



Mit Magie wollte Goethes Faust herausfinden, „was die Welt im Innersten zusammenhält“. Heute jagt die Physik dieser Frage nach, zumindest was unsere materielle Welt angeht. Statt Zauberformeln wendet sie nüchterne mathematische Formeln und Hightech-Experimente an. Trotzdem hat sie etwas Magisches: Sie reist durch Supersymmetrien, Schwarze Minilöcher oder zusätzliche Dimensionen und spricht von Quarks, Neutrinos oder Higgs-Teilchen.

Die heutige Physik kennt zwölf **Elementarteilchen**, die nicht weiter teilbar sind – zumindest nach derzeitigem Wissen. Die wichtigsten sind das Elektron mit der **Elementarladung** -1 (d.i. die kleinste frei existierende elektrische Ladung) sowie zwei Quarks, das Up-Quark und das Down-Quark. Während das Up-Quark eine Ladung von $+2/3$ trägt, sind es beim Down-Quark $-1/3$. Und jetzt geht's ans Bruchrechnen: Zwei Up-Quarks und ein Down-Quark bilden jeweils

Zurück zum Urknall – wie Teilchenphysiker mit dem LHC auf Zeitreise gehen

Aus astronomischen Beobachtungen wissen wir, dass unser Universum vor etwa 13,7 Milliarden Jahren in einem gewaltigen Urknall entstand. Seitdem dehnt es sich aus und kühlt ab. Wahrscheinlich herrschte in der heißen Anfangsphase eine andere Physik als heute. Ihre Erforschung könnte einige der großen physikalischen Rätsel lösen. Dazu zählt die Dunkle Materie, die sich im Kosmos allein durch ihre Gravitation bemerkbar macht. Der Traum wäre also, mit einer Zeitmaschine eine Reise zurück zum Urknall anzutreten.

