

Der Large Hadron Collider (LHC)

Die größte Maschine der Welt auf der Suche nach den kleinsten Teilchen des Universums

Markus Friedl, Institut für Hochenergiephysik

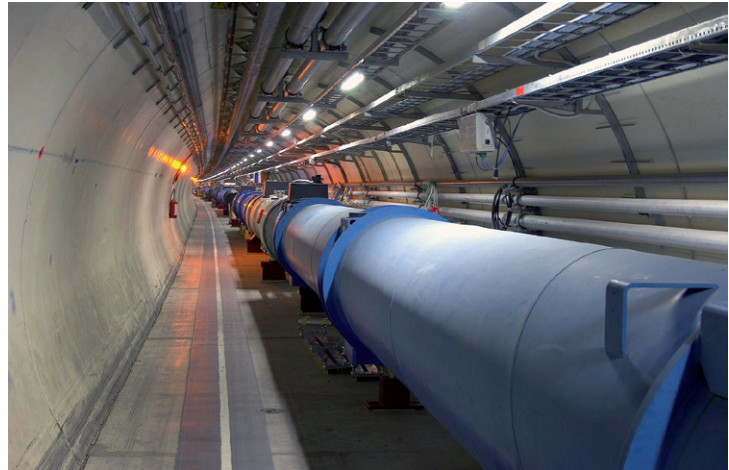
In den Medien wurde in den vergangenen Wochen ungewöhnlich viel über den neuen Beschleuniger am CERN bei Genf berichtet, vor allem über einen technischen Defekt und noch viel mehr über schwarze Löcher. Doch alles der Reihe nach, bevor wir auf diese Punkte zu sprechen kommen.

Die Ziele des LHC

Am CERN geht es um Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Teilchenphysik. Woraus ist die Materie (bzw. Antimaterie) aufgebaut, was sind deren elementare Bestandteile und welche Kräfte wirken zwischen diesen. In den letzten Jahrzehnten hat sich in der Teilchenphysik das so genannte Standardmodell etabliert, das die Elementarteilchen und die fundamentalen Kräfte beschreibt. Nach und nach wurden theoretisch vorhergesagte Teilchen auch experimentell nachgewiesen, und nunmehr verbleibt im Rahmen des Standardmodells nur noch ein – allerdings wesentlicher – Baustein, nämlich das Higgs-Teilchen. Dieses ist deshalb von großer Bedeutung, da es erst allen anderen Teilchen deren Masse verleiht.

Der Large Hadron Collider ist so gebaut, dass das Higgs-Teilchen gefunden werden muss, sofern es wirklich so existiert, wie von der Theorie vorhergesagt. Dies würde vermutlich den Nobelpreis für den britischen Theoretiker Peter Higgs, der dieses Teilchen bereits 1964 postulierte, bedeuten. Falls jedoch das Higgs-Teilchen am LHC nicht gefunden wird, müsste das Standardmodell über Bord geworfen und eine neue Theorie aufgestellt werden – das wäre ein ziemlich heftiger Paukenschlag in der Teilchenphysik.

Die Suche nach dem Higgs-Teilchen ist freilich nicht die einzige Aufgabe des Large Hadron Colliders. Bei bislang unerreichten Energien erhoffen sich die Physiker auch Erkenntnisse im Bereich der derzeit spekulativen Supersymmetrie, liebevoll SUSY abgekürzt, sowie über die mögliche Existenz von Extra-Dimensionen zu gewinnen. Ein weiteres Forschungsziel ist die Untersuchung der geringen Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie, die dafür verantwortlich sein soll, dass wir heute in einer Welt aus Materie leben, obwohl beim Urknall gleich viel von beiden entstanden sein müsste. Ein anderes Thema mit kosmologischer Relevanz ist die Suche nach dunkler Materie und



Blick in den ringförmigen LHC-Tunnel. Aufgrund seiner enormen Größe – 27km Umfang – sieht man nur eine geringe Krümmung.

dunkler Energie, die zusammen etwa 96% der Masse im Universum ausmachen.

