

HIGGS

»Das schwerste Boson, das wir je gefunden haben«

von DANIEL LINGENHÖHL

Wir beobachten in unseren Daten deutliche Signale eines neuen Teilchens im Bereich von 125 Gigaelektronvolt (GeV) mit einer Signifikanz von knapp 5 Sigma. Diese Ergebnisse sind zwar noch vorläufig, aber es handelt sich tatsächlich um ein neues Teilchen. Wir wissen, dass es ein Boson sein muss, und es ist das schwerste Boson, das wir je entdeckt haben.« Mit diesen Worten umschreibt der Physiker Joe Incandela, Sprecher des CMS-Projekts am CERN, die bedeutende Entdeckung, die er zusammen mit seinem Team und den Kollegen des parallel laufenden ATLAS-Projekts gemacht hat. Noch vermeiden die Wissenschaftler eine Festlegung, ob es sich bei diesem neuen Teilchen tatsächlich um das lange gesuchte Higgs-Boson handelt, doch sprechen viele der jetzt bekannt gegebenen Daten dafür. »Die Zahl der Ereigniskandidaten und die Verteilungen der nachgewiesenen Zerfallsteilchen entsprechen der Hypothese, dass es sich um das Higgs-Boson handelt. Die Wahrscheinlichkeit, dass die beobachteten Signale eine Fehlmessung oder statistische Fluktuation sind, liegt bei eins zu einer Million«, sagt zum Beispiel Thomas Müller vom Karlsruher Institut für Technologie, dessen Arbeitsgruppe am CMS-Großdetektor mitwirkt. Zum Vergleich: Bei der Bekannt-



TEILCHENPHYSIK

Higgs-Boson: Das Gespenst von Genf wird greifbar

von ROBERT GAST

Am Mittwoch hat das CERN die Entdeckung eines neuen Teilchens bekannt geben. Auf das Higgs-Boson wollen sich die Forscher aber noch nicht endgültig festlegen

Peter Higgs wartet schon lange. 1964 hat er einen Aufsatz über theoretische Physik veröffentlicht: »Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons«. Ein- einhalb Seiten lang und gerade einmal mit vier Formeln gespickt, ist er mittlerweile eine der prominentesten Arbeiten der modernen Teilchenphysik. Darin skizziert Higgs einen Mechanismus, der einigen der Elementarteilchen Masse geben soll. Aber beschreibt er damit eine Eigenschaft der Natur? Lesen Sie bitte auch die aktuelle Meldung zur heutigen Bekanntgabe: »Das schwerste Boson, das

wir je gefunden haben«. 48 Jahre nach der Veröffentlichung der Arbeit könnte die Frage beantwortet werden. Am Mittwoch wird am CERN in Genf ein Seminar plus Pressekonferenz stattfinden, zu dem offenbar auch Peter Higgs angereist ist. Dort wird aller Voraussicht nach eine erdrückende Beweislast für die Entdeckung eines neuen Teilchens präsentiert. Schon im letzten Dezember hatten die Detektoren ATLAS und CMS am Large Hadron Collider (LHC) verdächtige Spuren bei einer Energie von 125 Gigaelektronvolt (GeV) präsentiert. Die

Liebe Leserin,
lieber Leser,



der 4. Juli 2012 wird wahrscheinlich in die Geschichte der Naturwissenschaften eingehen. Auch wenn wirklich noch das allerletzte Fünkchen Zweifel bleibt, so deutet doch vieles darauf hin, dass den Physikern am CERN in Genf das lang gesuchte und ersehnte Higgs-Boson ins Netz gegangen ist. Wir würdigen dieses Ereignis mit dieser Sonderausgabe von »Spektrum.de – Die Woche«, in der Sie neben der aktuellen Fundmeldung auch Hintergründe zum erfolgreichen Large Hadron Collider lesen können. Außerdem lassen wir einen kritischen Nobelpreisträger zu Wort kommen und blicken in die Zukunft des Teilchenbeschleunigers.

Eine spannende Lektüre wünscht Ihnen
Daniel Lingenhöhl
Redakteur Spektrum.de

IN DIESER AUSGABE:



NATURKRAFT
»Wir Teilchenforscher legen die Messlatte höher«



CERN
Der Letzte seiner Art?



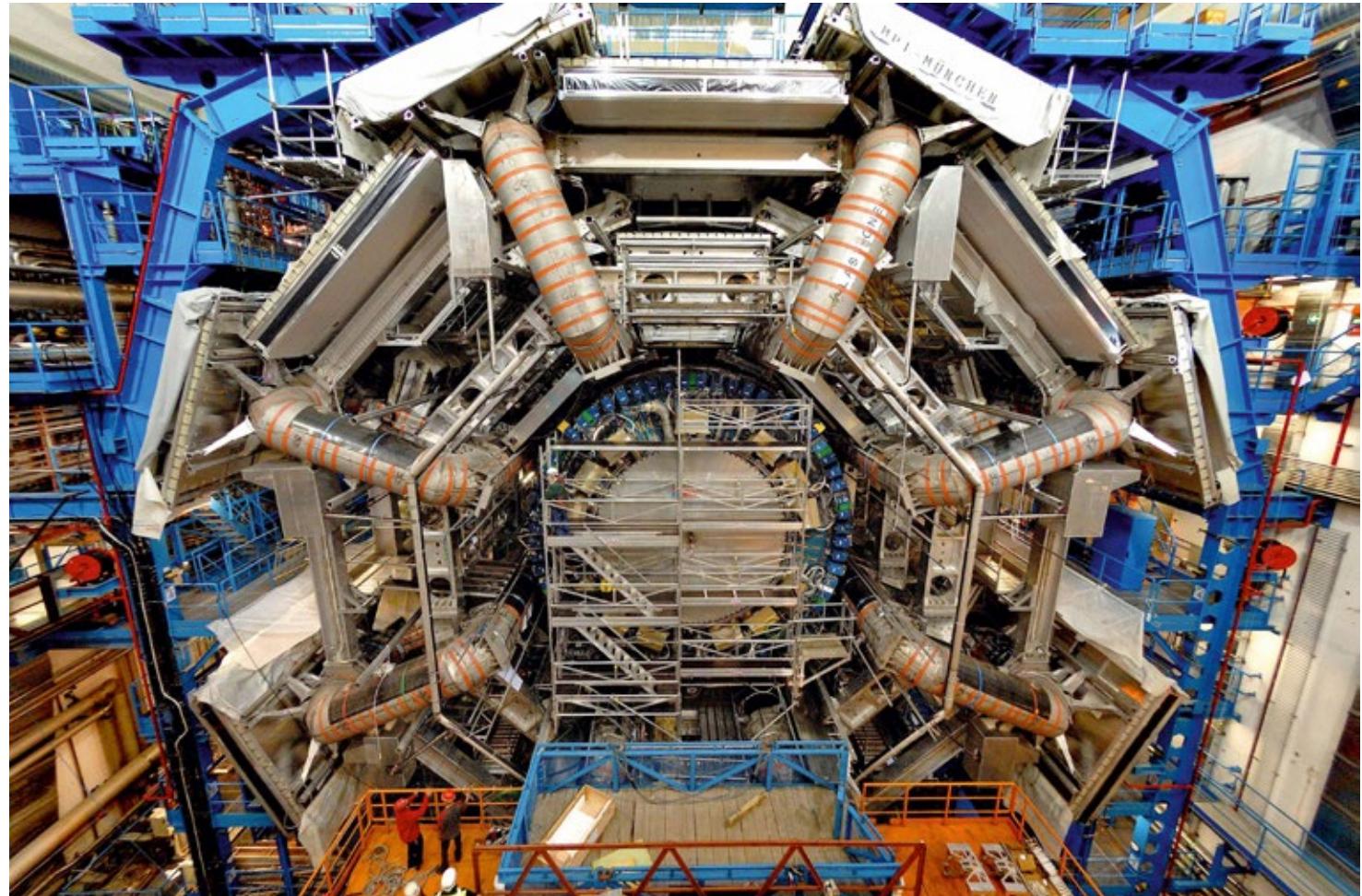
GRUNDLAGENFORSCHUNG
Jenseits des Higgs-Teilchens

Fortsetzung Seite 4

Fortsetzung Seite 2

FORTSETZUNG VON SEITE 1

Das Gespenst von Genf wird greifbar



CERN

Messungen des Jahres scheinen das Signal verstärkt zu haben - so dass nun offensichtlich kaum noch Zweifel an der Existenz des Teilchens bestehen.

Aber handelt es sich dabei tatsächlich um das nach Peter Higgs benannte Higgs-Boson? Das wäre eine Sensation, wie sie die Teilchenphysik seit 30 Jahren nicht gesehen hat. Um sicher zu sein, dass es sich bei dem Fund zweifelsfrei um das Higgs-Teilchen handelt, sind daher noch weitere Messungen nötig. Die Physiker werden sich auf der Pressekonferenz somit alle Mühe geben, das Wort »Entdeckung« nicht in den Mund zu nehmen. Erst wenn weitere Eigenschaften des neuen

Fundes untersucht wurden, dürfen sie das Higgs-Teilchen für real erklären.

Ende einer Ära

Damit fände eine Ära der modernen Teilchenphysik ihren Abschluss. Das Higgs-Teilchen wäre das letzte Puzzlestück in dem mikroskopischen Modell, mit dem Physiker seit einem halben Jahrhundert die Welt beschreiben. Das so genannte Standardmodell beinhaltet eine Zusammenstellung elementarer Konstituenten des Kosmos sowie der Kräfte, die zwischen ihnen wirken. Seit den 1960er Jahren wurden immer mehr seiner theoretischer Vorhersagen bestätigt,

als letztes Teilchen kam 1995 das Top-Quark hinzu. Zunächst ging man davon aus, dass das Standardmodell aus zwei Säulen besteht: zum einen die Bauteile, aus denen Materie aufgebaut ist. Dazu zählen Quarks, Elektronen und Neutrinos. Daneben gibt es Teilchen, die Kräfte übertragen: Photonen sind Pate elektromagnetischer Wechselwirkungen. Nukleonen halten zusammen, weil die Quarks darin ständig Gluonen austauschen. Und so genannte W- und Z-Bosonen übertragen die schwache Kraft, die Atomkerne zerfallen lässt. Schnell zeigte sich jedoch, dass das Modell des Mikrokosmos wackelt. Das Problem förderte ausgerech-

Detektor ATLAS

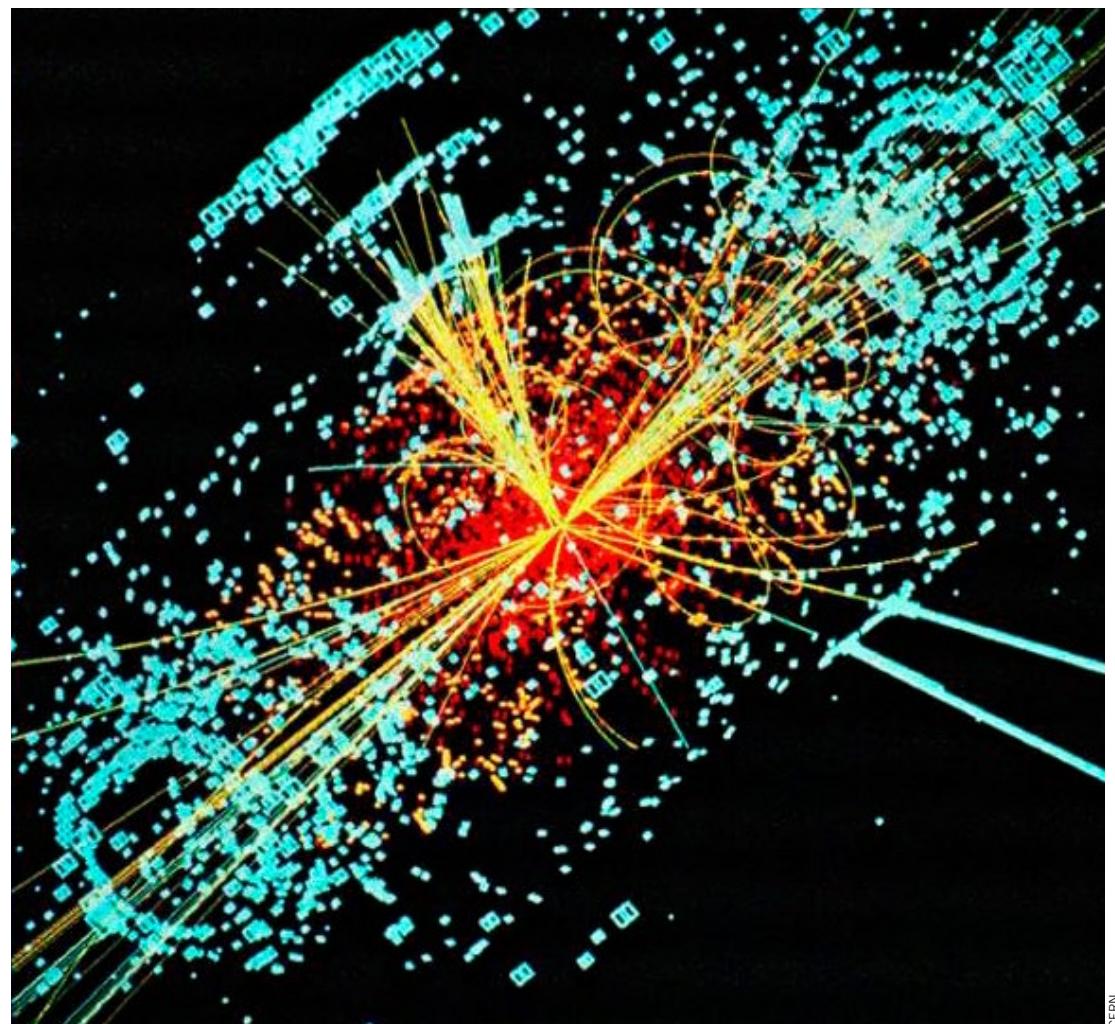
Der Detektor ATLAS soll über Zerfallsreignisse ein Higgs-Boson nachweisen.

