

Extra-
ausgabe

09.10.
2013

- > »Das schwerste Boson, das wir je gefunden haben«
- > Higgs-Boson praktisch nachgewiesen
- > »Das Higgs hat viele Väter«

TITELTHEMA: HIGGS-BOSON

Ein bittersüßes Ende?

Die Entdeckung des Higgs-Teilchens vor einem Jahr war der Höhepunkt einer spektakulären Suche. Es brachte die Teilchenphysik des 20. Jahrhunderts zum Abschluss – und beschert der Disziplin eine ungewisse Zukunft.



NOBELPREISE

Higgs-Teilchen und
-Mechanismus preisgekrönt



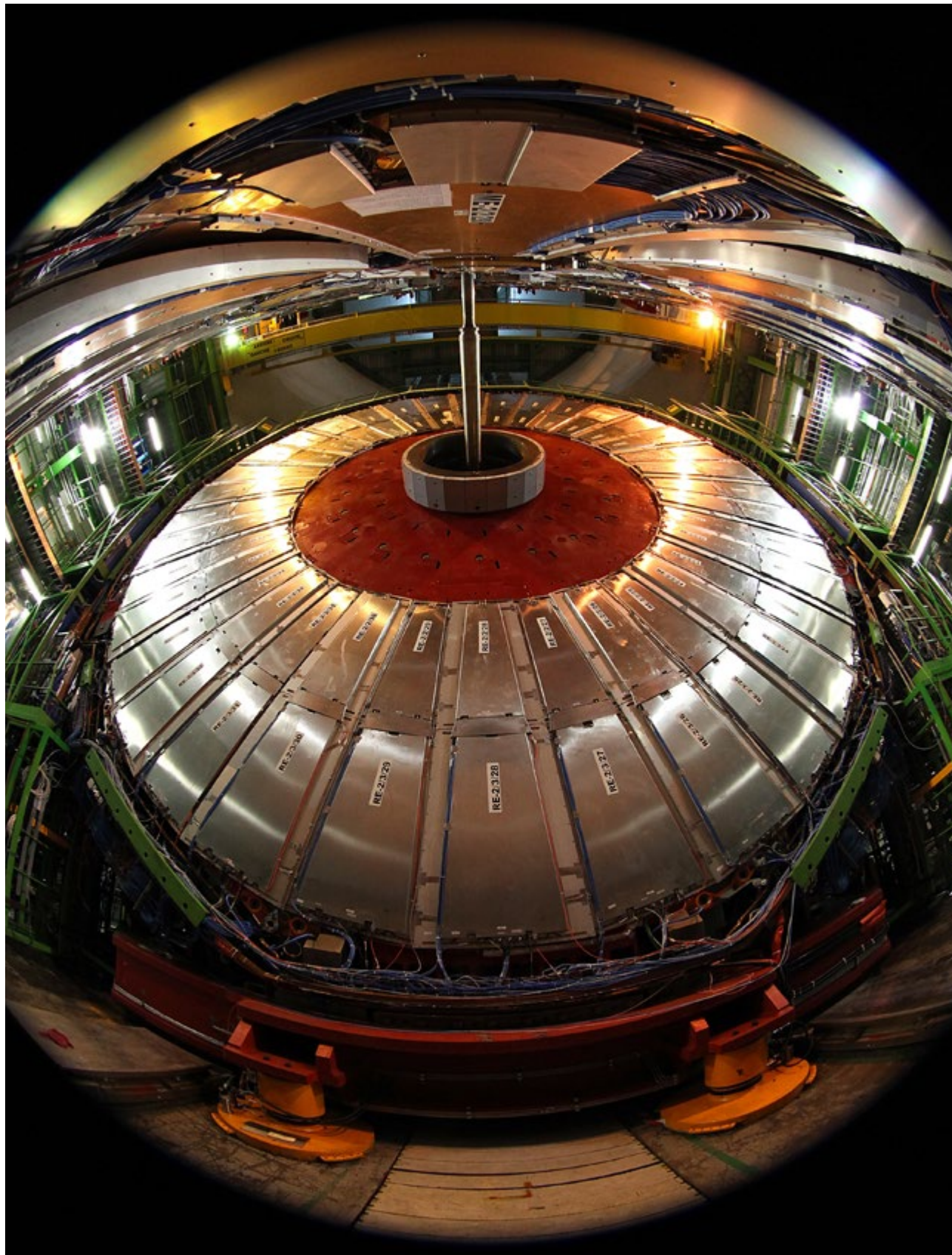
BESCHLEUNIGER

Die Weltmaschine
von morgen



MEINUNG: GRAVITONEN

Entpuppt sich die Suche
nach der Weltformel als
Hirngespinnst?





Daniel Lingenhöhl

Redaktionsleiter Spektrum – Die Woche

E-Mail: lingenhoehl@spektrum.com

Twitter: [@lingenhoehl](https://twitter.com/lingenhoehl)

Liebe Leserin, lieber Leser,

der Nobelpreis für Physik 2013 geht an die Erforscher des Higgs-Bosons. Kein Wunder: Die Entdeckung des lange vorhergesagten Teilchens war wohl die wissenschaftliche Nachricht des bisherigen Jahrhunderts und wurde daher weit über die Fachwelt hinaus gewürdigt. Daher widmen wir dem Higgs-Boson eine eigene Sonderausgabe von »Spektrum – Die Woche«.

Wer mehr über »Spektrum – Die Woche« und das einzige wöchentliche Wissenschaftsmagazin Deutschlands erfahren möchte, findet ausführliche Informationen unter <http://www.spektrum.de/spektrum-die-woche>. Ich würde mich freuen, wenn Sie uns dort besuchen.

Mit besten Grüßen

CHEFREDAKTEUR: Prof. Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.)

REDAKTIONSLEITER: Dr. Daniel Lingenhöhl

REDAKTION: Antje Findekle, Jan Dönges, Dr. Jan Osterkamp

STÄNDIGE MITARBEITER: Lars Fischer

ART DIRECTOR DIGITAL: Marc Grove

LAYOUT: Oliver Gabriel

SCHLUSSREDAKTION: Christina Meyberg (Lt.),

Sigrid Spies, Katharina Werle

BILDREDAKTION: Alice Krüßmann (Lt.), Anke Lingg, Gabriela Rabe

VERLAG: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH,

Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600,

Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114,

UStd-Id-Nr. DE147514638

VERLAGSLEITER: Richard Zinken

GESCHÄFTSLEITUNG: Markus Bossle, Thomas Bleck

MARKETING UND VERTRIEB: Annette Baumbusch (Lt.)

LESER- UND BESTELLSERVICE: Helga Emmerich, Sabine Häusser,

Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner des Nationalen Instituts für Wissenschaftskommunikation GmbH (NaWik). Das NaWik ist ein Institut der Klaus Tschira Stiftung GmbH und des Karlsruher Instituts für Technologie. Wissenschaftlicher Direktor des NaWik ist Spektrum-Chefredakteur Dr. Carsten Könneker.

BEZUGSPREISE: Einzelausgabe € 1,49.

IM ABONNEMENT JÄHRLICH: € 39,95; ermäßigt € 30,00.

Alle Preise verstehen sich inkl. Umsatzsteuer.

ANZEIGEN: Wenn Sie an Anzeigen in Spektrum – Die Woche interessiert sind, schreiben Sie bitte eine Mail an anzeigen@spektrum.com

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2013 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bildnachweise: Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

FOLGEN SIE UNS:

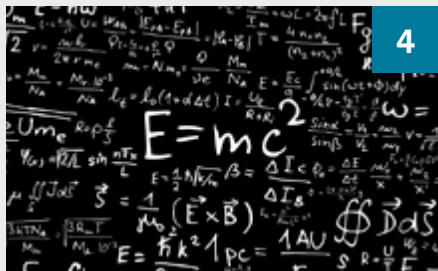
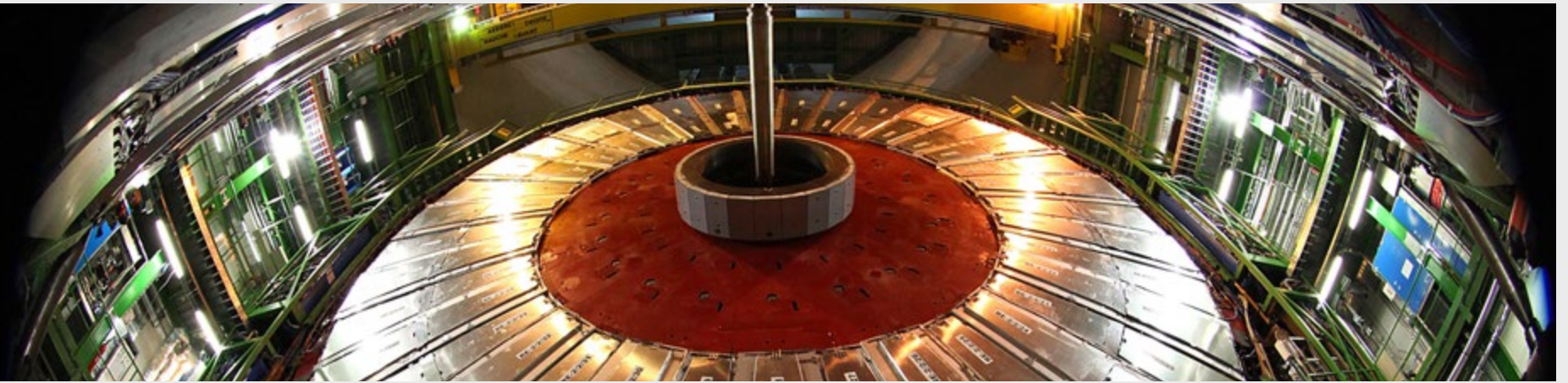


12

TITELTHEMA: HIGGS-BOSON

Ein bittersüßes Ende?

