

Urknall auf Erden

Gott-Teilchen, Schattenmaterie und Schwarze Minilöcher: Was sich Teilchenphysiker vom neuen Teilchenbeschleuniger bei Genf erhoffen – und was sie befürchten.

Je tiefer die Physiker ins Reich des Allerkleinsten vordringen wollen, desto größer werden die Maschinen, die sie dafür brauchen. Jüngstes Beispiel ist der Large Hadron Collider (LHC), der zurzeit unter der französisch-schweizerischen Grenze bei Genf fertiggestellt wird. In diesem bald leistungsfähigsten Teilchenbeschleuniger der Welt – Umfang des unterirdischen Rings: 26,66 Kilometer – werden Protonen (Wasserstoff-Kerne) oder Blei-Atomkerne mit über 99,9 Prozent der Lichtgeschwindigkeit aufeinanderprallen. Dabei werden Energien konzentriert wie eine Billionstel Sekunde nach dem Urknall.

Während Techniker, Ingenieure und Experimentalphysiker eifrig dabei sind, die einzigartige Erkenntnismaschine für den nun im Mai 2008 geplanten Start vor-

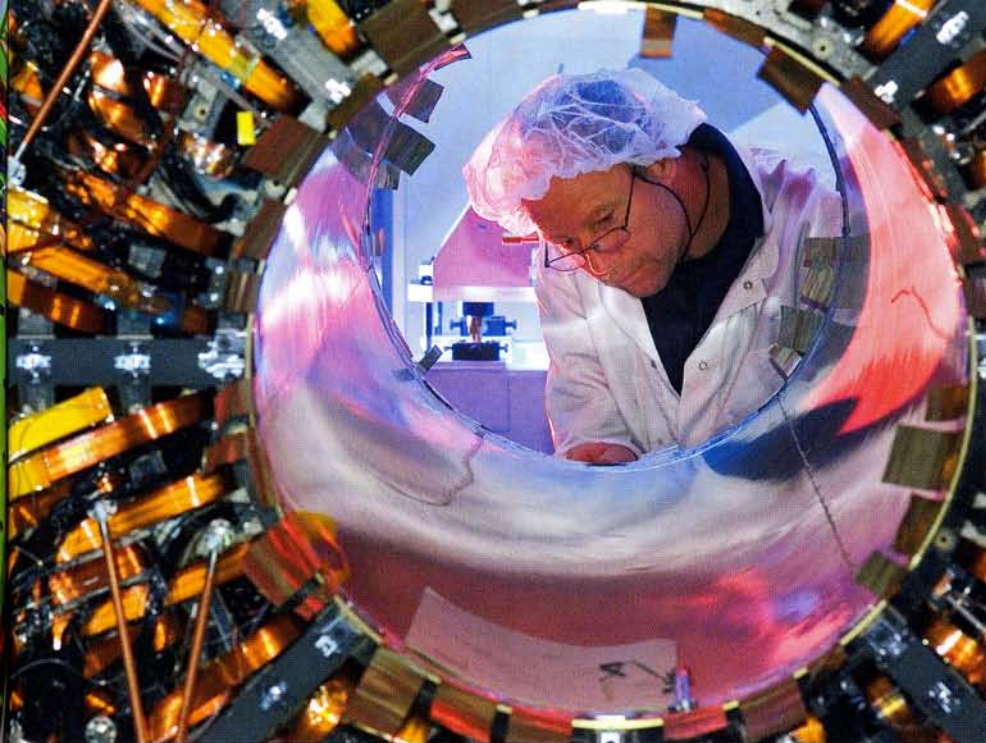
zubereiten, arbeiten Experimentelle und Theoretische Physiker mit Hochdruck an Computersimulationen der prognostizierten Messdaten und an Voraussagen ihrer spekulativen Theorien. Vor allem aber harren sie auf die Entdeckung völlig unerwarteter Phänomene, die ihr etabliertes Weltbild erschüttern könnten.

„Das aufregendste, das der LHC entdecken könnte, ist etwas, das wir nicht voraussagen können“, sagt Alvaro De Rujula, Theoretischer Physiker am CERN. JoAnne Hewett vom Stanford Linear Accelerator Center im kalifornischen Menlo Park beschreibt die gegenwärtige Stimmung: „Wir sind wie Kinder, die auf Weihnachten warten.“ Auf dem Wunschzettel der Physiker stehen unter anderem: der Nachweis des lang gesuchten Higgs-Teilchens (oder gleich mehrerer davon),

die Erzeugung von supersymmetrischer Schattenmaterie und vielleicht sogar von Schwarzen Minilöchern, die das Tor zu neuen Dimensionen aufstoßen würden.

Zunächst geht es darum, das „Standardmodell der Elementarteilchen“ zu vervollständigen. So heißt die grundlegende Theorie über die Grundbausteine der Materie. Ihr zufolge bestehen Protonen und Neutronen aus Quarks – und somit auch alle Atomkerne. Außerdem gibt es Leptonen („leichte Teilchen“), zu denen das Elektron gehört. Hinzu kommen die Teilchen, die die Wechselwirkungen – das heißt Naturkräfte – übertragen. Sie werden Bosonen genannt.

Eigentlich entspricht das Standardmodell der Elementarteilchen dem Wissensstand der Physiker in den Sechziger- und Siebzigerjahren. Die großen Beschleuni-



CERN (2)

Teilchenphysik ist Maßarbeit. Links: Eine 15 Meter hohe und 900 Tonnen schwere „Scheibe“ des CMS-Detektors wird mit seinen Myonen-Detektoren herangefahren. Oben der Semiconductor Tracker, ein zentraler Teil des ATLAS-Detektors.

ger, die danach gebaut wurden, haben es mit erstaunlicher Präzision bestätigt. Alle prognostizierten Partikel sind den Forschern nach und nach ins Netz ihrer raffinierten Detektoren gegangen, und zwar mit den vorhergesagten Eigenschaften: zum Beispiel 1979 die Gluonen, die der Starken Kraft zugrunde liegen (sie hält die Atomkerne zusammen), 1983 die W- und Z-Bosonen, die die Schwache Kraft vermitteln (sie erzeugt den radioaktiven Beta-Zerfall), 1975 und 1976 das Charm- und das Bottom-Quark und zuletzt 1995 nach der Analyse von vier Billionen Proton-Antiproton-Kollisionen das Top-Quark.

