter mit Bleilagern und 200 000 Kanälen für eine präzise Orts- und Energiemessung von Elektronen, Positronen und Photonen sowie

ABB. 3 KOPPLUNGSKONSTANTEN



Energieabhängigkeit der reziproken elektromagnetischen, schwachen und starken Kopplungen im Rahmen des Standardmodells (gestrichelte Geraden) und der SUSY [6].

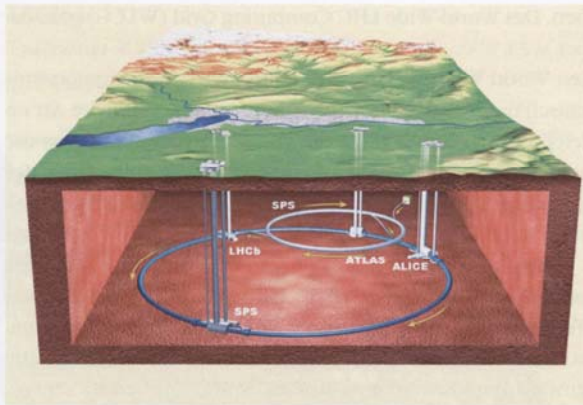


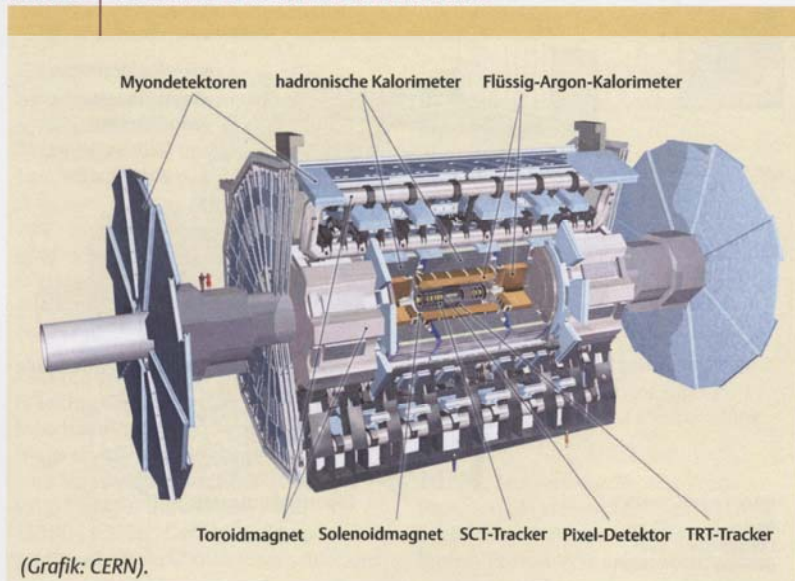
Abb. 4 Schema des LHC mit den vier Kavernen, in denen die Experimente untergebracht werden. Die unterschiedlichen Maßstäbe sind zu beachten: Der LHC hat etwa 8,5 km Durchmesser und liegt im Mittel etwa 100 m unter dem Erdboden (Grafik: CERN).

ein Eisen-Szintillator-Kalorimeter für die Vermessung von Hadronen und Hadronenbündeln (Jets). Ein großvolumiges Toroidfeld um die Kalorimeter herum erlaubt eine separate Impulsbestimmung von Myonen. Ihre zum Teil mehr als 20 m lange Bahnen durch insgesamt 1200 großflächige (bis zu 6 m mal 2 m) Driftkammern lassen sich sehr präzise bestimmen. Das Toroidfeld wird von einem Magneten erzeugt, der mit seinen acht Spulen und Ausmaßen von 26 m mal 5 m alle bisherigen Detektorkonstruktionen in den Schatten stellt (Abbildung 6). Um so erstaunlicher ist es, dass eine Myonspur auf 50 μm genau vermessen werden kann.