Große Maschinen für den Blick in kleine Strukturen

Um Strukturen sichtbar zu machen, die man mit freiem Auge nicht sehen kann, braucht man technische Hilfsmittel, zum Beispiel ein optisches Mikroskop, mit dem man bis etwa einem Tausendstel Millimeter kommt. Noch kleinere Dinge können grundsätzlich mit Licht nicht mehr gesehen werden, weil dessen Wellenlänge das Limit für die erzielbare Auflösung ist. Abhilfe schafft etwa ein Kernspinresonanzspektrometer – klingt klobig und ist es auch. Etwas kurios mutet die Tatsache an, dass die Maschinen immer größer werden, je kleinere Strukturen man untersuchen will – am Ende dieser Reihe steht der LHC.

Der Large Hadron Collider – sozusagen ein riesiges Mikroskop – ist der größte Teilchenbeschleuniger der Welt und in einem kreisförmigen, 27 Kilometer langen Tunnel rund 100 Meter unter der Erde eingebaut. Er dient dazu, Pakete von Protonen (und später auch Blei-Atomkernen) in beiden Richtungen auf 99,999 999% der Lichtgeschwindigkeit zu beschleunigen und frontal zur Kollision zu bringen. Dabei entstehen aus der Bewegungsenergie, mit der die Protonen (bzw. Bleikerne) zusammenprallen, viele neue Teilchen, die in der Natur nicht vorkommen, weil sie nur Bruchteile von Sekunden existieren und dann zu anderen Teilchen zerfallen. Aus der Beobachtung dieser Teilchen und dem Vergleich mit theoretischen Vorhersagen gewinnt man Erkenntnisse über den Aufbau der Materie.

Große und kleine schwarze Löcher

Und da wären wir auch schon beim medienwirksamen Thema der schwarzen Löcher. Kritiker behaupten, solche könnten bei den besagten Kollisionen entstehen und dann die ganze Erde verschlingen. Zunächst sollte man dabei festhalten, dass die Erzeugung schwarzer Löcher keineswegs gesichert ist, sondern an diverse Voraussetzungen gebunden ist, die bislang rein theoretischer Natur sind, etwa das Vorhandensein von Extra-Dimensionen. Zweitens darf man sich solche mikroskopischen schwarzen Löcher nicht wie gefräßige Monster im All vorstellen (wovon im Übrigen eines im Zentrum der Milchstraße vermutet wird), sondern als winzig kleine Strukturen, die ja nur aus wenigen Elementarteilchen gebildet werden. Nach Stephen Hawking nehmen schwarze Löcher nicht nur Materie auf, sondern strahlen auch Energie ab – umso mehr, je kleiner sie sind. Das führt dazu, dass kleine schwarze Löcher gar nicht stabil sein können, sondern in kürzester Zeit zerstrahlen. Die Grenze zwischen „kleinen“ und „großen“ schwarzen Löchern in diesem Sinne bildet in etwa die Masse des Mondes, also ein Objekt, das völlig jenseits dessen ist, was jemals in einem irdischen Teilchenbeschleuniger erzeugt werden kann.

Folglich sind mikroskopische schwarze Löcher, wie sie vielleicht am LHC entstehen, natürlich klein. Sie würden bereits nach winzigen Bruchteilen einer Sekunde wieder zerfallen und somit gar keine Zeit haben, Masse anzuhäufen. Es gibt aber noch einen anderen, viel plausibleren Grund für die Unbedenklichkeit. Seit Jahrmilliarden prasseln unaufhörlich aus dem Weltall kommende Teilchen – vorwiegend Protonen aus der Milchstraße – auf die Erde herab und stoßen in zehn bis zwanzig Kilometern Höhe mit Luft-Atomen zusammen. Auch bei diesen Kollisionen entstehen

