



Zurück zum Urknall –

wie die Teilchenphysik mit dem LHC auf Zeitreise geht

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 und zusätzliche Dimensionen und spricht von Quarks, Neutrinos oder Higgs-Teilchen.

Aus astronomischen Beobachtungen wissen wir, dass unser Universum vor etwa 13,8 Milliarden Jahren in einem gewaltigen Urknall entstand. Seitdem dehnt es sich aus und kühlt ab. Wahrscheinlich herrschten in der heißen Anfangsphase andere, uns heute noch unbekannte physikalische Gesetze. Ihre Erforschung könnte einige der großen Rätsel der Physik 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.

Titelbild Die Menschen fügen gerade das Vakuumrohr ein, das den Teilchenstrahl des LHC durch ATLAS leitet. In dessen Inneren, hinter dem gelblichen „Rad“ der Myonendetektoren (rechts), passieren die Teilchencrashes. Dabei entstehen auch Myonen, schwere Verwandte der Elektronen.

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 Physikerinnen und Physiker 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.

ABB. A: ZWÖLF ELEMENTARTEILCHEN

Generation	Teilchen	el. Ladung	↔ Wechselwirkung	Stärke
1.	Elektron	-1		1
	Elektron-Neutrino	0		$\frac{1}{137}$
	up-Quark	$\frac{2}{3}$		10^{-14}
	down-Quark	$-\frac{1}{3}$		10^{-40}
2.	Myon	-1		10^{-14}
	Myon-Neutrino	0		10^{-14}
	charm-Quark	$\frac{2}{3}$		10^{-14}
	strange-Quark	$-\frac{1}{3}$		10^{-14}
3.	Tau-Lepton	-1		10^{-40}
	Tau-Neutrino	0		10^{-40}
	top-Quark	$\frac{2}{3}$		10^{-40}
	bottom-Quark	$-\frac{1}{3}$		10^{-40}

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.

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.

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 Austauscheteilchen heißen W- und Z-Boson.

Nur die **Gravitation** als vierte Kraft 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. Noch ist die Lösung dieser großen Rätselfrage der Physik nicht gelungen.

PROTONEN AUF KOLLISIONSKURS

Das Standardmodell der Teilchenphysik erfasst die Gravitation nicht und ist daher sicher nicht der Weisheit letzter Schluss. 2012 fand der neue *Large Hadron Collider (LHC)* – auf Deutsch Großer Hadronen-Speicherring – am europäischen Forschungslaboratorium CERN in Genf ein wichtiges Puzzleteil des Standardmodells. Dieses berühmte **Higgs-Teilchen** gehört zu einem Mechanismus, der den Teilchen in der Quantenwelt erst ihre Masse verleiht. Die Physiker François Englert und Peter Higgs hatten dies vorhergesagt und erhielten 2013 den Nobelpreis für Physik. Vor allem aber soll der stärkste Beschleuniger der Welt tief in unbekanntes Terrain jenseits des Standardmodells vorstoßen.

Die heutige Physik kennt zwölf **Elementarteilchen**, die nicht weiter teilbar sind – zumindest nach derzeitigem Wissen (**Abb. A**). 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 elektrische 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 ein Proton mit der elektrischen 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. 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 Austauscheteilchen diese Kräfte – wie hin und her fliegende Ping-Pong-Bälle. Das nur über kurze Reichweiten wirksame Gluon (Klebeilchen) 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

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 – krachen diese Teilchen dann zusammen, 40 Millionen Teilchenpakete in einer Sekunde. Ihre Energie entspricht einem ICE 3 bei etwa 120 km/h.

Viele Millionen Crashes pro Sekunde sind nötig, um auch extrem seltene Ereignisse zu entdecken. Für den Nachweis des Higgs-Teilchens waren es mehr als 10^{14} (Hunderttausend Milliarden) Kollisionen. 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.