Ein Jahr Higgs-Boson und die Folgen seiner Entdeckung



4

GRAVITONEN

Entpuppt sich die Suche nach der Weltformel als Hirngespinnst?

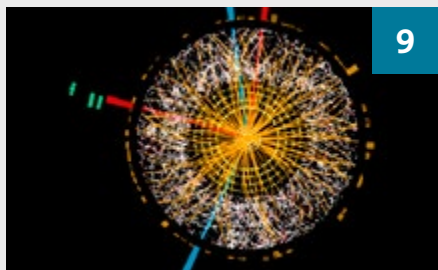
Wenig Hoffnung für die Vereinheitlichung der Physik



7

TEILCHENPHYSIK

Higgs-Boson praktisch nachgewiesen



9

HIGGS

»Das schwerste Boson, das wir je gefunden haben«



18

CERN

»Die Physik wird wieder Teil der Kultur«

Rolf-Dieter Heuer über Higgs-Bosonen, Entdeckungen und die Zukunft der Teilchenbeschleuniger

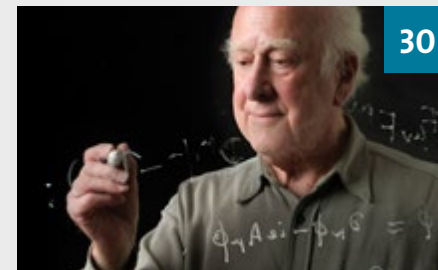


22

BESCHLEUNIGER

Die Weltmaschine von morgen

Welche Technik erlaubt einen genaueren Blick auf das Higgs-Boson?

aus
nature

30

NOBELPREISE

Higgs-Teilchen und -Mechanismus preisgekrönt

Favoritensieg im Rennen um den Physik-Nobelpreis



35

PHYSIKNOBELPREIS

»Das Higgs hat viele Väter«



38

REZENSION

Was können wir wissen?

von Josef Honerkamp

FOTOLIA / DAVIDUS

MEINUNG: GRAVITONEN

Entpuppt sich die Suche nach der Weltformel als Hirngespinnst?

von Ashutosh Jogalekar

Die Chancen, ein einzelnes Graviton und damit die Gravitationskraft zu finden, gehen gegen null. Und damit steht die Weltformel auf der Kippe, meint der Chemiker und Wissenschaftsautor Ashutosh Jogalekar aus Cambridge, Massachusetts, in seinem [Blog](#) bei »Scientific American«.

Vereinheitlichung ist ein altes Ziel der Physik. Seit im 19. Jahrhundert Physiker wie Maxwell und Clausius versucht hatten, scheinbar unvereinbare physikalische Phänomene doch zusammenzuzwängen, gehört die Suche nach der großen und einzigen Theorie, die alle bekannten Kräfte und physikalischen Gesetze in sich vereinigt, zu den impliziten wie expliziten Träumen der Wissenschaftler. Die Suche nach der Weltformel ist im weitesten Sinn ein Streben nach Harmonie, das Verlangen, das gesamte Universum durch die Linse eines einzigen, eleganten Gesetzes oder einer Gleichung zu betrachten, die alles erklärt.

Viele Einheitsbestrebungen waren bemerkenswert erfolgreich. Zuerst brachten die Pioniere der Thermodynamik die Mechanik und Hitze zusammen, dann verwoben Faraday und Maxwell spektakulär Elektrizität, Magnetismus und Optik zu einem nahtlosen Teppich. Sogar Einsteins berühmteste Gleichung kann als eine Art Vereinheitlichung betrachtet werden, die unterstreicht, dass selbst fundamentale Größen wie Materie und Energie nur zwei Seiten der gleichen Medaille sind.

Das Einheitsdenken durchzieht das 20. Jahrhundert: von der Begründung des Welle-Teilchen-Dualismus bis hin zu einem gemeinsamen Rahmen für das Verständnis der speziellen Relativitätstheorie und



ASHUTOSH JOGALEKAR

ASHUTOSH JOGALEKAR

der Quantenmechanik. Pioniere der Teilchenphysik wie Feynman, Weinberg und t'Hooft brachten uns quälend nah ans ultimative Ziel einer Weltformel – aber eben nur so weit: Die Anziehungskräfte erwiesen sich als hartnäckig, und ihre Vereinigung mit der Quantentheorie blieb das wohl größte ungelöste Problem der Physik in den letzten 50 Jahren. Viele der größten Denker – von Einstein bis Edward Witten – bissen sich daran die Zähne aus: mit geringem Erfolg. Die Stringtheorie behauptet für sich, dass sie die Aufgabe bewältigen könne, doch gelang es ihr bislang ebenso wenig wie anderen Theorien, fundierte, prüfbare Voraussagen zu treffen.

Aus experimenteller Sicht ist einer der aussichtsreichsten Kandidaten, um eine Quantentheorie der Anziehungskräfte zu testen, die Suche nach **Gravitonen**: Teilchen, die zwischen den Anziehungskräften vermitteln. Das fundamentale Problem, die Gravitonen aufzuspüren, liegt in der extremen Schwäche dieser gravitativen Kräfte. Um es zu lösen, haben Physiker extrem empfindliche Geräte entwickelt, die prinzipiell selbst den leisesten Hauch eines Gravitons registrieren sollten – etwa LIGO, eines der Meisterstücke. Das Laser In-

terferometer Gravitational Wave Observatory nutzt höchst sensible Interferometer, um winzigste Verschiebungen im Ereignisraum aufzuspüren, die vom Durchtritt einer Gravitationswelle verursacht werden. LIGO ist ein Wunder der Physik wie der Ingenieurkunst und wurde wahrhaftig dazu konstruiert, die Gravitationswellen zu registrieren, die von der klassischen allgemeinen Relativitätstheorie vorausgesagt werden. Ein typisches Experiment untersucht die Interferenz eines hochkonzentrierten Laserstrahls, der zwischen zwei verspiegelten Einwölbungen mit einer festgelegten Entfernung hin- und herspringt. Währenddessen wartet das Gerät darauf, dass eine Gravitationswelle aus einer festgelegten Quelle die Laserstrahlen passiert.

Sobald eine derartige Welle das Interferometer durchquert, verändert sich der Ereignisraum. Je nach Ausgangspunkt der Welle und ihrer Polarisierung resultiert dies in einer effektiven Längenveränderung einer oder beider Einwölbungen. Letztlich kommt es zu einer Phasenverschiebung der beiden Teilwellen des Laserlichts, und deren Interferenz ändert die Intensität des Lichts, was sich messen lässt. Allerdings ist dieser Effekt winzig klein und muss mit

höchster Vorsicht aufgezeichnet werden, um keine Messfehler zu erhalten.

Diese extreme Sensibilität verstärkt sich noch, wenn es an den eigentlichen Nachweis der Gravitonen geht. Wie fein würden die Einflüsse der abgesonderten Gravitonen sein? In einem Kapitel von John Brockmans neuem Buch »This explains everything« versucht Freeman Dyson vom Institute of Advanced Study in Princeton diese Feinheiten zu quantifizieren. In dessen Verlauf erzählt Dyson, dass die Anstrengungen, die Gravitation und die Quantenmechanik letztlich zu vereinen, zum Scheitern verurteilt ist. Das Schlüsselergebnis ist die Auslenkung der beiden Spiegel, die von der Passage der Gravitationswelle eingeleitet wird, was eine veränderte Interferenz der Laserstrahlen verursacht, die schließlich zum Signal führt.