net die größte Leistung seiner Architekten zu Tage. Schon 1967 gelang es Abdus Salam, Sheldon Glashow und Steven Weinberg, die Gleichungen der schwachen und der elektromagnetischen Wechselwirkung auf ein gemeinsames mathematisches Fundament zurückzuführen. Der »elektroschwachen Theorie« zufolge sind die Austauschteilchen der beiden Kräfte - Photonen auf der einen sowie Ws und Zs auf der anderen - gewissermaßen Spiegel-

bilder. Aber schon Weinberg und seine Kollegen vermuteten einen fundamentalen Unterschied. Sie sollten Recht behalten: 1983 konnte das Super-Protonen-Synchrotron (SPS) am CERN zeigen, dass Ws und Zs 85- beziehungsweise 97-mal schwerer als ein Wasserstoffkern sind - Photonen hingegen sind masselos. Es musste also etwas geben, das die Symmetrie zwischen der schwachen und der elektromagnetischen Wechselwirkung bricht. Gesucht wird seitdem eine dritte Säule des Standardmodells: ein Mechanismus, der die Ws und das Z so schwer macht, wie sie laut der Messungen am SPS sind.

Ein Nobelpreisträger verschaut sich

Peter Higgs war nicht der Einzige, der 1967 einen derartigen Mechanismus vorgeschlagen hatte. Gleich zwei andere Forschergruppen veröffentlichten unabhängig von Higgs kurz zuvor vergleichbare Arbeiten. Aber im Aufsatz »A model of leptons«, der die elektroschwache Vereinheitlichung begründet, wurde Peter Higgs an erster Stelle zitiert, womit sein Name untrennbar mit dem maßgebenden Mechanismus verbunden war. Sein Autor, der spätere Nobelpreisträger Steven Weinberg, begründete das jüngst in der »New York Times« damit, dass er sich bei den Veröffentlichungsdaten der Arbeiten verschaut hatte. Bei dem Rummel um den mittlerweile 83-jährigen Schotten geht es Physikern allerdings nicht um das Higgs-Teilchen an sich. Sein Aufauchen wäre der Beweis dafür, dass jeder Fleck des Universums von einem unsichtbaren Energiefeld durchzogen wird - einer Art modernem Äther, an dem die W- und Z-Bosonen reiben und somit Schwere erhalten. Auch Elektronen, Neutrinos und Quarks würden vom Higgs-Feld erfasst, Photonen und Gluonen hingegen können es der Theorie zufolge ungehindert durchqueren. Als alleinige Erklärung für die Masse von



CERN

Materie, wie oft in den Medien verbreitet wird, taugt das Higgs-Feld indes nicht. Der Löwenanteil des Gewichts des menschlichen Körpers stammt von den Bindungsenergien der Quarks in Atomkernen. Das Higgs würde nur jenen Teil bereitstellen, den Physiker als Ruhemasse kennen. Das sind nur wenige Prozent des Gewichts eines Menschen. Um diese Vorhersage aber mit der Wirklichkeit abzulegen, muss man den Higgs-Äther gezielt in Schwingung versetzen - etwa, indem man das Vakuum an einer Stelle für den Bruchteil einer Sekunde stark zusammendrückt. Das geschieht in dem 27 Kilometer langen Kreistunnel unter Genf, wenn Atomkerne mit annähernd Lichtgeschwindigkeit ineinanderfliegen. Die Folge einer solchen Anregung wäre das Higgs-Teilchen. Jedoch entsteht es nur bei wenigen der hunderte

Millionen Kollisionen, die während einer Sekunde in der Röhre des Untergrundexperiments stattfinden. Im letzten Jahr sollen auf diese Weise gerade einmal 75 000 Higgs-Teilchen entstanden sein.

Dieses Jahr dürften es noch mehr gewesen sein: In den zweieinhalb Monaten, die der LHC 2012 bislang lief, konnte die gesammelte Datenmenge mehr als verdoppelt werden. Die im Vergleich zu den Vorjahren reiche Ausbeute hat zwei Gründe: Zum einen werden Protonen nun mit 8000 statt 7000 GeV aufeinander geschossen. Zum anderen pressen die Forscher mehr Teilchenbündel in den Kreisring als je zuvor.

Spuren des Higgs-Bosons

Laut Computersimulationen könnte sich ein Higgs-Teilchen mit diesen Spuren im Detektor bemerkbar machen.

fällt unmittelbar in bekannte Teilchen. Jedes fünfhundertste Higgs soll etwa in zwei Photonen zerstrahlen - ein Signal, das sich besonders gut im Dickicht der sonstigen Trümmer der Teilchenkollision auffinden lässt. Nachdem es bereits aus den 2011er Daten herausstach, sind den Forschern nun offenbar mehr überschüssige Photonen ins Netz gegangen. Daneben findet sich vermutlich ein Überschuss an Z-Bosonen, die in so genannte Muonen zerfallen, in den neuen Daten. Auch das würde man von einem Higgs-Teilchen erwarten. Unklar ist noch, ob die Signale tatsächlich die für eine zweifelsfreie Entdeckung nötige Signifi-

kanz von fünf Sigma überschritten werden. Erst dann ist der Zufall mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,99994 Prozent ausgeschlossen. Bei drei Sigma - in etwa das Signifikanzniveau, auf das sowohl ATLAS als auch CMS im Dezember kamen - liegt die Wahrscheinlichkeit für eine statistische Schwankung noch bei hohen 0,26 Prozent. Derweil dürfte noch ein anderer Effekt die morgige Verkündung trüben: Da die Forscher einen großen Massenbereich nach Signalen absuchen, steigt die Wahrscheinlichkeit, bei einer der vielen Einzelmessungen einer statistischen Schwankung auf den Leim zu gehen. Zieht man diesen »look-elsewhere«-Effekt in Betracht, schrumpft die Signifikanz eines Signals etwa um ein Sigma. Die Haltung des CERN-Managements war stets: Erst wenn sowohl ATLAS als auch CMS unabhängig voneinander und vom »look-elsewhere«-Effekt bereinigt ein Signal von fünf Sigma sehen, spricht man von einer Entdeckung. Es ist jedoch nicht

ausgeschlossen, dass man sich in Anbetracht der Tatsache, dass das Signal in vielen Zerfallskanälen und in zwei Detektoren unabhängig voneinander bei derselben Energie aufgetaucht ist, von dieser Haltung verabschiedet hat.

Eine letzte Prüfung

Dennoch gehört diese Prüfung zweifelsfrei zu den Dingen, die noch geklärt werden müssen, bevor das neue Signal dem Higgs-Teilchen zugeordnet werden kann. Daneben müssen noch weitere Zerfallsprodukte des Higgs im Trümmerhaufen nachgewiesen werden. Das heiß ersehnte Teilchen soll dem Standardmodell zufolge noch in viele andere Partikel zerfallen. Bei einigen dieser »Zerfallskanäle« verdeckt die riesige Anzahl anderer Produkte der Teilchenkollisionen verdächtige Spuren - etwa in dem Fall, dass das Higgs in zwei Quarks zerfällt. Aber just in diesem Zerfallskanal hat der Beschleuniger Tevatron bei Chicago am Montag eine Häufung ver-

dächtiger Signale gemeldet, was den Fund am LHC untermauert. Für die zweifelsfreie Identifizierung des Signals gilt es auch, den Spin (eine Art Eigendrehimpuls) des neuen Teilchens genau zu vermessen. Das Higgs müsste dem Standardmodell zufolge einen Spin gleich null haben - um selbigen zu bestimmen, benötigt man vermutlich den kompletten Datensatz aus dem Jahr 2012, vielleicht gelingt es auch erst 2015, nachdem der LHC umgebaut wurde. Frühstens im Herbst könnte man indes wissen, wie oft das neu entdeckte Teilchen in verschiedene andere Teilchen zerfällt. Nur darüber können die Forscher ausrechnen, wie stark das vermeintliche Higgs-Feld an die verschiedenen Elementarteilchen koppelt. Zeigen hier weitere Messungen große Abweichungen von den Vorhersagen des Standardmodells, wäre ein Szenario denkbar, das sich mancher Physiker insgeheim wünschen dürfte: Das Signal ist gar kein Higgs-Teilchen - oder aber ein

Higgs-Teilchen, das nicht den Erwartungen der Teilchenphysiker entspricht. Denn das würde große Lücken im Standardmodell offenbaren: Lücken, deren Ausmaß der LHC wiederum genau vermessen könnte. Und das würde den Weg in Richtung einer Theorie deuten, die das Standardmodell ablöst. Eine solche ist umgänglich, denn die bisherigen Naturgesetze können längst nicht mehr den kompletten Kosmos erklären. Bei der Dunklen Materie, der Dunkle Energie, der Beschreibung der Neutrinomassen oder der Erklärung der Tatsache, dass es gerade drei Generationen von Quarks und Neutrinos gibt, stößt das Standardmodell an seine Grenzen. Offenbart der LHC aber in den nächsten Jahren auch sonst keine Hinweise auf neue Physik, etwa in Form supersymmetrischer Teilchen oder Extra-dimensionen, müsste man auf die nächste große Entdeckung womöglich genauso lange warten wie Peter Higgs auf den Nachweis seines Teilchens. <<