Die Besonderheit des CMS-Detektors liegt in seiner kompakten Bauweise (Abbildungen 7 und 8). Ein 4-T-Solenoid umgibt das gesamte Nachweisinstrument. Im Inneren be-

finden sich hochauflösende Spurendetektoren aus Siliziumpixeln und -streifen, um die herum ein aus Bleiwolframat bestehendes elektromagnetisches Kristallkalorimeter und ein Kupfer-Szintillator-Kalorimeter gruppiert sind. Hervorhebenswert ist der weltgrößte Siliziumstreifendetektor, bei dem mehr als zehn Millionen haarfeine Streifen (in Sperrrichtung geschaltete Dioden) eine Fläche von 210 m^2 abdecken. Der 21,6 m mal 14,6 m große Eisenmagnet ist mit einem Gesamtgewicht von rund 12 500 t der schwerste jemals gebaute Magnet. Im Eisenjoch befinden sich gasgefüllte Myonkammern, die wegen des 1,8 T starken Magnetfeldes des Jochs eine unabhängige Impulsmessung erlauben. In der supraleitenden Spule, 13 m lang und 6 m im Durchmesser, werden 2,5 GJ an Energie gespeichert. Sollte die Supraleitung einmal zusammenbrechen (Quenching), wird diese Energie, die ausreicht, einen elektrischen Heizofen zwei Wochen lang zu betreiben, von dicken Aluminiumkabeln gefahrlos abgeleitet. Abbildungen 7 und 8 verdeutlichen die Dimensionen und lassen verstehen, warum die CMS-Physiker eine Wert für die Konstruktion bemühen mussten.

ABB. 5 | SCHEMA DES ATLAS-DETEKTORS



(Grafik: CERN).

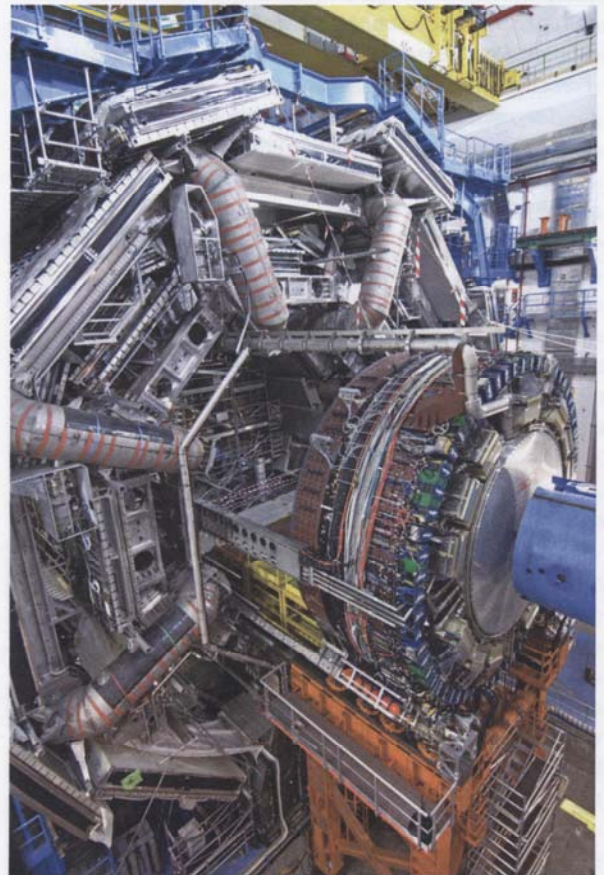


Abb. 6 Der ATLAS-Detektor kurz vor seiner Fertigstellung. Rechts eines der Vorwärtskalorimeter, das noch in die zylinderförmige Aussparung links hineingefahren werden muss. Deutlich sind die acht großen Spulen des Toroids, umgeben von großflächigen Myondetektoren, erkennbar (Foto: CERN).

Die Datenverarbeitung im Grid

Die immensen Teilchendichten und die große Zahl an elektronischen Detektorkanälen führen zu einer beträchtlichen Datenmenge von 1 bis 2 MB pro Ereignis. Bei der Rate von 40 MHz entsteht ein Informationsstrom von etwa 100 TB pro Sekunde. Zur Erinnerung: 1 TB entspricht der Speicherkapazität von 1500 CD.

Diese Datenmengen lassen sich nicht speichern, weswegen nur ein winziger Bruchteil an interessanten Ereignissen für die weitere Ereignisrekonstruktion und Datenanalyse selektiert und mit einer Rate von bis zu 200 pro Sekunde aufgezeichnet wird. Dieses Selektionssystem wird Trigger genannt und ist ein extrem leistungsfähiger Verbund von schnellen Rechnern, die während der Datennahme bereits Ereignisse vor-rekonstruieren und nach vorgegebenen Kriterien selektieren.

