Ring der Erkenntnis

Seit einigen Jahren entsteht beim europäischen Forschungszentrum Cern der weltweit leistungsstärkste Teilchenbeschleuniger. Ab Herbst 2007 soll der Large Hadron Collider zu einer neuen Physik jenseits des Standardmodells vorstoßen.



Der ringförmige LHC-Tunnel hat einen Umfang von gut 27 Kilometern. Radfahrer brauchen für eine komplette Runde mehr als eine Stunde. Doch die fast lichtschnellen Protonen schaffen die Strecke im Bruchteil einer Sekunde.



CERN

Von Gerhard Samulat



ALLE FOTOS DIESER DOPPELSEITE: GERHARD SAMULAT

Lyndon Evans, Leiter des LHC-Projekts, zeigt in der Magnetmesshalle auf den Doppelstrang, durch den die gegenläufigen Protonenbündel gejagt werden.

Wenn wir hier nichts finden, würde sich die gesamte Elementarteilchenphysik davon nicht mehr erholen.« Drastischer als Robert Aymar kann man kaum ausdrücken, unter welchem Erfolgsdruck die Physiker und Ingenieure stehen, die derzeit am Cern in der Nähe von Genf den leistungsstärksten Beschleuniger aller Zeiten errichten – den Large Hadron Collider (LHC). Aymar ist seit Anfang 2004 Generaldirektor des europäischen Laboratoriums, verantwortlich für Teilchenphysik und somit für das Gelingen dieses mehrere Milliarden Euro teuren Projekts. In gut einem Jahr wollen dort über 7000 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus mehr als 80 Ländern Kollisionen zwischen hochenergetischen Protonen beobachten – und die daraus entstehenden neuen Teilchen.

Sie suchen beispielsweise so genannte Higgs-Bosonen, die erklären sollen, warum Elementarteilchen wie Leptonen oder Quarks ganz unterschiedliche Massen haben (siehe »Das Geheimnis der Masse« von Gordon Kane, Spektrum der Wissenschaft 2/2006, S. 36). Zugleich halten die Physiker Ausschau nach einem ganzen Zoo supersymmetrischer Partnerteilchen, den es gemäß einer einheitlichen Theorie für Materie und Kräfte geben muss (siehe Spektrum der Wissenschaft 5/2005, S. 84). Die Wissenschaftler am Cern bezeichnen den LHC daher gern als Entdeckungsmaschine, denn die gigantische Partikelschleuder stößt weit in unerforschte Energiebereiche vor. »Die Situation ist ähnlich wie Mitte der 1980er Jahre, als wir die W- und Z-Teilchen entdeckten«, erläutert Cern-Sprecher James Gillies. Anschließende Präzisionsmessungen werden voraussichtlich von künftigen Linearbeschleunigern übernommen, die Elektronen und deren Antiteilchen, die Positronen, aufeinander schießen sollen.

Doch bis die ersten Experimente beginnen, liegt vor den Physikern, Ingenieuren und Technikern noch viel Arbeit. »Derzeit sind die Probleme vor allem logistischer Natur«, erklärt Cern-Chef Aymar. »Das beginnt beim Lagern der über eintausend tonnenschweren Ablenkmagnete und endet nicht mit dem Einbau aller Komponenten in den Tunnel.« Der hat immerhin einen Umfang von gut 27 Kilometern. Marathonläufer bewältigen diese Strecke in gut zwei Stunden; die auf Trab gebrachten Protonen schaffen die Distanz in weniger als 90 Mikrosekunden (millionstel Sekunden).

Die Tunnelröhre verläuft zwischen 50 und 175 Metern unter der Erde. Um nicht zu tief in das benachbarte Juragebirge vordringen zu müssen, hatten die Konstrukteure den ringförmigen Stollen, in dem zuvor der Large Electron-Positron Collider (Lep) seine Dienste verrichtete, mit einer Neigung von 1,4 Prozent versehen.