FORTSETZUNG VON SEITE 1

»Das schwerste Boson, das wir je gefunden haben«

gabe letzten Herbst, dass es erste schwache Signale gäbe, lag das Signifikanzniveau nur bei 2 Sigma. Zwischen den Resultaten der beiden Gruppen herrschen zudem nur geringe Unterschiede: Das ATLAS-Team berichtet von einem Teilchen bei 126,5 GeV mit 5 Sigma, das CMS-Team von einem Teilchen mit 125,3 GeV und 4,9 Sigma. Zu verdanken haben die Physiker diese Daten vor allem den Erhebungen der letzten Monate: Allein zwischen April und Juni sammelten die Gruppen von ATLAS und CMS mehr Material als während des gesamten letzten Jahres. Zudem erhöhten sie die Energie von sieben auf acht Teraelektronvolt,

mit der sie Protonen aufeinanderjagten und zusammenstoßen ließen. Die Auswertung dieser Daten zeigte nun das Signal eines Teilchens bei einer Masse von 125 GeV/c² (eine Masseneinheit der Elementarteilchenphysik): Das neue Teilchen wiegt damit etwas mehr als ein Zäsiatatom. Das vermeintliche Higgs-Boson ist sehr kurzlebig und lässt sich daher nicht direkt in den Detektoren beobachten. Nachgewiesen wird es daher über seine Zerfallsprodukte, die laut Incandela entweder zwei Photonen oder zwei Z-Bosonen sind. Billionen Protonenkollisionen waren hierfür nötig. Für einen hundertprozentigen Nachweis reichten

diese beiden Kanäle aber nicht aus: »Laut Standardmodell kann das Higgs-Boson beispielsweise auch in ein Elektron-Positronen-Paar oder in Fermionen zerfallen«, sagt Müller. Die Arbeit für die Physiker sei damit noch lange nicht beendet, weist Müller nachdrücklich auf weiterhin vorhandene Lücken hin: »Im laufenden Jahr werden wir voraussichtlich unsere Datenmenge vervierfachen. Das wird uns erlauben, die Eigenschaften des gefundenen Teilchens genauer zu vermessen: seine Masse, die Kraft, mit der es an verschiedene Teilchen koppelt, und weitere wichtige Kenngrößen, mit denen geprüft werden kann, ob das Standardmodell in

sich konsistent beschreibbar ist. Erst dann können wir festlegen: »Es ist das Higgs-Boson.« Im Moment sind die Physiker am CERN dennoch bereits sehr euphorisch, wie man den Worten von Rolf-Dieter Heuer, dem Leiter des CERN, entnehmen kann: »Wir haben einen Meilenstein im Verständnis der Natur erreicht. Die Entdeckung eines Teilchens, das mit dem Higgs-Boson im Einklang steht, öffnet das Tor zu weiteren, detaillierten Studien und wirft wahrscheinlich Licht auf andere Geheimnisse des Universums.« Lesen Sie mehr zum Thema in unserem Hintergrundartikel »Das Gespenst von Genf wird greifbar«. <<

NATURKRAFT

»Wir Teilchenforscher legen die Messlatte höher«

Es wird wild spekuliert, ob ein untypisches Signal des Beschleunigers Tevatron eine neue Physik ankündigt. Der Physiker Thomas Naumann vom deutschen Teilchenforschungszentrum DESY sieht die Sache nüchterner, wie Gerhard Samulat im Gespräch für »Spektrum der Wissenschaft« erfahren hat.

DAS GESPRÄCH FÜHRTE GERHARD SAMULAT.



Thomas Naumann
arbeitet am deutschen
Teilchenforschungszentrum DESY in
Zeuthen und ist Mitglied der Atlas-
Kollaboration am Large Hadron Collider
(LHC) des Europäischen Zentrums für
Kernforschung CERN bei Genf.

Kurz vor Ende des Experimentierbetriebs des Beschleunigers Tevatron am Fermilab in den USA sorgt dort eine Entdeckung für Aufsehen. Der Detektor CDF zeichnete ein Signal auf, das sich bislang nicht durch das Standardmodell der Teilchenphysik erklären lässt. Müssen die Physikbücher nun umgeschrieben werden?

Thomas Naumann: Das beobachtete Signal ist mit der invarianten Masse eines Teilchens verträglich, das etwa 150 Mal schwerer ist als ein Proton. Es hatte eine so genannte Signifikanz von etwas mehr als drei Standardabweichungen. Das heißt, es könnte sich hierbei mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit noch um einen statistischen Ausreißer handeln.

Derartige Signale habe ich in meinem Forscherleben als Physiker leider bereits mehrere Male kommen und gehen sehen, darunter die Anzeichen für so genannte Leptoquarks, die eine Verbindung aus Vertretern der Teilchenklasse der Leptonen und der Quarks darstellen sollen, sowie die exotischen Pentaquarks, die aus fünf Quarks bestehen. Für eine Entdeckung legen wir Teilchenforscher die Messlatte daher höher, nämlich auf eine Signifikanz von fünf Standardabweichungen.

Übertreiben die Medien also etwas?

Die Physiker von CDF verhalten sich jedenfalls meiner Meinung nach völlig korrekt: Sie publizieren, was sie beobachten und geben die statistische Signifikanz ihrer Beobachtung an. Sie enthalten sich dabei jeglicher Interpretation ihrer Messung. Auch das Fermilab ist damit noch sehr zurückhaltend.

Ist dies eventuell das viel gesuchte Higgs-Boson?

Das CDF-Team sieht in der invarianten Masse zweier Teilchenjets, die zusammen mit einem W-Boson erzeugt werden, das die schwache Kraft vermittelt, einen Hinweis auf eine Resonanz bei etwa 144 Gigaelektronenvolt. Sie enthält sich aber in ihrer Publikation weit gehender Interpretationen. Merkwürdig ist jedoch, dass das Signal offenbar in anderen Zerfallskanälen noch nicht nachgewiesen werden konnte. Daher muss man weitere Analysen abwarten.

Warum hatte man das Signal bisher übersehen?

Schwere Teilchen haben eine Vielzahl an Zerfallsmöglichkeiten. Zu diesen Teilchen zählen etwa das viel gesuchte Higgs-Boson, das den anderen Elementarteilchen

ihre Masse verleiht, das Top-Quark sowie die W- und Z-Bosonen der schwachen Wechselwirkung, die in den energiereichen Kollisionen am Tevatron und am Large Hadron Collider LHC in Genf laufend als Untergrundrauschen produziert werden. Das Higgs-Boson wurde beispielsweise bislang vor allem in anderen favorisierten Zerfallskanälen gesucht. Aber auch die Kolleginnen und Kollegen der CDF-Kollaboration vermuten, dass es sich bei diesem Signal – falls es sich denn als solches manifestieren sollte – nicht von einem Higgs-Boson des Standardmodells der Elementarteilchenphysik stammt.

Sieht man ähnliche Signaturen auch am Large-Hadron-Collider LHC des CERN bei Genf oder gehen die Nachweisgeräte dort nun erst auf die Suche?

Zuerst sollten die Forscher am CDF die Signifikanz des Signals steigern und alle Daten, die sie im Laufe des Betriebs gesammelt haben, zur Auswertung heranziehen. Zudem läuft unter dem Namen D0 am Tevatron ein weiteres Experiment, mit dem die Kollegen messen könnten, ob sie an der Stelle ebenfalls eine Signatur ausmachen. Und schließlich sollten ebenso die Detektoren Atlas und CMS am Large Hadron Collider eine unabhängige Analyse durchführen. Weil der LHC aber erst

seit etwa einem Jahr im Experimentierbetrieb läuft, hat er noch nicht die Datenmenge sammeln können, die am Tevatron vorliegt.

Was können wir erwarten, wenn es soweit ist?

Der LHC ist mit seiner mehr als dreifach höheren Energie im Vergleich zum Tevatron vorzüg-

lich für diese Versuche geeignet – wenngleich er noch nicht bei voller Intensität läuft. Wenn alle Experimente die gleichen Signaturen sehen, ist der Effekt nicht mehr weg zu diskutieren. Aber dafür braucht es noch etwas Zeit. Selbst die amerikanischen Kolleginnen und Kollegen gehen ja davon aus, dass das noch einige Monate dauern kann.

Was würde es bedeuten, wenn sich das Signal bestätigen würde?

Bevor man darüber spekuliert, müssten die Experimentalphysiker am Tevatron und am LHC sorgfältig nach weiteren möglichen Zerfallskanälen eines solchen Teilchens suchen. Für ein derart schweres Teilchen wäre es

zumindest höchst ungewöhnlich, wenn es nur auf genau eine Weise zerfiele. Erst wenn dies geschehen ist, kann man Aussagen darüber machen, ob das Teilchen in unser Standardmodell passt – oder ob es eventuell ein erster Hinweis auf eine Physik jenseits davon ist. <<

Herr Naumann, wir danken Ihnen für das Gespräch.

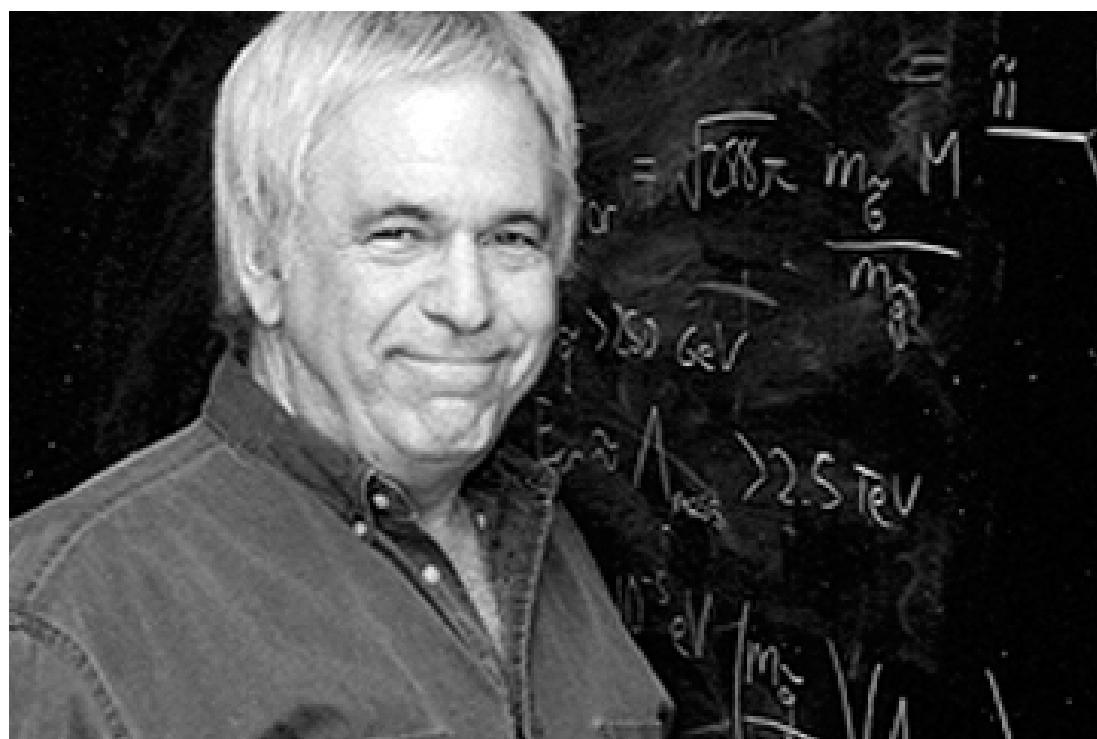
KOMMENTAR

Die Teilchenphysik steht am Wendepunkt

Das Higgs-Boson verhält sich wie vom Standardmodell vorhergesagt – und genau das mache eine Ergänzung der Theorie notwendig, meint der Physiker Gordon Kane. Die Antwort könnte in der Stringtheorie liegen.

von GORDON KANE

Gehen wir einmal davon aus, dass die Detektoren des Large Hadron Colliders in Genf tatsächlich das lang gesuchte Higgs-Boson gefunden haben. Auch wenn die Statistik noch zur Vorsicht gemahnt – alles in allem sieht es sehr danach aus. Zumal beide Detektoren, ATLAS und CMS, ihre stärksten Hinweise in ein und demselben Massenbereich von 125 GeV entdeckt haben und das mit gleich mehreren, doch recht verschiedenen Verfahren. Ich bin überzeugt, dass diese Entdeckung – immer vorausgesetzt, es handelt sich wirklich um eine – einen signifikanten Wendepunkt auf der Suche nach einer fundamentalen vereinheitlichten Theorie der physikalischen Welt darstellt: Zum einen deuten die Eigenschaften, die das Higgs am LHC offenbarte, darauf hin, dass bald die supersymmetrischen Partner weiterer Partikel auftauchen werden; und zum anderen könnten wir nun endlich kurz davorstehen, die bislang immer höchst abstrakte Stringtheorie



ANNA ZYTKOW (FREE ART LICENSE 1.3)

mit der realen Welt zu verknüpfen. Als Teilchen, das der Materie ihre Masse verleiht, ist das Higgs-Boson der Schlussstein im großartigen Theoriegebäude des Standardmodells. Dieses

Gordon Kane

Gordon Kane ist emeritierter Direktor des Michigan Center for Theoretical Physics und forscht an Erweiterungen des klassischen Standardmodells, insbesondere mit Hilfe der Stringtheorie.

beschreibt, wie sich unsere Welt aus Teilchen (Quarks und Leptonen) sowie der starken, schwachen und elektromagnetischen Kraft zusammensetzt (lediglich die Schwerkraft hatte ihre eigene Theorie). Es leidet nicht an offenkundigen Schwächen oder Lücken und umfasst auf grund-

hinführen könnte, liefert ausge rechnet die Beobachtung, dass sich das Higgs-Teilchen in den Daten wie ein »Standardmodell-Higgs« verhält. Das aber sollte im Rahmen des Standardmodells ei gentlich überhaupt nicht möglich sein. Gemäß der relativistischen Quantenfeldtheorie sind für die

orie. Anders als viele glauben, lassen sich doch konkrete Vor hersagen über die Welt aus der Stringtheorie ableiten, sofern man die 10- oder 11-dimensio nale Theorie zunächst auf vier Dimensionen »kompaktifiziert« - die übrigen sechs oder sieben werden dabei auf engstem Raum

chen am LHC entdeckt werden. Nach solchen Partikeln, zu denen beispielsweise die Gluinos - die Superpartner der Gluonen, die die starke Kernkraft übertragen - zählen, ist allerdings bislang in den Beschleunigerdaten noch gar nicht gesucht worden. Auch hier gäbe die Stringtheorie Anhalts punkte, anhand welcher Zerfalls produkte sich die Teilchen ver raten müssten: Im Wesentlichen handelt es sich dabei um Top- und Bottomquarks. Bereits Mitte nächsten Jahres könnten die Wissenschaftler fündig werden. Zwar werden sie damit gewiss weniger Schlagzeilen machen als die Higgsjäger unter ihren Kollegen. Doch die Auswirkungen auf die Physik könnten sogar noch größer sein. Vielleicht zeigt sich dann, dass die Stringtheorie mit der Zeit erwachsen geworden ist.