Dysons Berechnung demonstriert, dass diese Veränderung so klein ausfällt, dass sie vom Hintergrundrauschen der Quantenfluktuationen im Ereignisraum schlicht verschluckt würde. Man könnte nun die Spiegel so schwer konstruieren, dass sie nicht mehr von Quantenfluktuationen gestört würden. Doch Dyson beschreibt, wie schwer sie ausfallen müssten: »Wegen des Hintergrundrauschens und des Lärms

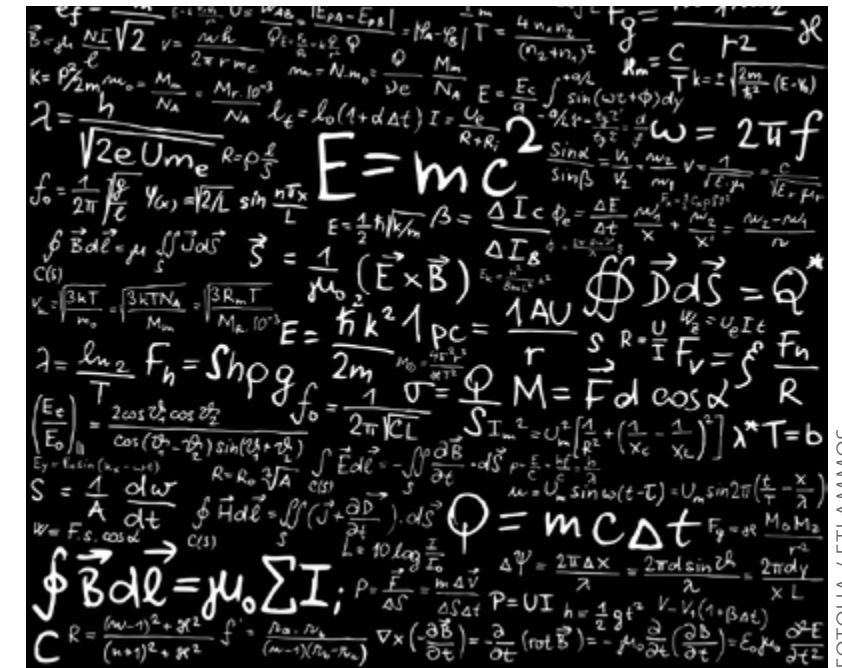
durch die Instrumente können die LIGO-Detektoren gegenwärtig nur Wellen erfassen, die wesentlich stärker als ein einzelnes Graviton sind. Doch selbst in einem völlig stummen Universum kann ich die Frage beantworten, ob ein idealer LIGO-Detektor ein einzelnes Graviton nachweisen könnte. Die Antwort lautet ‚Nein‘. Im stillen Universum wird die Exaktheit der Entfernungsmessung von der Unschärferelation der Spiegelpositionen bestimmt. Um diese Unschärferelation klein zu halten, müssen die Spiegel schwer sein. Eine einfache Rechnung, die auf den bekannten Gesetzen der Gravitation und Quantenmechanik basiert, führt zu einem eindrucksvollen Ergebnis: Um ein einziges Graviton mit LIGO nachzuweisen, müssten die Spiegel so schwer sein, dass sie sich unaufhaltsam anziehen und schließlich zu einem Schwarzen Loch zusammenstürzen! Mit anderen Worten: Die Natur schließt aus, dass wir mit diesem Instrument erfolgreich sein können.«

Letztes Jahr erzählte mir Dyson, dass er intensiv nach Mängeln in seiner Kalkulation gesucht habe – erfolglos. Falls sie auch weiterhin Prüfungen standhält, gingen die Einschränkungen weit über den versuchten Nachweis einzelner Gravitonen hin-

aus. Es könnte bedeuten, dass die Welt der Gravitation und der subatomaren Teilchen für immer getrennt blieben: Eine fundamentale physikalische Barriere würde verhindern, dass sie das jeweils andere Reich durchdringen könnten.

Oder wie es Dyson ausdrückt: »Sollte sich diese Hypothese als wahr herausstellen, hieße das, dass sich die Theorien der **Quantengravitation** als nicht testbar und damit wissenschaftlich bedeutungslos herausstellen würden. Das klassische Universum und das Quantenuniversum könnten dann in friedlicher Koexistenz leben. Keine Unvereinbarkeiten zwischen beiden könnten je aufgezeigt werden. Beide Abbildungen des Universums könnten wahr sein – und die Suche nach der Weltformel würde sich als Illusion herausstellen.«

Müssten wir uns ärgern, wenn dies tatsächlich der Fall sein sollte? Ich denke nicht. Das Fehlen einer Quantengravitationstheorie bedeutet vielleicht das Ende der Vereinheitlichung, aber es würde auch andeuten, dass das Universum vielfältiger ist, als wir bislang denken. Einheitlichkeit und Vielfalt tragen gleichermaßen zur Faszination des Kosmos bei. Darwins Evolutionstheorie illustriert diese Tatsache per-



FORMELN

So könnte sie aussehen: die Weltformel.

fekt: Sie stellt einen gängigen Mechanismus für die Entwicklung der Arten dar und bezeugt gleichzeitig die erstaunliche Vielfalt der heute lebenden Spezies.

Entpuppt sich die Weltformel als Hirn-ge-spinst, sollten wir die Tatsache feiern, dass das Universum noch interessanter ist, als wir uns bislang vorgestellt haben – gleich welche Kräfte es hervorgebracht haben. Unser Scheitern würde einen weiteren Erfolg bedeuten: dass das Universum ein unerschöpflicher Quell an Reichtümern ist. Dafür sollten wir dankbar sein. <

A close-up photograph of numerous golden-colored superconducting cables, likely part of the LHC's magnet system. The cables are bundled together and curve through the frame, reflecting light in a way that creates a bokeh effect in the background.

TEILCHENPHYSIK

Higgs-Boson praktisch nachgewiesen

von Gerhard Samulat

Die Zeichen verdichten sich, dass es sich bei dem im Juli vergangenen Jahres am europäischen Teilchenforschungszentrum CERN entdeckten Partikel wirklich um das lang gesuchte Higgs-Boson handelt, welches den anderen Teilchen des so genannten Standardmodells der Teilchenphysik ihre Masse verleiht.

Schon Ende letzten Jahres räumten die Physiker letzte Zweifel aus, dass sie möglicherweise einer statistischen Fluktuation aufgesessen seien. Nach Auswertung von mehr als 2000 Kandidaten des neuen Teilchens liegt nun aber die Wahrscheinlichkeit, dass sie sich irren, bei mittlerweile nur noch rund 0,000 000 000 256 Prozent – im Fachdeutsch: sieben Sigma.

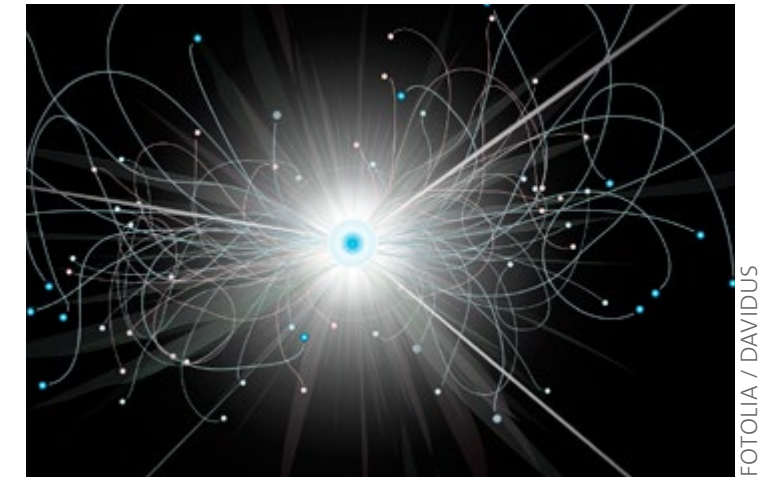
Ferner deutet alles darauf hin, dass die in den beiden Nachweisgeräten ATLAS und CMS bei Proton-Proton-Kollisionen am Large Hadron Collider (LHC) gefundenen Teilchen wirklich die Eigenschaften besitzen, welche die Wissenschaftler von dem Higgs-Teilchen erwarten. Demnach sollte es keinen Eigendrehimpuls besitzen – also einen Spin 0 aufweisen. Ferner sollte sich der Zer-

fall des Teilchens nicht ändern, wenn man das Ganze durch einen (gedachten) Spiegel betrachtet. Physiker sprechen davon, dass die Teilchen positive Parität besitzen.