Eine Milliarde Ereignisse pro Sekunde

Für den Betrieb des Beschleunigers hat das keine Auswirkungen. Die Techniker müssen allerdings beim Aufstellen ihrer meist mehrere tausend Tonnen schweren Experimente die leichte Schräge stets im Auge behalten. »An einem Ende ist der Detektor etwa 40 Zentimeter höher als am anderen«, erläutert Peter Jenni. Er ist der Sprecher der Atlas-Kollaboration, eines der vier im Aufbau befindlichen Nachweisgeräte. »Als wir einen schweren Zylinder mit einem Luftkissenfahrzeug in den Detektor fahren wollten, mussten wir es sofort wieder bremsen, weil das Gerät sonst heruntergerutscht wäre.«

Von ähnlichen Beinaheunfällen kann Hans Falk Hoffmann bislang nicht berichten. Als wahres Urgestein unter den Physikern hat er sich sein Leben lang mit dem Bau von Beschleunigern und den zugehörigen Nachweisgeräten beschäftigt. Bereits seit Anfang der 1970er Jahre am Cern, saß er schon mehrfach im Direktorium der europäischen Forschungseinrichtung und zwischenzeitlich auch

IN KÜRZE

- Der Large Hadron Collider (LHC) wird nach seiner Fertigstellung auf Jahre hinaus **die leistungsstärkste Experimentiermaschine** der Teilchenphysiker sein.
- Vom LHC erwarten die Forscher **konkrete Hinweise auf eine neue Physik,** die über das bekannte und bestens erprobte Standardmodell der Elementarteilchenphysik hinausgeht.
- Mit superflüssigem Helium als Kühlmittel der Magnete beschreiten die Erbauer **technisches Neuland.** Gleiches gilt für viele Komponenten der gewaltigen Nachweisgeräte. So sucht deren Elektronik aus rund einer Milliarde Ereignisse pro Sekunde zielsicher die wenigen heraus, von denen sich die Wissenschaftler neue Erkenntnisse erhoffen.



Physiker Jürgen Schukraft weist auf den im Bau befindlichen Alice-Detektor.



Hans Falk Hoffmann ist der technische Koordinator des CMS-Detektors.

im Entscheidungsgremium von dessen kleinerem Pendant, dem Desy in Hamburg. Derzeit ist er technischer Koordinator für das Nachweisgerät CMS und damit in einer ähnlichen Position wie Peter Jenni. »Was man gegenwärtig zu sehen bekommt, sind fantastische mechanische Strukturen«, beschreibt der kurz vor Kriegsende in Schlesien geborene Physiker. »Dahinter stecken aber – für unser Auge unsichtbar – riesige Gedankengebäude, an denen Tausende von Leuten über zig Jahre gearbeitet haben.« Sein größtes Augenmerk gilt der Computertechnik, die für die Datennahme und Interpretation der Kollisionen ungeheuer wichtig ist. »Bei einer Teilchenbündel-Folge-Frequenz von 25 Nanosekunden und etwa 25 Treffern pro *bunch* vermessen die Nachweisgeräte jede Sekunde rund eine Milliarde Ereignisse«, rechnet er vor. »Die Events fließen daher gleichzeitig in mehreren Wellen durch den Detektor hindurch«, erläutert er. »Und jede Spur muss einem Treffer richtig zugeordnet werden.«

Dazu muss man wissen, dass die Teilchen aus technischen Gründen portionsweise durch den Beschleuniger sausen. Im Fachjargon heißt so ein Bündel *bunch*. »Bei voller Füllung befinden sich jeweils 2800 davon in den beiden Vakuumröhren des Beschleunigers«, erläutert Lyndon Evans. Der gebürtige Waliser ist Leiter des LHC-Projekts. »Die einen fliegen links herum, die anderen in die Gegenrichtung.« Nur an den Kollisionspunkten – dort wo die Nachweisgeräte stehen – werden sie zusammengeführt. Im Jahr 1969 kam der Beschleunigerexperte zunächst für zwei Jahre als so genannter Fellow zum Cern. Wie viele seiner Kollegen verfiel er rasch der Faszination der Teilchenphysik. »Um die Protonen auf die notwendigen Energien zu bringen, hat jeder Ring zwei supraleitende Beschleunigungsstrecken, die jeweils mit einer Wechselspannung von 400 Megahertz arbeiten«, erklärt er weiter. Den Beschleunigungsvorgang kann man sich so vorstellen, als würden die geladenen Teilchen auf den elektrischen Wechselfeldern reiten wie Surfer auf einer Brandung. Die Frequenz gibt die Wellenlänge und damit den Abstand der Teilchenbündel vor, die jeweils einige Milliarden Protonen enthalten.