Dieser Artikel ist eine leicht gekürzte Übersetzung von: Particle physics is at a turning point. Erschienen in Nature 480, S. 415, 2011. <<

legende Weise alles von der Physik kondensierter Materie zur Astrophysik. Mit ihm hat die Physik endlich das erreicht, was sie sich seit vier Jahrhunderten zum Ziel gesetzt hat. Auch die Suche nach dem Higgs-Teilchen dauert schon etwas länger. Dabei konzentrierte man sich zumeist auf seine verräterischste Hinter lassenschaft: Jedesmal, wenn ein Higgs zerfällt, sendet es zwei charakteristische Photonen aus, die von den Detektoren erfasst werden können. Nach diesem Signal suchen die Physiker am LHC ebenso wie zuvor meine Kollegen und ich Mitte der 1980er Jahre am Superconducting Supercollider in Waxahachi in Texas, bis das Projekt im Jahr 1993 eingestellt wurde. Die Entdeckung des Higgs-Bosons komplettiert aber nicht nur das Standardmodell, sondern bedeutet auch, dass eine künftige, grundlegendere Theorie ein fundamentales Higgs-Boson im Inventar haben muss. Alternative Theorien, denen zufolge das Higgs-Teilchen seinerseits aus kleineren Teilen zusammengesetzt ist, werden durch die Daten des LHC im Wesentlichen ausgeschlossen. Auf diese Weise wird das Standardmodell zwangsläufig ausgeweitet und komplexe Fragestellungen wie Supersymmetrie und die Eigenschaften Dunkler Materie kommen in Reichweite. Einen gewichtigen und unerwarteten Hinweis, wo die Reise

Higgs-Masse erhebliche Quan tenkorrekturen notwendig, die seine Masse selbst um ein Vielfaches übersteigen. Weil nun die Massen grundlegender Teilchen wie Quarks, Leptonen oder W- und Z-Bosonen ihrerseits von der Masse des Higgs-Teilchens abhängen, würde ihnen das Standardmodell Massen zuschreiben, die um Größenordnungen über dem liegen, was Wissenschaftler seit Jahren messen.

Auf Antwortsuche in der Supersymmetrie

Ein gewichtiges Problem, das sich jedoch umgehen lässt: Erweitert man das Standardmodell in Rich tung Supersymmetrie, wandeln sich auch die Eigenschaften des vorhergesagten Higgs-Bosons. Sein Verhalten in den Gleichen ändert sich, und die Theorie deckt sich wieder mit der Erfahrung. In der Physik hat man lange vermutet, dass sich das Higgs in genau dieser supersymmetrischen Form zeigen würde. Warum aber finden wir nun Hinweise auf dessen eigentlich unmögliche Standardmodellvariante? Die Lösung dieses Rätsels könnte uns einen großen Schritt näher an die zugrundeliegende Theorie führen, die eines Tages das Standardmodell erweitern wird. Ein Erklärungsansatz etwa kommt aus ganz unerwarteter Richtung: der Stringtheorie oder ihrer Erweiterung, der M-The-

zusammengerollt. In den letzten Jahren hat es beträchtliche Fort schritte bei diesem Unterfangen gegeben; auch die Felder, mit denen sich die zusammengerollten Dimensionen beschreiben lassen, können immer besser stabilisiert werden. Gemeinsam mit meinen Kollegen habe ich die allgemeinere Stringtheorie und die M-Theorie in einer Form untersucht, die mit den Erkenntnissen der Kosmologie im Einklang steht und den Mechanismus enthält, mit dem Higgs-Teilchen Masse erzeugen. Dabei konnten wir zeigen, dass sich das leichteste Higgs-Boson sehr ähnlich dem Standardmodell-Higgs verhält. Und mehr noch: Es hat eine Masse von rund 125 GeV - exakt so viel, wie am Cern beobachtet. Die Resultate unserer Berechnungen haben wir vergangenen August auf der internationalen String Phenomenology Conference in Madison, US-Bundes staat Wisconsin, erstmals der Öffentlichkeit präsentiert. Und nur wenige Wochen vor Verkündung der LHC-Ergebnisse stellten wir eine verfeinerte Form mit nochmals deutlich genaueren Vor hersagen auf dem arXiv-Server online [1]. Laut derselben Stringtheorie - genauer gesagt handelt es sich um die M-Theorie -, die die Higgs-Masse korrekt vorher gesagt hat, ist zu erwarten, dass demnächst eine ganze Anzahl von supersymmetrischen Partnerteil-

[1] Kane, G. et al.: Higgs Mass Prediction for Realistic String/M Theory Vacua. arXiv:1112.1059

»Wir stehen endlich kurz davor, die Stringtheorie mit der realen Welt zu verknüpfen«

(Gordon Kane)



Don Lincoln
Die Weltmaschine
Aus d. Engl. v. Thomas Filk
Spektrum Akademischer Verlag
ISBN: 3827424631

Dieses Buch können Sie im Science-Shop
für 24,95 € (D), 25,70 € (A) kaufen.
www.science-shop.de/artikel/1061507

REZENSION

Auf der Suche nach der Zukunft der Physik

Was macht man mit einer »Weltmaschine«? Welten erschaffen oder gar vernichten wie im Film »Krieg der Welten«? So ganz falsch ist das nicht, denn der neue Large Hadron Collider (LHC) des CERN in Genf kann irgendwie beides – vorausgesetzt man interpretiert den Begriff »Welt« als die Welt im Kleinen, regiert von den Gesetzen der Quantenphysik. Wie andere Beschleuniger vor ihm, kann der LHC Elementarteilchen vernichten oder erzeugen. Aber keiner macht es so heftig: Hier werden, etwa 100 Meter unter der Erde, Protonen in einem 27 Kilometer langen Ring auf 99,999999 Prozent der Lichtgeschwindigkeit gebracht. Der finale Aufprall erfolgt aber nicht auf ein ruhendes Ziel, sondern so wie es bei Geisterfahrern üblich ist: frontal gegeneinander. Es braucht somit genau genommen zwei Beschleuniger mit gegenläufigen Protonenstrahlen, die durch extrem starke Magnete auf Kurs gehalten werden. Die Kollisionsenergie beträgt satte 14 Billionen Elektronenvolt.

Beim LHC reiht sich Superlativ an Superlativ – und Don Lincoln lässt nichts davon aus. Wer das Buch einmal in die Hand genommen hat, legt es erst wieder weg, wenn es ausgelesen ist. Das liegt nicht am kleinen, handlichen Format, sondern an der Attraktivität, Verständlichkeit und Kompetenz des Textes, der durch viele Grafiken, Tabellen und schwarz-weiße Bilder ergänzt wird. Der Autor ist vom Fach, arbeitet aber eigentlich bei der

Konkurrenz, dem Fermilab bei Chicago. Nach dem Abschalten des LHC-Vorgängers, dem LEP-Speicherring, im Jahr 2001 spielte hier die Musik.

Mittlerweile hat CERN wieder das Kommando übernommen und den amerikanischen Beschleuniger »energetisch« in den Schatten gestellt: Der LHC ist das Mekka der Teilchenphysiker. Obwohl Lincoln beim offiziellen Anfahren im 10. September 2008 nicht dabei war, ist er doch mit der »Weltmaschine« eng verbunden: als Mitarbeiter am CMS-Detektor. Dies ist einer von vier hausgroßen Apparaten mit denen die Kollisionen der Protonen – oder alternativ von Bleiatomkernen – und das nachfolgende Strahlengewitter untersucht werden.

Das Buch ist übersichtlich strukturiert. Es gibt sechs Kapitel, die eingängig überschrieben sind. Der Autor startet mit »Was wir wissen« – eine profunde Darstellung des Standardmodells der Teilchenphysik. In »Was wir vermuten« geht es anschließend um das Higgs-Boson, das für die Masse in der Quantenwelt verantwortlich sein soll. Für dessen Nachweis wurde der LHC hauptsächlich gebaut: vier Milliarden EURO für ein einziges Teilchen! Vielleicht entdeckt er aber auch die Supersymmetrie oder Hinweise auf zusätzliche Raumdimensionen. Don Lincoln und seine 3000 Kollegen sind jedenfalls äußerst gespannt.

»Wie wir es machen« beschreibt das Prinzip des Beschleunigers und »Wie wir etwas sehen« die unterschied-

lichen Nachweismethoden der erzeugten Teilchen. So werden mit dem »Compact Muon Selenoid« (CMS), einem Monstrum von 12 500 Tonnen Masse, vor allem die flüchtigen Myonen untersucht, die bei circa 800 Millionen Kollisionen pro Sekunde entstehen. Dass es Startschwierigkeiten gab, beschreibt der Autor in »Wie es anfing«: Bei den ersten Probelaufen schmolzen bei einer Stromstärke von 8700 Ampère Lötstellen durch, Leitungen verdampften und flüssiges Helium trat aus – ein Desaster! Die teure Reparatur dauerte über ein Jahr. Seitdem läuft alles nach Plan, man ist jetzt jedoch deutlich vorsichtiger geworden.

»Wohin der Weg führt« ist Thema des letzten Kapitels. Da ein Beschleuniger eine lange Planungsphase benötigt, macht man sich schon jetzt Gedanken über die nächste »Weltmaschine« – vielleicht wird es der International Linear Collider (ILC)? Immerhin zeigt der Name, dass nun alle zahlen sollen und eine Konkurrenz à la Fermilab/CERN keinen Sinn mehr macht.

Fazit: Das Buch von Lincoln ist leicht zu lesen und bietet auf 316 Seiten einen fundierten Einblick in die »neue Physik« und die Rolle die der LHC dabei spielen soll. Eine sehr zu empfehlende Lektüre – vor allem für Leser, die Superlative mögen. <<

DR. WOLFGANG STEINICKE

Der Rezensent ist Physiker und Mitglied der Vereinigung der Sternfreunde e.V., deren Fachgruppe »Geschichte« er leitet. Er ist außerdem Herausgeber des »Praxishandbuch Deep-Sky«

CERN

Der Letzte seiner Art?

Wie geht es mit der Teilchenphysik weiter, wenn das Higgs-Boson gefunden wird? Und wie, wenn das nicht passiert? Die Protagonisten wagen bereits einen Blick in die Zukunft.