EIN GANZER TEILCHEN-ZOO

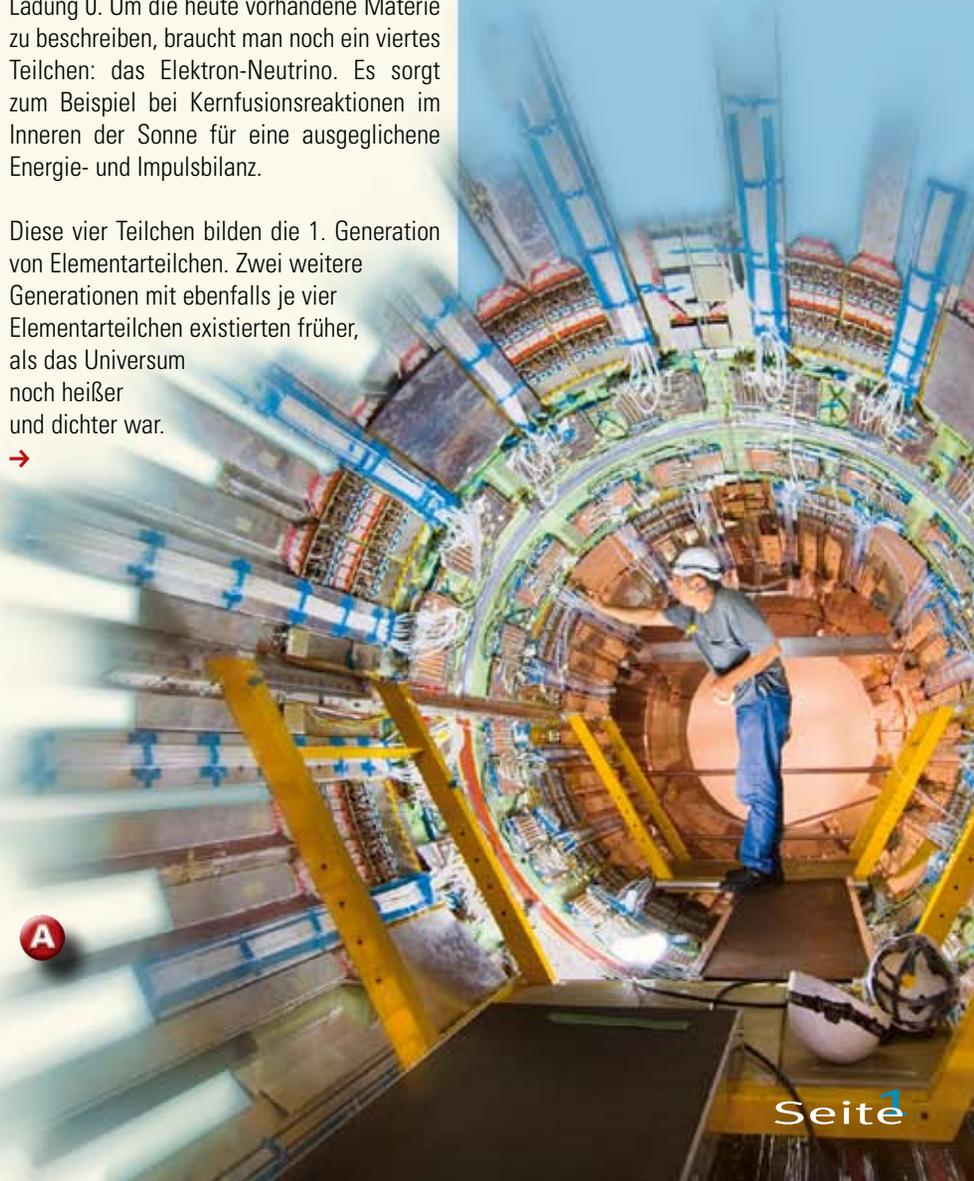
Tatsächlich gibt es solche Zeitmaschinen: die großen Teilchenbeschleuniger. Sie lassen atomare Materieteilchen heftig zusammenstoßen und erzeugen so kurzzeitig Bedingungen wie in der heißen Babyphase unseres Kosmos. Im Labormaßstab sind diese Teilchen-Crashes nicht nur ungefährlich, sondern kontrolliert wiederholbar. So können die Physiker genau erforschen, was dabei geschieht. Dazu benötigen sie große Detektoren, die als „Supermikroskope“ das Allerkleinste sichtbar machen. Dort bauen die grundlegenden Kräfte und Elementarteilchen die Materie auf **(Kasten Seite 3)**.

ein Proton mit der Ladung $+1$, zwei Down-Quarks und ein Up-Quark ein Neutron mit der Ladung 0 . Um die heute vorhandene Materie zu beschreiben, braucht man noch ein viertes Teilchen: das Elektron-Neutrino. Es sorgt zum Beispiel bei Kernfusionsreaktionen im Inneren der Sonne für eine ausgeglichene Energie- und Impulsbilanz.

Diese vier Teilchen bilden die 1. Generation von Elementarteilchen. Zwei weitere Generationen mit ebenfalls je vier Elementarteilchen existierten früher, als das Universum noch heißer und dichter war.



► **Blick entlang der Teilchenstrahl-Achse ins Innere des gerade entstehenden ATLAS-Detektors. Die großen Rohre beinhalten die Spulen starker Magnete, mit denen die Teilchenkollisionen analysiert werden. Inzwischen ist ATLAS fertig aufgestellt und der gesamte Innenraum voller Messinstrumente.**