Für den Betrieb moderner Beschleuniger setzen die Ingenieure zunehmend auf Supraleitung, das heißt auf eine Technik, die den elektrischen Widerstand verschwinden lässt. Der Beschleuniger braucht daher wesentlich weniger Strom. Trotzdem frisst die Maschine, wenn sie erst einmal unter Volllast läuft, gute 120 Megawatt. Das entspricht der Leistung eines mittleren Kraftwerks. Beim LHC werden sowohl die Hochfrequenzstrecken als auch die Magnete, welche die beschleunigten Partikel auf



Tatsuya Nakada sucht mit dem Detektor LHC-b nach seltenen Mesonen.

ihren Bahnen innerhalb der etwa armdicken Vakuumröhren halten, mit flüssigem Helium gekühlt.

Seiner Erfahrung und einer kühnen Idee verdankt Aymar der Berufung zum Generaldirektor: Er regte an, die Magnete auf weniger als zwei Kelvin zu kühlen. Bei diesen extremen Temperaturen – kaum zwei Grad über dem absoluten Nullpunkt – wird das Edelgas suprafluid und verhält sich wie eine ideale Flüssig- ▷

▷ keit. »Normalerweise experimentieren Wissenschaftler in ihren Labors ausschließlich mit wenigen Kubikzentimetern«, erläutert Aymar. Denn der garstige Stoff kriecht durch kleinste Ritzen und klettert sogar Wände empor. »Als ich vorschlug, den LHC mit 10 000 Litern davon zu kühlen, erklärten mich die Leute für verrückt«, meint der Cern-Chef: »Doch wir hatten Erfolg.«

»Bislang verliefen alle Tests reibungslos«, ergänzt Evans. »Im Sommer machen wir den ersten Sektor kalt.« Damit sind alle Rückschläge vergessen, die es vor einiger Zeit mit dem Kühlsystem gab und die zu einer gut einjährigen Verzögerung im Zeitplan führten. »Das hatte aber nichts mit der Supraleitung an und für sich zu tun«, versichert Aymar. »Zulieferer hielten beim Schweißen der Zuleitungen nicht die geforderte Genauigkeit ein. Und wir haben das viel zu spät bemerkt«, gesteht der Generaldirektor.

Insgesamt enthält der LHC einige tausend supraleitende Magnete. Während 1232 so genannte Dipole – jeder einzelne über 14 Meter lang und 35 Tonnen schwer – die Protonen auf eine Kreisbahn zwingen, bündeln Quadrupole den Strahl. Ihren Namen verdanken diese Geräte der Tatsache, dass sie jeweils zwei alternierend angebrachte Nord- und Südpole besitzen. Sie übernehmen für den Protonenstrahl die gleiche Funktion wie beispielsweise Sammel- und Streulinsen für das Licht auf einer optischen Bank. Insbesondere vor den Kollisionsexperimenten fokussieren sie die Teilchenbündel so, dass es zu möglichst vielen Zusammenstößen kommt.