Die Wissenschaftler haben nun eine Reihe von Optionen für den Spin und die Parität des Teilchens durchgespielt und mit den gemessenen Signalen verglichen. Alles scheint darauf hinauszulaufen, dass es sich tatsächlich um das Higgs-Boson handelt, wenngleich die Ergebnisse noch mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Dennoch traut sich Joe Incandela, der für die CMS-Kollaboration spricht, zu sagen: »Für mich ist klar, dass es sich um ein Higgs-Boson handelt.«

Trotzdem gibt es noch eine Menge an Details zu klären: Eine offene Frage ist beispielsweise, ob es sich bei dem Teilchen um ein so genanntes Standardmodell-Higgs-Boson handelt, das quasi den Schlussstein des bewährten Gedankengebäudes der Teilchenphysik bildet, oder ob es nur das leichteste von mehreren unterschiedlichen Higgs-Bosonen ist, die einige weiterführende Theorien vorhersagen. Wenn dem so wäre, wäre das ein erster Hinweis auf eine mögliche neue Physik, wie es beispielswei-

Spektrum.de – Themenseite



FOTOLIA / DAVIDUS

Teilchenphysik

Vom LHC und anderen Erkenntnisbeschleunigern

se die Supersymmetrie oder die Stringtheorie darstellen.

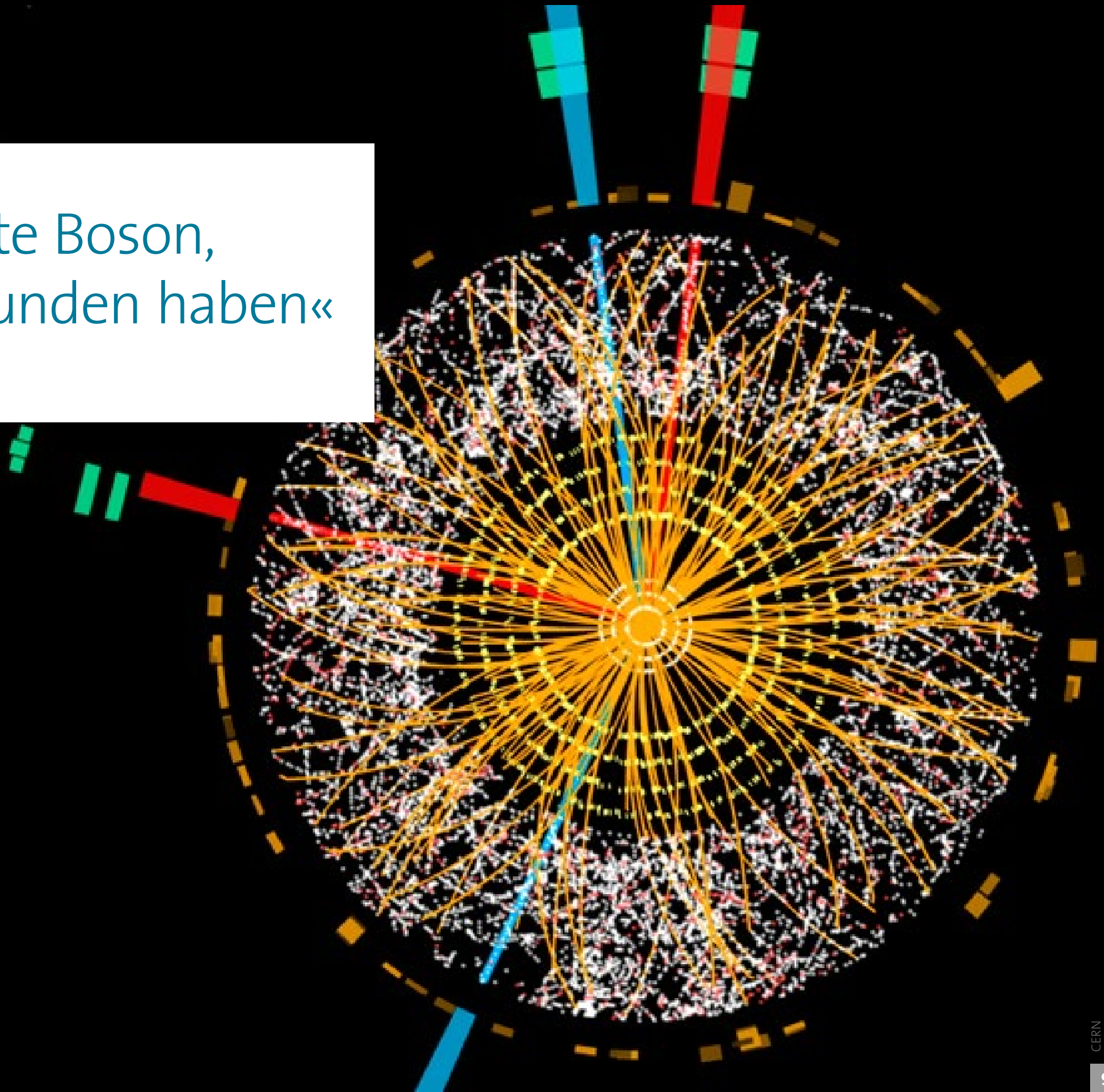
Antworten auf diese Fragen gibt es aber voraussichtlich erst, wenn der LHC im Jahr 2015 wieder anläuft und dann bei voller Leistung arbeiten kann. Denn das neue Teilchen ist extrem selten: Etwa eine Billion Mal müssen Protonen miteinander kollidieren, um ein einziges dieser Bosonen zu erzeugen.

<

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.

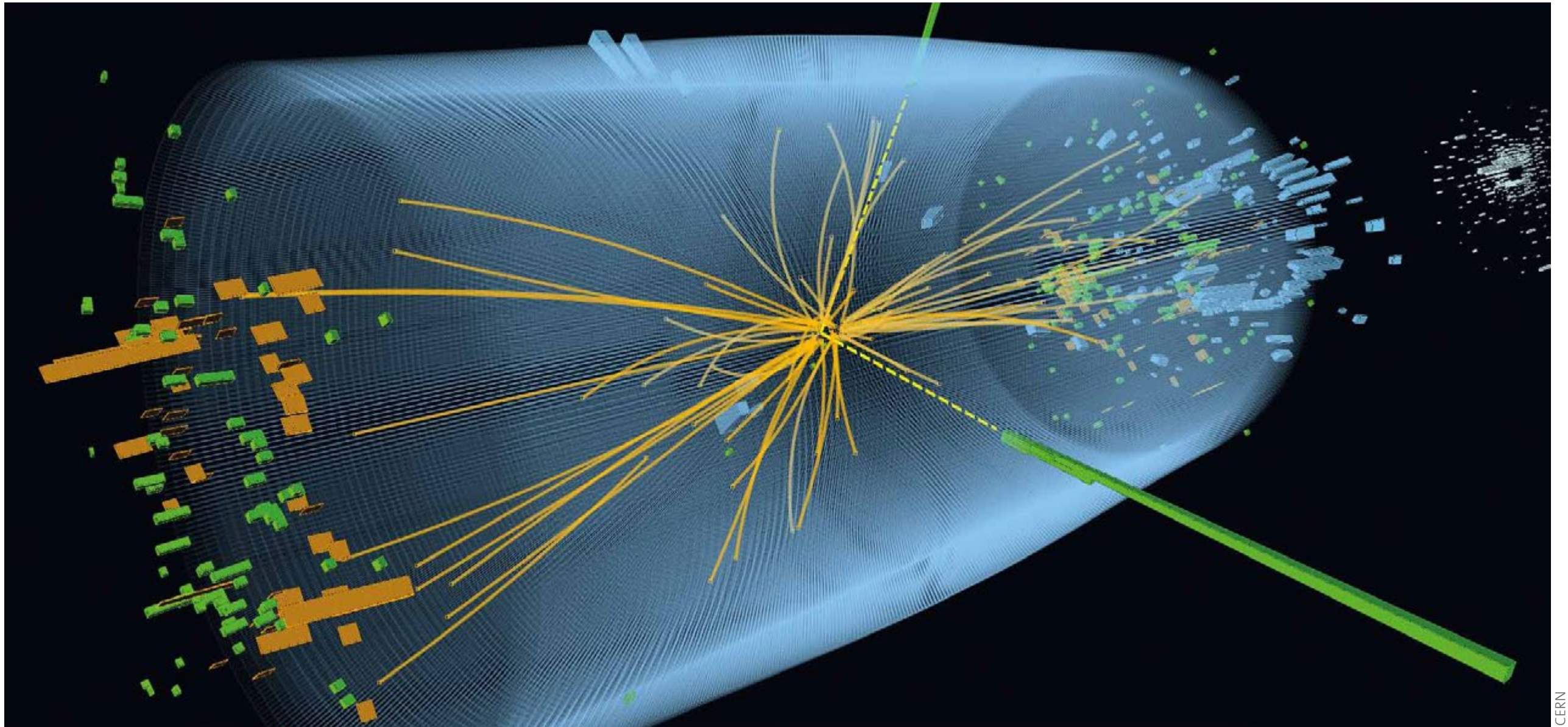
Noch vermeiden die Wissenschaftler eine Festlegung, ob es sich bei diesem neuen Teilchen tatsächlich um das lange gesuchte Higgs-Boson handelt, doch sprechen viele der jetzt bekannt gegebenen Daten dafür. »Die Zahl der Ereigniskandidaten und die Verteilungen der nachgewiesenen Zerfallsteilchen entsprechen 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 Bekanntgabe 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 Zäseumatom. 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-Positron-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 Teilchen 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



CERN

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.« <

PROTON-PROTON-KOLLISION

Darstellung einer mit dem CMS-Detektor aufgezeichneten Proton-Proton-Kollision, die indirekte Hinweise auf die Existenz des Higgs-Bosons liefert. Physiker gehen davon aus, dass bei diesem Ereignis ein Higgs-Boson in zwei Photonen (grüne Linien) zerfallen ist.

