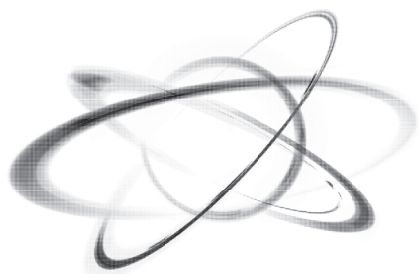


RÜDIGER VAAS
VOM
GOTTESTEILCHEN
ZUR
WELTFORMEL

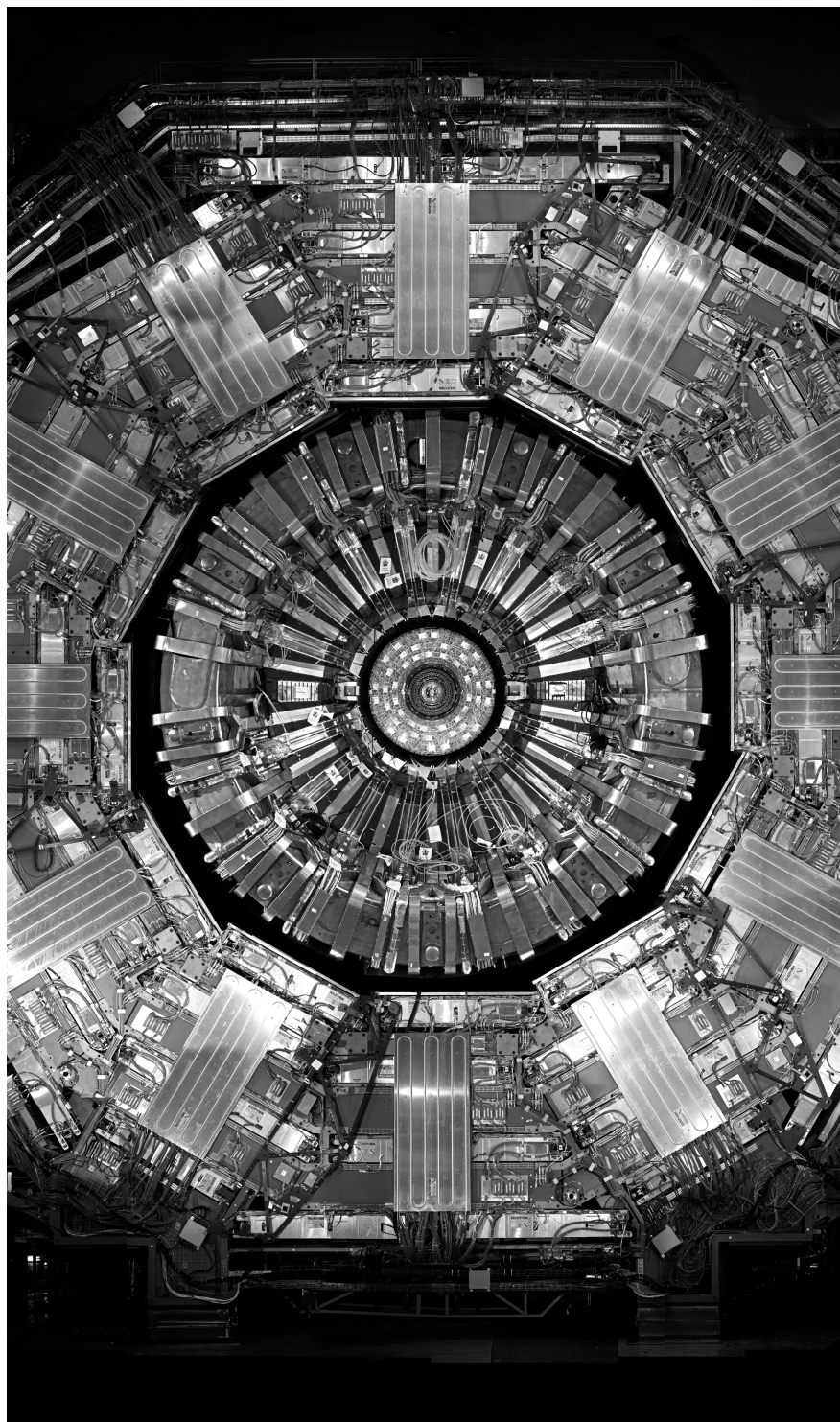


NIKOL
VERLAG

Inhalt

- 6 › **Prolog**
Wir haben eine Entdeckung!
- 10 › **Mikrokosmos**
Die Bausteine des Universums
- 102 › **Gottesteilchen**
Ein schöpferisches Feld und sein Verkünder
- 166 › **Antimaterie**
Vorstoß in die Gegenwelt
- 256 › **Dunkle Materie**
Das Weltreich der Finsternis
- 318 › **Symmetrien**
Mit vereinten Kräften zur Vielfalt der Welt
- 384 › **Weltformel**
Die Melodie des Mikrokosmos

- 502 › Paralleluniversen-Publikationen
- 503 › Teilchendank
- 503 › Lesepartikel
- 511 › Photonen-Emitter



»Wir haben eine Entdeckung!«

Diese freudigen Worte von Rolf-Dieter Heuer, dem Generaldirektor des Forschungszentrums CERN bei Genf, bedeuten wohl den Schlussstein eines rund fünf Jahrzehnte dauernden Kapitels einer Erfolgsgeschichte ohne Beispiel: der Entwicklung, Ausarbeitung und Vervollständigung des Standardmodells der Elementarteilchenphysik. Es beschreibt alle bekannten Teilchen und Kräfte außer der Gravitation. Und es ist zusammen mit Albert Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie die am besten bestätigte wissenschaftliche Theorie aller Zeiten.

Nur ein Beispiel: Mit dem Standardmodell lässt sich, wenn auch mit erheblichem Aufwand, der normierte Wert des anomalen magnetischen Moments eines Elektrons sehr genau berechnen beziehungsweise voraussagen: $0,00115965218178(77)$ (wobei selbst die Gründe der Unsicherheiten in den letzten Ziffern bekannt