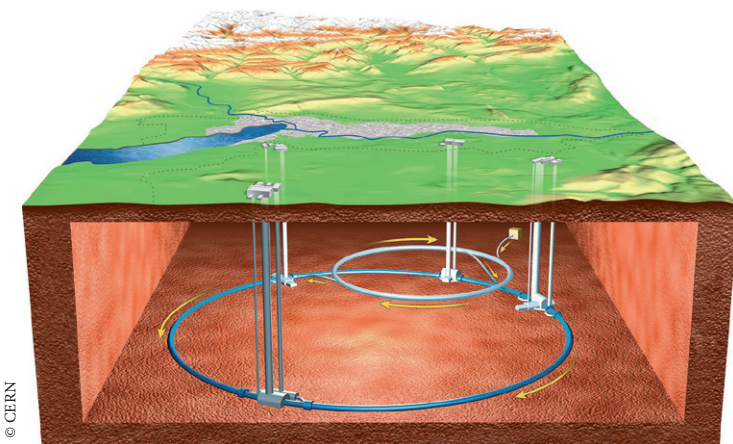
jede Menge neue Teilchen, die meist recht kurzlebig sind. Wie der geneigte Leser bereits erkannt hat, passieren in der äußeren Atmosphäre genau die gleichen Dinge wie auch am LHC, und das schon seit Urzeiten und in wesentlich größerem Ausmaß als dies je in einem irdischen Labor der Fall sein wird. Entstünden dabei wirklich gefährliche schwarze Löcher, wäre dies wohl schon passiert und wir könnten an dieser Stelle nicht mehr darüber nachdenken.

An dieser Stelle mag man sich fragen, wozu man denn überhaupt einen großen, teuren Beschleuniger braucht, wenn es doch die Kollisionen auch gratis in der Atmosphäre gibt. Zum einen ist es nicht sehr praktisch, in derartiger Höhe physikalische Messungen durchzuführen. Außerdem sind dort so ziemlich alle Parameter (etwa Richtung, Energie, Häufigkeit usw.) dem Zufall überlassen, während die Kollisionen am LHC unter exakt kontrollierten Bedingungen stattfinden. In der Tat gibt es auch Experimente, die sich mit der kosmischen Strahlung befassen, allerdings mit der grundsätzlichen Einschränkung unbekannter Anfangsbedingungen. Entdeckt wurde die Höhenstrahlung übrigens 1912 vom Österreicher Victor Hess, der dafür mit dem Nobelpreis ausgezeichnet wurde.

LHC – eine Ansammlung von Weltrekorden

Nach diesem Exkurs zurück zum Large Hadron Collider: Am 10. September 2008 wurde der Beschleuniger erstmalig in Betrieb genommen, und das bedeutet, dass zigtausende Bauteile und Parameter so aufeinander abgestimmt werden müssen, um die Protonen exakt auf Bahn zu halten. In erstaunlich kurzer Zeit – schon nach wenigen Stunden – gelang es, diese tatsächlich um den ganzen Ring zu schicken. Wie alle Körper besitzen auch Protonen eine Trägheit und würden sich am liebsten geradeaus in unveränderter Richtung bewegen, wenn man sie ließe. Mehr als Tausend supraleitende Magnete sorgen dafür, dass die Protonen ständig von der Geraden abgelenkt werden und sich daher kreisförmig bewegen.

In vielerlei Hinsicht ist der LHC ein technisches Wunderwerk und bietet einige Superlative, die man vielleicht im ersten Moment gar nicht erwarten würde. Die supraleitenden Magnete werden mit rund 120 Tonnen flüssigem Helium auf $-271,3^{\circ}\text{C}$ gekühlt, das ist nur 1,9 Grad über dem absoluten Nullpunkt und somit kälter als im Weltall. Damit ist der LHC auch mit Abstand der größte Kühltank der Welt. Dort, wo die Protonen-Pakete kollidieren, ist es jedoch 100 000 Mal heißer als im Inneren der Sonne, freilich in einem winzig kleinen Volumen. In den Strahlrohren, in denen die Protonen im



© CERN

Der LHC-Teilchenbeschleuniger befindet sich rund 100 Meter unter der Erde zwischen Genfer See und Jura-Gebirge. An den vier Kollisionspunkten befinden sich große Experimentierhallen. Der kleinere Ring namens SPS wird als Vorbeschleuniger genutzt.