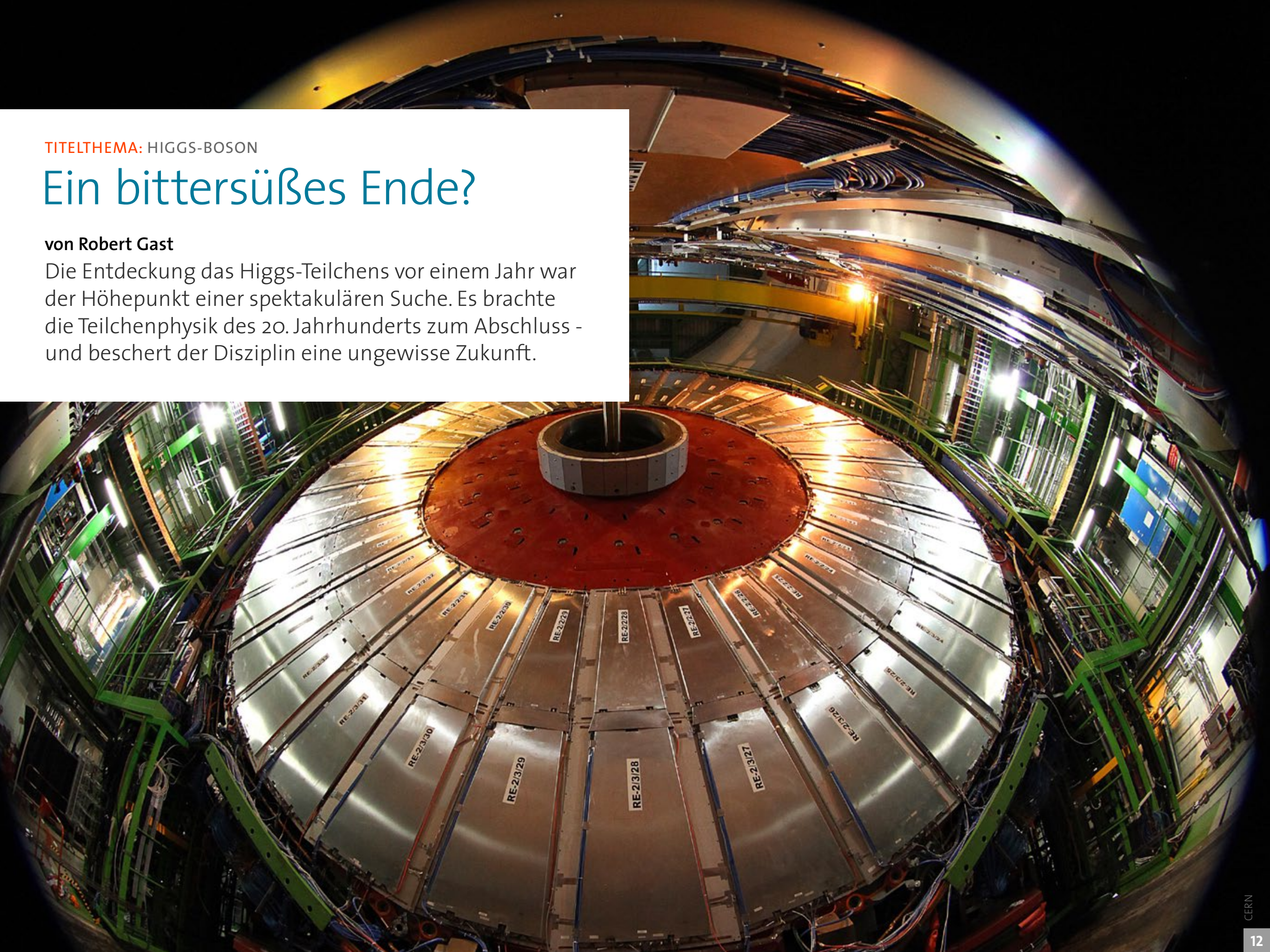
Lesen Sie mehr zum Thema in unserem Hintergrundartikel [»Das Gespenst von Genf wird greifbar«](#).

TITELTHEMA: HIGGS-BOSON

Ein bittersüßes Ende?

von Robert Gast

Die Entdeckung des Higgs-Teilchens vor einem Jahr war der Höhepunkt einer spektakulären Suche. Es brachte die Teilchenphysik des 20. Jahrhunderts zum Abschluss - und beschert der Disziplin eine ungewisse Zukunft.



Die Geste für die Geschichtsbücher ereignete sich am Ende des Seminars. Peter Higgs rang mit den Tränen, die Zuschauer in dem großen Genfer Hörsaal applaudierten stehend. Schließlich, im Fokus der Kameras, reckte ein grauhaariger Herr seine Faust in die Luft – die Geste eines siegreichen Sportlers. Kein Wunder: In einem fünf Jahrzehnte währenden Ringen hatten tausende Physiker der Natur ihr bisher tiefstes Geheimnis abgetrotzt: das Higgs-Teilchen.

Die Faust gehörte zum Arm von Lyn Ewans, seit 1994 Projektleiter des Rieseschleunigers LHC. Sie ließ erahnen, was für ein harter Wettstreit es war. Er begann 1964, als der schottische Physiker Peter Higgs einen subatomaren Mechanismus skizzierte, der eine grundlegende Frage beantworten sollte: Warum haben die meisten Elementarteilchen eine Masse, während andere schwerelos durch den Raum flitzen?

Heute wissen Physiker, dass Higgs Recht hatte: Jeder Fleck des Universums wird von einem unsichtbaren Energiefeld durchzogen. Kurz nach dem Urknall trat es plötzlich in Erscheinung, glauben die Physiker,

und verlangsamt seitdem Quarks, Elektronen sowie Z- und W-Bosonen. Es gibt den Partikeln ihre »träge« Masse – sie macht etwa ein Prozent des Gewichts eines Atomkerns aus, der Rest kommt von der Bindungsenergie der Atomkerne.

Photonen und Gluonen (die Austauschteilchen der starken Kernkraft) huschen hingegen einfach durch den modernen Äther hindurch und sind deswegen masselos. Dass einige Teilchen eine Masse haben, andere hingegen nicht, ist aus Sicht der Physiker ein grober Verstoß gegen die mathematische Ästhetik. Die Symmetrie wurde plötzlich »gebrochen«, sagen sie, ganz spontan, am Anbeginn aller Zeit. Aber was für ein Naturprozess ist dazu im Stande?

Von der Idee zur Gleichung

Schon 1960 hatte der aus Japan stammende Physiker Yoichiro Nambu eine Idee. Nambus Theorie der »spontanen Symmetriebrechung in Supraleitern« hatte jedoch einige Probleme. Zum Beispiel sagte sie Myriaden exotischer Teilchen voraus, die eigentlich in der Sonne entstehen sollten und die Erde fluten würden. Peter Higgs fand schließlich einen Weg, Nambus Gedanken mathematisch so zu formulieren,

dass die »Goldstone-Bosonen« von den Gleichungen verschluckt werden [1].

Er war nicht der Einzige: Die Belgier Robert Brout und Francois Englert konnten ihre Theorie fast zwei Monate vor Higgs veröffentlichen [2]. Auch die drei Amerikaner Tom Kibble, Gerald Guralnik und Carl Hagen erarbeiteten einen ähnlichen Ansatz [3]. Sie konnten ihn jedoch erst zur Veröffentlichung einreichen, nachdem die Arbeiten der europäischen Physiker bereits erschienen waren.

Als einzige Arbeit des Jahres 1964 sagte die von Higgs ein massives Teilchen voraus. Es sollte zum Kronzeugen der Theorie der spontanen Symmetriebrechung werden. Bis dahin war es allerdings ein weiter Weg. Die Idee der jungen Theoretiker war in den 1960er hochspekulativ, und der altehrwürdige Werner Heisenberg soll sie 1965 auf einer Konferenz am Starnberger See sogar als »junk« diffamiert haben.

Denn zunächst war nicht klar, wo der Mechanismus überhaupt gebraucht wurde. Erst als Abdus Salam, Sheldon Glashow und Steven Weinberg ihn 1967 aufgriffen, gewann sie an Akzeptanz. Die Theoretiker hatten eine Theorie entwickelt, gemäß der Elektromagnetismus und schwache Kern-



CERN

kraft zwei Fassetten ein und derselben Urkraft sind. Der Higgs-Mechanismus sollte eine Diskrepanz in der »elektroschwachen Vereinheitlichung« auflösen: Wieso die Botentilchen der schwachen Kernkraft, die W- und Z-Bosonen, eine sehr große Masse haben, die Quanten des Elektromagnetismus – die Photonen – hingegen überhaupt keine.

Margaret Thatcher als Teilcheninteressierte

Auch das war zunächst nur ein Luftschloss. W- und Z-Bosonen waren Theoriekonstrukte, die elektroschwache Vereinheitlichung umstritten. Sie nachzuweisen, war ein Kraftakt. In den 1970er Jahren platzte in den USA der Plan, die größten Beschleuniger des Landes so umzurüsten, dass er die schweren Partikel nachweisen könnte. Frustriert ging der Chefphysiker Carlo Rub-

ATLAS-DETEKTOR

Der LHC ist die größte Maschine der Welt - und benötigt riesige Detektoren, um kleinste Teilchen nachweisen zu können. Im Bild: der ATLAS-Detektor, der sich an der Jagd auf das Higgs-Boson beteiligte.

bia zum CERN. Dort zeigte man mehr Risikobereitschaft und wandelte das sieben Kilometer lange [Super Proton Synchrotron](#) (SPS) in eine Maschine um, die Protonen mit Antiprotonen kollidieren ließ – nur so konnte man die nötige Energie für die Austauschteilchen der schwachen Wechselwirkung aufbringen.

Ende 1982 fanden die Physiker schließlich erste Spuren von einer Hand voll W-Teilchen in ihren Detektoren. Auf einer Konferenz in Rom stellten Rubbia und ein Kollege das noch vorläufige Ergebnis ihren Kollegen vor. Der Saal, so wirkt es auf Videoaufnahmen, applaudierte eher höflich als euphorisch, und die Pressemitteilung damals beschränkte sich auf fünf Sätze. Schon Wochen vorher, kurz vor Weihnachten 1982, hatten die Wissenschaftler die britische Premierministerin Margaret Thatcher informiert – so wie es die Eiserne Lady bei einem Besuch am CERN einige Monate zuvor gefordert hatte.

Anschließend versuchte man auf der anderen Seite des Atlantiks die Ehre der amerikanischen Grundlagenphysik wiederherzustellen. In einem 87 Kilometer langen Ring sollten Protonen und Antiprotonen mit 40 Teraelektronenvolt kollidie-

ren, dem Dreifachen der LHC-Energie. Erst wurde der [Superconducting Super Collider](#) (SSC) von Ronald Reagan gefördert, schließlich gab man ihn 1993 halb fertig auf. Der ohne den SSC größte Teilchenbeschleuniger auf US-Boden, der [Tevatron](#) am Fermilab bei Chicago, konnte bis zum Schluss die Spuren des Higgs-Bosons nicht zweifelsfrei aus dem Datensalat fischen – auch wenn es an Gerüchten und Festsensationen bis zu seinem Ende 2011 hin nicht mangelte.

Auch am CERN fand man jahrzehntelang keine eindeutigen Spuren des Phantoms. Das Problem: Aus der Theorie ergab sich keine Masse für das Higgs-Teilchen, bei der man gezielt nach dem neuen Partikel suchen konnte. Es blieb nur das mühsame Abgrasen aller möglichen Energien, in der Hoffnung, bei einer die Signatur des Higgs zu entdecken.

[Gutes Versteck](#)

Doch schon der LHC-Vorgänger LEP tastete am CERN zusammen mit dem Tevatron fast den gesamten Massenbereich ab – vergeblich. Im Jahr 2000, kurz vor dem Abschalten des LEP-Beschleunigers, war man jedoch auf eine verdächtige Häufung von Ereignissen bei einer Energie von 115 Gi-

gaelektronenvolt gestoßen. Sollte das das Higgs sein?

Letztendlich versteckte es sich in der letzten Lücke, die die vorherigen Teilchenbeschleuniger noch offen gelassen hatten: Bei einer Masse von 125 bis 126 Gigaelektronenvolt. Das lange gesuchte Teilchen, das nach 10-20 Sekunden in andere Teilchen zerfällt, ist damit 133-mal so schwer wie ein Wasserstoffkern. Diesmal wurde das Internet zuerst informiert. Zweieinhalb Wochen vor der offiziellen Bekanntgabe jagte ein Blogger Gerüchte durchs [Netz](#), die sich als akkurate Wiedergabe des Stands am CERN entpuppten. Am Vortag des großen Spektakels gelangten sogar [Videos](#) mit Erklärungen der Chefwissenschaftler an die Öffentlichkeit.

Das CERN hatte sich entschieden, ein großes Seminar in den eigenen Räumen abzuhalten, damit das Higgs-Boson nicht scheibchenweise auf einer Fachkonferenz in Melbourne das Licht der Öffentlichkeit erblicken musste. Dass es auf der Veranstaltung tatsächlich zu einer »Jahrhundertentdeckung« kommen würde, wie zahlreiche Medien und öffentliche Vorträge danach beschworen, war allerdings lange nicht klar. Zwei Wochen zuvor sah es noch so aus, als

würden die gesammelten Daten nicht reichen, um die magische Grenze von fünf Sigma zu knacken, ab der ein Teilchen als offiziell entdeckt gilt – so schildert es zumindest der britische Wissenschaftsautor Ian Sample in seinem Buch »Massive«.

Demnach war erst am 24. Juni 2012, zehn Tage vor der Melbourne-Konferenz, sicher, dass zumindest der [ATLAS-Detektor](#) die magische Grenze knacken würde. Junge Forscher sollen der Überlieferung zufolge die Nacht auf den 4. Juli am Eingang des Seminarraums ausgeharrt haben, um einen Sitzplatz zu ergattern. Am nächsten Morgen waren Physiker in vielen Hörsälen rund um den Globus via »Live-Viewing« dabei, als CERN-Direktor Rolf-Dieter Heuer die erlösenden Worte sagte: [»Für Laien« gelte das Higgs als gefunden.](#)

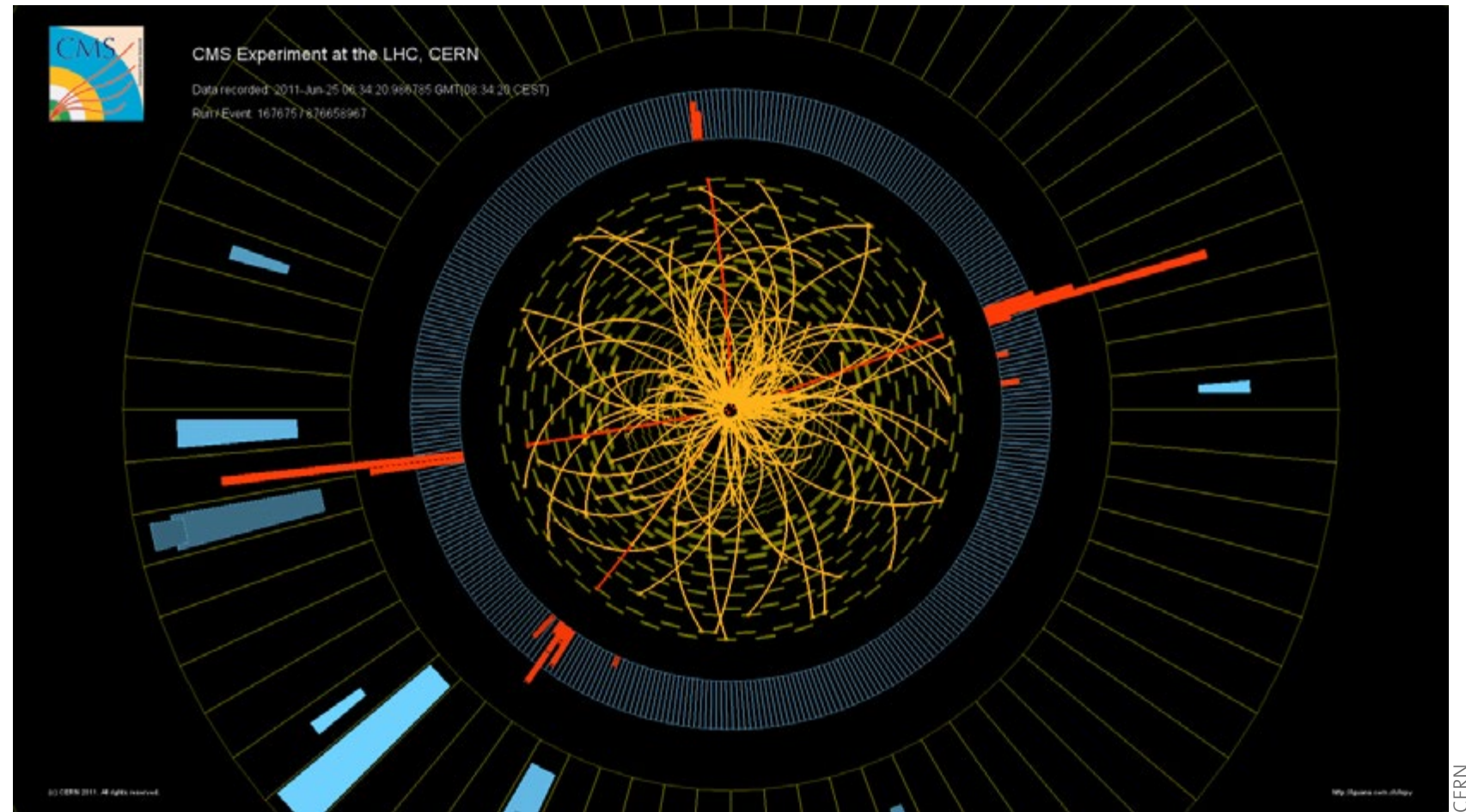
[Letzte Zweifel](#)

Doch im Juli 2012 konnte noch niemand sicher sein, ob man tatsächlich ein Higgs-Teilchen entdeckt hatte. Erst im März dieses Jahres haben die Forschergruppen der zwei Detektoren ATLAS und CMS den kompletten Datensatz der Jahre 2011 und 2012 ausgewertet. Mittlerweile sind alle Zerfallsarten des neuen Partikels ausgewertet wor-

den. Es sehe »immer mehr« wie das von der Theorie vorhergesagte Higgs-Teilchen aus, gab die CERN-Pressestelle bekannt. Die Gleichungen aus den 1960er und 1970er Jahren erweisen sich als beeindruckend genaue Beschreibung der Wirklichkeit.

Und darin liegt aus Sicht vieler Physiker das Problem. Sie hatten auf eine Überraschung gehofft – ohne sie bleiben viele Fragen offen. Wieso etwa das Higgs ausgerechnet die gemessene Masse von etwa 133 Protonen hat, ist für die Wissenschaftler nach wie vor ein Rätsel. Eigentlich müsste das Teilchen viel schwerer sein und dürfte eigentlich erst bei Energien in Erscheinung treten, wie sie unmittelbar nach dem Urknall herrschten, als das Higgs-Feld einige der Elementarteilchen in der Ursuppe erfasste.

So hat mit der Entdeckung des Higgs-Teilchens für Physiker die Zeit einer großen Ungewissheit begonnen. Wie geht es weiter bei der Entschlüsselung des Universums? Und geht es überhaupt weiter? Aus Sicht der meisten Forscher braucht es eine umfassendere Theorie als das »Standardmodell der Teilchenphysik«, um den Mikrokosmos zu beschreiben. Die »**Supersymmetrie**« könnte solch eine Erweiterung



sein – sie sagt für jedes Elementarteilchen aus dem Standardmodell ein Partnerteilchen voraus. Der größte Charme der Theorie: Mit den Partnerteilchen lässt sich elegant erklären, weshalb die Higgs-Masse so klein ist.

Allerdings wäre auch die Supersymmetrie »gebrochen«: Die Superpartner müssten ganz offensichtlich viel schwerer als ihre bereits entdeckten Brüder und Schwestern sein – sonst wären sie längst an Beschleunigern aufgetaucht. Nur wie viel

HIGGS-SIGNAL

Im Juli 2012 gaben die Physiker am CERN bekannt, dass sie sehr deutliche Hinweise auf das Higgs-Boson gefunden hätten – ein Befund, der sie in der Zwischenzeit verfestigt hat.

schwerer? Bisher hat man am LHC, trotz großer Hoffnung im Vorfeld, keine Hinweise auf eines dieser Susy-Teilchen gefunden. Die Physiker haben die Revolution nun ab dem Jahr 2015 auf die Wunschliste gesetzt, wenn der LHC mit seiner Maximalenergie von 14 Teraelektronenvolt aus einer zweijährigen Umbauphase kommt.

Was bringt die Zukunft?

Und wenn es da nicht klappt, mit der neuen Physik? Dann könnte der LHC ein weiteres Mal aufgewertet werden: Der »HE-LHC« würde Protonen und Antiprotonen mit bis 33 Teraelektronenvolt **zusammenprallen lassen**. Dazu müssten allerdings weitaus stärkere supraleitende Magnete entwickelt werden, als es sie heute gibt. Sollten die Supersymmetrie allerdings erst bei sehr hohen Energien in Erscheinung treten, könnten die neuen Teilchen nicht mehr helfen, die korrekte Higgs-Masse vorherzusagen.

Die andere Hoffnung der Physik stützt sich auf das Higgs-Teilchen selbst. Vielleicht weichen seine Eigenschaften minimal von den Vorhersagen des Standardmodells ab, hoffen die Physiker. Oder im Teilchensalat des LHC verstecken sich noch

weitere Higgs-Teilchen, wie die Supersymmetrie vorhersagt. Beides soll der **International Linear Collider** untersuchen: ein Linearbeschleuniger, der Elektronen und Positronen mit bis zu 0,5 Teraelektronenvolt aufeinanderschießt. Dabei entstehen weit weniger Trümmer als bei Proton-Antiproton-Kollisionen, die wegen ihrer inneren Struktur aus Quarks sehr viel komplexere Teilchenkaskaden hervorrufen. Nach aktuellem Stand hat Japan großes Interesse, den ILC zu bauen – als Leuchtturmprojekt in der nördlichen Iwate-Region, die von der Nuklearkatastrophe in Fukushima schwer gezeichnet wurde.

Vermutlich wird der 31 Kilometer lange ILC auch Milliarden Dollar und Euro aus anderen Erdteilen brauchen. Ob sich diese zusammenkratzen lassen, um einen Beschleuniger zu bauen, der eine verglichen mit allen vorherigen Beschleunigern recht vage Hoffnung auf neue Physik birgt? Vor der Entdeckung des Higgs-Teilchens waren selbst Beteiligte pessimistisch. Die Soziologin Arpita Roy interviewte für ihre Doktorarbeit zwischen 2007 und 2009 zahlreiche Physiker am CERN. Unter dem Deckmantel der Wissenschaft sagte etwa

der CERN-Cheftheoretiker **Luis Alavarez-Gaume**: »Wir wollen das Higgs-Teilchen gar nicht sehen. Die Disziplin wäre absolut tot.« Die Pressestelle habe die Idee in die Welt gesetzt, es gehe beim LHC nur darum, das Higgs zu finden. Eigentlich suche man neue Physik jenseits des Standardmodells. Roy folgerte schließlich: »Auf viele verschiedene Arten und Weisen sagten mir alle, dass das Higgs das Ende der Teilchenphysik bedeuten würde.« <

Phys. Rev. Lett. 13, S. 508–509, 1964

Phys. Rev. Lett. 13, S. 321–323, 1964

Phys. Rev. Lett. 13, S. 585–587, 1964



Sie suchen eine
Mathematikerin
für ein Interview?