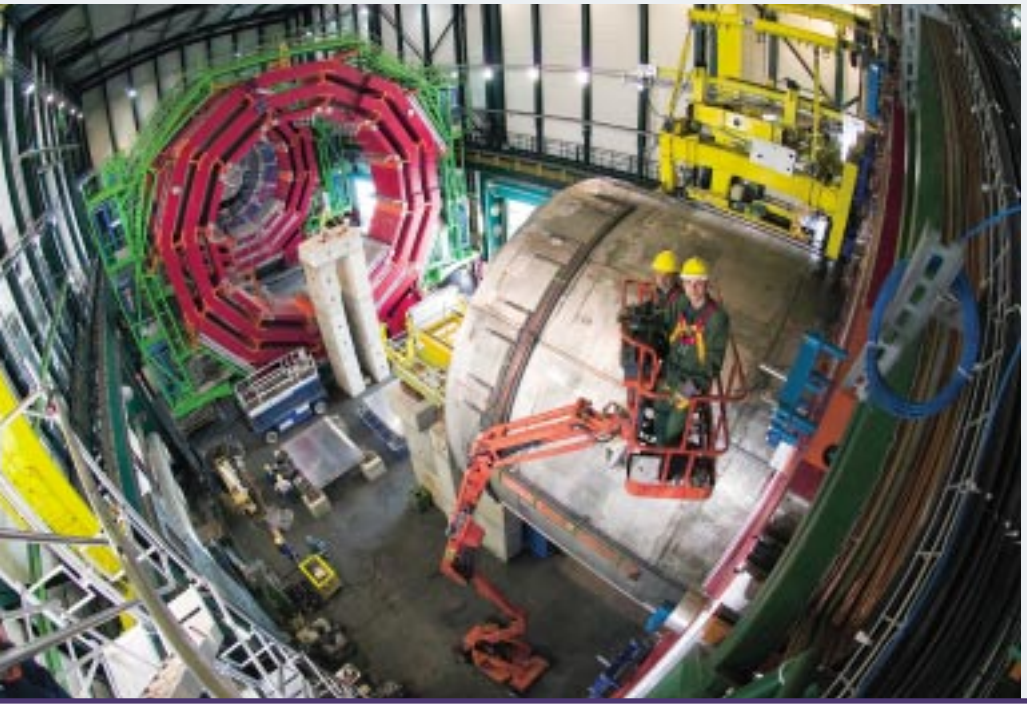
Protonen mit fast 7000facher Masse

Die Entscheidung für superflüssiges Helium hatte mehrere Gründe. »Für uns ist dessen enorme thermische Leitfähigkeit mindestens ebenso wichtig. Sie ist 10 000-mal höher als die von Kupfer«, erläutert Evans. »Daher benutzen wir die Superflüssigkeit zugleich, um die im Beschleuniger entstehende Wärme abzutransportieren.« Denn beim kleinsten Anstieg der Temperatur in den Magneten bräche die Supraleitung in sich zusammen. Außerdem gelingt es nur so, die für die umhersausenden Protonen notwendigen Magnetfelder von 8,3 Tesla zu erzeugen. Das ist deutlich stärker als beispielsweise die Felder von Kernspintomografen in der medizinischen Diagnostik. Derart hohe Werte benötigen die Physiker, um die Protonen mit der angepeilten Energie von 7 TeV (Tera-, das heißt Billionen Elektronenvolt) auf ihrer Bahn zu halten. Das ist eine Energieeinheit des internationalen SI-Einheiten-Systems, mit der die Beschleunigerexperten und die Theoretiker der Elementarteilchenphysik normalerweise der Einfachheit halber rechnen. Ein Teraelektronenvolt entspricht der Energie, die ein Proton hinzugewinnt, wenn es eine elektrische Spannung von einer Billion Volt durchläuft.

Nach Einsteins Relativitätstheorie macht sich der Energiezuwachs als Mas-

Die Experimente Atlas, CMS, Alice und LHC-b

Um der Natur Geheimnisse zu entlocken, benötigen die Experimentatoren Nachweisgeräte. Am Cern gibt es zunächst vier davon. Zwei – Atlas und CMS – sind wahre Alleskönner. Sie sehen sich sehr ähnlich. Zwiebelschalenartig umgeben ihre Komponenten den Kollisionspunkt. Direkt um das Strahlrohr liegen so genannte Streifen- oder Pixel-Detektoren aus Halbleitermaterial. Sie vermessen hochpräzise die Flugbahnen geladener Teilchen. Bei Atlas kommt eine zylindrische Spurenkammer hinzu. Zur Bestimmung der Teilchenimpulse umgeben leistungsstarke supraleitende Magnete die Spurennachweisgeräte. Je nach Masse und Geschwindigkeit der auseinander stiebenden Teilchen zwingen die Felder sie auf unterschiedlich stark gekrümmte Bahnen. Weiter draußen liegen massive Kalorimeter, in denen die Partikel ihre Energie verlieren, sowie ganz außen





BEIDE FOTOS: CERN



senzunahme bemerkbar. Durch diesen relativistischen Effekt verhalten sich die hoch beschleunigten Protonen, als ob sie rund 7000-mal schwerer wären. Lässt man derart schnelle Teilchen aufeinander prallen, entstehen kurzfristig Energiedichten, die denen des Universums wenige Sekundenbruchteile nach dem Urknall entsprechen.

Das ist der Grund, warum Physiker so gewaltige Beschleuniger bauen: Bei den Kollisionen entstehen für kurze Zeit exotische Partikel, die im Urknall gang und gäbe waren. Selbst flüchtige Auftritte von mikroskopisch kleinen Schwarzen Löchern schließen die Experimentatoren nicht aus (siehe »Schwarze Löcher im Labor« von Bernard J. Carr und Steven B. Giddings, Spektrum der Wissenschaft 9/2005, S. 32).