Kreis sausen, herrscht ein extremes Vakuum von 10-13 bar – ein Zehntel des Druckes auf dem Mond. Nachdem sich die Protonen praktisch mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, schaffen sie mehr als 11 000 Umdrehungen pro Sekunde.

...und was dabei schief gehen kann

Nach diesen Schwindel erregenden Fakten noch ein paar Worte zu dem technischen Problem, das den LHC bereits am 19. September lahm gelegt hat. Unter den zigtausenden Bauteilen, deren perfektes Zusammenspiel erst den Betrieb ermöglicht, gab es leider eine schlechte elektrische Verbindung zwischen zwei Magneten. Das bewirkte eine lokale Erhitzung, die in weiterer Folge zum schlagartigen Zusammenbruch der Supraleitung in den umgebenden Magneten, dem Verdampfen mehrerer Tonnen flüssigen Heliums und damit auch zu mechanischen Erschütterungen führte. In einem herkömmlichen Beschleuniger ohne Supraleitung und den damit verbundenen Auswirkungen wäre solch ein Defekt leicht an einem Tag zu reparieren, nicht aber am LHC. Denn dort muss man, um zur schadhafte Stelle zu gelangen, zunächst den betreffenden Abschnitt auf Zimmertemperatur bringen, und das dauert aufgrund der großen thermischen Masse und der damit verbundenen Trägheit etwa drei Wochen. Gleiches gilt natürlich für den umgekehrten Vorgang des Abkühlens.

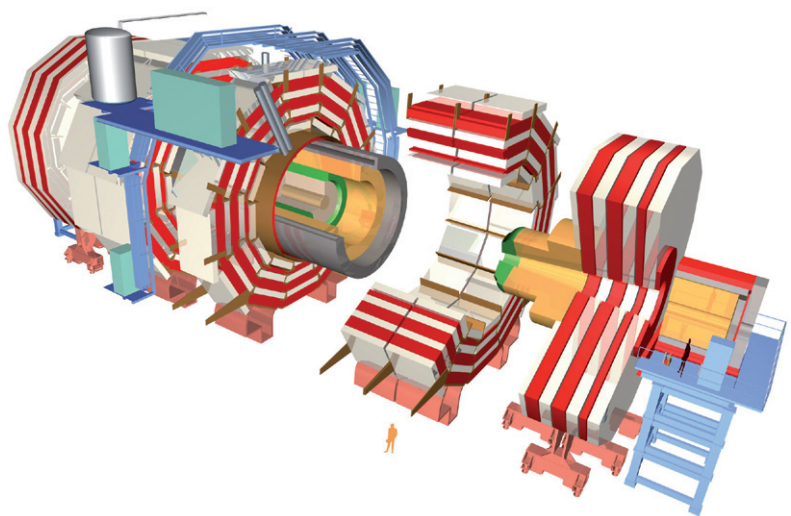
Außerdem gibt es am CERN jeden Winter mehrere Monate, in denen die Beschleunigeranlagen abgeschaltet werden, weil der Strom in dieser Jahreszeit teuer ist. Insofern kommt also das Problem zu einem günstigen Zeitpunkt, denn dadurch ist ausreichend Zeit für sorgfältige Prüfung, Reparatur bzw. Austausch aller betroffenen Komponenten. Das genaue Ausmaß ist noch nicht bekannt. Ersten Berichten zufolge sind etwa zwei Dutzend Magnete betroffen, die getauscht werden müssen, wofür genug Ersatzteile vorhanden sind.