sind). Und Experimentalphysiker konnten ihn äußerst präzise messen: $0,00115965218076(27)$ (mit einer Unsicherheit von plus/minus $0,0000000000027$). Theorie und Beobachtung passen also auf zehn signifikante Stellen zueinander – und das bei einem nicht gerade selbstverständlichen Parameter eines Elementarteilchens, das kleiner als 10^{-19} Meter sein muss. Diese Übereinstimmung ist kein Zufall, sondern sie zeigt, dass Wissenschaftler hier ein sehr tiefes Verständnis von der Natur haben.

Am 4. Juli 2012 gaben Physiker am CERN die Entdeckung eines neuen Teilchens bekannt, die Heuer so freute. Es ist sehr wahrscheinlich das seit Jahrzehnten gesuchte Higgs-Boson – das Quant eines Felds, ohne das es keine Masse gäbe, keine Atome und kein Leben. Dieses Feld durchzieht alles, auch dieses Buch, und ist vielleicht der

Kathedrale für das »Gottesteilchen«: Im CMS-Detektor am Large Hadron Collider sind bereits über eine halbe Million Higgs-Bosonen entstanden – und nach jeweils einer Trilliardstel Sekunde sofort wieder zerfallen.

Schlüssel zu einer unbekanntten Realität, zu verborgenen Dimensionen und einer »Weltformel«. Peter Higgs und François Englert, die die Existenz des neuartigen Felds vorausgesagt und so eine Großfahndung mit den gewaltigsten Maschinen aller Zeiten ausgelöst hatten, wurden im Dezember 2013 mit dem Nobelpreis geehrt.

Dieses Buch beschreibt die Entdeckung des Higgs-Teilchens, das Standardmodell der Materie sowie das, was Physiker heute jenseits davon vermuten, suchen, erhoffen und befürchten.