→ Heute entstehen sie nur noch kurzzeitig in Beschleunigerexperimenten – oder dort, wo extrem energiereiche kosmische Strahlung die Moleküle unserer Atmosphäre trifft. Die drei Generationen umfassen alle zwölf elementaren Materiebausteine des **Standardmodells** der Teilchenphysik. Für die „Steckverbindungen“ zwischen ihnen sorgen drei der vier heute bekannten **Grundkräfte**. Nach den Vorstellungen der Quantenphysik vermitteln virtuelle Austauschteilchen diese Kräfte – wie hin und her fliegende Ping-Pong-Bälle. Das nur über kurze Reichweiten wirksame Gluon (Klebeiteilchen) trägt dabei die starke Kraft. Es hält die Quarks in den Protonen und Neutronen in strenger Haft: Nur extrem energiereiche Bedingungen, wie direkt nach dem Urknall, können sie befreien. Die starke Kraft klammert zudem die Atomkerne zusammen. Sie wirkt damit der heftigen Abstoßung der elektrisch positiv geladenen Protonen entgegen. Träger dieser zweitstärksten, elektromagnetischen Kraft sind Photonen (Lichtquanten). Die dritte ist die schwache Kraft. Sie sorgt dafür, dass zum Beispiel beim radioaktiven β -Zerfall aus Neutronen Protonen werden – oder umgekehrt. Ihre Austauschteilchen heißen W- und Z-Boson.

Nur die **Gravitation** entzieht sich bislang einer Beschreibung mit Quanten. Sie ist unglaubliche 10^{40} -mal schwächer als die starke Kraft. Trotzdem dominiert sie über kosmische

Distanzen hinweg. Albert Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie beschreibt sie präzise. Theoretische Physiker ringen seit Jahrzehnten darum, seine Theorie für das Größte mit der Theorie für das Kleinste, der Quantentheorie, zu vereinigen. Dazu gibt es heute verschiedene Ansätze, vor allem die Stringtheorie und die Schleifen-Quantengravitation (siehe auch *Max Planck Forschung* 1/06). Ob und welche von beiden die Natur richtig beschreiben, ist noch offen.

PROTONEN AUF KOLLISIONSKURS

Das Standardmodell der Teilchenphysik erfasst die Gravitation nicht und ist daher sicher nicht der Weisheit letzter Schluss. Es enthält zudem ein Puzzleteil, dessen Existenz noch unbewiesen ist: das berühmte **Higgs-Teilchen**. Das gehört zu einem Mechanismus, den der britische Physiker Peter Higgs erdacht hat, und der den Teilchen in der Quantenwelt erst ihre Masse verleiht. Ob das Higgs-Teilchen existiert, soll der neue *Large Hadron Collider* (LHC) – auf Deutsch Großer Hadronen-Speicherring – am europäischen Forschungslaboratorium CERN in Genf klären. Vor allem aber soll der stärkste Beschleuniger der Welt tief in unbekanntes Terrain jenseits des Standardmodells vorstoßen.

Hadronen sind natürlich keine Fantasy-Kriegerkaste, sondern all jene Teilchen, die der starken Kraft gehorchen. Der LHC kann zwei