Insgesamt werden pro Jahr und Experiment etwa zwei Milliarden Ereignisse gespeichert und mit Rechnern überall auf der Welt analysiert. Die dabei entstehende Datenmenge von 2000 TB pro Detektor ist so gewaltig, dass ein weltweites Netz von Rechner-Clustern, das Grid, errichtet werden muss, um ihrer Herr zu werden. Ausgehend von einem Zentralverteiler am CERN gibt es extrem schnelle Datenleitungen zu insgesamt elf Großrechenzentren in zehn Nationen. Das Deutsche Zentrum GridKa befindet sich am Forschungszentrum Karlsruhe.

Insgesamt wird das Grid mehrere 100 000 Rechner vernetzen und jedem beteiligten Physiker Zugriff auf die Rechenleistung weltweit verteilt gespeicherter Daten erlau-

ben. Das World-Wide LHC Computing Grid (WLCG) geht dabei weit über die Möglichkeiten des am CERN entwickelten World Wide Web hinaus, mit dem der Informationsaustausch unter den Teilchenphysikern auf revolutionäre Art erleichtert wurde. Es dient als gutes Beispiel dafür, dass die sehr aufwendige und teure Teilchenforschung neben der grundlegenden Erkenntnis auch technische und ökonomische Rechtfertigungen findet.

Beschleuniger, Detektoren und Datenverarbeitung müssen vollständig installiert sein, damit die Suche nach neuen Teilchen beginnen kann. Um Fehler bei der Detektorkonstruktion zu vermeiden und nicht unvorbereitet auf die großen Datenmengen zu stoßen, haben wir bereits im Vorfeld die physikalischen Prozesse, die zum Signal und allen erdenklichen Untergrundquellen führen sowie das Verhalten des Detektors und die Datenauswertung mit Simulationsprogrammen (Monte-Carlo-Programmen) durchgespielt. Deshalb glauben wir, die Signaturen der gesuchten Teilchen zu kennen. Schauen wir sie uns einmal an.

Higgs-Bosonen, SUSY, Dunkle Materie, Schwarze Löcher und zusätzliche Dimensionen

Abbildung 9a zeigt ein simuliertes Ereignis, bei dem ein 150 GeV/c² schweres Higgs-Boson erzeugt und in CMS nachgewiesen wird. Wie dem Schema in Abbildung 9b zu entnehmen ist, zerfällt das Higgs-Boson in diesem Beispiel in ein reelles und ein virtuelles Z-Boson (Träger der neutralen Schwachen Wechselwirkung), die wiederum je in ein Paar von Myonen zerfallen. Diese sind im Bild als vier grüne Spuren deutlich sichtbar. Man sieht auch deutlich die mehr als Tausend weiteren Spuren, die von der Kollision der Protonen herrühren. Nur mit ausgeklügelten Rekonstruktionsalgorithmen können diese Signale gefunden werden.

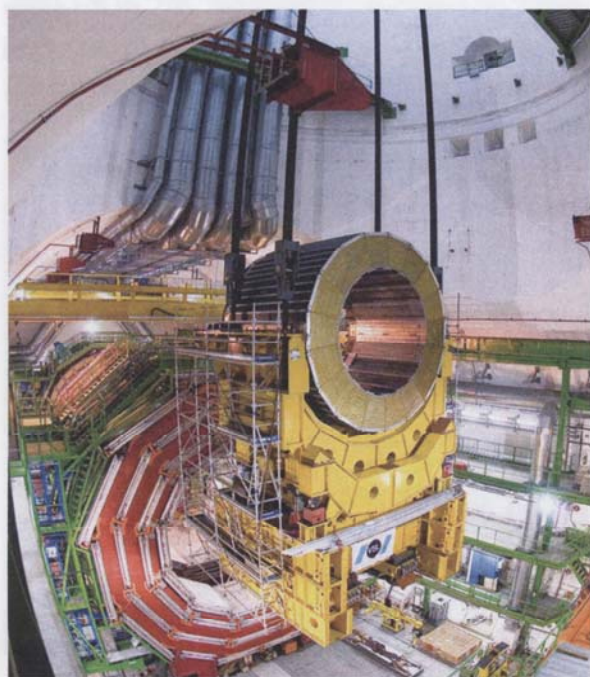


Abb. 7 Zusammenbau des CMS-Detektors in der unterirdischen Kaverne. Im Vordergrund das zentrale Hadron-Kalorimeter, das gerade von der oberirdischen Montagehalle abgelassen wird (Foto: CERN).