› Das erste Kapitel, *Mikrokosmos*, schlägt den weiten Bogen von den ersten Spekulationen griechischer Philosophen über Naturgesetze und Atome bis zum modernen Standardmodell der Elementarteilchenphysik. Obwohl sich die »reduktionistische« Erklärungsstrategie bis heute glänzend bewährt hat, wurden die Vorstellungen von der Materie und ihren Wechselwirkungen radikal umgewälzt. So richtig weiß niemand, was Materie eigentlich ist – und die Quantenfeldtheorien werfen auch diffizile philosophische Fragen auf. Ganz handfest geht das Kapitel aber weiter mit der Erfolgsgeschichte des Forschungszentrums CERN, dem globalen Zentrum der experimentellen Elementarteilchenphysik, und mit seiner grandiosen Weltmaschine, dem Large Hadron Collider (LHC) und dessen haushohen Messgeräten. Der LHC ist auch eine Art »Urknall-Maschine«, denn er erzeugt Bedingungen, wie sie weniger als eine Milliardstel Sekunde nach dem Anfang unseres Universums überall im Weltraum herrschten.

› Das zweite Kapitel, *Gottesteilchen*, beschreibt die abenteuerliche Suche nach dem Higgs-Boson. Seine Existenz wurde 1964 am Schreibtisch postuliert, was zunächst kaum Beachtung fand. Fast ein halbes Jahrhundert später haben es Teilchenphysiker am LHC vieltausendfach produziert und mit riesigem Aufwand akribisch nachgewiesen – ein grandioser Erfolg für die Wissenschaft! Damit ist das Standardmodell der Elementarteilchen komplett und ein echt »schweres« Rätsel gelöst.

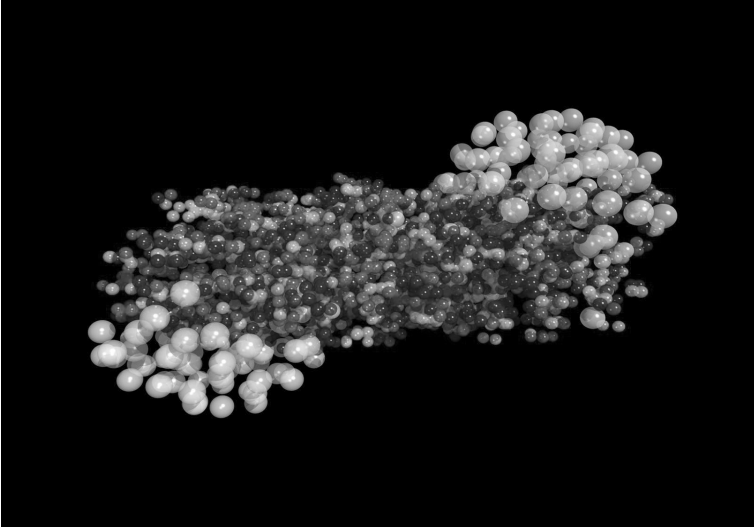
Feuerbälle für einen Moment

Nur mit hochempfindlichen Detektoren und Analysemethoden lassen sich aus den Feuerbällen im Labor die Spuren des QGPs erschließen. Erste Anzeichen davon meinten Forscher im Jahr 2000 nach der langwierigen Auswertung von Experimenten mit dem Super Proton Synchrotron am CERN aufgespürt haben. Die Interpretationen waren aber umstritten und die Daten nicht zuverlässig genug.

Nach zehnjähriger Bauzeit ging im selben Jahr der Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) am Brookhaven National Laboratory in Upton auf Long Island, New York, in Betrieb. Darin werden auf einer vier Kilometer langen Kreisbahn zwei gegenläufige Strahlen aus Gold-Atomen mithilfe von supraleitenden Magneten auf 99,9 Prozent der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und mit Energien von 100 Gigaelektronenvolt aufeinander geschossen. »Bei jeder Kollision entsteht ein winziger Feuerball, der 200.000-mal heißer ist als das Zentrum der Sonne«, sagt Peter Braun-Munzinger.