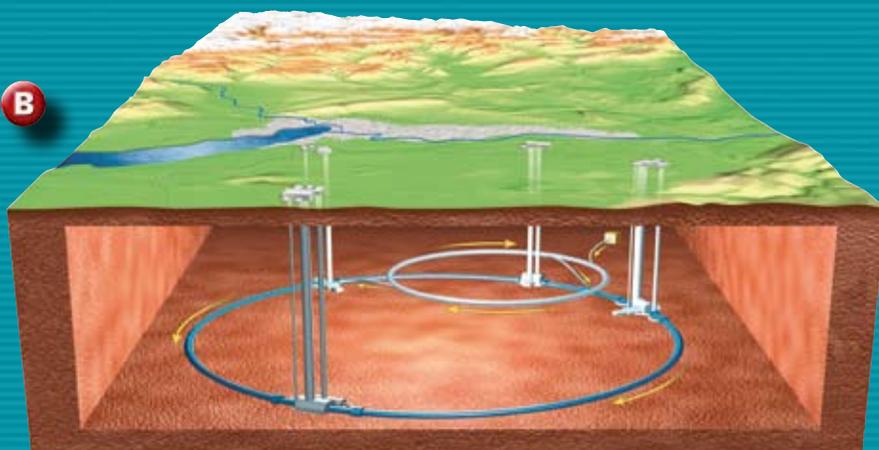
Sorten von Hadronen aufeinander schießen: leichte Protonen und schwere Blei-Ionen. Die Protonen-Crashes erlauben eine Reise zurück in eine Zeit, als unser Universum erst 10^{-13} Sekunden existierte, also den Millionsten Teil einer Zehntelmillionstel Sekunde. Es war noch extrem kompakt und über 10^{16} Kelvin heiß! Dagegen ist das Zentrum unserer Sonne mit nur 15 Millionen Kelvin ($1,5 \times 10^7$ Kelvin) ziemlich kühl. Damals waren die Quarks gerade entstanden. Vermutlich gab es auch nur eine Urkraft anstatt der vier heutigen Kräfte. Die Kollisionen mit Blei-Ionen führen dagegen in eine Zeit, als der Kosmos bereits eine Millionstelsekunde „alt“ war. Er hatte sich aufgebläht und abgekühlt. Trotzdem war er noch so heiß, dass die Gluonen die umherflitzenden Quarks nicht einfangen konnten. Dieses Quark-Gluon-Plasma soll LHC ebenfalls erforschen. Sein Speicherring befindet sich in einem knapp 27 Kilometer langen, unterirdischen Ringtunnel (**Abb. B**). Starke, supraleitende Magnete zwingen die elektrisch geladenen Protonen oder Blei-Ionen in zwei Strahlrohren auf zwei gegenläufige Kreisbahnen. Vorgeschaltete Beschleuniger „füttern“ den LHC mit rasenden Teilchenpaketen, die er dann wie die Waggons eines langen Zugs hintereinander in seinem Riesenkarussell speichert. An vier Kollisionspunkten – dort stehen in unterirdischen Kavernen mächtige Detektoren – lassen die Physiker diese dann zusammenkrachen, 40 Millionen Teilchenpakete in einer Sekunde.

Bis zu 600 Millionen Crashes pro Sekunde sind nötig, um auch extrem seltene Ereignisse zu entdecken. Für den Nachweis des Higgs-Teilchens sind geschätzte 10^8 bis 10^{14} Kollisionen nötig. Wäre es eine Nadel, dann wäre der Heuhaufen zehn Millionen Tonnen schwer! Entsprechend gewaltig ist die anfallende Menge der Messdaten. Sie erfordert eine völlig neue Informationstechnologie. Nicht von ungefähr hat das CERN maßgeblich zur Erfindung des World Wide Web beigetragen und unsere Kultur damit schon einmal revolutioniert.

TEILCHENSPIUREN FESTGEHALTEN

Einer der Kollisionspunkte liegt im Zentrum von ATLAS (**Abb. C**). Dieser Riese unter den fünf Experimenten des LHC ist so hoch wie ein fünfstöckiges Haus, 44 Meter lang und wiegt 7000 Tonnen. Wer kleine und schnelle Teilchen einfangen will, braucht viel „Bremsmasse“. Die komplexe Maschine aus einer Million Teilen haben 2200 Wissenschaftler und Ingenieure aus 37 Ländern konstruiert.

DER LARGE HADRON COLLIDER



Der große Speicherring des LHC (blau) hat 26,7 km Umfang und liegt 50 bis 175 Meter tief unter der Erde. An vier Kollisionspunkten stehen die Detektoren. Die senkrechten Schächte zur Erdoberfläche sind für ihren Bau und ihren Betrieb nötig. Der LHC hält mit rund 2000 starken supraleitenden Magneten den Teilchenstrahl in der Kreisbahn. Insgesamt 31000 Tonnen Material

müssen dazu auf unglaublich niedrige 1,9 Kelvin gekühlt werden. Das ist kälter als der freie Weltraum, der 2,7 Kelvin „warm“ ist. Der LHC produziert nicht nur die mit Abstand stärksten künstlichen Teilchenkollisionen, er lässt auch besonders viele Teilchen auf einmal zusammenstoßen.