Nur ein Baustein fehlt noch: ein Teilchen, das Peter Ward Higgs von der University of Edinburgh 1964 vorausgesagt hatte, um mit ihm zu erklären, wie die Elementarteilchen zu ihrer Masse kommen. Der Physik-Nobelpreisträger Leon Lederman bezeichnete es augenzwinkernd als „Gott-Teilchen“, weil es gewissermaßen

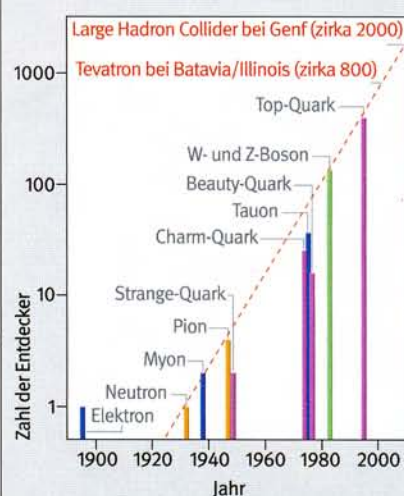
die wichtigste Eigenschaft der Materie erschafft, ihre Masse. Die Physiker nennen es Peter Higgs zu Ehren Higgs-Teilchen. Falls es existiert, wird es am LHC gefunden werden, sind die meisten Physiker überzeugt. So auch Thomas Müller, Physik-Professor an der Universität Karlsruhe: „Ich habe schon einigen Kollegen eine Wette über ein volles Monatsgehalt angeboten. Aber es wollte bislang keiner dagegen halten. Das Angebot gilt noch.“

Bis der LHC 2008 seinen Betrieb aufnimmt und etwa ein Jahr später seine geplante Energie erreicht, arbeitet die Konkurrenz am Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab) in Batavia, Illinois, auf Hochtouren. Denn noch ist das Tevatron dort mit 6,3 Kilometer Umfang der stärkste Teilchenbeschleuniger. In ihm kollidieren Protonen und Antiprotonen mit einer Energie von 1,96 Teraelektronenvolt. 1995 wurde am Tevatron das Top-Quark entdeckt, dessen Masse vor wenigen Monaten auf rund ein Prozent

genau bestimmt werden konnte. Das ist ein wichtiger Schritt zur Entdeckung des Higgs-Teilchens, dessen Masse von der des Top-Quarks und des W-Bosons abhängt (siehe Grafik „Das Massentrio: Top-Quark, W-Boson und Higgs-Partikel“).

Womöglich hat das Fermilab auch bei der Entdeckung des Higgs die Nase vorn, selbst wenn sich dieses erst am LHC richtig charakterisieren lässt. Als John Conway von der University of California in Davis in den Fermilab-Daten nach Spuren des Higgs-Zerfalls in zwei Tau-Leptonen – massereichen Verwandten des Elektrons – und nach deren Zerfallsprodukten suchte, fand er einen interessanten Hinweis bei 160 Gigaelektronenvolt. In seinem Blog im Internet wertete er ihn im Dezember 2006 als denkbare Indiz für ein Higgs-Teilchen – was einigen Presse-rummel auslöste. Conway betonte allerdings, dass die Nachweiswahrscheinlichkeit noch weit unter den Standards der

IM TEAM ZUM ERFOLG



WANDEL DER ZEITEN: Immer mehr Menschen müssen an immer größeren Geräten zusammenarbeiten, damit bahnbrechende Entdeckungen gelingen. Inzwischen sind Hunderte von Forschern an einem einzigen Experiment beteiligt – und damit auch an neuen Entdeckungen. Das wird bei der künftigen Vergabe von Nobelpreisen zum Problem, denn einzelne Wissenschaftler lassen sich dann kaum noch auszeichnen.

KOMPAKT

- Die wichtigste Aufgabe für den neuen Teilchenbeschleuniger bei Genf ist die Suche nach Partikeln und Phänomenen jenseits der bekannten Theorie der Materie.
- Wenn das Higgs-Teilchen, das die Massen der Elementarteilchen erzeugt, nicht entdeckt würde, hätte das für die Physik viel gravierendere Folgen als sein Nachweis.
- Selbst Schwarze Minilöcher könnten unter Genf erzeugt werden – aber nur, wenn es mehr als die drei Raumdimensionen unserer Alltagswelt gibt.

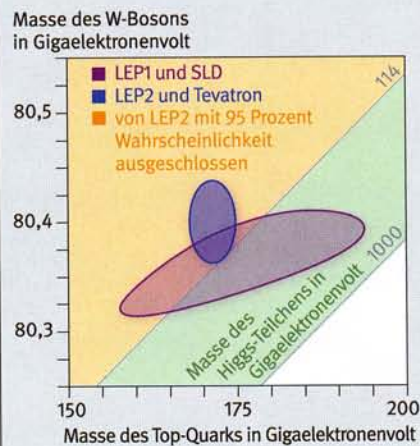
Elementarteilchenphysik liegt. Wie schon oft in deren Geschichte könnte es sich also um blanken Zufall, einen Messfehler oder eine falsche Signalrekonstruktion im Detektor handeln. So gab es Mitte der Neunzigerjahre eine Higgs-„Entdeckung“ bei 85 Gigaelektronenvolt, die sich bald im statistischen Staub auflöste.

Im März 2007 zog Tommaso Dorigo von der Universität Padua mit einem weiteren Higgs-Indiz nach. Er hatte einen anderen Datensatz mit anderen Zerfällen analysiert und ebenfalls einen Hinweis bei 160 Gigaelektronenvolt gefunden.

Auch diese Nachricht verbreitete sich im Internet rasend schnell. Wissenschaftssoziologen vermuten bereits, dass künftig große Entdeckungen nicht mehr über Fachzeitschriften oder Pressekonferenzen bekannt gegeben werden, sondern in Blogs. Vielleicht wird das Higgs-Teilchen das erste prominente Beispiel dafür sein.

„Die gezeigten Daten würde man normalerweise nur achselzuckend zur Kenntnis nehmen. Aber in dieser ange-

DAS MASSENTRIO: TOP-QUARK, W-BOSON UND HIGGS-PARTIKEL



DER „HEILIGE GRAL“ der Teilchenphysik ist die Suche nach dem Higgs-Partikel, das der Materie ihre Masse verleiht. Seine eigene noch unbekannte Masse wird für seine Entdeckung ausschlaggebend sein. Physiker versuchen zurzeit, sie indirekt zu erschließen. Denn die Massen zweier anderer kurzlebiger

Teilchen – des Top-Quarks und des W-Bosons – hängen mit der des Higgs-Teilchens zusammen. Die Massen von Top und W wurden inzwischen durch Messungen vom Large Electron Positron Collider (LEP) am CERN, vom SLAC Large Detector (SLD) am Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) und vom Tevatron am Fermilab auf wenige Prozent genau bestimmt. Damit ergibt sich aus der Elementarteilchentheorie für das Higgs-Teilchen eine wahrscheinlichste Masse um 80 Gigaelektronenvolt. Die experimentelle Untergrenze von LEP beträgt dagegen etwa 114 Gigaelektronenvolt. Die aktuelle theoretische Obergrenze für die Higgs-Masse liegt bei 153 Gigaelektronenvolt (mit einer Wahrscheinlichkeit von 68 Prozent). Der neue Large Hadron Collider am CERN wird das Higgs-Partikel finden, falls es existiert. Er könnte noch Higgs-Massen von über 1000 Gigaelektronenvolt aufspüren.

