

Strahlzeit am Genfer Hadronencollider

Erste Ergebnisse am Large Hadron Collider (LHC) nach dem Neustart zeigen, dass der gigantische Beschleuniger nun einwandfrei funktioniert – beste Voraussetzungen für die erhofften großen Entdeckungen in der Teilchenphysik.

Von Georg Wolschin

Als im Dezember letzten Jahres die Sprecher der LHC-Experimente die ersten Ergebnisse vom Großen Hadronencollider am Teilchenphysik-Forschungszentrum CERN bei Genf vorstellten, begann Fabiola Gianotti ihren Vortrag erleichtert mit den Worten: »Nach 20 Jahren Simulation werde ich jetzt nur Daten zeigen.« Das tat sie dann mit Begeisterung. Ihr Bericht betraf Atlas, das größte der sechs LHC-Experimente, an dem allein 2900 Wissenschaftler – davon 1000 Studenten – von 172 Institutionen aus 37 Ländern mitwirken. Gianottis Kollegen

von den anderen Versuchsanordnungen zeigten sich ähnlich euphorisch. Es herrscht Aufbruchstimmung am CERN, und bis jetzt funktioniert alles blendend.

Bekanntlich war das nicht immer so. Kurz nach dem Start des größten physikalischen Projekts der Menschheitsgeschichte im September 2008 ereignete sich durch eine fehlerhafte elektrische Verbindung zwischen zwei supraleitenden Magneten ein Unfall, bei dem etwa sechs der 96 Tonnen superflüssigen Heliums, die zur Kühlung der Magnete auf 1,9 Kelvin dienen, explosionsartig entwichen. Der Schaden war groß. 39 der 1232 Dipolmagnete sowie 14 Quadru-

pole mussten erneuert oder repariert werden. Es dauerte mehr als ein Jahr, bis die Anlage mit zusätzlichen Sicherheitseinrichtungen am 20. November 2009 wieder in Betrieb gehen konnte.

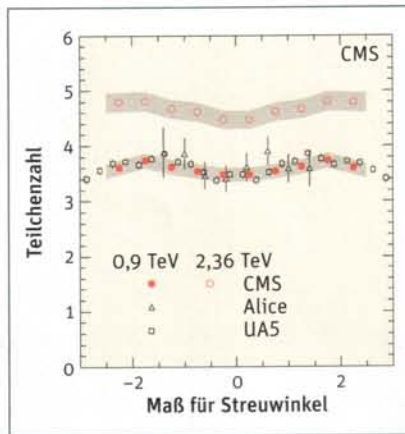
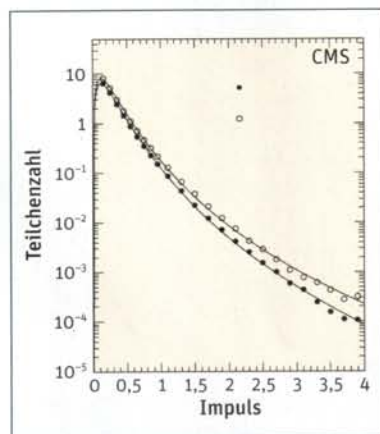
Diesmal lief alles glatt. Nach nur drei Tagen gab es erste Proton-Proton-Kollisionen bei der durch den Vorbeschleuniger bestimmten Energie von 0,9 Billionen Elektronvolt (Teraelektronvolt, TeV). Mussten die Wissenschaftler zum Test der Detektoren bis dahin mit hochenergetischen Teilchen aus der kosmischen Strahlung vorliebnehmen, konnten sie jetzt endlich »echte« Kollisionen messen, nach der Analyse der Daten im weltweiten Computer-Grid die abgelaufenen physikalischen Ereignisse rekonstruieren und sie mit den Ergebnissen von älteren Messungen und Simulationsrechnungen vergleichen. Zehn Tage nach Strahlzeitbeginn gelang es auch, den Effekt der Gezeitenkräfte auf den Strahl zu ermitteln – ein zusätzlicher Beleg für die Präzision der Beschleunigersysteme, die extrem gut und zuverlässig arbeiten.