Maßgebliche Entwicklungsarbeit leistete das Max-Planck-Institut für Physik in München. Siegfried Bethke, Direktor am Institut, ist seit Anfang der 1990er-Jahre dabei und sagt: „Es wird Zeit, dass es losgeht mit den Messungen!“

Teilchenkollisionen sind komplex, weil Einsteins berühmtes $E=mc^2$ kräftig mitmischt (E : Energie, m : Masse, c : Lichtgeschwindigkeit). Er hatte entdeckt, dass Energie sich in Materie umwandeln kann und umgekehrt. Deshalb „zersplittern“ die Protonen am superstarken LHC nicht – wie zwei aufeinander geschossene Kanonenkugeln – in ihre Bestandteile, die Quarks und Gluonen. Aus ihrer freigesetzten Bewegungsenergie entstehen auch viele neue Teilchen. Einige von ihnen lösen im Detektor weitere Schauer von „Sekundärteilchen“ aus.

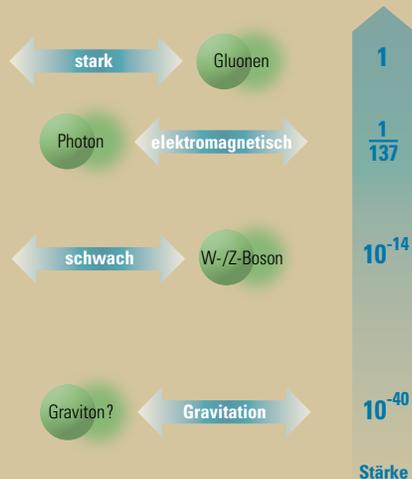
Die bis zu tausend Teilchenspuren pro Kollision soll ATLAS in allen drei Raumrichtungen präzise erfassen. Zum Glück müssen neu entstehende Teilchen den Spielregeln der Physik, den **Erhaltungssätzen**, gehorchen. Die geben ihnen streng Energie, elektrische Ladung, Impuls und Drehimpuls und gewisse Quanteneigenschaften vor. Das bringt Ordnung ins Chaos. Jeder physikalisch erlaubte Prozess hinterlässt so eine charakteristische Spur. Wie in einer Kartei mit Fingerabdrücken können die Physiker nach neuen Ereignissen suchen.

Damit ATLAS möglichst alle Teilchen einfängt, umschließt er den Kollisionspunkt von allen Seiten. Er soll genaue Informationen über die

Generation	Teilchen	el. Ladung
1.	Elektron	-1
	Elektron-Neutrino	0
	up-Quark	2/3
	down-Quark	-1/3
2.	Myon	-1
	Myon-Neutrino	0
	charm-Quark	2/3
	strange-Quark	-1/3
3.	Tau-Lepton	-1
	Tau-Neutrino	0
	top-Quark	2/3
	bottom-Quark	-1/3

Die zwölf Elementarteilchen des Standardmodells der Teilchenphysik verteilen sich auf drei Generationen. Heute existiert nur noch die erste Generation. Das Myon entsteht allerdings häufig kurzzeitig durch kosmische Strahlung, die auf die Atmosphäre trifft.

↔ Wechselwirkung



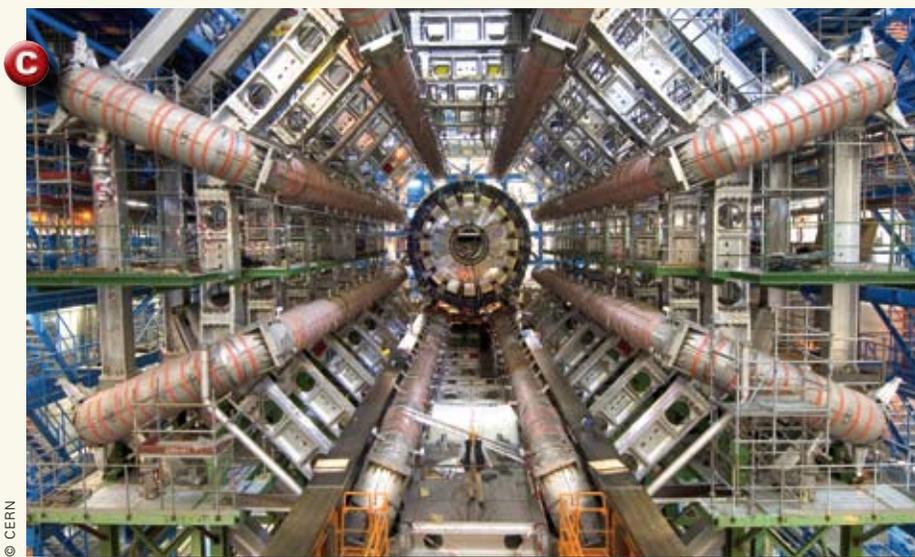
Bei drei der vier Grundkräfte sind die Teilchen, die sie vermitteln, experimentell nachgewiesen. Die Physik nennt sie Feldquanten und zählt sie zu den virtuellen Teilchen, das heißt, dass diese Teilchen nur kurz während ihres Kraft-Vermittlungsjobs existieren dürfen. Ob die Gravitation auch ein Graviton als virtuelles Teilchen besitzt, ist offen.