»Doch braucht sich davor niemand zu fürchten«, beruhigt Gillies. »Die energiereiche kosmische Strahlung müsste derartige Gebilde ja bereits längst in der Atmosphäre erzeugt haben, ohne dass bislang irgendeine Gefahr von ihnen ausging.«

Im Unterschied zu solchen zufälligen Naturereignissen haben die Experimentatoren die Vorgänge im Beschleuniger genau unter Kontrolle. Außerdem setzt der Zusammenstoß zweier Protonen eine verhältnismäßig geringe Energie frei – sie entspricht etwa dem Zusammenprall zweier Mücken. Dennoch: In der Summe kommt einiges zusammen. Betrachtet man die Gesamtenergie aller im Ring kreisenden Teilchen, so entspricht sie der Bewegungsenergie eines 40-Tonnen-Lkws, der mit über vierhundert Sachen dahinbraust. Gebändigt werden die gewaltigen Kräfte ausschließlich von den Magneten. »Getestet haben wir alle Dipole bis zu einer Feldstärke von neun Tesla«, berichtet Evans. Damit hat der Beschleuniger etwas Spielraum, um die Partikel auf noch größeren Schwung zu bringen.

Wenn es nach Evans ginge, könnte die Maschine schon im Sommer nächsten Jahres starten. Gleich bei Inbetriebnahme wollen auch die Experimentatoren mit ihren Messungen beginnen – neben Atlas und CMS gehören dazu zwei weitere Kollaborationen. Jürgen Schukraft vom Nachweisgerät Alice versucht beispielsweise mit seinem etwa tausend Kopf starken internationalen Team das so genannte Quark-Gluon-Plasma zu erforschen.

Künstliche Zustände wie kurz nach dem Urknall

Das ist ein Materiezustand, der Sekundenbruchteile nach dem Urknall existiert haben muss; dabei bewegten sich die Quarks und deren Austauschteilchen, die Gluonen, mehr oder weniger unabhängig voneinander. Um diese Phänomene zu studieren, schleudern die Physiker möglichst viele Protonen und Neutronen gegeneinander. Im LHC werden deswegen etwa vier bis sechs Wochen pro Jahr vollständig ionisierte Bleistrahlen mit einer Energie von etwa 1150 Teraelektronenvolt umlaufen.

Schukraft träumt davon, eine Zustandsgleichung für das Quark-Gluon- ▷

spezielle Nachweisgeräte für Myonen. Diese massereichen Verwandten der Elektronen durchdringen das Innere der viele tausend Tonnen schweren Detektoren mit großer Leichtigkeit.

Eine Besonderheit von Atlas ist ein weit außen liegendes Toroidfeld – ein von gewaltigen Ringspulen erzeugtes Magnetfeld –, mit dem die Experimentatoren die Spuren der Myonen mit einer Genauigkeit von 50 Mikrometern vermessen können. Diese Präzision ist deshalb so wichtig, weil die Physiker erwarten, dass das postulierte Higgs-Teilchen mit großer Wahrscheinlichkeit in vier Myonen zerfällt.

Prinzipiell gleicht Alice den beiden Universaldetektoren Atlas oder CMS, nur dass es für die Analyse der hochkomplexen Zusammenstöße von ionisierten Bleiatomen optimiert ist. Bei jedem derartigen Zusammenprall werden rund 10000 neue Teilchen erzeugt; bei einer Proton-Proton-Kollision sind es dagegen nur einige Dutzend. Um alle Flugbahnen im Zentrum von Alice möglichst präzise vermessen zu können, ist das Innere äußerst filigran gehalten, auch wenn das Experiment mit rund 10000 Tonnen Gewicht, 16 Meter Höhe und 26 Meter Länge größer und schwerer ist als CMS und Atlas. Der massivste Teil ist das außen liegende Rückflussjoch aus Eisen für den normal leitenden Magneten. Vormals gehörte es zum Nachweisgerät L3 des Lep-Beschleunigers. Die Kollaboration von Alice hat es dem Vorbesitzer und Nobelpreisträger Samuel Ting für einen symbolischen Schweizer Franken bei einem guten Essen abgekauft. Mit rund 7000 Tonnen wiegt es allein etwa so viel wie der Eiffelturm.