Eine Welle von Enthusiasmus und Teamgeist erfasste die Wissenschaftler am LHC und in den internationalen Kollaborationen. Dazu gehören außer Atlas der Compact Muon Solenoid Detektor (CMS) sowie LHCb (das b steht für das Quarkflavor *beauty*) und das Alice-Experiment, das primär zur Untersuchung eines Plasmas aus Quarks und Gluonen gedacht ist, wie es kurz nach dem Urknall vor fast 14 Milliarden Jahren vorlag. Für diesen Zweck sollen frühestens im Oktober Bleikerne in dem Ringbeschleuniger aufeinander geschossen werden. Alice kann jedoch auch Proton-Proton-Stöße sehr genau messen.

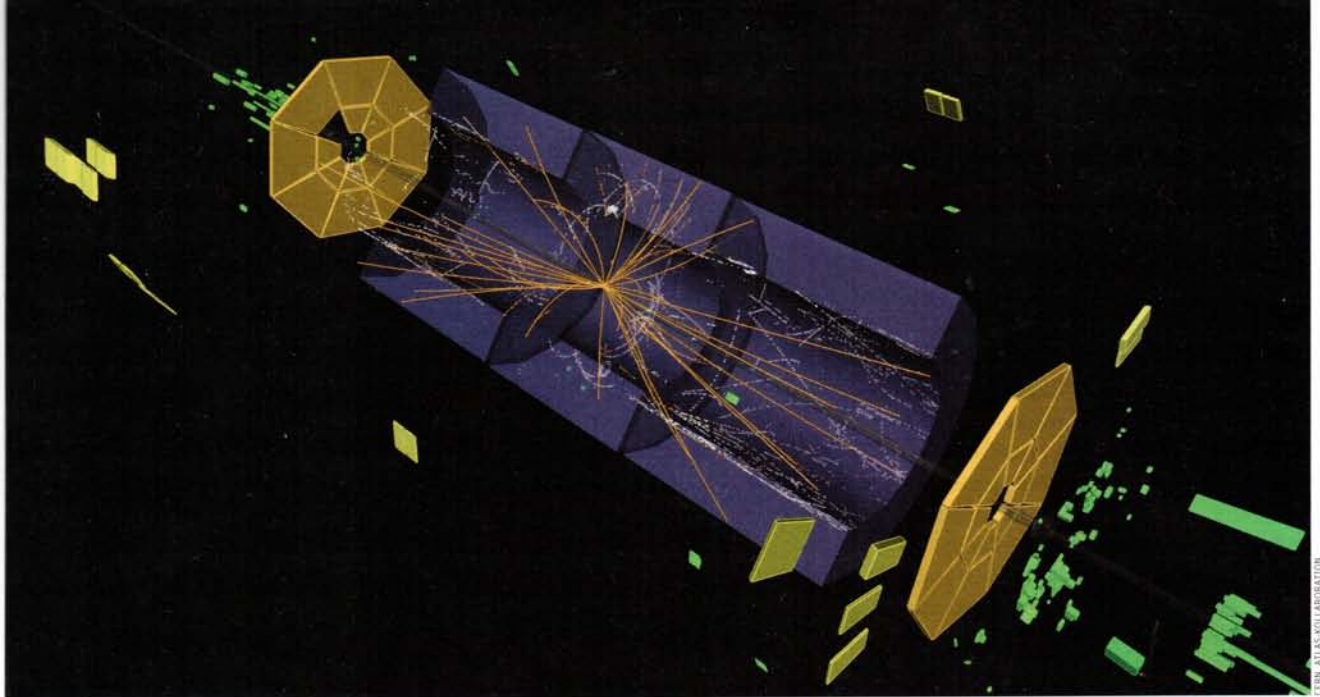
Ähnliche Experimente wie nun am LHC fanden bisher am Tevatron-Collider des amerikanischen Fermi-Nationallaboratoriums in Illinois statt. Allerdings erreicht er bei der Kollision von Protonen und Antiprotonen nur eine Maximalener-

ERMUTIGENDE ERSTE DATEN

Erste Messungen am LHC bestätigen, dass der Beschleuniger und die Detektoren einwandfrei funktionieren. So ermittelte die CMS-Kollaboration die Anzahl der bei Proton-Proton-Kollisionen erzeugten geladenen Hadronen (aus Quarks bestehenden Teilchen, die der starken Wechselwirkung unterliegen) als Funktion eines Maßes für den Streuwinkel (rechts). Bei einer Schwerpunktsenergie von 0,9 TeV stimmen die Ergebnisse sowohl mit analogen Messungen der Alice-Kollaboration als auch mit älteren Daten überein. Die Werte bei einer Energie von 2,36 TeV sind neu. Die Impulsverteilungen der erzeugten geladenen Hadronen senkrecht zum Strahl bei Schwerpunktsenergien von 0,9 und 2,36 TeV ließen sich mit dem Detektor CMS über fünf Zehnerpotenzen sehr genau bestimmen (links). Die Werte bei 0,9 TeV stimmen ebenfalls sehr gut mit älteren Daten von Proton-Antiproton-Kollisionen am CERN überein.