Pro Feuerball werden rund 7500 Quarks freigesetzt beziehungsweise erzeugt. Manche kollidieren miteinander und bilden dabei zwei kegelförmige Ströme von Sekundärteilchen. Diese Jets rasen in entgegengesetzten Richtungen davon. Die Feuerbälle währen lediglich 10^{-23} Sekunden. Doch das ist lang genug, um die Jets zu behindern. Wenn sich ein QGP im Feuerball bildet, so die Annahme, wird ein Jet stärker als der andere gebremst, weil die Jets nicht exakt im Mittelpunkt der Kollisionen entstehen, das QGP also mal dem einen und mal dem anderen Jet stärker im Weg ist.

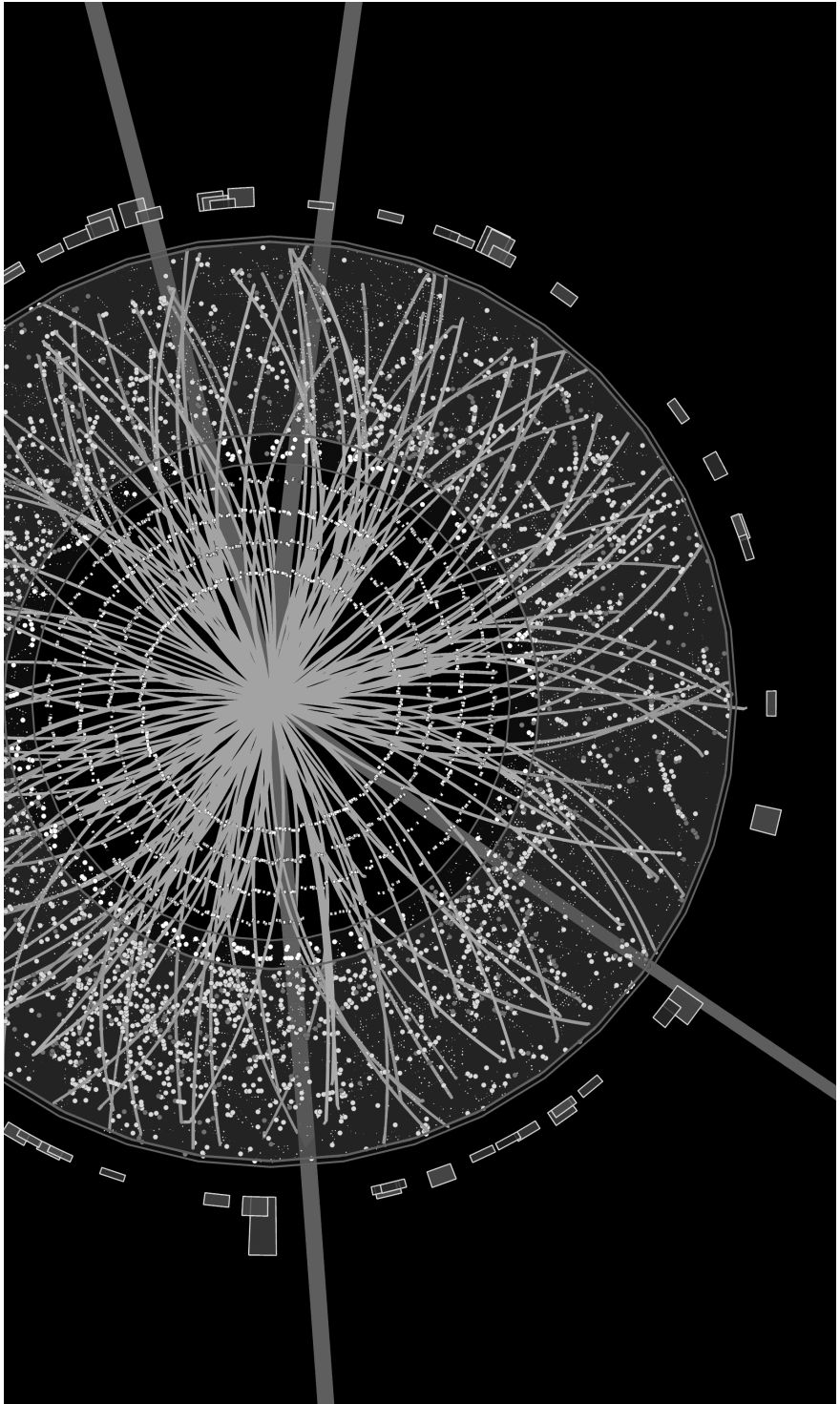
Genau solche asymmetrischen Jets haben die Forscher am RHIC beobachtet. Das ist ein gutes Indiz für die Entstehung des QGP, zumal die Energien für diesen Phasenübergang im vorausgesagten Bereich von etwa 160 bis 175 Megaelektronenvolt pro Teilchen liegen, entsprechend einer Transitionstemperatur von einer Billion Grad.