bdw-Grafik; Quelle: Fermilab

heizten Atmosphäre gehen da schon mal die Gäule durch“, kommentiert Thomas Müller die Euphorie mancher Kollegen. „Mit einer doppelt so großen Datenmenge werden wir das alles besser verstehen – wahrscheinlich schon Ende des Jahres.“ Er kann das Wettrennen zwischen Fermilab und LHC entspannt sehen, denn mit seinem Team an der Universität Karlsruhe forscht der Mitentdecker des Top-Quarks seit zwölf Jahren am Fermilab und ist auch am Bau des Riesendetektors CMS (Compact Muon Solenoid) des LHC beteiligt, der die 200-fache Leistung des Fermilab haben wird. „Mein Herz schlägt natürlich für den Beschleuniger in Europa“, gibt Müller zu.

„Wenn das masseschaffende Partikel im vermuteten Energiebereich um 120 Gigaelektronenvolt existiert, wird der LHC es sehr wahrscheinlich spätestens 2011 nachgewiesen haben“, ist Müller überzeugt. Die Detektion dauert so lange, weil sie sehr aufwendig ist: Bei rund zehn Billionen Teilchenkollisionen entsteht statistisch nur ein einziges Higgs. Wenn der LHC auf Hochtouren läuft, sind das selbst bei 800 Millionen Kollisionen in

jeder Sekunde nur wenige Higgs-Partikel pro Tag.

Würde das Higgs-Teilchen vom LHC jedoch nicht erhascht, käme das Standardmodell in eine schwere Krise. Denn es könnte nicht mehr erklären, warum Elementarteilchen eine Masse haben. Zugleich wäre für die Physiker rätselhaft, weshalb das Standardmodell so viele andere Messungen sehr exakt beschreibt. „Grundlegenden Berechnungen zufolge müssten dann als Alternative zur Existenz von Higgs-Bosonen neue Phänomene bei Energien um 1000 Gigaelektronenvolt auftreten. Aller Voraussicht nach würden sie am LHC beobachtet werden“, sagt Müller.

Ein Problem für den physikalischen Fortschritt ist es, dass es in den letzten 20 Jahren keine einzige Überraschung gegeben hat – abgesehen von der Erkenntnis, dass die geisterhaften Neutrinos, die wie die Elektronen zu den Leptonen zählen, nicht masselos sind, sondern eine geringe Masse besitzen und sich ineinander umwandeln können. Diese Neutrino-Eigenschaften sagt das Standardmodell nicht voraus, aber sie sind mit ihm ver-



ALICE im Wunderland des LHC: Hier wird ein Materiezustand kurz nach dem Urknall erforscht – das Quark-Gluon-Plasma.

einbar. Allerdings machen sie es durch die Einführung von sechs neuen Parametern noch unübersichtlicher. Überhaupt ist das Standardmodell mit insgesamt 26 nur experimentell bestimmbar – also nicht ableitbar – Parametern für die Theoretiker viel zu kompliziert. Denn es erklärt zahlreiche Phänomene nicht: etwa die Verwandtschaft und Masse der 24 bekannten Elementarteilchen, die Stärke und den Zusammenhang der Naturkräfte, die Eigenschaften der kräfteübertragenden Partikel und den milliardenfachen Überschuss der Materie gegenüber der Antimaterie im Universum. Deshalb warten die Teilchenphysiker gespannt auf Anzeichen einer neuen Physik jenseits des Standardmodells.

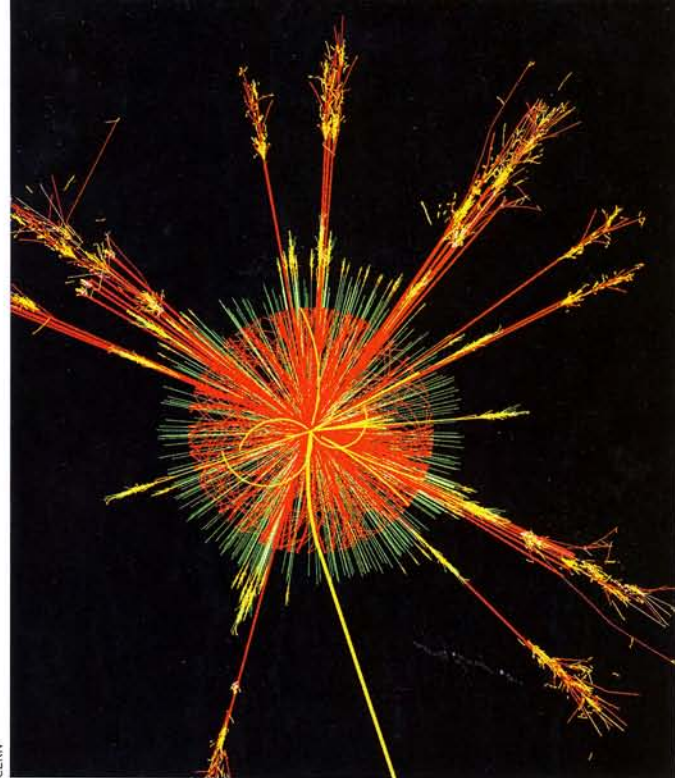
Wenn der LHC das Higgs-Teilchen nicht fände, müssten die Wissenschaftler zurück zu den Wurzeln und vieles neu durchdenken. Denn das Standardmodell ist nicht ein Mosaik, in dem sich beliebige Steinchen austauschen lassen, sondern eine grazile Architektonik, die zusammenstürzen könnte, wenn ein tragender Baustein wegbriecht. Wie sich diese Architektonik stützen oder womöglich ersetzen ließe, ohne dass die Erfolge des Standardmodells verloren gehen, ist völlig unklar. „Es müsste andere Prozesse geben, die den Partikeln ihre Masse verleihen“,

sagt Thomas Müller. „Die Entdeckung solcher Vorgänge würde die Teilchenphysik revolutionieren.“

Gravierende Folgen hätte es auch, wenn der LHC weder das Higgs noch sonst etwas Neues aufspüren würde: Aus den Krisen von Theorien sind schon oft neue, erfolgreichere Theorien entstanden und falsche Annahmen über Bord geworfen worden.