VON GERHARD SAMULAT

Die Zukunft der experimentellen Teilchenphysik hängt an einem seidenen Faden: Findet der Large Hadron Collider (LHC) am Teilchenforschungszentrum CERN bei Genf keine eindeutigen Hinweise auf eine irgendwie geartete neue Physik, dürfte dies das Aus der großen, internationalen Beschleunigeranlagen einläuten. Die 27 Kilometer lange und mehrere Milliarden Euro teure Kette aus tonnen-

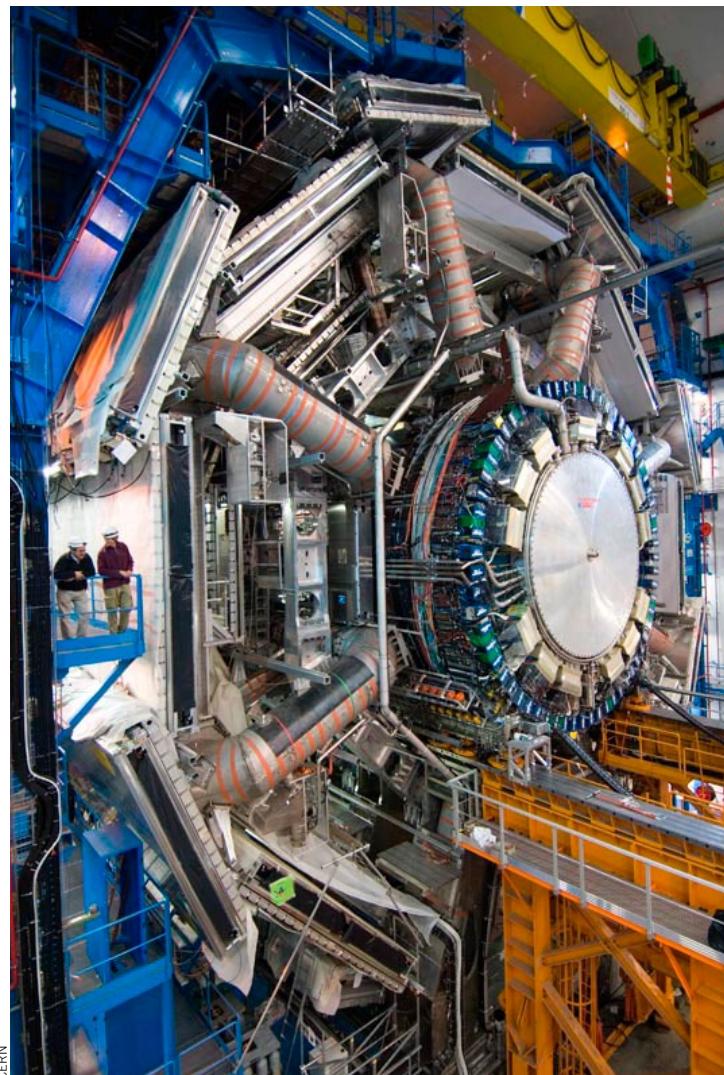
schweren, supraleitenden Magneten mit den vier haushohen Nachweisgeräten Atlas, CMS, Alice und LHCb wird dann wohl genauso sang- und klanglos eingemottet werden wie jüngst das Tevatron in den Vereinigten Staaten oder vor fünf Jahren die 6,3 Kilometer lange Elektronen-Protonen-Beschleunigeranlage HERA beim Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg. Mit dem LHC endete dann die

experimentelle Teilchenphysik, bei der sich die Versuchsbedingungen reproduzierbar einstellen lassen. Die Physiker wären künftig auf Zufallsergebnisse aus der kosmischen Strahlung angewiesen. Mit dem LHC wird derzeit vor allem das sogenannte Higgs-Boson gesucht - so wie vorher bereits mit all seinen Vorgängern. Das geheimnisvolle Teilchen wurde vor fast fünfzig Jahren vom britischen Physiker Peter Higgs postuliert und soll all den anderen Partikeln im sogenannten Standardmodell der Teilchenphysik ihre Massen verleihen. Denn prinzipiell funktionieren die mathematischen Grundlagen des Standardmodells genauso prächtig, wenn Quarks und Co keine Massen besäßen. Die Wirkung des postulierten Higgs-Felds vergleicht CERN-Cheftheoretiker John Ellis mit dem eines Tiefschneefeldes: Mit Skatern gleitet man leicht darüber - was in Analogie zur Realität einem Teilchen ohne Masse entspräche. Geht man jedoch mit Schneeschuhen über die weiße Pracht, so ist man in seiner Bewegung eingeschränkt - was in der Realität einem Teilchen mit einer relativ kleinen Masse entspräche. Schwere Teilchen bewegen sich

im Higgs-Feld dagegen so träge wie Winterwanderer ohne jegliche Hilfsmittel. Um im Bilde zu bleiben, wären die gesuchten Higgs-Bosonen dann die Schneeflocken. Ellis vermutet sogar, dass alle Elementarteilchen kurz nach dem Urknall noch gar keine Masse besessen hätten, weil das Higgs-Feld bei den damals vorherrschenden gewaltigen Temperaturen des frühen Universums sozusagen »geschmolzen« war.

2012 bringt die Entscheidung

Schon die kommenden Monate sollen die Entscheidung bringen: Zumindest die Führungsriege des CERN - allen voran der Generaldirektor Rolf-Dieter Heuer - rechnen fest damit, in Kürze die Frage nach der Existenz des Higgs beantworten zu können. Oder aber das vielgesuchte Teilchen war doch nur ein Phantom, dem Tausende von Physikern jahrzehntelang nachjagten. Nach neuesten Auswertungen der aktuellen Daten der beiden LHC-Experimente Atlas und CMS könnte das Higgs-Teilchen eine Masse um die 125 Gigaelektronenvolt (GeV) besitzen: In Vielfachen eines Elektronenvolts geben Physiker die Massen von Elementarteilchen an, wobei die Vorsilbe »Giga« für eine Milliarde steht. Das Higgs-Boson wäre damit gut 130 Mal schwerer als ein Proton oder ungefähr so schwer wie ein Zäsiat. Das nun gesuchte Higgs-Teilchen müsste noch nicht einmal elementar sein. Das »größte vorstellbare Desaster«, das sich ein Physiker vorstellen könnte, sei denn auch ein einziges, relativ leichtes Standardmodel-Higgs-Boson, meint



Der ATLAS-Detektor am Teilchenbeschleuniger des CERN
ATLAS (Akronym für »A Toroidal LHC ApparatuS«) hat einen Durchmesser von 25 Metern und eine Länge von 46 Metern. Er vermisst die Teilchen, die als Produkte bei einer Teilchenkollision entstehen. Ihre Spuren werden aufgezeichnet und ihre Energien und die Teilchensorte bestimmt.

John Ellis. Er glaubt, dass es aus anderen elementaren Bausteinen zusammengesetzt sein könnte, so wie Schneeflocken aus Wassermolekülen bestehen.

Ein Higgs allein macht noch keine neue Physik

Doch selbst wenn mit dem Higgs-Boson der letzte Baustein des Standardmodells gefunden wäre, blieben viele Fragen offen. Ellis fasst sie folgendermaßen zusammen: Warum gibt es eigentlich unterschiedliche Generation an Elementarteilchen: zwei mal drei Quarks und zwei mal drei Leptonen - die Teilchen, denen auch die Elektronen zugerechnet werden? Warum sind es gerade drei Familien? Wie können sich die Elementarteilchen ineinander umwandeln? Weswegen unterscheidet sich Antimaterie in einigen Versuchen minimal von der Materie? Ein Umstand, dem wir wohl unsere Existenz mit zu verdanken haben, wenngleich die in den Laboren gemessene Diskrepanz allein nicht ausreicht, um den Überschuss an Materie im Universum zu erklären. Was ist die so genannte dunkle Materie, die bis zu achtzig Prozent der Schwerkraft im Universum ausmacht? Lassen sich die vier fundamentalen Kräfte - die elektromagnetische, die Schwerkraft sowie die schwache und starke Kernkraft - vereinigen? Wie sähe eine quantenphysikalische Beschreibung der Gravitation aus? Sträubt sich die in kosmischen Dimensionen vorherrschende Schwerkraft doch bislang beharrlich, sich im Mikrokosmos genauso beschreiben zu lassen wie alle anderen Kräfte. Ebenso unbefriedigend ist für die Physiker, dass ihr an und für sich bestens funktionierendes Standardmodell durch mindestens 19 verschiedene Parameter charakterisiert wird. Haben Neutrinos eine Masse, kommen weitere Kenngrößen hinzu. All diese Hilfsgrößen sind derzeit

»gottgegeben« und müssen einzeln experimentell bestimmt werden. Kleinst Abweichungen in deren Werten hätten zudem dazu geführt, dass unsere Welt heute ganz anders aussähe – oder sie wäre erst gar nicht entstanden. »Niemand glaubt daher, dass das Standardmodell das Ende der Geschichte sei«, sagt Ellis. Ein Modell, welches das Standardmodell forschreiben soll, ist die so genannte Supersymmetrie. Demnach sollte es zu allen bekannten Elementarteilchen »supersymmetrische« Partner geben, die sich quantenmechanisch genau anders verhalten als unsere bisher entdeckten Grundbausteine und Kräfte. Die Theorie würde helfen, die fundamentalen Kräfte zu vereinheitlichen. Zugleich wäre das leichteste dieser supersymmetrischen Teilchen ein heißer Kandidat für die dunkle Materie. Viele Modelle gehen davon aus, dass es eine Masse von etwa einem Teraelektronenvolt (TeV; Tera steht für eine Billion) besitzt und somit im Messbereich des LHC liegt. Doch weder CMS noch Atlas fanden bislang irgendwelche Hinweise auf supersymmetrische Teilchen. Die Supersymmetrie könnte ebenso die augenfällige Materie-Antimaterie-Diskrepanz im Universum erklären. Dazu müssten sich nach Ansicht des verstorbenen russischen Physikers und Friedensnobelpreisträgers Andrei Sacharow jedoch Quarks in Leptonen umwandeln können. Das Nachweisgerät LHCb untersucht derzeit diese Fragestellungen, hat aber bislang noch nichts dergleichen beobachtet.

Wenn Gravitation schwer wird
Zusammen mit dem Konzept der Extradimensionen - mikroskopisch kleinen »aufgewickelten« Dimensionen, die sich im Alltag verborgen halten - bildet die Supersymmetrie zudem die Basis für die Stringtheorie. Dort werden alle elementaren Bestand-

teile nicht mehr als punktförmige Objekte beschrieben, sondern als winzige schwingende Fäden. Die Stringtheorie gilt als vielversprechender Ansatz, die Gravitation mit den Quantenfeldtheorien der Elementarteilchen zu vereinheitlichen: ein Problem, an dem sich bereits Albert Einstein die Zähne ausbiss. Nach den meisten Hypothesen werden die Extradimensionen ausschließlich von der Schwerkraft wahrgenommen, was der Grund dafür ist, dass sie uns - verglichen mit den anderen Kräften - als relativ schwach erscheint. Es gibt viele Möglichkeiten, wie sich zusätzliche Dimensionen in den Experimenten am LHC zeigen könnten. In den meisten Szenarien verschwindet einfach eine gewisse Menge an Energie oder Impuls. In anderen führen Extradimensionen zu Anregungen gewisser Teilchen. Bei den sehr großen Energiedichten, die der LHC in der Lage ist zu produzieren, könnte die Gravitation zudem plötzlich sehr viel stärker werden. Gelänge es dem LHC beispielsweise, mikroskopisch kleine Schwarze Löcher zu produzieren, wäre das eventuell ein erster Hinweis auf die Stringtheorie. Angst müsste man vor den kleinen Materieschluckern jedoch nicht haben, versichern die Teilchenphysiker. Sie wären sehr instabil und zerfielen außerordentlich rasch.