NACH: CMS-KOLLABORATION, IN: JOURNAL OF HIGH ENERGY PHYSICS, 7/2010, S. 41



gie von 1,96 TeV – gegenüber den 14 TeV, die letztlich am LHC geplant sind. Dennoch konnten am Tevatron 1995 zwei Gruppen unabhängig voneinander mit dem top-Quark einen damals noch fehlenden wichtigen Baustein des Standardmodells der Teilchenphysik entdecken. Erfolglos waren dagegen bisher alle Versuche zum Nachweis des Higgs-Bosons, das bestimmten Partikeln zu ihrer experimentell bestimmten Masse verhelfen soll.

Durch Messungen am Tevatron und am LEP-Teilchenbeschleuniger, dem Vorgänger des LHC bei CERN, ließ sich die Masse des Higgs-Teilchens immerhin eingrenzen: Sie sollte zwischen 114 und etwa 160 GeV liegen. Die Suche nach diesem Teilchen war ein Hauptmotiv für den Bau der neuen »Weltmaschine«. Daneben sollen am LHC aber weitere wichtige physikalische Fragestellungen erforscht werden. Das Spektrum reicht von der Suche nach den Teilchen, aus denen vermutlich die Dunkle Materie im Weltall besteht, über die Ursachen der Materie-Antimaterie-Asymmetrie im Universum bis hin zur Untersuchung des Quark-Gluon-Plasmas.

Neuer Weltrekord

Doch erst einmal gilt es, den LHC richtig zum Laufen zu bringen. Dazu erhöhten die Techniker schon im Dezember letzten Jahres die Schwerpunktsenergie auf 2,36 TeV, was neuer »Weltrekord« war. Vier mehrere Zentimeter lange Strahlenbündel mit etwa 10^{10} Protonen in jedem der beiden Strahlrohre wurden an den vier Kreuzungspunkten in den Detektoren mit einer Rate von einigen Hertz zur Kollision gebracht. »Offizielle« Ergebnisse dieser Messungen sind inzwischen publiziert.

In dieser Aufnahme einer Proton-Proton-Kollision bei 7 TeV Schwerpunktsenergie im ATLAS-Detektor krümmen sich die aus dem Wechselwirkungspunkt herausführenden Spuren der erzeugten geladenen Teilchen (gelbe Linien) wegen des Magnetfelds in dem etwa sieben Meter langen inneren Spurdetektor (violett). Aus den Bahnkurven lassen sich die Impulse der Partikel rekonstruieren. Am Ende einer Teilchenspür ist jeweils in Quaderform die Energieabgabe im elektromagnetischen (grün) und hadronischen (gelb) Kalorimeter dargestellt. Die Größe eines Quaders ist proportional zur Teilchenenergie. Bei den zwei gelben Achtecken handelt es sich um segmentierte Szintillationszähler zum Nachweis von Teilchendurchgängen und zur Auswahl bestimmter Ereignisklassen.

Am 30. März und danach – auch über die Osterfeiertage – wurden schließlich Kollisionen bei 7 TeV gemessen und dabei Raten um 100 Hertz erreicht.

Bis 2011 wird ganz allmählich die Strahlintensität hochgefahren – zunächst von 4 auf 8 und vielleicht 16 aufeinanderprallende Strahlenbündel. Aber bis zum Sollwert von 2808 Bündeln, die mit einer Frequenz von elf Kilohertz in jedem der beiden Strahlrohre umlaufen, ist es noch ein weiter Weg, den es langsam und sorgfältig zu gehen gilt, bis die geplanten 600 Millionen Kollisionen pro Sekunde erreicht sind. Vielleicht entsteht unterwegs vorübergehend sogar die Miniaturausgabe eines Schwarzen Lochs. Sein Nachweis wäre bahnbrechend, weil er die Existenz zusätzlicher aufgerollter Dimensionen jenseits der üblichen vierdimensionalen Raumzeit anzeigen würde, die einige Theorien zur Vereinigung der Gravitation mit den anderen drei Grundkräften fordern.

Bei den sehr geringen Strahlintensitäten bisher gelingt allerdings vorerst nur der Nachweis schon bekannter Teilchen, die als Beleg für die Funktionsfähigkeit der Detektoren alle am LHC wiedergefunden werden müssen. Die meisten davon sind aus Quark-Antiquark-Paaren

bestehende Mesonen wie das Pion oder das Kaon, deren Eigenschaften aus vielen teilchenphysikalischen Experimenten mit hoher Präzision bekannt sind.

Tatsächlich haben LHCb, Alice und Atlas zum Beispiel bereits das hauptsächlich in positive und negative Pionen zerfallende neutrale K_S -Meson aus den Daten rekonstruiert. Aber auch aus drei Quarks zusammengesetzte Baryonen wurden beobachtet. So fand LHCb für das aus up-, down- und strange-Quarks aufgebaute Lambda-Baryon exakt die bekannte Masse von 1,115 GeV. Ulrich Uwer von der LHCb-Kollaboration betont jedoch: »Im Prinzip haben alle Experimente sofort Kaonen, Lambdas, Eta-Mesonen und so weiter gesehen, auch wenn es noch nicht publiziert ist.« Den ersten Nachweis eines W-Bosons, des geladenen Trägerteilchens der elektroschwachen Wechselwirkung mit einer Masse von 80,4 GeV, meldete die Atlas-Kollaboration am 10. April. Gemessen wurden auch bereits Jets, die für die Erzeugung sehr hochenergetischer Teilchen charakteristisch sind.

Sobald die aus dem Standardmodell bekannten Partikel und Prozesse am LHC reproduziert sind und die Strahlintensität sich den angestrebten Werten nähert, be-

ginnt die Jagd nach »neuer Physik«. Nach der für 2012 geplanten Pause mit weiteren Optimierungen der Beschleunigersysteme steht dafür dann auch die Maximalenergie von 14 TeV zur Verfügung. Die Suche nach supersymmetrischen Teilchen wird jedoch vorher schon möglich sein.

Vertrauensbildende Maßnahmen

Vollständig ausgewertet und publiziert sind bisher nur die einfachsten Messgrößen – bis zum Erscheinen dieses Beitrags kann sich das allerdings geändert haben. Am schnellsten war die Alice-Kollaboration mit ihren Anfang des Jahres veröffentlichten Daten von zunächst nur 284 Ereignissen bei einer Einschussenergie von 0,9 TeV (*European Physical Journal C*, Bd. 65, S. 111, 2010). Sie betrafen die Anzahl der bei der Kollision erzeugten geladenen, starkwechselwirkenden Teilchen, die senkrecht zum Strahl davonflogen. Wie der Kollaborationssprecher Jürgen Schukraft sagt, sind dies »die ersten und einfachsten Größen, die wir messen müssen, um Vertrauen in die Detektoren zu gewinnen, die Simulationsrechnungen anzupassen, und den Untergrund zu studieren«.

Die Ergebnisse von Alice stimmten mit den später veröffentlichten von CMS und Atlas sowie mit früheren vom CERN und Tevatron überein. Die CMS-Publikation enthält auch Daten bei der vorläufigen Rekordenergie von 2,36 TeV (*Journal of High Energy Physics*, Bd. 2, S. 41). Interessanterweise liegen sie 15 bis 20 Prozent über der Voraussage von Simulationsrechnungen; der Grund dafür ist noch unklar. Die CMS-Kollaboration hat außerdem die Impulsverteilung der erzeugten geladenen, stark wechselwirkenden Teilchen senkrecht zum Strahl gemessen. Über fünf Zehnerpotenzen konnten dabei extrem genaue Werte gewonnen werden. Die Atlas-Gruppe wiederum hat inzwischen sogar Messungen über neun Zehnerpotenzen veröffentlicht, allerdings nur bei 0,9 TeV Einschussenergie (*Physics Letters B*, im Druck).

Die Alice-Kollaboration konnte zudem ermitteln, wie die Zahl der erzeugten geladenen, stark wechselwirkenden Teilchen bei 0,9 TeV mit dem Streuwinkel variiert. Das Ergebnis stimmt mit dem eines früheren Detektors am CERN sowie mit Daten der CMS-Kollaboration überein, die auch noch bei 2,36 TeV gemessen hat.

Bei der jetzigen Schwerpunktsenergie von 7 TeV gibt es zwar eindrucksvolle

Bilder der Kollisionen; bis Redaktionsschluss dieses Artikels Mitte April lagen aber noch keine in Fachzeitschriften publizierten Resultate vor. Die Wissenschaftler wollen erst einmal die Kollisionsraten erhöhen und durch Auswertung vieler Ereignisse die Aussagekraft der Ergebnisse verbessern. Immerhin hat die Alice-Gruppe am 20. April eine Onlineversion erster Ergebnisse bei dieser Energie ins Internet gestellt (*arXiv: 1004.3514*). Auch hier liefern die Messungen übrigens Werte, die über den Voraussagen der bisher am Tevatron geeichten Simulationen liegen. Am 21. April meldete die LHCb-Kollaboration die Rekonstruktion des ersten B-Mesons (»Beauty-

Teilchen«), eines *b*-Antiquarks in Verbindung mit einem up-Quark, aus etwa zehn Millionen Ereignissen bei 7 TeV.

Die bisherigen Erfolge sind sehr ermutigend und haben die Erwartungen in mancher Hinsicht übertroffen. Auf ihrer Grundlage kann demnächst endlich die Suche nach »neuer Physik« beginnen, auf die so viele Wissenschaftler lange Jahre gewartet haben und auf die nicht zuletzt auch die Öffentlichkeit zu Recht gespannt ist.

Georg Wolschin lehrt an der Universität Heidelberg theoretische Physik und ist wissenschaftlicher Geschäftsführer des Sonderforschungsbereichs »The Dark Universe«.

ASTRONOMIE ◀ Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audiobook

Scharfe Bilder einer fernen Sternfinsternis

Mit sechs interferometrisch zusammengeschalteten Einzelteleskopen ist es erstmals gelungen, die Verfinsterung eines fernen Sterns im Detail festzuhalten und dessen bislang unsichtbaren Begleiter dabei direkt zu beobachten.

Von Jan Hattenbach

Rund 2000 Lichtjahre entfernt im Sternbild Fuhrmann gelegen, zog Epsilon Aurigae Mitte letzten Jahres die Aufmerksamkeit der Astronomen auf sich, als sich seine Helligkeit erwartungsgemäß zu verringern begann. Bei diesem alle 27 Jahre wiederkehrenden Schauspiel, das schon in den 1820er Jahren erstmals beobachtet worden war, schiebt sich ein Objekt von der Erde aus gesehen vor den auch Almaaz genannten Stern. Während einer solchen Bedeckung erscheint er für fast zwei Jahre nur halb so hell, was ungewöhnlich lange ist. Daraus zogen die Astronomen schon früh den Schluss, dass der unsichtbare Begleiter aus einer ausgedehnten, fast undurchsichtigen Gas- und Staubwolke bestehen müsse.

Doch diese Theorie führte auf ein Problem. Aus der Bewegung von Almaaz lässt sich das Massenverhältnis zwischen ihm und seinem Begleiter errechnen. Demnach muss die Wolke mindestens so schwer sein wie der Stern selbst. Lange Zeit vermuteten Astronomen, dass es sich

bei Epsilon Aurigae um ein junges System handelt, das gerade erst im Entstehen begriffen ist. Demnach wäre Almaaz, der die 130 000-fache Leuchtkraft der Sonne und einen 130-mal größeren Durchmesser hat, ein Riesenstern mit der 15-fachen Sonnenmasse. Genauso schwer hätte sein Begleiter zu sein. Eine derartige Masse kann aber nicht gleichmäßig über eine Wolke verteilt vorliegen. Der Hauptteil muss vielmehr in einem kompakten Objekt in deren Zentrum stecken.

Ein solches Objekt wäre ein Riesenstern wie Epsilon Aurigae selbst und sollte genauso hell strahlen. Kein Teleskop hat diese Strahlung jedoch bisher empfangen. Dass das Licht des hypothetischen Sterns völlig von der Gaswolke absorbiert wird, ist kaum anzunehmen, weil deren Dichte im Innern abnimmt: Durch eine zentrale Öffnung scheint während des Maximums der Verfinsterung Almaaz hindurch.

Während der letzten Bedeckung 1982–1984 registrierte das Infrarotteleskop IRAS zudem die Wärmestrahlung der Wolke. Diese ist demnach rund acht