Der weitaus ungünstigste Fall für die Zukunft der Teilchenphysik wäre es, wenn der LHC das Higgs-Teilchen im vorhergesagten Energiebereich aufspüren würde – und sonst überhaupt nichts Neues. Welche Richtung sollte die Forschung dann nehmen? Außerdem befürchten die Teilchenphysiker, dass dann kaum noch die Bereitschaft bestünde, Milliardensummen in den Bau von Geräten zu investieren, die womöglich nicht mehr leisten, als ein paar Parameter einige Stellen hinter dem Komma genauer zu bestimmen.

In den letzten Jahrzehnten haben überwiegend Experimente die Hochenergie-Teilchenphysik vorangetrieben –



Wenn Protonen im LHC mit hoher Energie kollidieren, entsteht eine Kaskade neuer Partikel (Simulation).

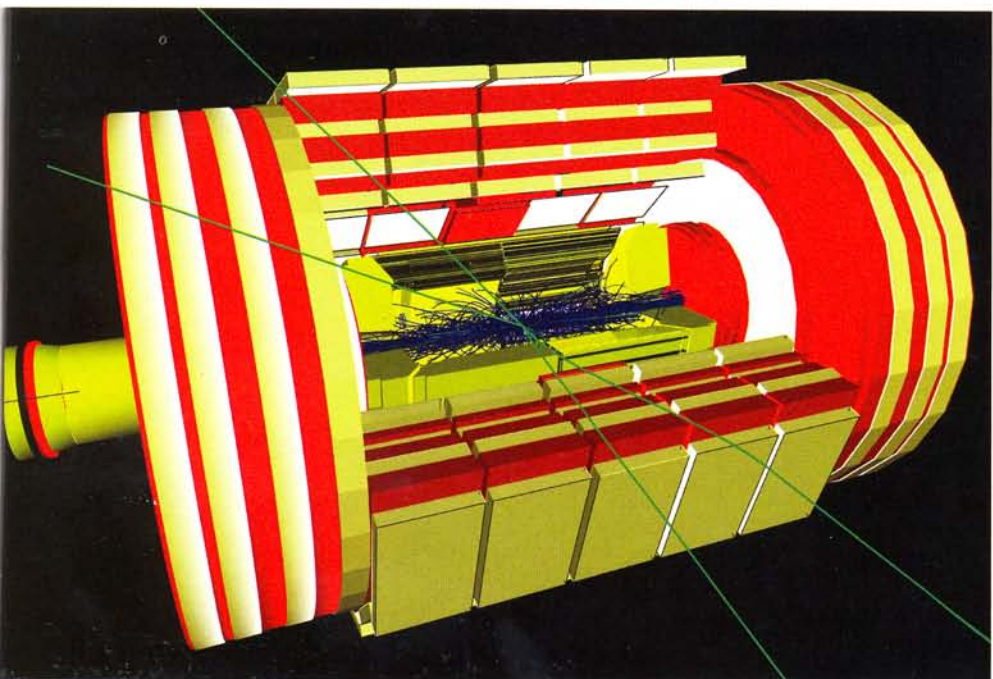
neue Entdeckungen und die Versuche, Voraussagen zu bestätigen oder zu widerlegen. So kam es in den Sechzigerjahren zu einer außerordentlich verwirrenden Situation: einem „Teilchenzoo“ aus über 200 Partikeln. Das änderte sich erst, als das Standardmodell aufgestellt wurde, das die unübersichtliche Vielfalt mit Symmetrieprinzipien bändigte.

Wie sich herausstellte, sind die meisten Partikel nur aus wenigen Elementarteilchen zusammengesetzt. Aber es sind immer noch zu viele, um die Physiker zufriedenzustellen, die nach fundamentaler Einfachheit und sparsamen Erklärungen suchen.

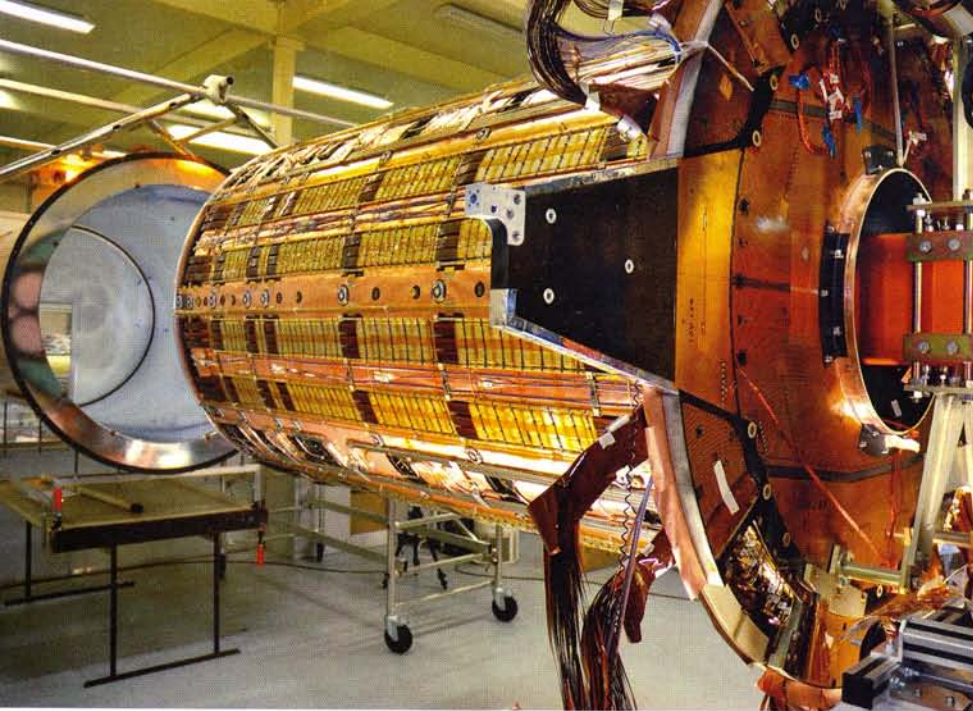
Und so entwickelten sie, überwiegend von mathematischen Erwägungen geleitet, grundlegendere Prinzipien und Theorien, um damit das Standardmodell auf eine tiefere Basis zu stellen und viele seiner Eigenschaften verständlich zu machen. Diese tiefgreifenden Theorien soll der LHC nun überprüfen. Das ist mindestens so wichtig wie die Entdeckung des Higgs-Teilchens.

Die wichtigsten (teils aufeinander aufbauenden) neuen Ansätze, die der LHC im Visier hat, sind:

- Vereinheitlichung der Wechselwirkungen: Die vier bekannten Naturkräfte waren im Urknall wahrscheinlich in einer Superkraft vereinigt und haben sich erst nach und nach aufgespalten. Das Standard-



Higgs-Teilchen lassen sich über charakteristische Spuren ihrer Zerfallsprodukte identifizieren – oben eine Simulation für den CMS-Detektor.