Art der Teilchen und ihre Bewegung liefern. Dazu besteht er aus mehreren ineinander steckenden Zylindern mit unterschiedlichen Funktionen. Jeden Zylinder schließen Kappen mit gleicher Funktion vorne und hinten ab. Der innerste Detektor ist 7 Meter lang und hat einen Durchmesser von 2,3 Meter. Er besteht aus vielen Tausenden Siliziumchips. Durchquert ein elektrisch geladenes Teilchen einen solchen Chip, dann produziert dieser ein kurzes elektrisches Signal. Aus einer Kette dieser Signale kann der Innendetektor die Teilchenspur auf wenige Mikrometer

(Tausendstel Millimeter) genau rekonstruieren. Allerdings würde diese Spur noch sehr wenig Information liefern. Deshalb umgeben zwei riesige Magneten den Innendetektor. Sie erzeugen ein kräftiges Magnetfeld, das die elektrisch geladenen Teilchen in gekrümmte Bahnen zwingt. Diese Krümmung liefert genaue Informationen über elektrische Ladung, Impuls (Geschwindigkeit) und damit die Bewegungsenergie eines Teilchens. Es sind wesentliche Teile des Informationspuzzles, das die Physiker bei der Analyse einer Kollision zusammenfügen müssen.

BLITZSCHNELLE DETEKTOREN

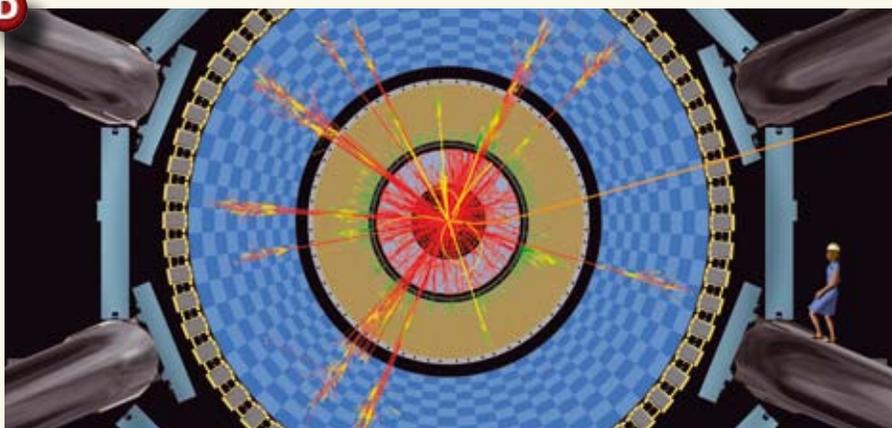
Die Münchner haben das Silizium-Innenleben des Detektors mit entwickelt und einige Teile gebaut. „Besonders wichtig ist die Strahlungshärte der Siliziumchips“, betont Bethke. Obwohl sie jahrelang einem gewaltigen Teilchen-Bombardement ausgesetzt sein werden, sollen sie möglichst lange funktionieren. Zudem muss der Detektor extrem schnell sein, um die vielen Kollisionen erfassen zu können. Den Innendetektor umschließen zwei ineinander steckende „Kalorimeter“. Zusammen haben sie einen Durchmesser von 8,4 Metern und eine Länge von 13,3 Metern. Die Kalorimeter sollen mit massiven Metallplatten nahezu alle Teilchen aus der Kollision abstoppen. Dabei messen sie präzise die frei werdende Bewegungsenergie. Mit ihren fast 200.000 Messkanälen registrieren sie zudem ganz genau, wo ein Teilchen abgebremst wurde. →