Wunsch und Wirklichkeit

Doch falls die Experimentatoren nicht bald erste Anzeichen einer neuen Physik finden, wird die experimentelle Teilchenphysik wohl zum Auslaufmodell. Dann wird es dem CERN schwer fallen, das Geld für die geplante Modernisierung der Beschleuniger aufzutreiben. Insbesondere die Kette der Vorbeschleuniger ist in die Jahre gekommen und müsste dringend auf Vordermann gebracht werden. Selbst der LHC leidet unter konstruktiven Unzu-

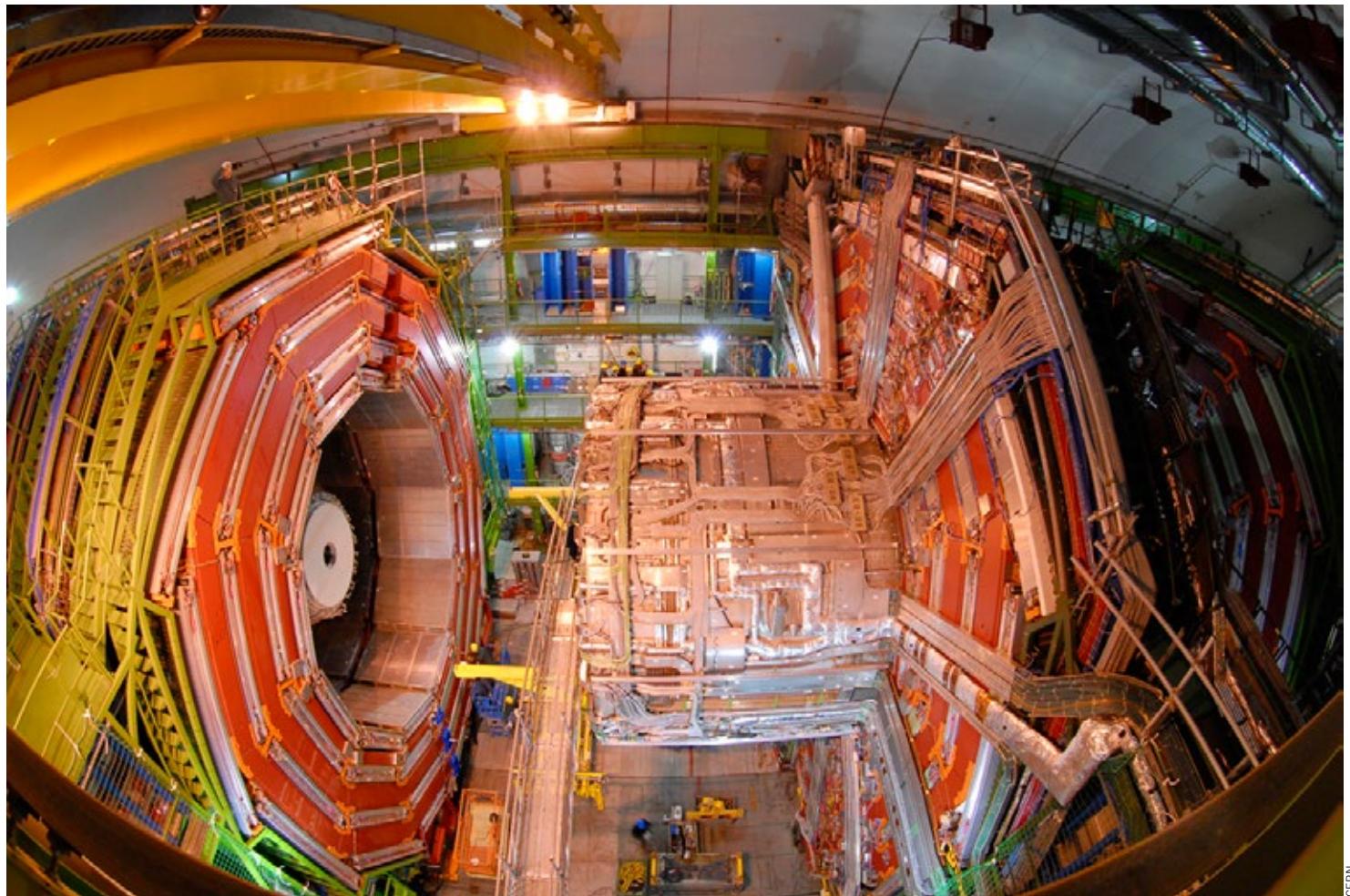
länglichkeiten. Denn er ist derzeit noch nicht einmal in der Lage, seine vorgegebenen Designwerte zu erzielen. Das betrifft sowohl die Energie der Teilchen, die bei 3,5 TeV statt bei den geplanten 7 TeV pro Proton liegt, sowie die Kollisionsrate, die momentan noch um etwa einen Faktor 50 unter dem Soll liegt. Sollten sich dagegen erste Anzeichen einer neuen Physik zeigen, könnte ein anderes Problem auf die Beschleunigerzentren zukommen: Weil die Anlagen immer komplexer und teurer werden, bleiben die Experimentiereinrichtungen aller Voraussicht nach stets Unikate - so wie der LHC bereits jetzt eines ist. Es wird sicherlich nicht leichter werden, andere Nationen davon zu überzeugen, gewaltige Geldsummen aufzubringen, um irgendwo auf der Welt ein Institut aufzubauen, von dem man nur noch indirekt profitiert. Die besten Köpfe müssen dafür sogar das eigene Land verlassen - zumindest für eine Zeit lang -, um an einem fernen Ort zu forschen. Ob Staaten künftig bereit sind, dafür Millionen hinzublättern, steht in den Sternen. Auf der Wunschliste der Teilchenphysiker steht aber noch ein dreißig bis fünfzig Kilometer langer Linearbeschleuniger, in dem Elektron und deren Antimaterie - Positronen - für Präzisionsmessungen aufeinander geschossen werden sollen. Wo der Beschleuniger dann arbeiten soll, mit welcher Technik und bei welcher Energie, hängt stark von den Ergebnissen ab, die der LHC liefert. Zudem denkt das CERN für weitere Präzisionsmessungen über so etwas wie einen Super-HERA-Beschleuniger nach, der hochenergetische Elektronen auf gegenläufige Protonen schießen soll, so wie HERA damals in Hamburg. Doch zunächst müssen die Physiker am CERN Aufsehen erregende Entdeckungen vorlegen. Sonst könnten ihre Träume schnell platzen. <<

GRUNDLAGENFORSCHUNG

Jenseits des Higgs-Teilchens

Auch nach der Bekanntgabe des Boson-Funds gehen die Arbeiten weiter. Bis zum Ende des Jahres sollen Versuche endgültig klären, ob die Entdeckung zweifelsfrei ein Higgs-Boson ist. Doch es gibt auch noch andere Fragen, die der LHC beantworten soll. Supersymmetrie, Dunkle Materie, Zusatzdimensionen und Schwarze Löcher stehen auf dem Programm.

VON THOMAS BÜHRKE



CERN

Im Dezember letzten Jahres verkündete das CERN erste Hinweise auf eine mögliche Entdeckung des Higgs-Teilchens mit einer Masse um 125 Gigaelektronvolt (125 GeV). Damit wäre es etwa 130-mal massereicher als ein Wasserstoffkern. Sollten sich die vagen Anzeichen zu einer veritablen Entdeckung verdichten, so wäre dies einer der größten Erfolge der modernen Physik. Doch der LHC wurde nicht nur wegen des Higgs-Teilchens ge-

baut. Es gibt weitere brennende Fragen, die über das derzeit bestehende Standardmodell der Elementarteilchen hinausweisen. An erster Stelle steht hier eine fundamentale Erweiterung: die Supersymmetrie. Die theoretischen Physiker führen eine Reihe von Gründen an, weswegen das heutige Standardmodell der Teilchen und der zwischen ihnen wirkenden Kräfte nicht »der wahre Jakob« sein kann, wie Einstein es einmal von der Quantenphysik

Das CMS-Experiment am CERN

Das CMS-Experiment ist ein Teilchendetektor des Large Hadron Collider am CERN. In seinem Herzen stoßen Protonen mit einigen Teraelektronvolt Kollisionsenergie zusammen. Dabei entstehen neue Teilchen, die in alle Richtungen davonfliegen und vom CMS-Detektor nachgewiesen werden.

behauptete: Zum einen gibt es eine nicht erklärbare Übereinstimmung in der elektrischen Elementarladung. Elektronen sind die Träger der negativen Elementarladung. Quarks besitzen exakt ein oder zwei Drittel der Elementarladung. So ist es möglich, dass drei Quarks ein Proton mit genau einer positiven Elementarladung bilden. Nur die identische Größe der elektrischen Ladung von Elektronen und Protonen, aber mit entgegengesetztem Vorzeichen, ermöglicht die Existenz stabiler, elektrisch neutraler Atome.

Lücken im Standardmodell der Elementarteilchen

Elektronen gehören zu der Familie der so genannte Leptonen und unterliegen nur drei Grundkräften, nämlich der schwachen und elektromagnetischen Kraft sowie der Gravitation. Quarks hingegen zählen nicht zu den Leptonen und unterliegen allen vier Grundkräften der Natur, auch der starken Wechselwirkung. Im Dreierpack bilden sie das Proton, das zur Familie der Fermionen zählt. Es muss einen noch unbekannten Zusammenhang beziehungsweise eine übergeordnete »Instanz« geben, die für diese rätselhafte Übereinstimmung zwischen den Familien gesorgt hat.

Das andere Argument hängt mit dem Higgs-Teilchen zusammen. Dieses ist die »Inkarnation« eines Energiefelds, welches das gesamte Universum durchzieht und dafür verantwortlich ist, dass Teilchen eine Masse besitzen. Theoretische Berechnungen im Rahmen des Standardmodells ergeben jedoch für die Energie des Higgs-Feld einen um 34 Größenordnungen zu hohen Wert. In einer solchen Welt wären Elektronen so schwer wie Bakterien! Ursache für diesen exorbitant hohen Wert des Higgs-Feldes sind so genannte virtuelle Elementarteilchen. Sie tauchen beständig im Raum auf und verschwinden wieder. Dieser See an virtuellen

Teilchen trägt zum Higgs-Feld bei und müsste ihm den unrealistisch hohen Wert verleihen.

Ausweg Supersymmetrie und Dunkle Materie

Als Ausweg aus diesem Dilemma haben Theoretiker eine über das Standardmodell hinausgehende, neue Physik entwickelt: die Supersymmetrie, kurz Susy. Diese besagt, dass es zu jedem Elementarteilchen ein Pendant gibt, ein Spiegelteilchen. Auch die Susy-Teilchen tauchen in dem See virtueller Elementarteilchen auf, doch ihre Quantenfluktuationen heben sich gerade mit denen der regulären Elementarteilchen auf. Dadurch erhält das Higgs-Feld einen kleinen Energiewert und das zugehörige Higgs-Teilchen eine relativ geringe Masse. Die Susy-Teilchen würden die Zahl der bekannten Teilchen auf einen Schlag verdoppeln. Doch sie existierten nur in den ersten Bruchteilen einer Sekunde nach dem Urknall. Sie sind nämlich instabil und zerfallen rasch – bis auf eins: das leichteste Susy-Teilchen Neutralino. Seit dem Urknall sind also alle Superpartikel bis auf die Neutralinos zerfallen. Die Namen der Susy-Materieteilchen ergeben sich durch Voranstellen eines S an den Namen des uns bekannten Teilchens. So gehört zum Elektron das Selektron, zu den Quarks die Squarks und zu den Neutrinos die Sneutrinos. Die Wechselwirkungsteilchen, welche die Kräfte zwischen den Materieteilchen vermitteln, erhalten ein »ino« ans Ende: zum Photon (Lichtteilchen) gehört das Photino zum Gluon das Gluino und so weiter. Bislang ist die schon in den 1970er Jahren vor allem von Julius Wess und Bruno Zumino in Karlsruhe entwickelte Supersymmetrie jedoch eine reine Theorie. Kein einziges der prognostizierten Teilchen ließ sich nachweisen. Physiker hoffen nun, mit dem LHC in den Feuerbällen der Protonkollisionen