CERN (3)

Jedes Nachweisgerät im LHC besteht aus mehreren ineinander verschachtelten Komponenten. Hier der Zusammenbau eines inneren Aggregats des ATLAS-Detektors.

modell beschreibt sie hingegen getrennt – die Schwerkraft wird sogar ignoriert.

- Stringtheorie: Sie ist das am weitesten entwickelte Beispiel für eine „Weltformel“ oder Quantengravitationstheorie. Sie beschreibt die Elementarteilchen nicht als punktförmige Partikel, sondern als Anregungszustände eindimensionaler schwingender Saiten (Strings) oder mehrdimensionaler Objekte, Branen genannt. Dies funktioniert aber nur, wenn es neben den drei bekannten Raumdimensionen (Höhe, Breite, Länge) noch sechs oder sieben weitere Dimensionen gibt. Diese Extradimensionen sind winzig (tatsächlich die Dimensionen selbst, nicht nur die Dinge in ihnen!) und daher bislang nicht zu beobachten. Das übersteigt die Vorstellungskraft des Alltagsverstands, lässt sich aber mit einem Gartenschlauch vergleichen: Aus der Ferne erscheint er als quasi eindimensionaler Strich, was einer großen, normalen Dimension entspricht; aber an jedem Punkt des Strichs sitzt gewissermaßen ein Kreis, was zwei zusätzlichen, „aufgerollten“ Dimensionen entspricht.

- Supersymmetrie (SUSY): Diese wichtige gemeinsame Eigenschaft aller Versionen einer Großen Vereinheitlichten Theorie und Stringtheorie nimmt an, dass jedes Elementarteilchen ein bislang unentdecktes Partnerteilchen besitzt. Das leichteste dieser SUSY-Teilchen wäre stabil – und der ideale Kandidat für die ominöse Dunkle Materie, die nicht leuch-

tet, sich aber durch ihre Schwerkraft in und um Galaxien und Galaxienhaufen bemerkbar macht und die gewöhnliche Materie an Masse im Universum um das Sechsfache übertrifft. Dutzende von Experimenten suchen seit Jahren nach den Bestandteilen der Dunklen Materie – bislang ohne Erfolg. Doch wenn es sie wirklich gibt und sie SUSY-Teilchen sind, dann stehen die Chancen gut, dass sie am LHC erzeugt und auch nachgewiesen werden können. Das würde das Tor zu einer ganz neuen Welt aufstoßen und wäre eine triumphale Bestätigung für die Supersymmetrie – und vielleicht auch für die Stringtheorie. SUSY-Modelle sagen übrigens nicht ein einziges Higgs-Teilchen voraus, sondern mindestens fünf davon. Und wenn an den Higgs-Hinweisen vom Tevatron etwas dran ist, dann wäre das dort aufgespürte Teilchen wohl nicht das des Standardmodells, sondern ein supersymmetrisches.

Noch spekulativer – aber umso sensationeller – ist die Möglichkeit, im LHC Schwarze Löcher zu erzeugen. Astronomen kennen solche extremen Schwerkraftschlünde als einige Kilometer große Relikte ausgebrannter Sterne und als Materiestrudel im Zentrum von Galaxien. Doch auch viel kleinere Massekonzentrationen sind denkbar, wenn sich

nur genug Materie oder Energie auf einem hinreichend kleinen Raumvolumen konzentriert. Könnte man die gesamte Erde zu einem Schwarzen Loch verdichten, hätte dieses einen Durchmesser von gerade 18 Millimetern.

Doch das ist immer noch riesig im Vergleich zu den Schwarzen Minilöchern, die theoretisch im LHC erzeugt werden können. Sie wären kleiner als ein Tausendstel des Protonen-Durchmessers und hätten die Masse von vielleicht 5000 dieser Kernteilchen. Entstehen könnten sie freilich nur unter ganz bestimmten Voraussetzungen: wenn von den sechs oder sieben Extradimensionen, deren Existenz die Stringtheorie postuliert, mindestens zwei relativ groß sind. „Groß“ heißt: zwischen einem Billiardstel Meter bis zu einem Zehntel Millimeter – das ist gigantisch im Vergleich zur typischen Stringlänge von etwa 10^{-34} Meter. Bei diesen Distanzen, der Größe der Extradimensionen, würde die Schwerkraft stärker sein, als es Isaac Newtons Gravitationsgesetz besagt. Deshalb könnte bei einer Teilchenkollision im LHC tatsächlich so viel Masse oder Energie komprimiert werden, dass sich daraus ein Schwarzes Miniloch bildet. Das haben Greg Landsberg von der Brown University in Providence, Rhode Island, und mehrere andere Physiker bereits 2001 berechnet.

Ihre Abschätzungen ergaben, dass der LHC bei mindestens zwei großen Extradimensionen ein Schwarzes Miniloch pro Tag – oder im günstigen Fall sogar pro Sekunde – erschaffen könnte. Und Marcus



Der zentrale Teil des CMS-Detektors wird mit einem Spezialkran zum Einsatzort in die Tiefe gehievt.

Bleicher von der Universität Frankfurt am Main hat berechnet, dass bei sieben jeweils mindestens ein Billiardstel Millimeter großen Extradimensionen bis zu eine Milliarde Schwarze Minilöcher pro Jahr im LHC entstehen könnten.

Für die Boulevard-Medien war dies vor ein paar Monaten ein willkommener Anlass, den Weltuntergang zu beschwören: Die im LHC erzeugten Schwarzen Löcher würden die Erde auffressen. Auch die sonst seriöse Lifeboat Foundation, die das Ziel hat, das Überleben der Menschheit zu schützen, verbreitet solche Befürchtungen. „Das Risiko ist vollkommen zu vernachlässigen“, entgegnet Landsberg. Niemand brauche zu befürchten, dass Schwarze Minilöcher die Erde verschlingen. Dafür gibt es mehrere gute Gründe:

- Schon Mitte der Siebziger Jahre hatte Stephen Hawking gezeigt, dass Schwarze Löcher nicht vollkommen schwarz sind, sondern aufgrund von Quanteneffekten Strahlung abgeben – und zwar umso mehr, je geringer ihre Masse ist. Die potenziellen Minilöcher im LHC würden daher binnen 10^{-33} Sekunden verdampfen. „Das ist viel zu schnell, um davor eine signifikante Menge von Materie verschlingen zu können“, sagt Landsberg. Im Übrigen kann die Zerstrahlung nicht durch „Nahrungsaufnahme“ verhindert werden. Sabine Hossenfelder vom Perimeter-Institut für Theoretische Physik im kanadischen Waterloo hat berechnet, dass die Minilöcher eine Billion Mal schneller Masse verschlingen müssten, um zu überleben, als es nach den Naturgesetzen möglich ist.

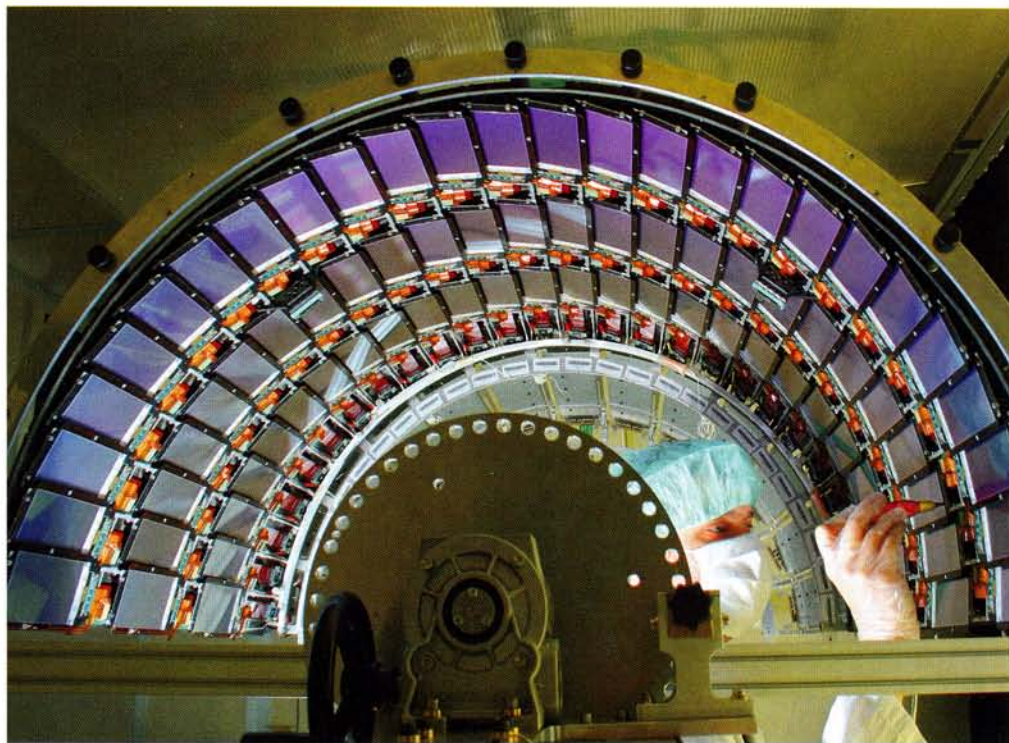
- Selbst wenn Hawkings Hypothese falsch ist und Schwarze Minilöcher stabil wären, bestünde kein Grund zur Besorgnis. Denn sie würden gar nicht im LHC oder in der Erde bleiben, sondern aufgrund ihrer hohen Geschwindigkeit rasch ins All verschwinden. „Selbst wenn man zehn Millionen Schwarze Minilöcher pro Jahr erzeugen könnte, würden nur etwa zehn in der Erde gefangen bleiben und deren Zentrum umkreisen“, schätzt Landsberg.

- Aber auch sie wären keine Gefahr. Denn sie wären so klein, dass sie einen Eisenblock von astronomischer Größe, der den Abstand zwischen Erde und Mond ausfüllt, mühelos durchdringen könnten, ohne mit irgendetwas zu kollisionieren.

Ein Miniloch bräuchte 100 Stunden, um ein einziges Proton zu treffen und zu verschlucken. Dadurch verringert sich die Geschwindigkeit des Minilochs und eine weitere Kollision wird noch unwahrscheinlicher. Aber selbst wenn man dies nicht berücksichtigt, könnte das Miniloch allenfalls 100 Protonen pro Jahr verschlingen. „Somit würde es viel länger dauern, als unser Universum alt ist, bis selbst ein einziges Milligramm der Erde zerstört wäre“, folgert Landsberg.

- Der überzeugendste Grund: Die kosmische Strahlung, die ständig aus dem All auf die Erde trifft und aus fast lichtschnel-

dern im Gegenteil ein Highlight der Physik. Und sie würde sogar die Jagd nach dem Higgs beflügeln. „Wenn sich Schwarze Minilöcher erzeugen lassen, müssen sich dabei auch Higgs-Teilchen bilden“, sagt Jack Smith von der Stony Brook University in New York. Zusammen mit dem Physiker Gouranga Nayak hat er ausgerechnet, dass laut bestimmten Modellen der Stringtheorie bei sehr hohen Energien – wenigen Teraelektronenvolt – sogar mehr Higgs-Bosonen in der Hawking-Strahlung der Schwarzen Minilöcher entstehen müssten als bei den normalen Teilchen-Kollisionen im LHC gemäß dem Standardmodell.



Feinjustierung für die Mikrowelt: Im Spurdetektor des CMS-Geräts werden die Bahnen unzähliger Sekundärteilchen registriert, die bei der Kollision von Protonen entstehen.