Das CMS-Experiment

Nun möchte ich noch auf eines der vier großen Experimente am LHC zu sprechen kommen, an dem das Institut für Hochenergiephysik beteiligt ist. Es nennt sich Compact Muon Solenoid (CMS), hat einen Durchmesser von 15 Metern, eine Länge von 21 Metern und wiegt mit seinen 12 500 Tonnen mehr als der Eiffelturm. CMS ist in zylindrischen Lagen rund um einen der vier Kollisionspunkte am LHC-Ring angeordnet und zusätzlich mit so genannten

Endkappen verschlossen, sodass eine hermetische Anordnung von Detektoren entsteht, in der alle Teilchen aus den Kollisionen vermessen werden.

Berechtigterweise darf man sich fragen, wie man so einen Koloss als „kompakt“ bezeichnen kann. Damit ist gemeint, dass die einzelnen Detektorelemente dicht aneinandergereiht sind, ohne dass nennenswerte Lücken dazwischen verbleiben. Dies unterscheidet CMS vom ATLAS-Experiment (A Toroidal LHC Apparatus), das zwar noch größer, aber nur etwa halb so schwer ist, weil es sozusagen viel Luft enthält. Anders ausgedrückt: ATLAS würde auf dem Wasser schwimmen, CMS jedoch untergehen.



Das CMS-Experiment besteht aus zwiebelschalen-artig angeordneten Detektoren, um alle Teilchen zu erfassen, die bei Kollisionen von Protonen im Zentrum entstehen. Es hat einen Durchmesser von 15 Metern und ist 21 Meter lang.

40 Millionen Mal pro Sekunde kollidieren Protonen-Pakete im Zentrum des CMS-Experiments. Obwohl jedes Paket 100 Milliarden Protonen enthält, gibt es im Mittel nur 25 tatsächliche Kollisionen, weil der Strahl dort zwar so fokussiert ist, dass er dünner als ein menschliches Haar ist, aber das für die Protonen immer noch riesengroß ist und dadurch die meisten ihre Reise ungestört fortsetzen. Aus jeder echten Kollision entstehen etwa 20 neue Teilchen, die je nach Art und Energie unterschiedlich viele Lagen des Detektors durchdringen.

Experiment mit Wiener Beteiligung

Das Institut für Hochenergiephysik (HEPHY) ist in drei Bereichen am CMS-Experiment beteiligt:

- am Tracker mit Silizium-Detektoren und Ausleseelektronik,
- am Trigger mit Selektionslogik und Elektronik,
- an der Datenauswertung mit Methoden zur Re-

konstruktion von Teilchenspuren und Wechselwirkungspunkten.

Der so genannte Tracker befindet sich unmittelbar um den Kollisionspunkt und besteht aus insgesamt zwölf Lagen von Silizium-Pixel- und -Streifen-Detektoren mit einer aktiven Gesamtfläche von über 200 Quadratmetern – wieder ein Weltrekord. Diese messen die Spuren von geladenen Teilchen. Weiter außen befinden sich so genannte Kalorimeter zur Bestimmung der Teilchenenergien. Besonders hervorzuheben ist der größte supraleitende Magnet der Welt mit einem Durchmesser von sechs Metern und einer Länge von zwölf Metern. In seinem Inneren erzeugt er ein Magnetfeld von 4 Tesla – das ist etwa 100 000 Mal stärker als das Erdmagnetfeld. Dieses Magnetfeld bewirkt, dass geladene Teilchen auf gekrümmte Bahnen gezwungen werden, womit man deren Impuls und die Polarität der Ladung bestimmen kann. Der größte Sub-Detektor von CMS und Namensgeber sind die außen liegenden Müon-Kammern.

Die Nadel im Heuhaufen

Würden die insgesamt etwa 100 Millionen Mess-Elemente tatsächlich bei jeder Kollision Daten liefern, wäre es schon unmöglich, diese ungeheure Datenflut abzuspeichern, geschweige denn später auszuwerten. Daher trifft der so genannte Trigger bereits online blitzschnell für jede Kollision die Entscheidung, ob es sich dabei um ein physikalisch interessantes Ereignis handelt oder ob lediglich altbekannte Dinge stattgefunden haben, die eigentlich ohnehin niemanden interessieren. In mehreren Stufen kann damit die Rate der letztlich abgespeicherten Ereignisse auf wenige hundert pro Sekunde reduziert werden.

Man mag sich vielleicht fragen, warum denn eigentlich 40 Millionen Mal pro Sekunde Kollisionen stattfinden müssen, wenn doch bloß ein paar hundert davon interessant sind. Die Antwort ist simpel: Die Ereignisse und Zerfälle, die sich bei den Kollisionen abspielen, unterliegen dem Zufall und finden mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten statt. Gerade die interessanten Dinge kommen dabei nur sehr selten vor, so erwartet man etwa gerade mal ein Higgs-Teilchen pro Tag – bei 40 Millionen Kollisionen pro Sekunde. Deshalb muss der Trigger hier sozusagen die Nadel im Heuhaufen herausuchen.

GRID – ein weltweites Rechenzentrum

Trotz Selektion entstehen immer noch gewaltige Datenmengen. Würde man ein Jahr lang den Output der vier Experimente am LHC auf CDs brennen, ergäbe das einen Stapel von 20 Kilometern Höhe. Man kann sich leicht

vorstellen, dass für die Auswertung dieser Datenflut ein riesiges Computersystem vonnöten ist. Dabei handelt es sich um das GRID, das – weltweit verteilt in über 200 Rechenzentren – insgesamt 200 000 Prozessoren umfasst. Die Rohdaten werden dabei, ausgehend vom CERN, mehr oder weniger zufällig dorthin geschickt, wo gerade Kapazitäten frei sind. Dort werden die Daten prozessiert und die Ergebnisse schlussendlich wieder ans CERN zurückgeschickt. Ein solches Rechenzentrum mit immerhin 1300 CPUs steht am Institut für Hochenergiephysik in Wien und bearbeitet bereits Daten aus Simulationen.

Der LHC wird während seiner Laufzeit von zehn Jahren vor allem die Physiker mit der Daten-Analyse beschäftigen. Obwohl die Maschine noch nicht einmal richtig angelaufen ist, denken vor allem Ingenieure und Techniker bereits über Verbesserungen und mögliche Erweiterungen nach. Vorerst bleibt aber mit Spannung abzuwarten, welche Entdeckungen uns der LHC in den nächsten Jahren bringen wird.

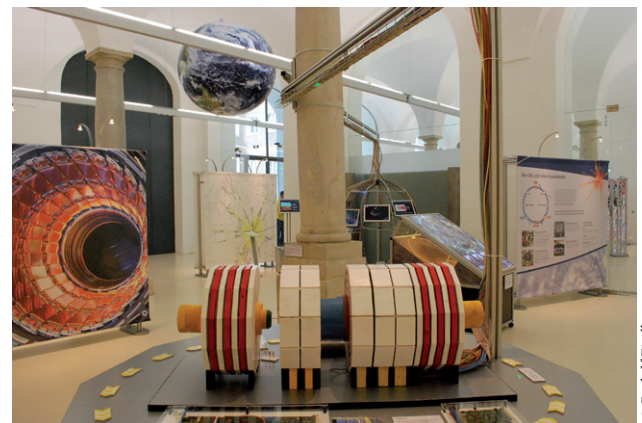
Weiterführende Links:

<http://www.cern.ch>

<http://www.hephy.at>



Nobelpreisträger Carlo Rubbia bei der LHC-Eröffnungsfeier am 14.10.2008



Blick in die LHC2008-Ausstellung in der Aula der Wissenschaften