Susy-Teilchen insbesondere das Neutralino zu finden. Dessen Masse erwarten die Forscher unterhalb von 1000 GeV, womit es durchaus im Leistungsbereich des LHC liegen würde. Aber Neutralinos gehen mit normaler Materie so gut wie keine Wechselwirkung ein. Sprich: Sie rasen völlig unbeeindruckt durch die riesigen Messgeräte hindurch. Der Nachweis muss deswegen auf indirekte Weise erfolgen: Die Bruchstücke einer Protonenkollision müssen zusammengenommen genau so viel Energie besitzen wie die beiden ursprünglichen Protonen. Es geht keine Energie verloren. Sollte man dennoch einmal einen solchen Fall beobachten, so wäre dies ein mögliches Indiz dafür, dass ein unsichtbares Neutralino die fehlende Energie fortgetragen hat. Diese für die Experimentatoren so unangenehme Eigenschaft des postulierten Neutralinos macht es hingegen für Astrophysiker interessant. Es besitzt nämlich genau jene Eigenschaften, die sie den mutmaßlichen Teilchen der Dunkle Materie zuschreiben. Nach heutiger Kenntnis macht sie 23 Prozent der insgesamt im Universum vorhandenen Materie aus (73 Prozent Dunkle Energie und rund 4 Prozent »gewöhnliche« Materie). Sie ist unsichtbar und lässt sich bislang ausschließlich über ihre Schwerkraftwirkung nachweisen. Neutralinos könnten die Lösung dieses Jahrzehnte alten Rätsels sein. Die Supersymmetrie könnte noch weitere Fragen beantworten. So erklärt sie die Kraftwirkung zwischen Quarks, und sie bildet die Grundlage für einige Versionen der Stringtheorie, mit der man das Ziel verfolgt, Quantenphysik und Gravitation zu einer übergeordneten Theorie zu vereinen. Viele Physiker schätzen die Supersymmetrie, weil sie auf einen Schlag viele Fragen beantworten würde. Doch der bislang ausbleibende Nachweis auch nur eines einzigen Vertreters

dieser Spiegelwelt macht Forscher zunehmend skeptisch. Startheoretiker John Ellis vom CERN bekannte im letzten Jahr in der Fachzeitschrift »Nature«: »Ich arbeite nun seit fast 30 Jahren an der Theorie – und ich kann mir vorstellen, dass einige Leute langsam ein wenig nervös werden.« Er wolle noch bis Ende 2012 abwarten, ergänzte er, bevor er Susy aufgibt. »Viele Dinge werden sich ändern, wenn wir Susy nicht bestätigen können«, ergänzt Teilchenphysiker Chris Lester von der University of Cambridge in derselben Ausgabe von »Nature«. Theoretische Physiker müssten dann wieder zu ihrem Reißbrett zurückkehren und einen alternativen Weg finden, um die Mängel des Standardmodells zu beheben.

Eintauchen in zusätzliche Raumdimensionen und mikroskopische Schwarze Löcher

Vereinheitlichungstheorien wie die der Strings funktionieren nicht mehr in drei Raumdimensionen, sie benötigen neun. Diese Extradimensionen könnten auf kleinsten Skalen »aufgerollt« sein, so dass wir sie nicht wahrnehmen. An jedem Punkt unserer Welt gäbe es eine oder mehrere zusätzliche »Richtungen.« Direkt beobachten lassen sich Extraräume nicht, weil wir keinen Zugang zu ihnen haben: Wir leben und experimentieren in drei Dimensionen. Aber Zusatzdimensionen könnten physikalische Gesetze beeinflussen und somit indirekt nachweisbar sein. So sagt eine Theorie voraus, dass das bekannte newtonsche Gesetz, wonach die Schwerkraft quadratisch mit der Entfernung von einem Körper abnimmt, auf sehr kleinen Skalen nicht mehr stimmt. Sie würde auf der Größenskala der Extradimensionen zum Körper hin viel stärker ansteigen, als man es nach Newton erwarten würde. Der Grund hierfür ist, dass die Schwerkraft sich als einzige der

bekannten vier Grundkräfte auch in diese Zusatzdimensionen ausdehnt.

Mechanische Experimente konnten das newtonsche Kraftgesetz bis auf Distanzen von 0,04 Millimeter bestätigen. Die versteckten Zusatzdimensionen müssen also – so sie denn existieren – auf kleineren Skalen aufgerollt sein. Für den LHC hätte das unter Umständen extreme

Folgen. So könnten bei den Protonenkollisionen Gravitationswellen und mikroskopisch kleine Schwarze Löcher entstehen. Diese wären aber instabil und würden nach etwa 10-26 Sekunden wieder zerfallen. Sie könnten also niemals durch Verschlucken weiterer Materie zu beunruhigender Größe heranwachsen. Aber die Bruchstücke, in die die Schwarzen Löcher zerfallen, sind

nachweisbar. Am CERN wird man alles daran setzen, Hinweise auf »Neue Physik« zu finden. Das ist das Ziel dieses milliardenschweren Projekts. Wie das CERN mitteilte, wird es deswegen die Energie der Protonen im LHC in diesem Jahr um 0,5 TeV auf 4 TeV (4000 GeV) pro Strahl erhöhen. Im November wird der LHC dann für voraussichtlich 20 Monate abgeschaltet, um Ende

2014 mit der angestrebten Maximalenergie von 7 TeV pro Strahl wieder anzulaufen. Doch die Pläne reichen noch weiter. Nach 2020 soll der LHC noch einmal technisch aufgerüstet werden – um vielleicht noch weiter in neue Dimensionen vorzustoßen. <<

In der ursprünglichen Version wurden die Quarks fälschlich zu den Bosonen gestellt. Dies haben wir nun korrigiert. Die Redaktion.

ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

»Die Physik marschiert weiter«

Am 4.Juli 2012 hat das CERN die bislang überzeugendsten Hinweise auf die Existenz eines neuen Elementarteilchens präsentiert. Sehr viel deutet darauf hin, dass es sich dabei tatsächlich um das lang gesuchte Higgs-Boson handelt. Eine Erfolgsgeschichte der Wissenschaft? Nicht unbedingt. Physik-Nobelpreisträger Martinus Veltman geißelt das Vorgehen seiner Genfer Kollegen im Spektrum.de-Interview sogar als »richtig doof«.

von LARS FISCHER



JENS ZORN, UNIVERSITY OF MICHIGAN

Martinus Veltman

ist niederländischer Physiker und wurde 1999 zusammen mit seinem früheren Studenten Gerardus 't Hooft mit dem Nobelpreis »für ihre entscheidenden, die Quantenstruktur betreffenden Beiträge zur Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung in der Physik« ausgezeichnet.

Herr Professor Veltman, Sie haben 2004 ein Buch über das Standardmodell der Teilchenphysik verfasst. Wenn Sie das Buch heute noch einmal schreiben müssten, was würde sich ändern?

Martinus Veltman: Wenn ich das Buch noch einmal schreiben würde, dann änderte sich daran nicht wirklich viel. Die Wissenschaft ist zeitlos, und ich habe schon damals über Leute geschrieben, die lange tot sind – Planck zum Beispiel. Etwa 80 bis 90 Prozent des Buchs gelten heute noch genauso wie vor ein paar Jahren. Aber ich würde einige Sachen ergänzen, die in den letzten Jahren passiert sind – zuvorderst natürlich die Suche nach dem Higgs-Boson.

Heute hat das CERN eine große Pressekonferenz abgehalten, um die neuesten LHC-Da-

ten zu präsentieren. Wie sehen Sie diese Veranstaltung?

Was das CERN macht, ist meiner Meinung nach richtig doof. Es ist doch im Grunde genau das Gleiche wie mit den überlichtschnellen Neutrinos. Aus der Affäre sollten sie eigentlich gelernt haben. Wichtige Ergebnisse zu verkünden, ist Sache der Kollaborationen, ich verstehe nicht, warum das CERN extra Pressekonferenzen macht.

Das Higgs-Boson ist aber doch eine wichtige Entdeckung.

Zu den Aufgaben der Organisation gehört es, Wissenschaftlern die Gelegenheit zu ihren Experimenten zu geben und sie dabei zu unterstützen. Die CERN-Mitarbeiter selbst machen ja keine Versuche, sondern die Forscher, die von den Universitäten kommen.

Aber wie ich jetzt in der »Sunday Times« gelesen habe, lud das CERN Leute ein, darunter Peter Higgs, um diese Pressekonferenz abzuhalten. Natürlich würden sie dann verkünden, dass sie jetzt das Higgs-Boson gefunden haben.

Im Grunde sind solche Veranstaltungen einfach Egotrips. In Wirklichkeit ist das alles nicht wichtig. Ich könnte mir nicht vorstellen, bei der Forschung auf so etwas zu achten – ich suche doch meine Themen nicht danach aus, ob ich damit in die Zeitung komme. Es ist überhaupt nicht wichtig, wer da wofür Öffentlichkeit bekommt. Die Physik schreitet voran und wird über all das hinweggehen.

Sollten sich also junge Wissenschaftler lieber zurückhalten und nicht versuchen, durch öffentliche Aufmerksamkeit

in der Konkurrenz um For- schungsgelder und Posten besser dazustehen?

Ich persönlich habe nichts dagegen, dass junge Wissenschaftler versuchen, mit Pressekonferenzen und dergleichen Aufmerksamkeit für ihre Forschung zu erzeugen. Wissenschaft braucht Geld, aber die Menschen, die Wissenschaft finanzieren, wissen ja sehr genau, warum sie das tun. Forschung ist wichtig für die Gesellschaft. Und wir sollten uns nicht dafür schämen, dass wir für unsere Forschungen Geld benötigen und bekommen. Aber schauen Sie sich doch die Neutrino-Geschichte an: Hat es den beteiligten Forschern etwas gebracht, auf diese Weise an die Öffentlichkeit zu gehen? Nein, im Gegenteil: Der Leiter der Kollaboration hat sich zurückziehen müssen. Und Nachwuchswissenschaftler müssen verstehen, dass Publicity zwei Seiten hat. Einerseits ist sie sehr positiv, aber wenn so etwas passiert wie bei den Neutrinos, hilft ihnen das auch nicht.

Wenn am LHC nun tatsächlich das Higgs-Boson entdeckt wur- de: Wie geht es dann weiter?

Wenn es wirklich das Higgs-Boson ist, dann wird man anschließend seine Eigenschaften erforschen. Die Masse haben die Kollegen damit ja schon festgenagelt, das ist eine wichtige Sache. Anschließend müssen sie nach und nach alle möglichen Zerfallsprozesse des Teilchens untersuchen, um zu sehen, ob es sich gemäß den Vorhersagen verhält. Wie lange das dauert, weiß man nicht – sie fangen ja nicht bei null an, sondern sammeln seit geraumer Zeit ebenso Daten über andere Zerfallsreaktionen.

Aber das wirkliche Problem liegt ohnehin an anderer Stelle. Das Higgs-Boson ist ein dankbarer Untersuchungsgegenstand: Man sagt es voraus, macht ein großes Experiment, und am Ende findet man das Higgs. Aber die großen, wichtigen Fragen funktionieren nicht so einfach – etwa die Eigenschaften des Standardmodells, die drei Teilchengene-

rationen: Warum gibt es diese? Warum ist das so? Wir haben kein Experiment, das diese Fragen beantworten könnte. Ähnliches gilt für die Massen der Teilchen. Die Neutrinos sind sehr leicht, während Top-Quarks millionenfach schwerer sind. Wir wissen nicht, warum das so ist, und wir haben keine Versuche, die uns diese Fragen beantworten können.

Was ist mit Ideen wie der String-Theorie?

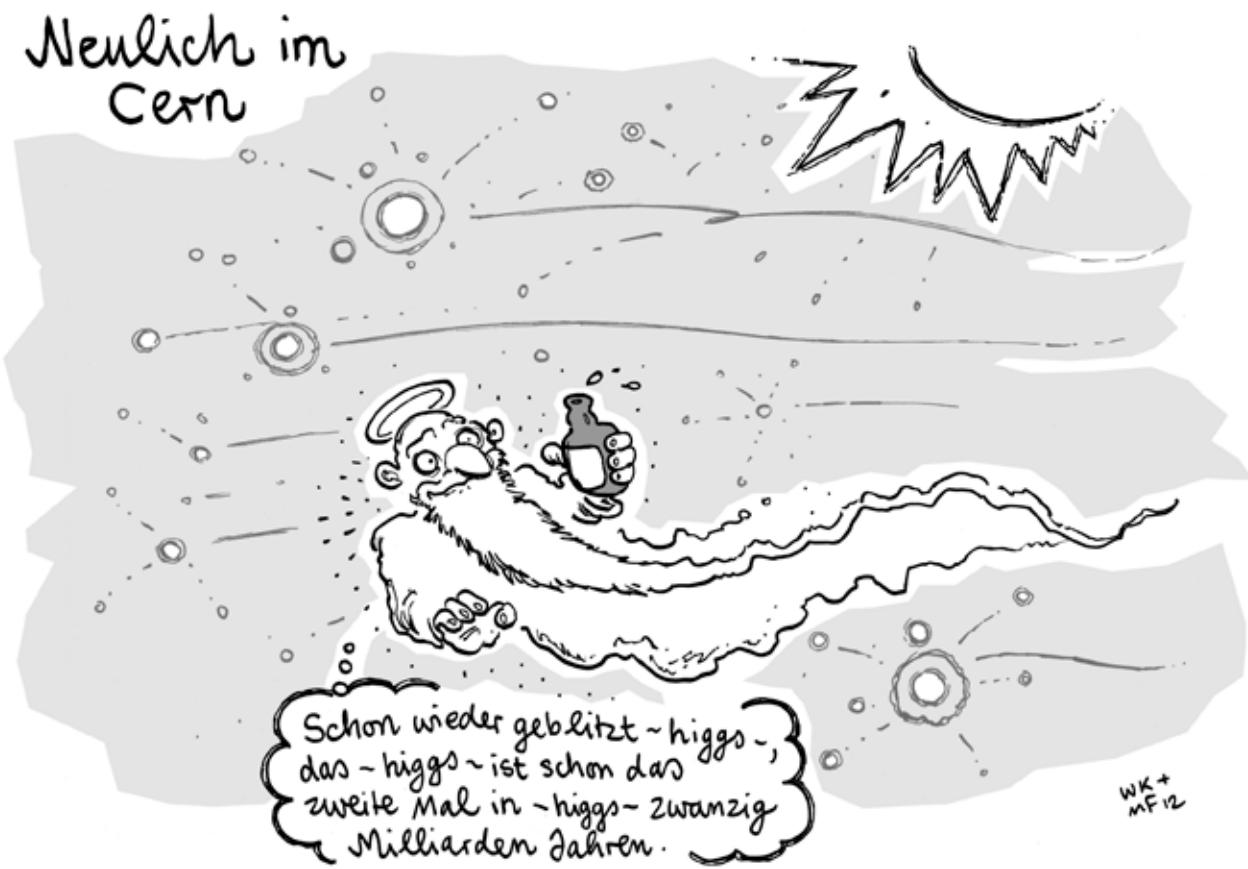
Die String-Theorie ist ziemlich tot. Sie hat bis heute nichts dazu beigebracht, diese Fragen zu klären.

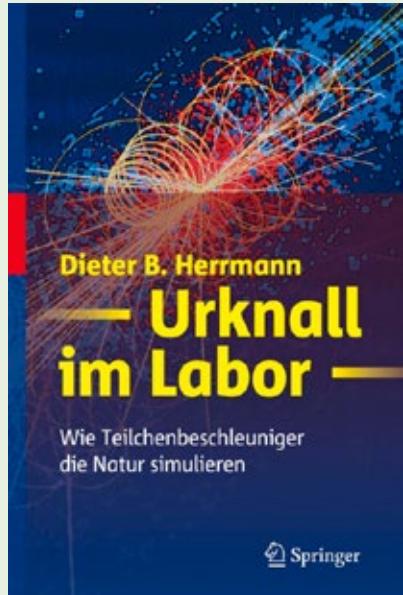
Und die Supersymmetrie?

Die Supersymmetrie hat ebenfalls nicht geliefert, was sie versprach. Es hieß vor einer Weile, wenn wir den Messbereich erweitern, finden wir Indizien für die Supersymmetrie. Aber das ist dann nicht passiert. Wir haben bis heute nichts, was auch nur annähernd danach aussieht. Im Grunde zeigt sich dieses Muster bisher bei allen

Beschleunigern. Sie wurden damit begründet, dass wir mit den dann möglichen neuen Messbereichen dieses oder jenes finden. Aber das geschah nie. Wenn sie jetzt das Higgs entdecken, ist der LHC meines Wissens die erste Maschine überhaupt, die tatsächlich das geliefert hat, wofür sie gebaut wurde. Eines muss man immerhin zugeben: Die Superstring-Theoretiker waren bisher stets sehr gut darin, ihre Theorien so zu modifizieren, dass sie die jeweiligen Probleme umschiffen. Möglicherweise schaffen sie es ja noch und belegen die Supersymmetrie. Aber vielleicht werden wir uns irgendwann auch damit abfinden müssen, dass wir gewisse Dinge experimentell nicht herausfinden können. Andererseits wird die Physik auch in Zukunft Schritt für Schritt ins Unbekannte vorstoßen. Und vielleicht bekommen wir dann doch noch unsere Antworten. <<

Herr Professor Veltman, wir danken Ihnen für das Gespräch.





Dieter B. Herrmann
Urknall im Labor
 Springer, Berlin
 ISBN: 9783642103138

Dieses Buch können Sie im
 Science-Shop für 24,95 € (D),
 25,70 € (A) kaufen.
www.science-shop.de/artikel/1022118

REZENSIONEN

Der Kosmos im Labor

Angesichts der Dimensionen heutiger Forschungsgeräte ist es gängige Praxis, dass sich Autoren zu Superlativen hinreißen lassen. Der Buchtitel »Urknall im Labor« von Dieter B. Herrmann jedenfalls übersteigt die Realität bei Weitem: Mit »Labor« ist der brandneue Large Hadron Collider (LHC) des CERN in Genf gemeint. Der Durchmesser des Rings, in dem Kernteilchen mit nahezu Lichtgeschwindigkeit kollidieren sollen, beträgt beachtliche 8,5 Kilometer – leider etwas zu wenig, um die Energie für die vorausgesagte

Vereinigung der Naturkräfte – geschweige denn die des »Urknalls« – aufzubringen. Dafür bräuchte man wohl einen Ring von der Größe der Milchstraße, die einen Durchmesser 100 000 Lichtjahren aufweist.

In der Einleitung wird dann schon weniger dick aufgetragen: Der Urknall solle im LHC »nachgeahmt werden, wenn auch nur in kleinstem Maßstab«. Interessanterweise nimmt der neue Teilchenbeschleuniger nur einen relativ kleinen Teil des Buchs ein. Wurde hier auch noch das Thema verfehlt?

Alles kein Problem, denn Dieter B. Herrmann hat eine Menge mehr zu bieten als den üblichen populärwissenschaftlichen Gemischtwarenladen à la Bublath. Das liegt vor allem an seinem »Background«: die Wissenschaftsgeschichte. Hier ist

er Autor vieler fundierter Werke, vor allem zur Astronomie. Das prägt auch den Inhalt dieses Buchs. Der LHC ist nur ein Alibi für eine historische Aufarbeitung der immer enger werdenden Verbindung von Physik und Astronomie, und so geschehen passt der Titel »Urknall im Labor« ganz gut, geht es doch heute um die (theoretische) Vereinigung von Makro- und Mikrokosmos, repräsentiert durch scheinbar so gegensätzliche Gebiete wie Kosmologie (Allgemeine Relativitätstheorie) und Teilchenphysik (Quantenfeldtheorie).

Bereits im ersten Kapitel »Kosmische Vorgänge und irdische Experimente« wird diese Absicht deutlich. Grundlage ist die universelle Gültigkeit der physikalischen Gesetze; bereits eindrucksvoll sichtbar in der Newtonschen Mechanik: Die Ursache für den fallenden Apfel ist dieselbe wie für die Planetenbewegung. Der Stab wird weitergegeben an »Sterne und Atome«. Die Spektroskopie hat uns das Innere der Sonne und Sterne eröffnet. Ohne auch nur einen Fuß vor die »Tür« der Erde zu setzen, sind wir in der Lage, die Zusammensetzung der entferntesten kosmischen Objekte zu erkennen – jedenfalls so lange sie elektromagnetische Strahlung aussenden. Die Kernphysik liefert dazu das nötige Wissen über die Energieerzeugung. Alter, Masse,

Leuchtkraft und Dynamik von Sternen und Galaxien sind heute über riesige Distanzen »messbar«.

Im dritten Kapitel geht es dann ums »Ganze«. Herrmann zeigt, wie sich die kosmologischen Hypothesen von den alten Griechen über Kopernikus und Newton bis hin zu Einstein gewandelt haben. Hier betritt nun der Urknall die Bühne. Es geht um interessante Fragen: Wie kam es zur Vorstellung einer Anfangssingularität, was war in den berühmten »ersten drei Minuten« und wie wurde das Relikt des Urknalls, die kosmische Hintergrundstrahlung entdeckt?

Zentral für das Thema des Buchs ist Kapitel 5: »Der Kosmos als Labor – das Labor als Kosmos«. Was früher der »Kosmos Experimentierkasten« war ist heute dank »irdischer« Physik das Universum selbst! Der LHC symbolisiert die derzeit höchste Stufe der Verbindung zwischen den kleinsten und größten Dimensionen. Man hofft zu klären, was die Welt im Innersten zusammenhält. Eine der wichtigsten Fragen klingt dabei seltsam rückwärtsgewandt: Was ist Masse? Wer glaubt, Newton – oder zumindest Einstein – hätten dazu schon alles Wesentliche gesagt, irrt: Ihre Theorien können das mysteriöse Massenspektrum der Elementarteilchen nicht erklären. Warum besitzen Proton, Neutron und Elektron gerade die gemessenen

Werte? Vielleicht liegt die Antwort in der Peter Higgs' Theorie von 1964. Findet CERN das darin postulierte Higgs-Boson? Das nobelpreisverdächtige Experiment steht noch aus, nicht zuletzt wegen technischer Probleme beim Anfahren des LHC. Nichts Geringeres als die bewährten aber bereits in die Jahre gekommenen Standardmodelle der Mikro- und Makrophysik stehen auf dem Spiel. Vielleicht wird ja auch das Tor zur längst fälligen Theorie der Quantengravitation aufgestoßen. Im letzten Kapitel zeigt sich Herrmann hier allerdings skeptisch, zumindest was die aktuellen Kandidaten angeht: »Stringtheorie« und »Schleifen-Quantengravitati-

on« (auf S. 182 irrtümlich als »Quanten-Schleifengravitation« bezeichnet).

Der genannte Fehler bestätigt leider eine generelle Schwäche von Springer-Publikationen: das Lektorat. So ist auf S. 94 von »Mikrowellenwellen« die Rede. Anzumerken ist auch, dass die Kernbausteine als »Partonen« bezeichnet werden (S. 176). Dieser überholte Begriff bezeichnet hypothetische Bestandteile von Hadronen. Falsch ist die Aussage, William Herschel habe die Statistik der Milchstraße mit seinem 120-Zentimeter-Spiegelteleskop durchgeführt (S. 77). Es wurde erst später gebaut; das verwendete Fernrohr hatte eine Öffnung von 47 Zentimetern.

Man könnte auch die spärliche grafische Ausstattung bemängeln, da es nur wenige schwarz-weiße Abbildungen gibt.

All dies fällt aber kaum ins Gewicht. Entscheidend ist der klar und flüssig geschriebene Text. Das Buch ist sehr informativ und auch für Laien verständlich. Hier profitiert es vor allem vom historischen Wissen des Autors. Geschichten und Hintergründe sind immer gut, um komplizierte Fakten geschmeidig zu machen. Als Abrundung gibt es noch einen Glossar und ein Personen- und Literaturverzeichnis. Mein Fazit: Eine empfehlenswerte Lektüre, die uns zum Thema »Verbindung von Mikro- und Makrokosmos« auf den neues-

ten Stand bringt. Warten wir als gespannt auf die Resultate aus dem »LHC-Labor« – und auf neue Fragen. <<

DR. WOLFGANG STEINICKE

Der Rezensent ist Physiker und Mitglied der Vereinigung der Sternfreunde e.V., deren Fachgruppe »Geschichte« er leitet. Er ist außerdem Herausgeber des »Praxishandbuch Deep-Sky«

Die Wissenschaftszeitung im Internet

Für nur € 3,33* im Monat erhalten Sie als Abonnent nicht nur jeden Freitag **Spektrum.de DIE WOCHE**, Sie haben zusätzlich Zugang auf das **Spektrum.de**-Archiv sowie auf die Inhalte von 13 Online-Lexika.



* Jahresabonnementspreis € 39,95; ermäßigt für Studenten sowie Abonnenten eines Printmagazins des Verlages € 30,-

www.spektrum.de/premium