Teilchenschmelze: Bei der frontalen Kollision schwerer Atomkerne wie Blei oder Gold brechen die Protonen und Neutronen gleichsam auf, und eine Art Flüssigkeit aus Quarks und Gluonen entsteht (Bildmitte). Sie hat in den ersten Sekundenbruchteilen des Urknalls den gesamten Weltraum erfüllt.

Als der Weltraum flüssig war

»Viele Theoretische Physiker und eine große Zahl der Experimentatoren denken, dass RHIC das Quark-Gluon-Plasma nachgewiesen hat«, sagt Thomas Kirk vom Brookhaven National Laboratory. »Aber nicht alle sind davon überzeugt.« Das hat zum einen damit zu tun, dass die Indizien nur indirekt sind, weil das QGP so kurzlebig ist und die vorhergesagten Signaturen – etwa Energiedichte, Temperatur, Dynamik und die Anreicherung von strange-Quarks, die durch die Verschmelzung von Gluonen entstehen – stark von den theoretischen Modellen abhängen. »Zum anderen weichen die von RHIC gemessenen Effekte von unseren Erwartungen ab«, sagt Kirk.



Gottesteilchen

Ein schöpferisches Feld und sein Verkünder

Das Higgs-Boson ist eine verwegene Annahme mit schwerwiegenden Folgen: Als Quant eines neuartigen Felds, das den gesamten Weltraum ausfüllt, weist es auf einen kurz nach dem Urknall angesprungenen Mechanismus hin, der Elementarteilchen ihre Masse gibt.

Signatur des Neuen: Zerfallsspur eines mutmaßlichen Higgs-Teilchens in zwei Paare von Myonen (lange Linien), gemessen im ATLAS-Detektor.

Exkurs



Nur zweiter Sieger: Der Teilchenbeschleuniger Tevatron (Ringumfang 6,3 Kilometer) bei Chicago fand vor dem LHC Hinweise auf das Higgs-Boson. Für eine Entdeckung reichten seine Daten aber nicht aus.

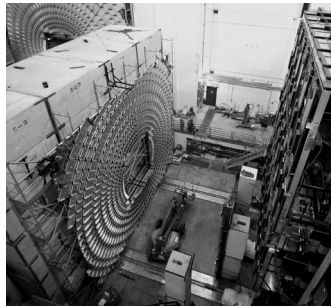
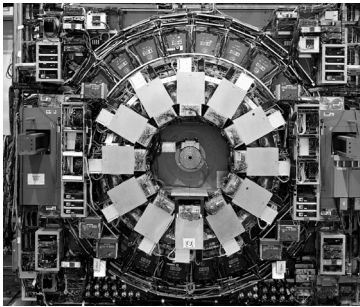
Unterstützung aus den USA

Ende Juli 2012 wurde die erste Gesamtanalyse der Tevatron-Daten publiziert (9,7 inverse Femtobarn). Dieser im Umfang 6,3 Kilometer messende Teilchenbeschleuniger des Fermilab in Batavia bei Chicago, der bis zum 30. September 2011 lief, war vor dem LHC der leistungsfähigste Beschleunigerring der Welt. In ihm wurden Protonen und Antiprotonen mit bis zu 1,96 Teraelektronenvolt aufeinander geschossen.