Im Gegensatz zu den anderen Experimenten ist LHC-b asymmetrisch konstruiert. Das liegt daran, dass die dort untersuchten B-Mesonen verhältnismäßig leicht sind und deshalb vorzugsweise in Strahlrichtung davonfliegen. LHC-b sieht daher beinahe aus, als hätte man aus einem der großen Nachweisgeräte ein breites Tortenstück herausgeschnitten.

Der CMS-Detektor (links) wird in der Montagehalle im französischen Cessy zusammengebaut. Gesamtansicht des Atlas-Detektors (rechts); die acht Toroidmagnete sind bereits installiert.

▷ Gemisch aufstellen zu können. »Den Phasenübergang vom Plasma zu den als Hadronen gebundenen Quarks und Gluonen kann man sich vorstellen wie das Gefrieren von Wasser zu Eis«, erläutert Schukraft: »Da rechnet auch niemand mit den Maxwell-Gleichungen oder gar mit der Quantenchromodynamik, sondern einfach mit statistischer Mechanik.«

Die größte Fabrik für B-Mesonen

Der Japaner Tatsuya Nakada interessiert sich für die Besonderheiten der Antimaterie. Weil er einige Jahre in Heidelberg lebte, spricht er perfekt Deutsch. Nun arbeitet er als Professor in Lausanne. Mit einem Budget von 75 Millionen Schweizer Franken und einem Team aus 500 Leuten steht er dem kleinsten Experiment des LHC vor. Hingegen kommen die beiden großen Kollaborationen Atlas und CMS auf jeweils 1500 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sowie auf einen Etat von über 500 Millionen Euro. Nakada hat es insbesondere auf seltene Mesonen abgesehen, die ein so genanntes Strange-Quark sowie ein Bottom-Quark enthalten. »Rein statistisch wird der LHC rund hundertmal mehr von diesen Teilchen erzeugen als die Beschleuniger KEK-b in Japan oder SLAC in Amerika, die sich stolz B-Meson-Fabriken nennen«, sagt Nakada.

Ihn interessieren die unterschiedlichen Zerfälle von Materie und Antimaterie – ein Phänomen, das die Physiker als CP-Verletzung bezeichnen (siehe »Künstliche kalte Antimaterie« von Graham P. Collins, Spektrum der Wissenschaft 1/2006, S. 62). Diese Diskrepanz ist bei einigen leichten Teilchen bereits recht gut nachgewiesen. Bei einer Sorte von schweren B-Mesonen, die wegen ihrer hohen Masse im Wesentlichen am LHC erzeugt werden können, soll

15-mal das World Wide Web

Wie wollen die Forscher aus der Datenfülle, die bei den Zusammenstößen der Protonen anfällt, die bedeutsamen Ereignisse herausfischen? »Wir rechnen mit ungefähr einer Milliarde Kollisionen pro Sekunde«, sagt Peter Jenni, Sprecher des Nachweisgeräts Atlas. »Davon behalten wir weniger als einhundert, weil wir darin neue physikalische Phänomene vermuten.« – »Uns bleiben maximal zwei Mikrosekunden, um zu entscheiden, ob wir die Daten abspeichern wollen«, ergänzt Thomas Trefzger von der Universität Mainz. Er arbeitet am so genannten Triggerlevel 1 von Atlas, der ersten Entscheidungsstufe, an der die Signale gefiltert werden. Danach folgen noch zwei weitere Entscheidungsebenen. »Obwohl wir die Informationsdichte so stark verringern, müssen wir noch etwa 150 Gigabyte pro Sekunde verarbeiten«, meint der Mainzer Physiker. Selbst Deutschlands größter Internetknoten in Frankfurt am Main muss mit weniger als der Hälfte dieses Datenaufkommens fertig werden.

Zusammen mit den anderen drei Nachweisgeräten kommt eine ungeheure Flut an Bits und Bytes zusammen. »Pro Jahr erzeugen die LHC-Experimente rund 15 Petabyte an Daten«, schätzt Hannelore Hämmerle vom Cern-Rechenzentrum. Nach ihrer Kenntnis beträgt die Textmenge im gesamten World

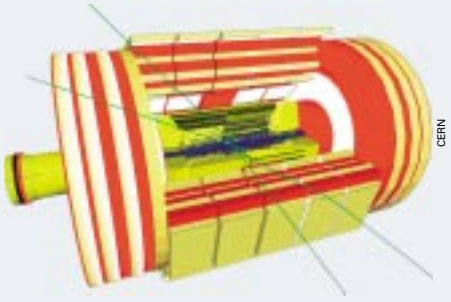
Wonach suchen die Elementarteilchenphysiker?