ABB. 8 | SCHEMA DES CMS-DETEKTORS

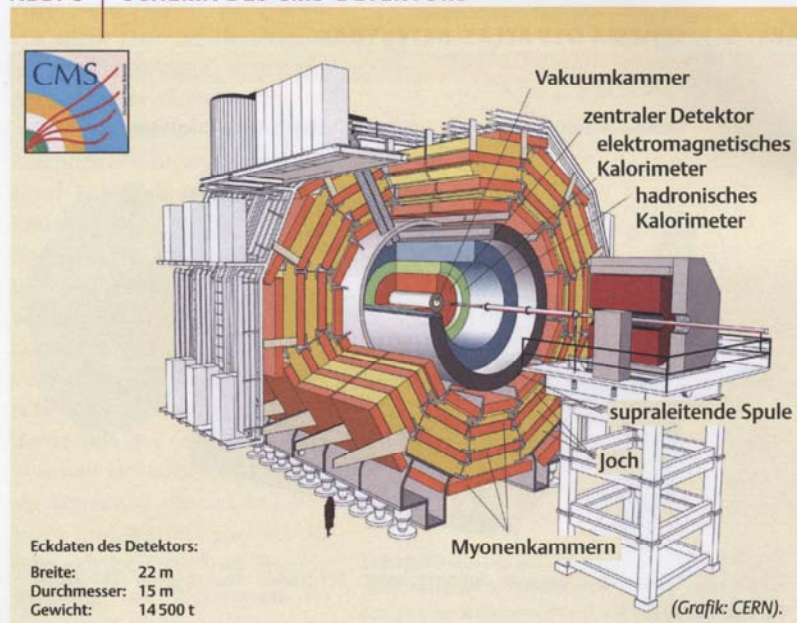
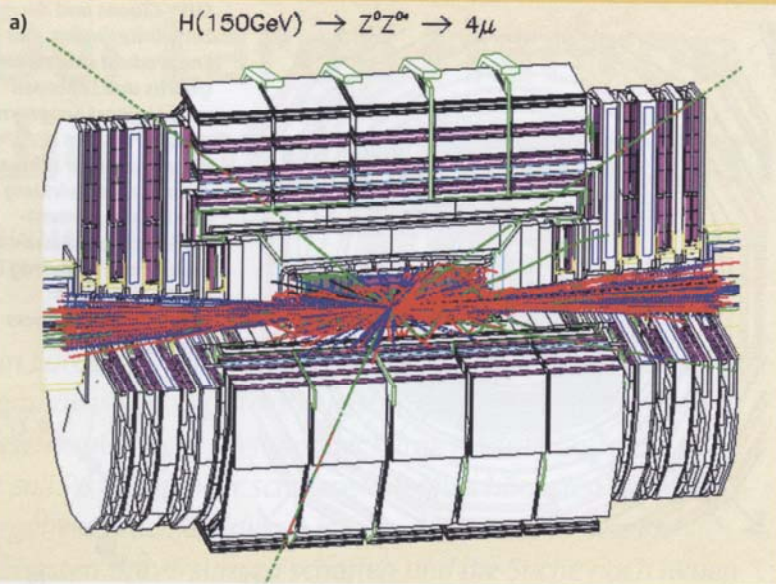
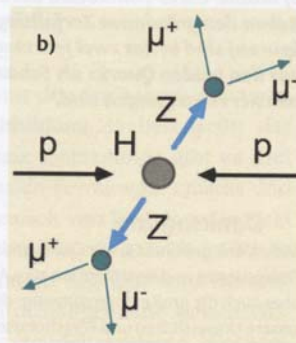


ABB. 9 HIGGS-ZERFALL



a) Simulation eines Ereignisses im CMS-Detektor, bei dem ein Higgs-Boson mit einer Masse von $150 \text{ GeV}/c^2$ in vier Myonen zerfällt (grüne Spuren). Zusätzlich entstanden weitere etwa 1600 geladene Teilchen (farbige Spuren) und ähnlich viele neutrale Teilchen (nicht dargestellt).

b) Schema der Erzeugung eines Higgs-Bosons und dessen Zerfalls in zwei Z-Bosonen, die wiederum in jeweils zwei Myonen zerfallen.