Die Hoffnung vor allem der US-amerikanischen Physiker, das Higgs-Teilchen hier noch vor dem LHC zu finden, erfüllte sich nicht. Aber die kombinierte Auswertung der Messdaten beider Tevatron-Detektoren – CDF (Collider Detector at Fermilab) und DØ (sprich: »D Zero«) – gibt immerhin einen guten Hinweis. Mit 3,1 Sigma (etwa 99,8 Prozent) wurde das Higgs-Boson in einem Bereich von 120 bis 135 Gigaelektronenvolt erspäht. Bei dem vom LHC favorisierten Wert von 125 Gigaelektronenvolt kam das Tevatron auf 2,8 Sigma – konsistent mit den LHC-Messungen, aber für sich genommen nicht ausreichend für eine Entdeckung.



Die Wissenschaftler schätzen, dass sie etwa 150 Higgs-Signale unter fast 10.000 Untergrund-Ereignissen am Tevatron gemessen haben. Weil unter den Bedingungen dieses Beschleunigers die Higgs-Teilchen eher in bottom-Quarks und -Antiquarks zerfallen als beim LHC, stützen die Tevatron-Resultate die LHC-Ergebnisse und sind teilweise komplementär zu diesen, für sich allein jedoch nicht signifikant.



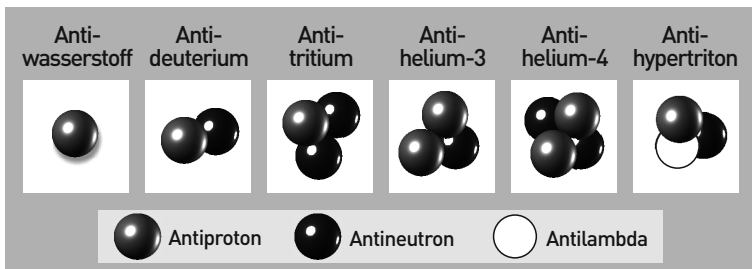
Große Apparate für kleine Teilchen: Die beiden Riesendetektoren CDF und DØ am Tevatron haben das top-Quark entdeckt sowie Anzeichen für das Higgs-Teilchen. Beide sind rund 5000 Tonnen schwer und zwölf Meter hoch.

Neue Impulse

Bis 2010 waren die schwersten bekannten Antiteilchen Kerne von Antihelium-3. Sie setzen sich jeweils aus zwei Antiprotonen und einem Antineutron zusammen. Dann gelang es am RHIC-Beschleuniger (Relativistic Heavy Ion Collider) in Upton, New York, in dem Gold-Atome fast mit Lichtgeschwindigkeit aufeinander geschossen werden, einen neuen Typus von Antimaterie zu erzeugen und nachzuweisen: Antihypertriton. Der Stoff besteht aus einem Antiproton, einem Antineutron und einem instabilen Teilchen namens Antilambda.

Doch das Antihypertriton hielt nicht lange den Antirekord. Bereits 2011 glückte den RHIC-Physikern erstmals der Nachweis von Antihelium-4. Genau 18 dieser Kerne aus je zwei Antiprotonen und Antineutronen konnten sie identifizieren. Dazu hatten sie rund eine Milliarde Kollisionen zwischen den Gold-Atomkernen analysiert.

Auch am CERN hat sich die Antikreation inzwischen wiederholt. So hat der ALICE-Detektor am LHC ebenfalls Antihypertriton und Antihelium-4 nachgewiesen.



Aufmarsch der Antikerne: Antimaterie ist im bekannten Universum eine Rarität – besonders in Gestalt von Antinukleonen schwerer als Antiprotonen. In Experimenten wurden bislang drei Antiwasserstoff-Isotope erzeugt sowie schwerere Kerne, zuletzt Antihelium-4 und das extrem kurzlebige Antihypertriton.