Higgs-Boson

Ganz oben auf der Liste der erhofften Entdeckungen steht das Higgs. Es soll zu einem weltumspannenden Hintergrundfeld gehören, das alle Materieteilchen spüren. Vorgebracht wurde die Idee 1964 vom Briten Peter Higgs. Demnach ist das Higgs-Boson elektrisch neutral und hat den Spin null. Experimente am Lep – dem Vorgänger des LHC – sowie astronomische Beobachtungen lassen vermuten, dass die Higgs-Masse zwischen 114 und 250 GeV (Giga-, das heißt Milliarden Elektronenvolt) liegt, also im Messbereich des neuen Beschleunigers.

Supersymmetrische Teilchen

Die Theoretiker sind den Experimentatoren derzeit gedanklich weit voraus. Aus Symmetriegründen postulieren sie etwa, dass jedem Fermion – Teilchen mit halbzahligem Spin – ein Boson, das heißt ein ganzzahliger Partner, zugeordnet ist und umgekehrt. Diese Supersymmetrie sorgt dafür, dass die Kopplungskonstanten der starken, der schwachen und der elektromagnetischen Kraft bei sehr hohen Energien dem gleichen Wert zustreben. Die Theorie erfordert mindestens fünf Higgs-Bosonen. Supersymmetrische Teilchen sind zugleich aussichtsreiche Kandidaten für die Dunkle Materie, aus der rund ein Viertel unseres Universums bestehen soll. Optimistische Physiker verbreiten das Bonmot: Gut die Hälfte aller supersymmetrischen Teilchen sei ja bereits gefunden – die Quarks, die Leptonen und die meisten Kraftaustauschteilchen …



Diese Simulation stellt einen Wunschtraum dar: Der CMS-Detektor weist ein Higgs-Boson nach, das in vier Mesonen zerfällt.

Quark-Gluon-Plasma

Das Quark-Gluon-Plasma ist ein eigener Materiezustand, bei dem Quarks und Gluonen nicht wie üblich zu Hadronen verkittet sind, sondern sich frei bewegen. Diesen Phasenübergang kann man sich vorstellen wie die Umwandlung von Eis zu Wasser oder Dampf. Nur »verdunsten« Hadronen erst bei Temperaturen weit oberhalb einer Billion Kelvin – bei Hitzegraden wie kurz nach dem Urknall. Das wollen Physiker am Nachweisgerät Alice studieren, indem sie das »Schmelzen« von Hadronen wie dem J/Psi-Teilchen beobachten. Erst kürzlich deuteten Versuche am Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) des amerikanischen Brookhaven National Laboratory an, dass sich das Quark-Gluon-Plasma kurz vor der Hadronisierung tatsächlich wie eine Art Flüssigkeit verhält. Am Cern hoffen die Physi-

Wide Web – das übrigens 1989 von Tim Berners-Lee am Cern entwickelt wurde – weniger als ein Petabyte (eine Billiarde Bytes). Würde man die Nullen und Einsen, die die Experimente ausspucken, auf handelsübliche CDs brennen und diese übereinander stapeln, ergäbe das einen Turm von zwanzig Kilometer Höhe. »Um die Informationsflut zu verarbeiten, benötigen wir rund 100 000 Personal Computer«, meint Hämmerle.

Supercomputer sucht man auf dem Forschungsgelände vergeblich. Die Informatiker setzen auf verteiltes Rechnen im so genannten Grid. Die Idee stammt von den amerikanischen Informatikern Carl Kesselman und Ian Foster. Im Gegensatz zu Projekten wie seti@home, das nach außerirdischem Leben sucht, sind die am Grid angeschlossenen Rechner nicht nur Dienstempfänger. Jeder Teilnehmer kann Rechenleistungen aus dem gesamten Netz anfordern. So entsteht ein weltumspannender, virtueller Supercomputer, der auf paralleles Arbeiten optimiert ist.

»Derzeit stehen bei uns 2500 vernetzte, handelsübliche PCs«, sagt Bernd Panzer-Steindel, Manager der Computerfarm am Cern. Bald sollen es 5000 sein. »Das einzig Besondere ist, dass sie mit je zwei Prozessoren ausgestattet sind«, erläutert er. An das Cern angeschlossen sind bereits 200 Computerzentren mit ungefähr 15 000 Prozessoren.



GERHARD SAMULAT

Mehrere tausend Personal Computer arbeiten vernetzt, um die bei den Experimenten anfallenden Datenfluten zu bewältigen.

dieser Effekt noch deutlicher zu Tage treten. Da das Bottom-Quark virtuell – wie die Physiker sagen – in ein wesentlich schwereres Top-Quark oder – so zumindest die Hoffnung der Arbeitsgruppe von Nakada – in ein noch schwereres supersymmetrisches Teilchen zerfallen kann, ließen sich auf diese Art Hinweise auf eine neue Physik jenseits des Standardmodells der Elementarteilchenphysik gewinnen.

Virtuelle Prozesse sind in der klassischen Physik eigentlich verboten, weil sie das Grundgesetz der Energieerhaltung verletzen; die Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation der Quantenmechanik erlaubt jedoch kurzzeitige Ausnahmen, die aber augenblicklich wieder verschwinden müssen.

Alle Wissenschaftler, die an den Experimenten am Cern beteiligt sind, haben also sehr genaue Vorstellungen von dem, was zu erwarten ist. Doch viele meinen: Forschung wird erst dann spannend, wenn Unerwartetes eintritt. Das ist beim LHC keinesfalls ausgeschlossen. Schließlich dringt der Beschleuniger in bislang unerreichte Energieregionen vor.

So oder so finden die Ergebnisse mit Sicherheit Gehör beim Nobelpreiskomitee in Stockholm. Aber die Wissenschaftler am Cern geben sich bescheiden. »Zunächst einmal wäre Peter Higgs an der Reihe«, meint beispielsweise Thomas Trefzger, der für die Universität Mainz am Atlas-Experiment beteiligt ist. Da sind sich alle einig – vorausgesetzt, die Experimente am LHC entdecken das von dem britischen Physiker postulierte Teilchen, das den Elementarteilchen ihre Masse verleiht. ◁

ker nun, eine Zustandsgleichung für diese exotische Substanz aufstellen zu können.

B_s-Mesonen-Zerfälle

Physiker konnten bereits zeigen, dass sich Materie und Antimaterie unterschiedlich verhalten. Sie bezeichnen diese Symmetriebrechung als CP-Verletzung. Der Effekt sollte sich besonders gut an so genannten B_s-Mesonen beobachten lassen; diese Teilchen enthalten jeweils ein Bottom- sowie ein Strange-Quark respektive deren Antiquarks. An den Zerfällen solcher Exoten sind oft virtuelle Prozesse beteiligt, bei denen unter kurzzeitiger Umgehung der Energieerhaltung schwere Partikel wie das Top-Quark oder vielleicht sogar supersymmetrische Teilchen entstehen. Gelingt es den Nachweisgeräten Atlas oder CMS, die Masse dieser supersymmetrischen Objekte zu bestimmen, so kann das Forscherteam um Tatsuya Nakada vom Detektor LHC-b durch Vergleich mit eigenen Messungen die Kopplungskonstanten zwischen den elementaren Bausteinen errechnen. Diese Bestimmungsgrößen fassen die Physiker in einer Matrix zusammen, deren Elemente die jeweilige Wahrscheinlichkeit angeben, mit der sich die elementaren Bausteine ineinander umwandeln. Mit diesem Wissen lassen sich die Ereignisse bei Teilchenkollisionen exakt interpretieren – und die Forscher können nach Abweichungen suchen, die auf unbekannte Phänomene hindeuten.

Neue Physik

Jede neue Beschleunigergeneration verspricht Überraschungen. Zwar glauben die Physiker ziemlich genau zu wissen, was sie bis zu einer Kollisionsenergie von etwa einem Teraelektronenvolt sehen werden. Doch der LHC geht weit darüber hinaus. Wahrscheinlich wird die neue Maschine exotische Phänomene entdecken und manche Spekulationen widerlegen, andere bestätigen.



Gerhard Samulat ist Diplomphysiker und und lebt als freier Wissenschaftsjournalist in Wiesbaden.

AUTOR UND LITERATUR

Die Quantenrevolution. Neue Nachrichten aus der Teilchenphysik. Von Brigitte Röthlein. dtv, Februar 2004

Der Large Hadron Collider. Von Chris Llewellyn Smith in: Spektrum der Wissenschaft 9/2000

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.