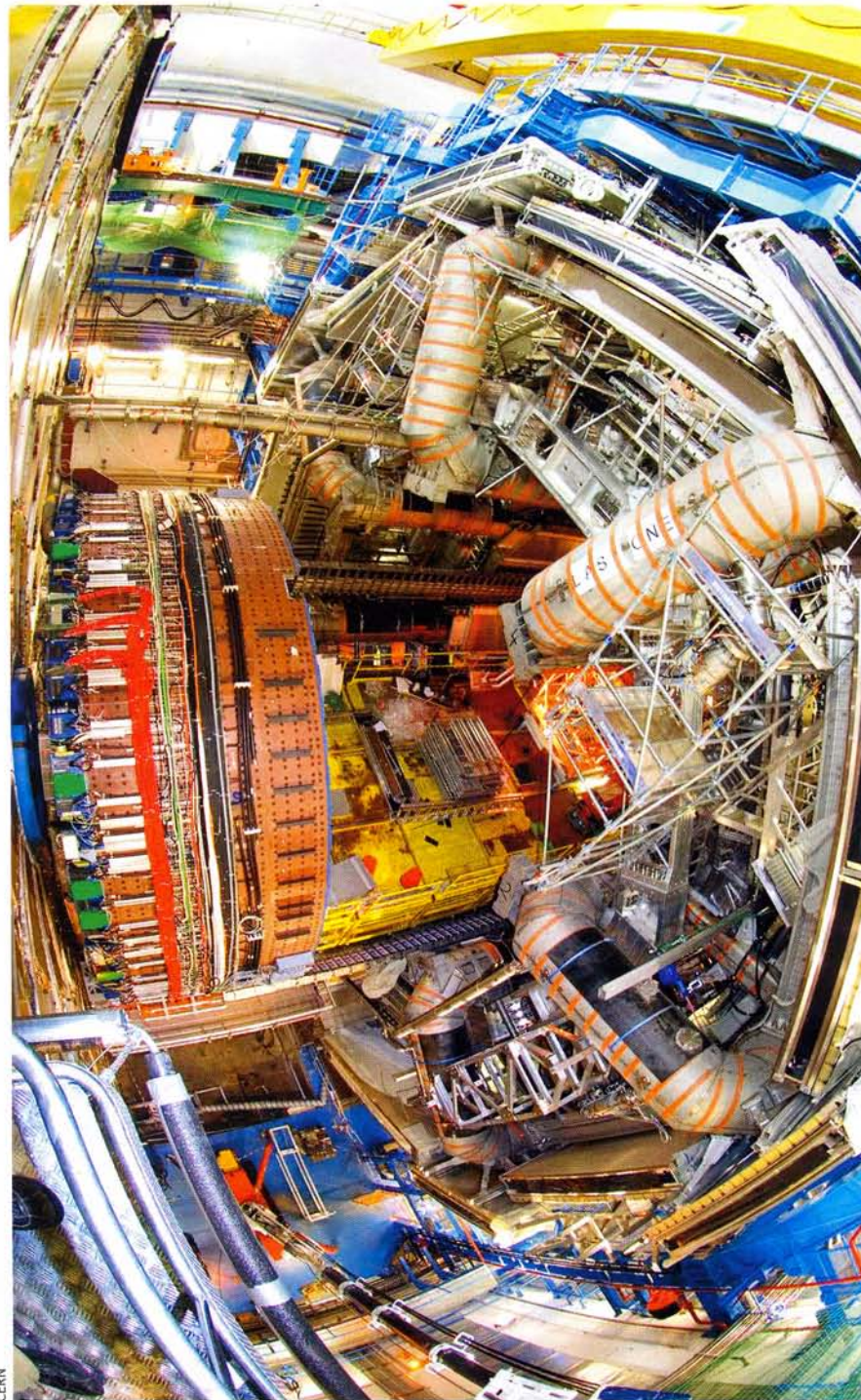
len Elektronen, Protonen und Atomkernen sowie aus Gammaquanten besteht, ist viel energiereicher als die Energie der Teilchenkollisionen, die der LHC erzeugen kann oder jeder Teilchenbeschleuniger in absehbarer Zeit. Wenn sich Schwarze Minilöcher also bei Partikel-Kollisionen bilden können, dann geschieht dies nicht erst im LHC, sondern seit Jahrmilliarden ständig in der Erdatmosphäre – ohne dass es unseren Planeten weiter berührt.

Die Erschaffung Schwarzer Mini-Löcher wäre also keine Gefahr für die Erde, son-

Entstehen die Minilöcher schon bei relativ niedrigen Energien in großen Mengen, dann sind sie womöglich die einzigen im LHC nachweisbaren Higgs-Quellen – eine sehr spekulative, aber faszinierende Möglichkeit. „Das wäre die Entdeckung des Jahrhunderts“, sagt Ben Allanach von der University of Cambridge. „Ein Schwarzes Miniloch zu erzeugen und in den Trümmern das Higgs zu finden – dies wäre, als würde man zum ersten Mal Amerika betreten und erstaunt feststellen, dass dort Gänseblümchen wachsen.“ **Rüdiger Vaas** ■

Die Erkenntnismaschine – Rekorde über Rekorde

Der Large Hadron Collider (LHC) am Europäischen Kernforschungszentrum CERN bei Genf ist das größte und aufwendigste technologische Projekt der Menschheit.

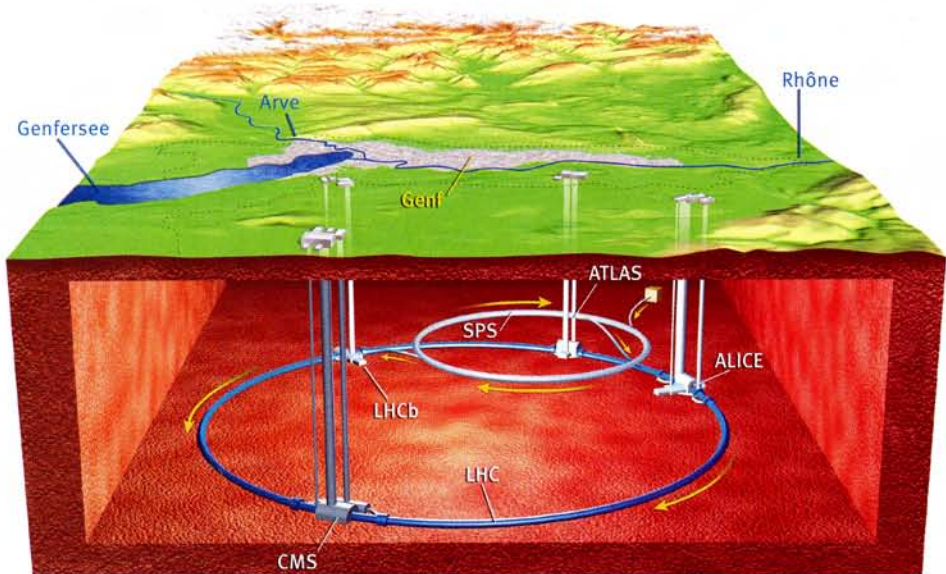


9200 Ingenieure und Wissenschaftler aus 500 Instituten und 80 Ländern sind an der rund vier Milliarden Euro teuren Erkenntnismaschine beteiligt – und das im Gegensatz zu allen anderen Großprojekten ohne rigide Hierarchien und in einem eigenverantwortlichen Zusammenschluss vieler unabhängiger Forschungseinrichtungen weltweit. „Es ist erstaunlich, dass ein so gigantisches Unternehmen auf diese Weise realisiert werden kann, aber die Suche nach Erkenntnis ist für alle eine enorme Motivation“, sagt Thomas Müller von der Universität Karlsruhe.

Der ursprünglich zum Jahresende vorgesehene Beginn des LHC-Betriebs musste auf Mai 2008 verschoben werden. Das gab CERN-Generaldirektor Robert Aymar im Juni bekannt. Zum einen kamen viele kleine Verzögerungen bei den diversen Geräten und Detektoren zusammen. Zum anderen ereignete sich Ende März bei einem Test von einem der neun Magnete, die die beiden gegenläufigen Protonenstrahlen fokussieren werden, ein Störfall. Aufgrund eines Materialfehlers war der 13 Meter lange Magnet stark beschädigt worden. Die Reparatur des Magneten sowie die Nachbesserung der anderen dauert zu lange, um den ursprünglichen Termin noch halten zu können. Zwar wird die Verschiebung von den Physikern bedauert, aber sie erlaubt die Fertigstellung der Experimente und die Vorbereitung der Datenanalysen mit weniger Hast. Außerdem hat der CERN-Rat einer Aufstockung der Finanzmittel für 2008 bis 2011 um 150 Millionen Euro zugestimmt, was Endausbau und Forschungsbetrieb des LHC merklich erleichtern wird.