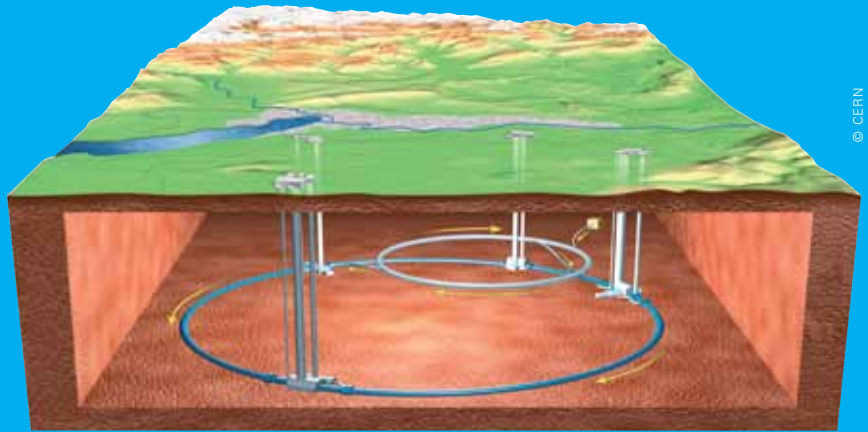
TEILCHENSPIUREN FESTGEHALTEN

Einer der Kollisionspunkte liegt im Zentrum von ATLAS **(TITELBILD)**. 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“ und empfindliche Messgeräte (Detektoren). Diese besitzen 100 Millionen Sensoren, die Teilchenspuren sehr genau vermessen. Die komplexe Maschine aus einer Million Teilen haben 2200 Forscherinnen und Forscher aus 37 Ländern konstruiert. Maßgebliche Entwicklungsarbeit leistete das Max-Planck-Institut für Physik in München. Siegfried Bethke, Direktor am Institut, sagt: „Der Bau von ATLAS war eine große Herausforderung, und sein Betrieb erfordert viel Einsatz!“

Teilchenkollisionen sind komplex, weil Einsteins berühmtes $E = mc^2$ kräftig mitmisch (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 einfach in ihre Bestandteile, die Quarks und Gluonen – wie zwei aufeinander geschossene Kanonenkugeln. Aus ihrer freigesetzten Bewegungsenergie entstehen auch viele neue Teilchen. Einige von ihnen lösen im Detektor weitere Schauer von „Sekundärteilchen“ aus. Die vielen 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 kann die Forschung nach neuen Ereignissen suchen.

Damit ATLAS möglichst alle Teilchen einfängt, umschließt er den Kollisionspunkt von allen Seiten. Er liefert genaue Informationen über die Art der Teilchen und ihre Bewegung. Dazu besteht er aus mehreren ineinander steckenden Zylindern mit

ABB. B: DER GROSSE SPEICHERRING



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 Betrieb nötig.

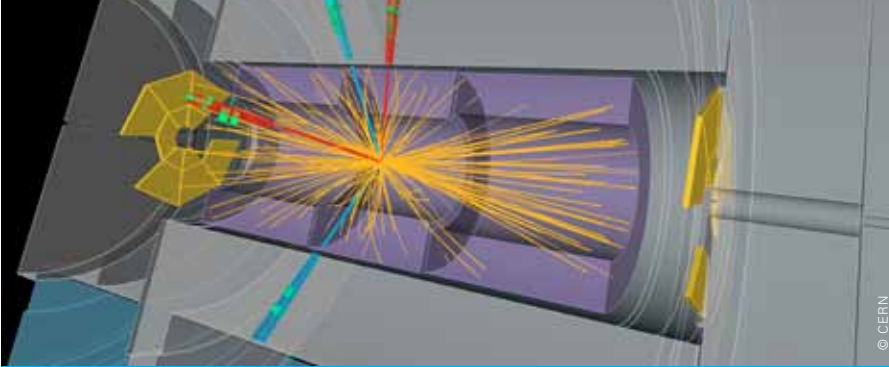
unterschiedlichen Funktionen. Jeden Zylinder schließen Kappen mit gleicher Funktion vorne und hinten ab. Der innerste Detektor ist 7 Meter lang und hat einen Durchmesser von 2,3 Meter. Er besteht aus vielen Tausenden Siliziumchips. Durchquert ein elektrisch geladenes Teilchen einen solchen Chip, dann 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 Physikerinnen und Physiker bei der Analyse einer Kollision zusammenfügen müssen.

BLITZSCHNELLE DETEKTOREN

Die Münchner haben das Silizium-Innenleben des Detektors mit entwickelt und einige Teile gebaut. Dieser muss 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. 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,

ABB. C: HIGGS-TEILCHEN IM ATLAS



Spuren eines Crashes zwischen Protonen in ATLAS, in dem ein Schauer von Teilchen erzeugt wurde. Darunter befand sich auch ein Higgs-Teilchen. Die verschiedenen Detektoren von ATLAS sind unterschiedlich gefärbt, die Myonendetektoren gelb (vergl. TITELBILD).

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.“

SUSY UND DIE DUNKLE MATERIE

2009 gingen LHC und seine Detektoren in Betrieb. 2012 war das erste Hauptziel erreicht: Die beiden großen Detektoren ATLAS und CMS fanden in den Teilchenkollisionen das heiß gesuchte Higgs-Teilchen (Abb. C).

Als wichtigen nächsten Schritt soll der inzwischen verstärkte LHC das neu entdeckte Higgs-Teilchen genau vermessen. Es ist noch nicht sicher, ob es das gesuchte Higgs-Teilchen des Standardmodells ist. Es könnte auch eine ganze „Higgs-Familie“ geben. Von den Eigenschaften des Higgs-Teilchens hängt aber die Stabilität unseres Universums ab, denn es könnte auch irgendwann zerfallen. Vielleicht hilft das Higgs-Teilchen auch, ein anderes großen Rätsel der Physik zu lösen: Woraus besteht die allgegenwärtige Dunkle Materie im Universum?

Hinter dieser Dunklen Materie, deren Wirken man in den Bewegungen der Sterne und Galaxien beobachten kann, könnten auch „supersymmetrische“ Teilchen stecken. Diese „Supersymmetrie“ (Susy) ist ein wichtiges Thema. Bethkes früherer Kollege am Institut, Julius Wess, hat diese Theorie in den 1970er-Jahren mitentwickelt. Sie gesellt den bekannten Elementarteilchen eine

zweite Welt von Spiegeltailchen 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.

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 zerstrahlten 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 widerspenstige 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. Nach 2026 wird es für die Teilchenphysik nochmals spannend. Ab 2023 soll der LHC „runderneuert“ und dabei erneut gestärkt werden. Danach wird er noch voraussichtlich bis 2035 laufen. Fast zwanzig Jahre sind genug Zeit, um Physik zu studieren und selbst an der größten Maschine der Menschheit mit zu forschen.

Schlagwörter

Elementarteilchen, Elementarladung, Standardmodell, Grundkräfte, Gravitation, Higgs-Teilchen

Link-Tipps

- LHC und CERN www.mpg.de/t121 >
- ATLAS (Infos) www.mpg.de/t122
- ATLAS (Filme) www.mpg.de/t123 > YouTube
- Materialien Teilchenphysik www.mpg.de/t124



Video-Tipp

- ATLAS Experiment: Licht-Licht-Streuung www.mpg.de/t125 > YouTube



www.maxwissen.de

der Link zur Forschung
für Lernende und Lehrkräfte



Hier finden Sie Hintergrundinformationen und Materialien für den Unterricht zu den Ausgaben von **BIOMAX**, **GEOMAX** und **TECHMAX**. Weitere Exemplare können Sie kostenlos bestellen unter: www.maxwissen.de/heftbestellung