▲ Der noch leere ATLAS in einer frühen Bauphase. Nur die riesigen Spulen des äußeren supraleitenden Magneten sind schon installiert und hinten eine radförmige „Endkappe“ des Kalorimeter-Systems. Die Person in der Mitte unten vermittelt einen Eindruck von den Größenverhältnissen.

D

© CERN



▲ **Computersimulierte Teilchenspur eines Schwarzen Minilochs, das bei Proton-Proton-Stößen in ATLAS entstehen könnte. Der Blick aus der Richtung des Strahlrohrs (Zentrum) zeigt den kreisförmigen Querschnitt des Detektors. Sicher ist, dass das Miniloch ungefährlich wäre. Es würde sofort in viele Sekundärteilchen zerstrahlen, wie hier gezeigt.**

→ Anders als der Innendetektor erfassen sie auch elektrisch neutrale Teilchen. Das sind vor allem Photonen mit sehr hoher Energie, also Gammastrahlung, aber auch Neutronen oder andere, elektrisch ungeladene Hadronen.

Zwei Teilchenarten entweichen jedoch den Kalorimetern: Neutrinos und Myonen. **Myonen** sind die schweren Geschwister der Elektronen und gehören zur 2. Generation von Elementarteilchen. In unserer heutigen Welt entstehen sie nur noch kurzzeitig, wenn viel Energie im Spiel ist – zum Beispiel dort, wo kosmische Strahlung unsere Atmosphäre bombardiert. Die Myonen aus den Teilchenkollisionen sind besonders wichtige Informationsträger. Um sie einzufangen, besitzt ATLAS einen riesigen Detektor, der ihn in drei Schichten umhüllt. Das Prinzip dieser Myonenkammern ist einfach: Sie bestehen aus Bündeln von 4 Meter langen Aluröhren, die mit einem Zählgas, hauptsächlich Argon, gefüllt sind. Durch das Zentrum der 2,5 Zentimeter dicken Röhren verläuft ein langer Metalldraht, der nur halb so dünn ist wie menschliches Haar. Zwischen Draht und Röhrenwand liegt eine elektrische Spannung an. „Rast ein Myon durch das Zählgas, dann schlägt es aus den Argon-Atomen Elektronen heraus“, erklärt Bethke. „Diese driften zum positiv geladenen Draht und erzeugen so ein elektrisches Signal.“

Allerdings sollen die riesigen Kammern die Myonen auf mindestens 100 Mikrometer genau orten. Das macht ihre Konstruktion aufwändig. Die Schwerkraft verformt die Kammern in ihren Halterungen, Temperaturschwankungen ändern zudem ihre Geometrie. Diese Änderungen sind zwar winzig,

würden aber schon die erforderliche Genauigkeit zerstören. Deshalb besitzt jede Kammer ein aufwendiges Laser-Messsystem, das kleinste Verbiegungen erfasst.