Mit 25 Meter Durchmesser der Riese im LHC: Zwölf Jahre lang wurde an dem ATLAS-Detektor gebaut. Er wird 100 Megabytes an Daten generieren – in jeder Sekunde.

CERN



Der LHC steckt mitsamt seinen vier Hauptdetektoren in einem ringförmigen Tunnel 50 bis 175 Meter unter dem Grenzgebiet von Frankreich und der Schweiz. Die Teilchen werden mehrfach vorbeschleunigt, zuletzt im Super Proton Synchrotron (SPS).

CERN Der LHC soll mindestens 10 bis 15 Jahre lang betrieben werden. Dann wollen ihn die Physiker noch leistungsfähiger machen.

Im LHC kreisen die Teilchen im Gegensatz in zwei getrennten Vakuum-Röhren, die im Querschnitt so groß sind wie zwei Brillengläser und sich an vier Punkten kreuzen. Dort finden die Kollisionen statt. Die Röhren stecken in einem 3,8 Meter großen Ringtunnel von 8,49 Kilometer Durchmesser, 50 bis 175 Meter unter der Erde.

Riesige unterirdische Hallen beherbergen die Detektoren. Zwei gigantische Vielzweck-Detektoren – ATLAS und CMS – suchen nach Higgs-Teilchen, Extradimensionen, supersymmetrischer Materie, zerstrahlenden Schwarzen Mini-Löchern und anderen Phänomenen:

- ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) hat das Ausmaß des Kirchenschiffs von Notre Dame – der Detektor ist 46 Meter lang, 25 Meter im Durchmesser groß und 7000 Tonnen schwer. Dafür verantwortlich sind rund 2000 Wissenschaftler und Ingenieure von 165 Instituten in 35 Ländern.
- CMS (Compact Muon Solenoid) ist 21 Meter lang, 16 Meter im Durchmesser groß und 12 500 Tonnen schwer. Ihn bauten und betreiben rund 2000 Forscher von 159 Instituten aus 37 Ländern.

Außerdem gibt es zwei große Spezial-Detektoren, nämlich:

- ALICE (A Large Ion Collider Experiment) ist 25 Meter lang, 16 Meter breit und wiegt zirka 1000 Tonnen. ALICE wird die Kollisionen von Blei-Atomkernen ana-

lysierten, die ein Quark-Gluonen-Plasma erzeugen. Dieser Materiezustand herrschte im ersten Sekundenbruchteil nach dem Urknall im Universum.

- LHCb (LHC-beauty) – 7,6 Meter breit und 6,2 Meter hoch – ist spezialisiert auf die Analyse der Wechselwirkung von Teilchen, die Beauty-Quarks enthalten. Das Experiment soll unter anderem das Rätsel des Materie-Überschusses gegenüber der Antimaterie lösen helfen.

Quasi nebenbei betreibt das CERN noch noch zwei weitere Detektoren:

- TOTEM (Total Cross Section, Elastic Scattering and Diffraction Dissociation) wird die Streuung von Protonen an anderen Protonen bei niedrigen Energien vermessen und Informationen über die Kollisionsraten am LHC geben.
- LHCf (LHC-forward) ist ein Experiment der Astroteilchenphysik. Es wird die Wechselwirkung der Kosmischen Strahlung mit der Atmosphäre studieren.

Der LHC besitzt zur Beschleunigung der Teilchen rund 9300 Magnete, 1232 Dipole, 858 Quadrupole und 6208 Korrekturmagnete. Er erzeugt ein Magnetfeld von 8,33 Tesla. Die supraleitenden Kabel der LHC-Magnete sind so lang, dass sie 6,8 Mal um den Äquator gewickelt werden könnten. Alle Fasern zusammen würden 5 Mal von der Erde zur Sonne und zurück reichen und noch ein paar Mal zum Mond.

Mit 1,9 Grad über dem absoluten Nullpunkt sind die Magnete kälter als der Weltraum. Sie sind gleichsam der größte Gefrierschrank der Welt. Diese Betriebs-

temperatur wurde erstmals am 10. April 2007 beim Test eines drei Kilometer langen Teilstücks erreicht.

Der Energiebedarf des LHC beträgt rund 120 Megawatt – vergleichbar mit dem Strombedarf von Genf. Um Geld zu sparen, wird der LHC im Winter abgestellt. In dieser Zeit werden die Geräte gewartet. Imposant sind auch die Daten zur Physik des LHC:

Die Protonen im LHC bewegen sich mit 99,9999998 Prozent der Lichtgeschwindigkeit. Jedes Teilchen rast über 11 000 Mal pro Sekunde durch den Ring. Die beiden Protonenstrahlen sollen 10 bis 20 Stunden lang kreisen und werden aus 2808 „Bündeln“ bestehen, von denen jedes $1,15 \cdot 10^{11}$ Protonen enthält. In jedem Strahl stecken 362 Megajoule Energie – das entspricht der Bewegungsenergie eines ICE-Zugs bei 150 Kilometer pro Stunde.

Die Energie bei der nur 10^{-12} Sekunden dauernden Kollision zweier Protonen beträgt bis zu 14 Teraelektronenvolt (10^{12} Elektronenvolt). Das entspricht dem 14 000-Fachen der Ruhemasse eines Protons. 1 Teraelektronenvolt ist etwa die Bewegungsenergie einer fliegenden Mücke. Die Kollisionsenergie der Bleikerne wird 1144 Teraelektronenvolt betragen.

Von den Myriaden an Kollisionsereignissen werden pro Jahr rund eine Milliarde gespeichert – eine Datenmenge von einer Million Gigabyte, die nur in weltweiter Zusammenarbeit analysiert werden kann. Das einzige deutsche Grid-Rechenzentrum steht am Forschungszentrum Karlsruhe.

Übrigens: Wie sein Vorgänger LEP (Large Electron Positron Collider) wird der Teilchenstrahl im LHC so empfindlich justiert sein, dass sich an ihm minimale Effekte der Schwerkraft ablesen lassen – zum Beispiel durch die Schneeschmelze im Jura-Gebirge oder den Umlauf des Mondes.

Rüdiger Vaas ■



INTERNET

CERN-Homepage:
www.cern.ch

Einführung in die Teilchenphysik:
www.teilchenphysik.de