DIE DETEKTOREN UND IHRE FORSCHUNGSSCHWERPUNKTE

ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus): Präzisionsmessungen im Rahmen des Standardmodells, Suche nach dem Higgs-Boson und Phänomenen jenseits vom Standardmodell. ATLAS ist 46 m lang, hat 25 m Durchmesser und ist 7000 t schwer. Gebaut und betrieben wird es von rund 2000 Wissenschaftlern und Ingenieuren von 165 Instituten aus 35 Ländern, darunter 15 Instituten aus Deutschland.

CMS (Compact Muon Solenoid): Präzisionsmessungen im Rahmen des Standardmodells, Suche nach dem Higgs-Boson und Phänomenen jenseits vom Standardmodell. CMS ist 21 m lang, 16 m im Durchmesser und 12500 t schwer. Gebaut und betrieben wird es von rund 2000 Wissenschaftlern

und Ingenieuren von 159 Instituten aus 37 Ländern, darunter 6 Instituten aus Deutschland.

ALICE (A Large Ion Collider Experiment): Studium von Blei-Blei-Kollisionen, Suche nach dem Quark-Gluon-Plasma. ALICE ist 26 m lang und 16 m im Durchmesser und 10000 t schwer. 7 Institute aus Deutschland sind beteiligt.

LHCb (LHC-beauty): Physik mit Hadronen, die ein Beauty-Quark enthalten, Präzisionsuntersuchungen zur CP-Verletzung. 6 Deutsche Institute sind beteiligt.

TOTEM: Studium von Proton-Proton-Streuung bei kleinen Energien, Bestimmung des elastischen und diffraktiven Proton-Proton-Wirkungsquerschnittes.

Interessant wäre die Frage, ob die Natur eventuell auch ohne Higgs-Boson auskommt. In diesem Falle würden zwangsläufig neue Prozesse auftreten, um den fehlenden Higgs-Mechanismus zu kompensieren. Diese sollten sich bei hohen Energien deutlich im Experiment bemerkbar machen und ergäben eine echte Revolution unseres Forschungsgebiets.

Wenn tatsächlich Supersymmetrische Teilchen existieren, könnten sie bei sehr hohen Energien erzeugt und anhand ihrer charakteristischen Zerfalleigenschaften nachgewiesen werden (Abbildung 10). Sollten Ereignisse wie hier beschrieben einwandfrei identifiziert werden können, würde die Arbeit erst richtig losgehen: Die große Vielzahl neuer Parameter, gegeben durch die Eigenschaften der SUSY-Teilchen, müssen dann in mühevoller Kleinarbeit aus den experimentellen Daten ermittelt werden. Nur dann gelingt es, eine Supersymmetrische Theorie aufzustellen, die das Standardmodell ablöst. Eine solche Theorie würde auch Vorhersagen über die mysteriöse Dunkle Materie machen. Sie könnte dann mit weiterführenden Experimenten getestet werden. Beispielsweise könnte man elastische Stöße von Dunkler Materie an Atomkernen vermessen und deren Massen und Kopplungen mit den Lightest Supersymmetric Particles vergleichen. Dunkle-Materie-Detektoren laufen bereits seit vielen Jahren in unterirdischen Labors, haben aber noch keinen eindeutigen Nachweis erbracht.

Die Existenz von weiteren makroskopischen Raumdimensionen lässt sich durch eine Vielzahl interessanter Prozesse am LHC nachweisen. Erwähnen möchte ich hier die Erzeugung von Schwarzen Löchern. Mit der Existenz zusätzlicher Raumdimensionen verändert sich wie beschrieben das Gravitationsgesetz unterhalb jener kleinen Abstände, die der Ausdehnung der zusätzlichen Dimensionen entsprechen. Diese Ausdehnung definiert dann auch die charakteristische Größe des Schwarzschild-Radius. Das ist jene Größe, die die Ausdehnung angibt, bei der ein Objekt zum Schwarzen Loch wird. Für den Fall, dass wie eingangs geschrieben die Gravitation bei Energien von 1000 GeV , entsprechend Abständen unterhalb von 10^{-19} m , stark wird, würde bei einer entsprechenden Energiedichte innerhalb dieses Radius ein Schwarzes Loch entstehen.

Solche Energiedichten können am LHC bei Stößen von Quarks oder Gluonen durchaus erzeugt werden und wegen der stark gewordenen Gravitation ein gebundenes System bilden und zum Schwarzen Loch werden. Diese Gebilde wären so massearm, dass sie aufgrund der von Hawking vorhergesagten Quanteneffekte sofort wieder zerfallen. Bei einem solchen Zerfall würden gleichsam auf „demokratische“ Weise alle möglichen Teilchen erzeugt werden, die dann eine klare Signatur im Detektor hinterlassen. Evidenz dafür, dass es sich hierbei um kleine Schwarze Löcher handelt, wäre ein rapider Anstieg der Produktionsrate solcher Ereignisse mit der im Detektor nachweisbaren Masse der erzeugten Schwarzen Löcher.

Wegen der extrem kurzen Lebensdauer eines solchen Schwarzen Loches ist es unmöglich, dass es weitere Mate-

rie in seinem Umfeld binden oder gar die Erde verschlingen könnte, wie in der Vergangenheit befürchtet wurde. Dies lässt sich nicht nur theoretisch zeigen, sondern hat die Natur sogar „experimentell“ demonstriert. Seit 4,5 Milliarden Jahren haben Kollisionen von energiereichen Teilchen der kosmischen Strahlung mit Atomkernen in der Erdatmosphäre oder auch in der Sonne nicht zu einem Schwarzen Loch oder anderen Katastrophen geführt. Und das, obwohl die Energien der Höhenstrahlung sehr viel höher sind, als sie an Beschleunigern erzeugt werden können.

Erste Ergebnisse und weitere Ziele

Mit dem Large Hadron Collider erwarten wir für die kommenden Jahre einen immensen Zugewinn an Erkenntnissen. Schon nach einem Jahr Datennahme besteht eine gute Chance, ein mittelschweres SUSY-Teilchen zu identifizieren. Für eine sichere Entdeckung eines Higgs-Bosons im Rahmen des Standardmodells werden je nach verfügbarer Luminosität zwei bis drei Jahre Datennahme zu veranschlagen sein. Eine präzise Vermessung des Higgs-Bosons sowie weiterer Standardmodellparameter und eine vertiefte Suche nach Phänomenen jenseits vom Standardmodell werden noch einige Jahre mehr in Anspruch nehmen.

In dem Zeitraum wird auch ein Verbesserungsprogramm für Detektoren und Beschleuniger eingeplant, um danach noch höhere Luminositäten und vielleicht auch Energien zu erzielen. So ist mit einem mehr als eine Dekade währendem Programm zu rechnen.

Das Fernziel der Teilchenphysiker ist allerdings der Bau eines weiteren Teilchenbeschleunigers, des International Linear Collider (ILC), der Elektron-Positron-Kollisionen bei bis zu 1200 GeV Schwerpunktsenergie liefern soll (siehe Physik in unserer Zeit 2006, 37 (4), 159). Diesem Beschleuniger kommt dann die Aufgabe zu, das Higgs-Boson und mögliche leichte SUSY-Teilchen genau zu vermessen.

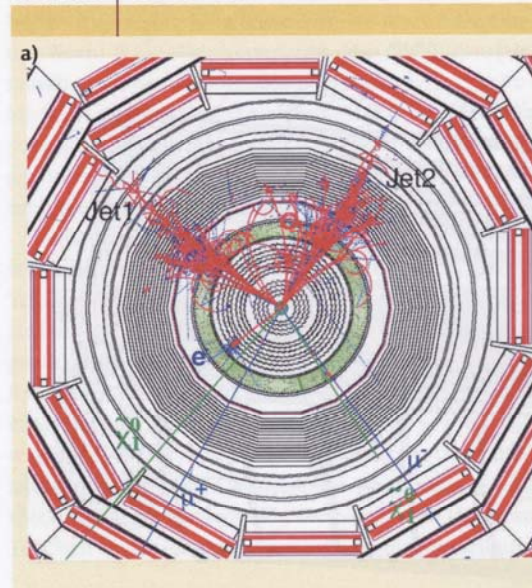
Zusammenfassung

Am Europäischen Zentrum für Teilchenphysik CERN läuft demnächst der Large Hadron Collider, LHC, an. Er soll Protonen mit einer Schwerpunktsenergie bis zu 14 TeV und Blei-Ionen bis zu 1144 TeV miteinander kollidieren lassen. Mehr als 6000 Wissenschaftler und Ingenieure aus rund 500 Instituten aus aller Welt sind am Bau der Detektoren beteiligt. Hauptziele des LHC sind die Entdeckung des Higgs-Bosons und Teilchen der Supersymmetrie sowie die Erzeugung des Quark-Gluon-Plasmas. Auch Fragen nach der Dunklen Materie und kleinen Schwarzen Löchern lassen sich angehen. Der LHC soll mindestens zwanzig Jahre lang arbeiten.

Stichworte

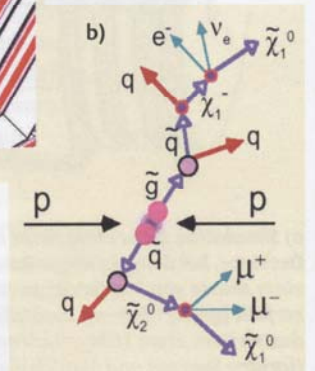
Large Hadron Collider, LHC, ATLAS, CMS, Teilchenphysik, Standardmodell, Higgs-Boson, Supersymmetrie.

ABB. 10 SUSY-ZERFALL



b) Monte-Carlo-Simulation des Prozesses. Neben den geladenen Zerfallsleptonen (blaue Spuren) sind in Rot zwei Jets eingezeichnet, die aus den beiden Quarks als Schauer von Hadronen hervorgegangen sind.

a) Erzeugung eines SUSY-Quarks und eines SUSY-Gluons und deren Zerfallskaskaden. Das Endprodukt sind neben Quarks und Leptonen zwei Lightest Supersymmetric Particles ($\tilde{\chi}_1^0$), die wegen ihrer schwachen Wechselwirkung den Detektor unentdeckt verlassen und nur durch den Fehlbetrag in der Energie- und Impulsbilanz messbar sind.



Danksagung

Mein Dank gebührt Günter Quast und Dieter Zeppenfeld für wertvolle Diskussionen und Kommentare zum Artikel. Hervorheben möchte ich aber auch die große Unterstützung, die unser Feld in Deutschland durch unsere Universitäten und Forschungseinrichtungen, das BMBF, der DFG und die Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren erfährt.

Literatur und Internet

- [1] S. L. Glashow, Nucl. Phys. 1961, 20, 579; S. Weinberg, Phys. Rev. Lett. 1967, 19, 1264.
- [2] Particle Listings in <http://pdg.lbl.gov>.
- [3] lepewwg.web.cern.ch/LEPEWWG.
- [4] O. Buchmüller et al, arXiv:hep-ph/0707.3447.
- [5] J. Wess, B. Zumino, Nucl. Phys. B 1974, 70, 39.
- [6] U. Amaldi, W. de Boer, H. Fürstenau, Phys. Lett. 1991, 260, 447.
- [7] G. Flügge, P. Jenni, Physik Journal 2006, 5 (2), 29.

Der Autor



Thomas Müller promovierte 1983 und habilitierte sich 1988. Anschließend nahm er einen Ruf an die University of California, Los Angeles an. Er ist heute Ordinarius am Institut für Experimentelle Kernphysik der Universität Karlsruhe (TH), sein Institut ist u. A. Mitglied in der CDF- und CMS-Kollaboration des LHC.

Anschrift

Prof. Dr. Thomas Müller, Institut für Experimentelle Kernphysik, Universität Karlsruhe (TH) und Karlsruhe Institut für Technologie, Wolfgang-Gaedestraße 1, D-76128 Karlsruhe. Email: mullerth@ekp.uni-karlsruhe.de