SCHWARZE MINILÖCHER, HARMLOS

Der LHC und seine Detektoren werden einige Jahre laufen müssen, bis die Teilchenphysiker auf erste Ergebnisse hoffen können. Dann werden sie hoffentlich wissen, ob es Higgs-Teilchen tatsächlich gibt. „Sonst müssen sich die Theoretiker etwas Neues ausdenken“, sagt der Experimentalphysiker Bethke. Es gibt aber noch viele weitere faszinierende Fragen zum Innersten unserer Welt, die der LHC beantworten könnte. Ein wichtiges Thema ist die „**Supersymmetrie**“. Bethkes früherer Kollege am Institut, Julius Wess, hat diese Theorie in den 1970er-Jahren mitentwickelt. Sie gesellt den bekannten Elementarteilchen eine zweite Welt von Spiegelteilchen hinzu, die allerdings schwerer sind. Der LHC sollte sie mit seiner enormen Energie erzeugen können, falls es sie gibt. Diese „Susy“-Teilchen könnten zum Beispiel hinter der Dunklen Materie stecken. Außerdem haben die Teilchenphysiker schon beobachtet, dass die drei Kräfte des Mikrokosmos sich einander annähern, wenn die Kollisionsenergie steigt. Wenn es so heiß wie kurz nach dem Urknall wird, könnten sie sich zu einer einzigen Urkraft vereinigen. Ein besonders eleganter „Punkt-Treffer“ gelänge dabei mit Hilfe der Supersymmetrie. Demnach wäre das junge, heiße Universum noch sehr einfach gewesen. Einfachheit ist die Art von Schönheit, die Physikerinnen und Physiker lieben.

Eine andere Spekulation sind **Schwarze Minilöcher**, die der LHC erzeugen könnte

(Abb. D). Würden sie die Erde verschlucken? Das wird sicher nicht passieren, denn sie würden sofort wieder zerstrahlen. Die Natur selbst beweist, dass diese Gefahr nicht besteht. Manche Teilchen aus dem Kosmos, die auch die Erde treffen, setzen bei diesen Crashes viele Millionen Mal mehr Energie frei als der LHC. Würden dabei wirklich gefährliche Schwarze Löcher entstehen, wäre zum Beispiel unsere Sonne längst von einem verschluckt.

Warum beobachten wir im heutigen Kosmos nur Materie? Das ist eine weitere grundlegende Frage der Physik, die der LHC vielleicht beantworten könnte. Nach dem Urknall muss nämlich so viel Materie wie spiegelbildliche Antimaterie entstanden sein. Beide zerstrahlen sich aber sofort gegenseitig – bis auf einen winzigen Überschuss an Materie. Dieser blieb übrig und bildet unseren heutigen Kosmos. Für so folgenreiche Macken im Spiegelkabinett der Natur interessiert sich die Physik natürlich brennend.

„Diesen Symmetriebrüchen verdanken wir schließlich unsere Existenz“, sagt Bethke und lenkt das Gespräch auf eine weitere spannende Frage: Gibt es mehr als nur drei Raumdimensionen? Die Stringtheorie benötigt zehn oder elf Dimensionen, um die widerpenstige Gravitation in ihre schwingenden Quantenfäden – die Strings – einzubetten. Warum erleben wir aber nur drei Raumdimensionen? „Die höheren Dimensionen könnten winzig klein aufgerollt sein“, erklärt Bethke. Falls es sie gibt, könnten Supermikroskope wie ATLAS womöglich einen Blick in sie werfen. Vielleicht offenbart das Innerste unserer Welt aber auch völlig Neues.

Schlagwörter: Elementarteilchen, Elementarladung, Standardmodell, Grundkräfte, Gravitation, Higgs-Teilchen, Hadronen, Erhaltungssätze, Myonen, Supersymmetrie, Schwarze Minilöcher

Lesetipps: „Weltmaschine“, Broschüre des BMBF, PDF-Download unter www.bmbf.de/pub/lhc_weltmaschine.pdf „240 Elefanten in einer Röhre“, MaxPlanckForschung, 1/2007, PDF-Download unter www.mpg.de/bilder-BerichteDokumente/multimedial/mpForschung/2007/

Internettipps: <http://weltmaschine.de/>

Animation: Wie funktioniert ATLAS?

www.atlas.ch/etours_exper/experiment-08.html

WWW.MAXWISSEN.DE

– der Link zur Forschung für Schüler und Lehrer

Hier finden Sie Hintergrundinformationen und didaktisches Material zu den jeweils zweimal im Jahr erscheinenden Ausgaben von BIOMAX, GEOMAX und TECHMAX. Weitere Exemplare können Sie kostenlos bestellen bei: