Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse
Band: 98 (2007)
Heft: 7

Artikel: Die Welt der Elementarteilchen
Autor: Gabathuler, Kurt / Rosenfelder, Roland
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-857430

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Die Welt der Elementarteilchen

Eine Übersicht über die kleinsten Bausteine der Materie und deren Wechselwirkungen

Mit der Schaffung des Periodensystems der Elemente konnte gegen Ende des 19. Jahrhunderts Ordnung in die vielen damals bekannten chemischen Stoffe und Verbindungen gebracht werden. Hundert Jahre später ist es in einem ähnlichen Schritt auf einem wesentlich grundlegenderen Niveau gelungen, durch die Schaffung des Standardmodells der Teilchenphysik die Bestandteile des Atomkerns (Protonen und Neutronen) auf elementare Bausteine (Quarks) zu reduzieren, diese zusammen mit Elektronen, Neutrinos etc. in ein Schema einzuordnen und ihr Verhalten zu erklären. Das Standardmodell beschreibt fast alle Phänomene der unbelebten Welt – vom radioaktiven Zerfall bis zur Evolution des Universums nach dem Urknall –, lässt aber noch viele Fragen offen, die intensiv erforscht werden.

Die Frage nach den letzten Bestandteilen der Materie ist uralt. In der griechischen Antike wurde sie durch die Grundelemente Feuer, Wasser, Erde und Luft mehr philosophisch als empirisch beantwortet. Allerdings hat bereits Demokrit angenommen, dass alle Materie aus unteilbaren Bestandteilen – Atomen

Kurt Gabathuler, Roland Rosenfelder

– besteht. Dies war jedoch alles Spekulation, bis zwei Jahrtausende später Chemie und Physik begannen, diese Fragen durch Experimente schrittweise zu beantworten.

Ein grosser Schritt vorwärts war dabei die Aufstellung des periodischen Systems der Elemente, das im 19. Jahrhundert Ordnung in die Vielzahl von chemischen Verbindungen brachte und sie auf einzelne Elemente = Atome zurückführte. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts erkannte man, dass sich diese Atome in ihrem Kern und in den darumliegenden Elektronenschalen unterscheiden. Der einfachste Kern ist derjenige des Wasserstoffatoms, den man auch als Proton bezeichnet und der genau eine Ladungseinheit trägt. Nachdem 1932 ein neutraler Kernbestandteil gefunden wurde – das Neutron –, schien die Liste der Elementarteilchen komplett: Proton, Neutron und Elektron, aus denen sich alle chemischen Elemente kombinieren liessen. Bild 1 zeigt die räumliche Struktur eines Atoms. Fast die gesamte Masse ist im winzigen Kern konzentriert.

1937 wurde jedoch in der kosmischen Strahlung ein neues Teilchen entdeckt: Das nachmalige Myon. Ein Nobelpreisträger fasste diese unwillkommene Überraschung im Satz zusammen: «Who ordered this?» Mit dem Aufkommen von Teilchenbeschleunigern ab 1950 explodierte die Zahl von neu entdeckten Teilchen. Ende der 60er-Jahre wurde beim Beschuss von Protonen durch Elektronen im Innern des Protons eine körnige Struktur festgestellt (Bild 1). Dies führte zur Postulierung der Existenz von Quarks, aus denen sich die meisten Teilchen kombinieren liessen.

Inzwischen waren auch zwei Arten von beinahe masselosen Neutrinos zur Liste der Teilchen gestossen, und es war bekannt, dass zu jedem Teilchen ein entsprechendes Antiteilchen existiert (z.B. das positiv geladene Positron als Antiteilchen zum Elektron).

Nach intensiver experimenteller und theoretischer Arbeit wurde in den Jahren nach 1970 das Standardmodell der Teilchenphysik aufgestellt, das alle damals als elementar aufgefassten Teilchen (Quark, Elektron, Myon, Neutrinos) in ein Schema einordnete.

Das Standardmodell

Das Standardmodell der Teilchenphysik müsste eigentlich als Standardtheorie bezeichnet werden, da es seit mehr als drei Jahrzehnten (fast) alle experimentellen Ergebnisse erklärt und alle Tests bestanden hat. In jeder neuen, weitergehenden Theorie muss es daher als Spezialfall

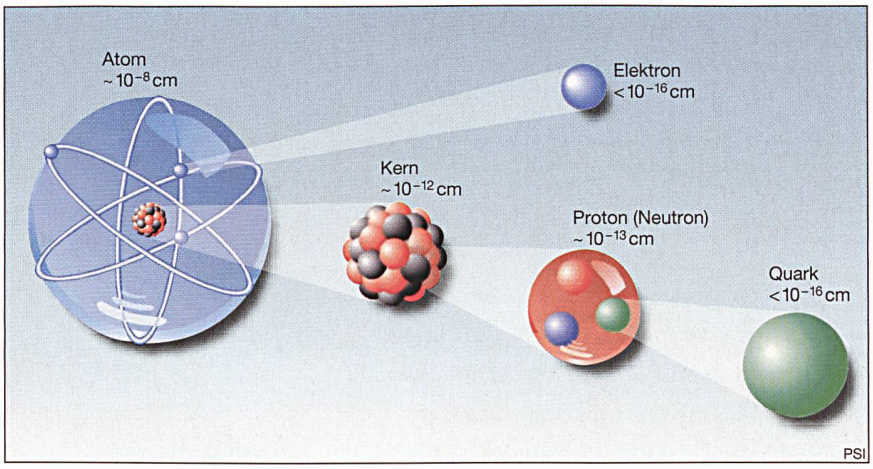


Bild 1 Kleinste Strukturen der Materie
Das Elektron und das Quark sind nach heutiger Kenntnis strukturlos

Materieteilchen							
Ladung	Quarks			Leptonen			Ladung
2/3	u	c	t	ν_e	ν_μ	ν_τ	0
	up	charm	top	Neutrinos			
−1/3	d	s	b	e	μ	τ	−1
	down	strange	bottom	Elektron	Myon	Tauon	
Familie	1.	2.	3.	1.	2.	3.	Familie

PSI

Bild 2 Periodensystem der Teilchenphysik

Das «Periodensystem» der Teilchenphysik, bestehend aus 6 Quarks und 6 Leptonen. Sie werden in drei Familien eingeteilt, wobei jede Familie aus 2 Quarks und 2 Leptonen besteht (die Antiteilchen werden nicht mitgezählt)

enthalten sein, so wie Einsteins Relativitätstheorie in die klassische Mechanik übergeht, wenn alle Geschwindigkeiten klein gegenüber der Lichtgeschwindigkeit sind.

Die Bausteine der Materie im Standardmodell sind in Bild 2 dargestellt: Es sind die Quarks und Leptonen, die in drei Familien (oder Generationen) vorkommen. Die Teilchen der ersten Generation machen den Hauptteil der uns umgebenden Welt aus: Elektronen sind nach unserem derzeitigen Wissensstand immer noch elementar (d.h. punktförmig mindestens bis zu Abständen von 10^{-16} cm), aber die Protonen und Neutronen des Atomkerns sind aus (punktförmigen) u- und d-Quarks zusammengesetzt. Quarks und Leptonen der zweiten und dritten Generation werden kurzfristig bei Zusammenstössen von Teilchen hoher Energie erzeugt und zerfallen danach wieder. Beispielsweise ist das Myon der Cousin des Elektrons, aber 200-mal schwerer als dieses. Es zerfällt nach 2 μs in ein Elektron und zwei Neutrinos.

Die Materieteilchen in Bild 2 reagieren auf verschiedene Weise miteinander: Die Quarks sind der starken (Kern-)Kraft unterworfen, alle elektrisch geladenen Teilchen nehmen an der aus dem Alltag bekannten elektromagnetischen Kraft teil, und schliesslich können alle Leptonen und Quarks auch schwach wechselwirken (dies ist die Kraft, die für bestimmte Kernzerfälle verantwortlich ist).

Nach der speziellen Relativitätstheorie können Wirkungen nicht augenblicklich übertragen werden, sondern benötigen einen Boten, der die Kraft höchstens mit Lichtgeschwindigkeit vermittelt. Virtuelle Kraftteilchen können aufgrund von quantenmechanischen Fluktuationen (Unschärferelation) von einem Materieteilchen emittiert und von einem anderen wieder absorbiert werden, was sich als Wechselwirkung zwischen diesen beiden Materieteilchen manifestiert (siehe Kasten auf der folgenden Seite). Die Stärken der Wechselwirkungen werden durch (energieabhängige) Kopplungen beschrieben. Solche Kraftteilchen können aber auch reell existieren und gehören ebenfalls zum Standardmodell: Das Photon (Lichtquant) für die elektromagnetische Kraft, die Gluonen (engl. glue = Klebstoff) für die starke Wechselwirkung und die W- und Z-Teilchen für die schwache Wechselwirkung. In Bild 3 ist dieser Austausch in sogenannten Feynman-Diagrammen dargestellt, die für die Teilchenphysiker auch gleichzeitig genaue Vorschriften enthalten, wie die entsprechenden Prozesse theoretisch zu berechnen sind.

Im Prinzip müsste man auch noch die Gravitation berücksichtigen, die auf alle Teilchen wirkt und durch hypothetische Gravitonen vermittelt wird. Allerdings ist die Schwerkraft zwischen den Elementarteilchen so schwach, dass man sie im Mikrokosmos getrost vernachlässigen kann.

Das Standardmodell besteht nicht nur aus einer Aufzählung der Konstituenten und ihrer Wechselwirkungen – nein, es ist ein präzises mathematisches Modell, das es erlaubt, Streuprozesse und Zerfälle der Elementarteilchen vorherzusagen. Erstaunlicherweise haben sich diese Vorhersagen immer wieder im Experiment mit hoher Genauigkeit bestätigt. Da Kerne, Atome und Moleküle sich aus den elementaren Bausteinen bilden, ist das Standardmodell ein Triumph der physikalischen Erkenntnis: Aus den wenigen Eigenschaften von Quarks, Leptonen und Kraftteilchen (Massen, Kopplungsstärken etc.) lässt sich die ganze Fülle der unbelebten Welt und ihrer Phänomene (im Prinzip) ableiten!

Das Standardmodell ist die einzigartige Synthese von zwei theoretischen Revolutionen in der Physik des 20. Jahrhunderts,

Wechselwirkung	Kraftteilchen	Diagramm
elektromagnetisch	Photon γ	γ
stark	Gluon g	g
schwach	W, Z	W, Z
Gravitation	Gravitation G	G

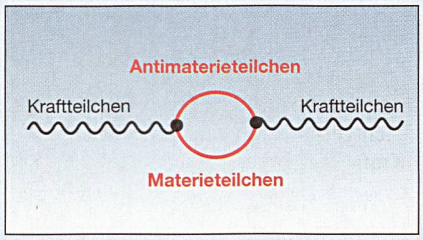
PSI

Bild 3 Wechselwirkung durch Kraftteilchen

Die Wechselwirkungen zwischen zwei Materieteilchen geschehen durch Austausch von Kraftteilchen, wobei Impuls und Energie übertragen werden. Solche Prozesse werden durch sogenannte Feynman-Diagramme beschrieben. Die roten Pfeile stellen die Bewegung zweier Materieteilchen dar, zwischen denen ein Kraftteilchen (gewellte Linie) ausgetauscht wird.

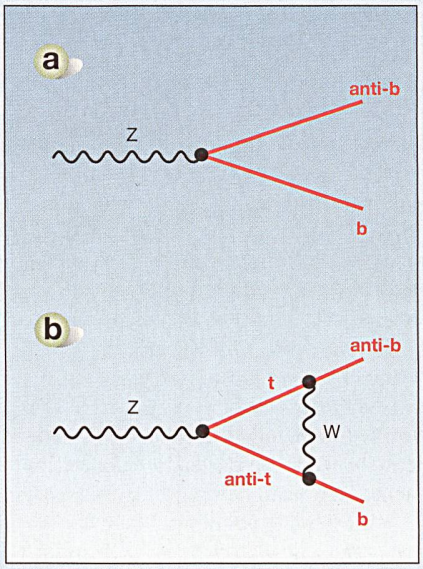
Unschärferelation, Quantenfluktuationen und virtuelle Teilchen

Die spezielle Relativitätstheorie Einsteins aus dem Jahr 1905 und die Quantentheorie aus den 20er-Jahren des vorigen Jahrhunderts bilden die theoretische Grundlage der Teilchenphysik. Eine wesentliche Aussage der Ersteren ist, dass für alle Teilchen in jedem System die Lichtgeschwindigkeit c die höchste mögliche Geschwindigkeit ist. Daraus folgt dann die berühmte Äquivalenz von Energie und Masse $E = m \cdot c^2$. Nach der Quantentheorie sind alle Teilchen auch Wellen, wobei ihre Wellenlänge umgekehrt proportional zur Energie ist. Die Synthese beider Theorien sagt voraus, dass es Antiteilchen geben muss mit praktisch denselben Eigenschaften, aber umgekehrter Ladung.



Eine besondere Unschärferelation der Quantentheorie stellt eine Beziehung her zwischen Zeit und Energie: Teilchen, die nur für kurze Zeiten existieren, haben keine scharf festgelegte Energie. Aus der Äquivalenz von Energie und Masse folgt damit, dass sich spontan Paare von Teilchen bilden können, die sich nach sehr kurzer Zeit wieder selbst vernichten. Diese nur temporär existierenden Teilchen nennt man virtuelle Teilchen. Die erste Figur zeigt einen solchen Prozess in der Darstellung der Feynman-Diagramme: Ein Kraftteilchen (z.B. ein Photon) spaltet sich für kurze Zeit in ein Paar aus einem Teilchen und dem dazugehörigen Antiteilchen (z.B. in Elektron und Positron) auf. Solche Quantenfluktuationen bewirken eine Energieabhängigkeit der Kopplungsstärken der verschiedenen Kräfte, da je nach verfügbarer Energie mehrere Arten von virtuellen Teilchen unterschiedlich involviert sein können. Diese Energieabhängigkeit ist experimentell genau bestätigt worden.

Aufgrund solcher Quantenfluktuationen lässt sich auch der Einfluss von Teilchen nachweisen, die am Beschleuniger wegen zu geringer Energie zwar nicht direkt erzeugt werden können, jedoch als virtuelle Teilchen die Werte von genau bestimmbaren Messgrössen beeinflussen. Die zweite Figur zeigt als Beispiel den Zerfall eines Z-Kraftteilchens in ein b-Quark-Paar (genauer: ein b-Quark und ein b-Antiquark). Der direkte Prozess a) wird durch den Prozess b) modifiziert, der über t-Quarks abläuft. Solche Effekte, die durch virtuelle Teilchen (hier eine Schleife aus zwei t-Quarks und W) hervorgerufen werden, können theoretisch vorherbestimmt werden. In diesem Fall war die Vorhersage abhängig von der Masse des (damals noch hypothetischen) Top-Quarks. Ein Vergleich mit der experimentell genau bestimmten relativen Zerfallswahrscheinlichkeit $Z \rightarrow b + \text{anti-b}$ erlaubte eine präzise Vorhersage der Masse des Top-Quarks, bevor dieses entdeckt wurde. Nachdem die Leistung eines Beschleunigers in den USA erhöht worden war, wurde das Top-Quark 1995 tatsächlich gefunden, und seine Masse lag innerhalb des vorausgesagten Massenbereichs.



der speziellen Relativitätstheorie und der Quantentheorie (siehe Kasten). Gleichzeitig führt es den uralten Traum der Vereinheitlichung der Kräfte weiter: So wie Maxwell im 19. Jahrhundert Elektrizität und Magnetismus als separate Manifestation des Elektromagnetismus erkannte, so vereinigt das Standardmodell die schwache und die elektromagnetische Kraft. Daher spricht man auch oft von der «elektroschwachen» Wechselwirkung.

Experimente zum Test des Standardmodells

Jede physikalische Theorie hat nur einen begrenzten Gültigkeitsbereich, den es auszuloten gilt. In der Teilchenphysik können mögliche Abweichungen – grob gesagt – auf zwei Arten festgestellt werden. Bei hohen Energien, wo man (neue) Teilchen erzeugt und ihre Wechselwirkungen und Zerfälle misst, oder bei niedrigen Energien, wo man durch sehr präzise Messungen Abweichungen von vorhergesagten Werten feststellen kann.

Im ersten Fall benötigt man immer grössere Beschleuniger und gewaltige Detektoren. Das Paradestück ist der Large Hadron Collider (LHC), der Ende dieses Jahres am europäischen Zentrum für Teilchenphysik CERN bei Genf in Betrieb gehen und erste, mit Spannung erwartete Ergebnisse im nächsten Jahr liefern soll (Bilder 4 und 5).

Mehrere Universitäten und Institute der Schweiz (die beiden ETH, PSI, die Universitäten Bern, Genf und Zürich) sind an diesen Experimenten beteiligt. Der LHC wird einen neuen Energiebereich erschliessen, werden doch Protonen mit Energien von je 7 TeV (entspricht einer Beschleunigungsspannung von je 7000 Gigavolt) frontal aufeinandergeschossen. Nach den Regeln der Quantentheorie ist der LHC daher ein riesiges Mikroskop, das mit kleinster Wellenlänge Strukturen der Materie untersuchen wird, die bis jetzt noch nie gesehen wurden. Aus der Äquivalenz von Energie und Masse folgt, dass hohe Energie zur direkten Erzeugung schwerer Teilchen benutzt werden kann. Eines der herausragenden Ziele des LHC ist die Entdeckung des letzten noch nicht gefundenen Teilchens des Standardmodells: des Higgs-Teilchens. Dieses Teilchen ist entscheidend für die spezielle Art, wie im Standardmodell den Quarks, Leptonen und den Kraftteilchen W und Z ihre experimentell beobachtete Masse gegeben wird. Gemäss Vorhersage des Standardmodells liegt die Masse des Higgsteilchens in einem dem LHC zugänglichen Bereich. Es ist aber auch nicht ausgeschlossen, dass vollkommen neuartige Teilchen erzeugt werden.

Im zweiten Fall – bei niedrigen Energien – erlaubt es eine Eigenschaft der

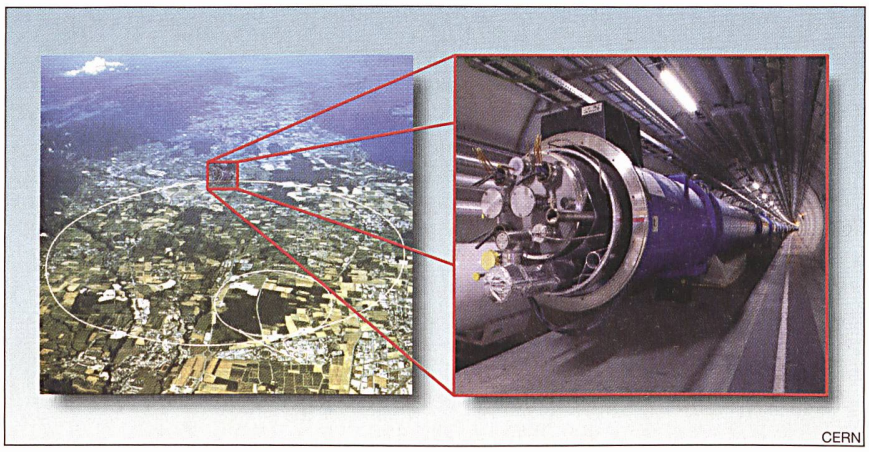


Bild 4 Large Hadron Collider bei Genf

Links: Luftaufnahme des europäischen Teilchenphysikzentrums CERN bei Genf mit seinem System von unterirdischen Beschleunigern. Rechts unten sieht man Meyrin mit den CERN-Labors, rechts oben liegt der Genfersee. Der grosse Ringtunnel, in dem der Large Hadron Collider operieren wird, hat 27 km Umfang. Rechts: Etwa 65% des Tunnels sind mit supraleitenden Magneten gefüllt, die die beiden gegenläufigen Protonenstrahlen auf einer Kreisbahn halten.

Quantenphysik, Effekte von noch unbekannten schweren Teilchen in präzisen Messdaten zu erkennen, obwohl die Energie des Prozesses weit geringer ist als für die direkte Erzeugung dieser Teilchen erforderlich wäre. Dieser Beitrag von virtuellen Teilchen ist eine Folge der Unschärfebeziehung (Details im Kasten auf Seite 11).

Insbesondere konzentriert man sich auf Prozesse, die im Standardmodell der Teilchenphysik nicht erlaubt sind oder nur mit verschwindend kleiner Wahrscheinlichkeit vorkommen. Die eindeutige Messung eines solchen Prozesses wäre ein Ergebnis, das auf neue Phänomene ausserhalb des so gut bestätigten Standardmodells hindeuten würde. Als Beispiel sei ein Experiment am Hochstrom-Protonenbeschleuniger des PSI erwähnt, das nach dem Zerfall des Myons in ein Elektron und ein Lichtquant sucht ($\mu \rightarrow e + \gamma$). Im Standardmodell ist der Myon-Zerfall immer mit der Aussendung von Neutrinos begleitet. Dieses (unverstandene) Faktum ist bis jetzt in allen Zerfällen beobachtet worden, aber das Experiment am PSI wird in der Lage sein, einen Zerfall $\mu \rightarrow e + \gamma$ selbst noch unter 10^{14} normalen Zerfällen des Myons zu beobachten. Selbst wenn dieses Experiment (wie die bisherigen, weniger genauen) diesen hypothetischen Zerfall nicht findet, wird es dennoch vorgeschlagene Theorien zur Erweiterung des Standardmodells stark eingrenzen.

Es sollte nicht unerwähnt bleiben, dass diese aufwendigen Experimente auch technologische Spin-offs haben, da die Anforderungen an Beschleuniger, Detektoren und Datenverarbeitung oft die Grenzen des Machbaren sprengen müssen. Bekanntes Beispiel dafür ist das World Wide Web, das zuerst am CERN für die Datenanalyse innerhalb internationaler Kollaborationen entwickelt wurde. Und spezielle Pixeldetektoren, die am PSI für den CMS-Detektor am LHC entwickelt wurden, haben inzwischen eine breite Anwendung in anderen Bereichen gefunden.

Über das Standardmodell hinaus

Das Standardmodell lässt viele Fragen offen, zum Beispiel:

- Warum gibt es drei Familien?
- Was geschieht bei sehr hohen Energien? Vereinheitlichen sich dort die elektroschwache und starke Wechselwirkung?
- Sind die fundamentalen Teilchen ihrerseits zusammengesetzt oder gibt es eine (Super-)Symmetrie zwischen einzelnen Gruppen?
- Warum gibt es im Kosmos mehr Materie als Antimaterie?
- Wie kann die Gravitation einbezogen werden?
- Was ist die Natur der «dunklen Materie», der «dunklen Energie», für die es in den letzten Jahren in der Astronomie immer mehr Hinweise gibt?

Die letzten Punkte zeigen den zunehmenden Zusammenhang der Teilchenphysik mit der Astrophysik und der Kosmologie. Tatsächlich ist der Urknall, mit

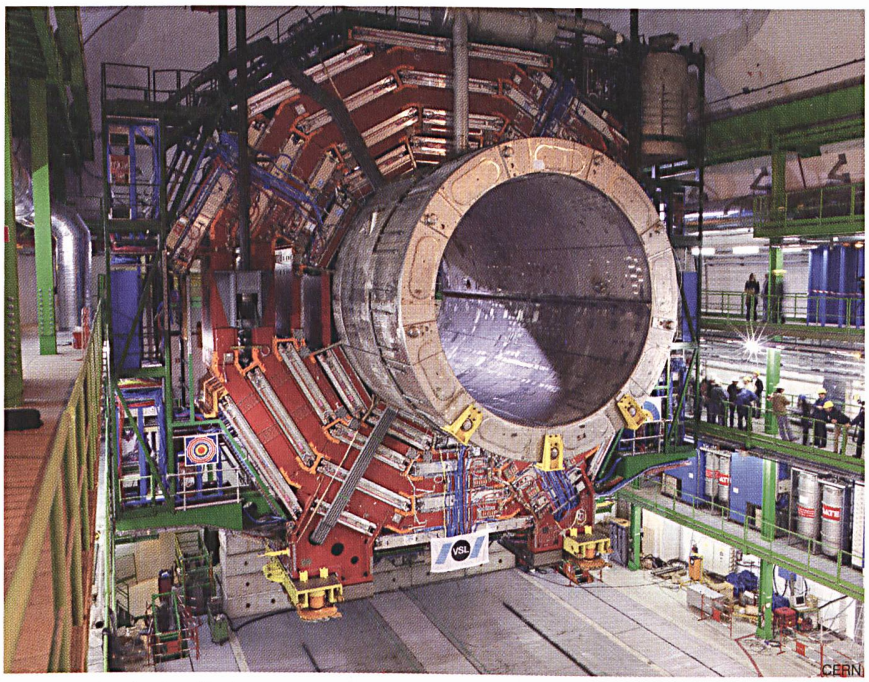


Bild 5 Teilchendetektor für das LHC-Projekt

Die mit 1920 Tonnen schwerste Komponente des CMS-Detektors (Compact Muon Solenoid) wurde Ende Februar 2007 durch einen 78 m langen vertikalen Schacht mit einem Spezialkran abgesenkt und landete in einer unterirdischen Halle, wo die beiden gegenläufigen Protonenstrahlen des LHC aufeinandertreffen werden. Die Komponente besteht aus einem 12,5 m langen Solenoidmagneten von 6 m Durchmesser, der ein Feld von 4 Tesla erzeugen kann, und einem Teil des Eisenrückführjochs (rot), das mit Teilchendetektoren bestückt ist. Die supraleitende Magnetspule wurde von der ETH Zürich massgeblich mitkonzipiert. Das Innere des Solenoids wird vollständig mit Detektoren ausgefüllt sein. Ganz im Zentrum wird ein vom PSI und der Universität Zürich gebauter zylindrischer Pixeldetektor sitzen (Durchmesser 22 cm, Länge 55 cm). Der CMS-Detektor wird insgesamt ca. 12 000 Tonnen schwer sein und wird in einer internationalen Kollaboration von 160 Hochschulinstituten und 2300 Physikern aus aller Welt gebaut.

dem unser Universum begann, ein Zustand höchster Energie und Dichte, der alles übertrifft, was im Laboratorium hergestellt werden kann. Ausdehnung und Abkühlung des Universums führten dann jedoch zu Phasen, die wir mit der heutigen Teilchenphysik gut verstehen – etwa die Bildung des kosmischen Mikrowellen-Hintergrundes, der in letzter Zeit durch Satelliten immer genauer vermessen wurde.

Ausblick

In den nächsten Jahren werden entscheidende Fragen der Teilchenphysik einer experimentellen Prüfung unterworfen – und wahrscheinlich werden viele neue Fragen auftauchen. Dies ist vor allem der Inbetriebnahme des LHC zu verdanken. Bereits jetzt gibt es aber Überlegungen für weiterführende Beschleuniger, beispielsweise einen Linearbeschleuniger, der Elektronen und Positronen gegeneinander schiessen würde. Wegen des grossen finanziellen Aufwands wird ein solcher International Linear Collider jedoch nicht mehr von einzelnen Staaten oder regionalen Organisationen gebaut werden, sondern ein globales Projekt sein. Die Frage nach den kleinsten Bausteinen der Materie wird aber auch in Zukunft durch hochpräzise Experimente bei niedrigen Energien untersucht werden.

Schliesslich ist der Kosmos auch ein einzigartiges Laboratorium für Produktion, Beschleunigung und Zerfall von Elementarteilchen, sodass zu erwarten ist, dass die Untersuchung astrophysikalischer und kosmologischer Fragen in Zukunft ein immer wichtiger werdendes Thema der Teilchenphysik darstellen wird.

Angaben zu den Autoren

Dr. **Kurt Gabathuler** hat am CERN (Genf) und in Los Alamos (USA) gearbeitet. Er leitete von 1998 bis 2006 das Laboratorium für Teilchenphysik am PSI.
Paul-Scherrer-Institut, 5232 Villigen PSI,
kurt.gabathuler@psi.ch

Dr. **Roland Rosenfelder** hat an den Universitäten Mainz (Deutschland) und Stanford (USA) gearbeitet. Seit 1987 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am PSI und leitet dort zurzeit die Theoriegruppe des Laboratoriums für Teilchenphysik.
Paul-Scherrer-Institut, 5232 Villigen PSI,
roland.rosenfelder@psi.ch

Résumé

Le monde des particules élémentaires

Aperçu des plus petits éléments de la matière et de leurs interactions. La création du système périodique a permis, vers la fin du 19e siècle, de mettre de l'ordre dans les substances et composés chimiques alors connus. Cent ans plus tard, une étape semblable a été franchie à un niveau beaucoup plus fondamental, la création du modèle standard de la physique corpusculaire permettant de réduire les éléments du noyau atomique (protons et neutrons) à des composants élémentaires appelée quarks, de les classer en un schéma avec les électrons, neutrinos, etc. et d'expliquer leur comportement. Ce modèle standard décrit presque tous les phénomènes du monde inanimé – de la désintégration radioactive à l'évolution de l'univers après le big bang – mais laisse sans réponse de nombreuses questions qui font l'objet d'une intense recherche.