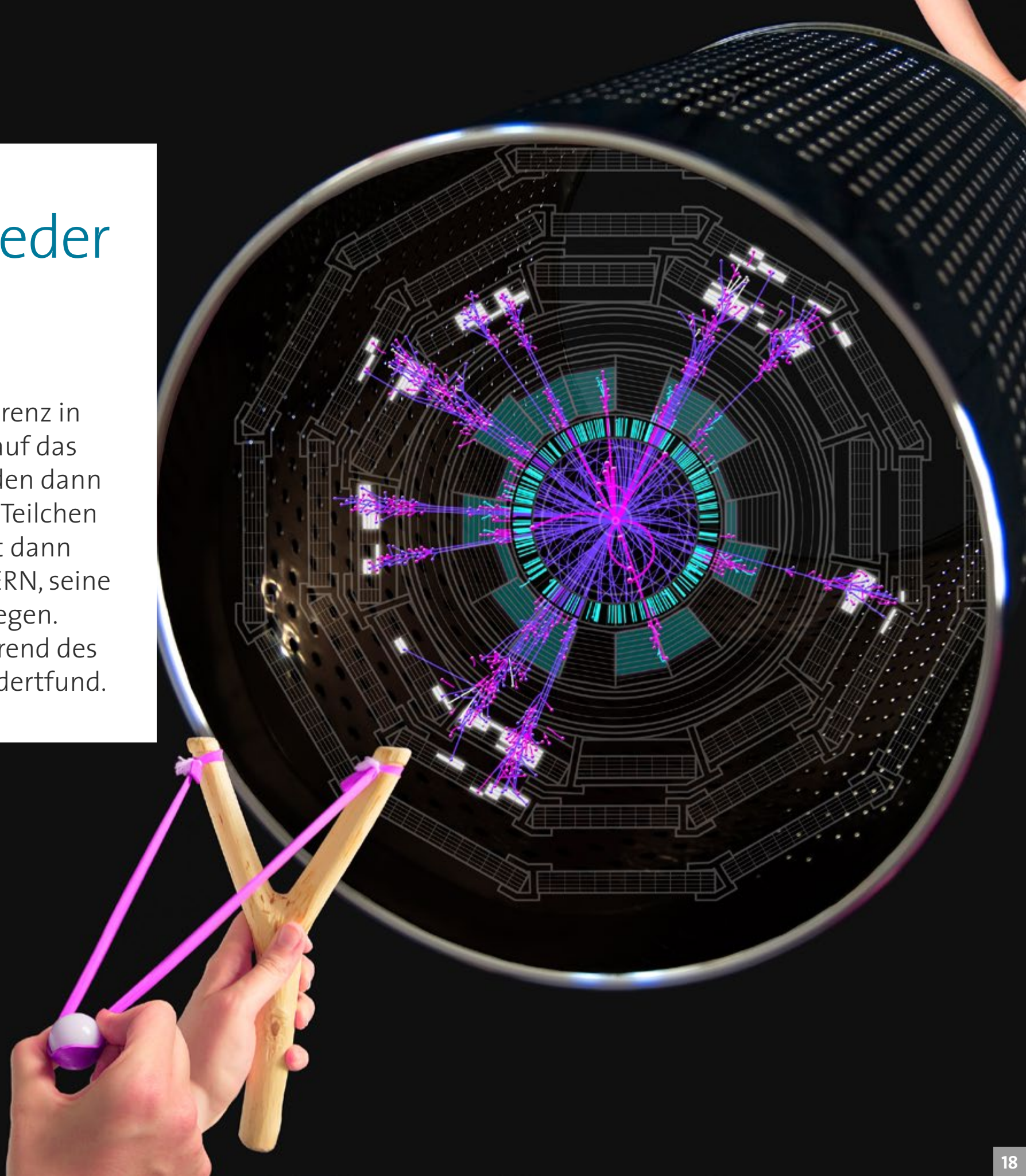
www.academia-net.de

CERN

»Die Physik wird wieder Teil der Kultur«

von Robert Gast

Am 15. November werden auf einer Konferenz in Kioto wohl die neuesten Daten zur Jagd auf das Higgs-Boson vorgestellt. Vermutlich werden dann noch deutlichere Hinweise auf ein neues Teilchen präsentiert als zuletzt im Juli. Doch selbst dann dürfte Rolf-Dieter Heuer, der Leiter des CERN, seine Zurückhaltung wohl noch nicht ganz ablegen. Spektrum.de sprach mit ihm bereits während des Sommers über den potenziellen Jahrhundertfund.





ROLF-DIETER HEUER

Der deutsche Physiker Rolf-Dieter Heuer leitet seit 2009 als Generaldirektor das CERN, wo mit dem Large Hadron Collider der größte Teilchenbeschleuniger der Welt in Betrieb ist.

Herr Professor Heuer, Sie haben uns Journalisten ein Schnippchen geschlagen – eigentlich hatten wir erst jetzt im Herbst mit der Entdeckung eines neuen Teilchens am LHC gerechnet. Wieso ging es doch so viel schneller?

Rolf-Dieter Heuer: Der Beschleuniger und das Grid-Computing haben hervorragend funktioniert. Außerdem lief der LHC mit etwas höherer Energie als im letzten Jahr, damit hatte man eine höhere Wahrscheinlichkeit, das Higgs-Teilchen zu produzieren. Auch die Experimente haben ihre Analysemethoden verfeinert, was zusätzlich geholfen hat.

Einigen ging es offenbar trotzdem nicht schnell genug. Schon Wochen vor der Bekanntgabe gelangten die Ergebnisse ins Internet. Hat Sie das geärgert?

Ich habe mich daran gewöhnt und rege mich lieber über andere Sachen auf. Das ist die heutige Zeit. Ich habe nichts gegen Blogs. Außer sie geben vertrauliche Informationen raus.

An eine Verschwiegenheitsklausel in den Verträgen der CERN-Wissenschaftler haben Sie noch nicht gedacht?

Es gibt einen »Code of Conduct«, einen Verhaltenskodex. Auf den wird im Vertrag indirekt Bezug genommen, denn wir wollen natürlich niemandem einen Maulkorb verpassen.

Warum sind die Daten eines Experiments wie des LHC denn überhaupt vertraulich?

Weil sie unausgegoren sind. Diese Analysen sind ständig im Fluss und müssen von Fachleuten gegengeprüft werden. Außerdem muss ein anderes Experiment das Ergebnis bestätigen, sonst kommen Effekte heraus, die man nachher wieder zurücknehmen muss.

Wie ließen sich denn am CERN in Zukunft weitere Datenlecks vermeiden?

Entweder verstehen die Leute, dass Vertraulichkeit ab und zu sein muss. Oder aber wir können Ergebnisse nur in ganz kleinen Gruppen diskutieren – das verstößt aber gegen das wissenschaftliche Prinzip der

Transparenz. Natürlich müssen wir transparent und offen sein, das ist ganz klar. Ich glaube, wir haben in den letzten Jahren immer alles genau dargelegt und erklärt. Aber wir haben das immer erst dann getan, wenn wir wussten, was Sache war.

Jetzt wissen Sie also, dass Sie das Higgs-Boson entdeckt haben?

So habe ich es ja nicht gesagt.

Na ja, Sie sagten, für den Laien gelte es als gefunden.

Ja, für den Laien. Die Hinweise sind sehr stark, aber wissenschaftlich ist es noch nicht ganz eindeutig. Wir haben ein Teilchen gefunden, das so zerfällt, wie man es vom Higgs-Teilchen erwarten würde.

Bei den bisherigen Signalen gibt es ein paar Abweichungen von den Vorhersagen der Theorie – beispielsweise scheint es mehr Photonenpaare zu geben.

Ja, aber das ist noch sehr früh, zu früh. Sie machen eine Entdeckung, wenn Sie an irgendeiner Stelle einen Überschuss ha-

ben. Wenn Sie an das Top-Quark denken, das 1995 entdeckt wurde, da war die Erzeugungsrate, glaube ich, auch doppelt so hoch, aber das ging dann wieder runter, als man mehr Daten genommen hat.

Und wie erklären Sie, dass so genannte Taus, in die das Higgs eigentlich zerfallen sollte, bisher zu selten in den Daten auftauchen?

Sie können nicht erwarten, dass alle Kanäle im Überschuss sind. Ich bin aber vor allem vorsichtig, weil es eben sein könnte, dass es nicht DAS Higgs-Teilchen ist, sondern eines von mehreren. Denn auch das leichteste supersymmetrische Higgs-Teilchen ist im Prinzip von seinen Eigenschaften her dem Higgs-Teilchen aus dem Standardmodell sehr ähnlich.

Auf die Theorie der Supersymmetrie, die die Gesetze der Teilchenphysik erweitern würde, hat man bisher jedoch keinerlei experimentelle Hinweise gefunden. Einige Ihrer Kollegen sagen, das neue Teilchen könnte sich theoretisch auch noch als etwas völlig anderes als das Higgs entpuppen. Hätte man also

nicht sagen sollen: Wir haben ein Teilchen, wir sagen Ihnen in einem halben Jahr, ob es das Higgs ist?

Das können wir auch in einem halben Jahr nicht sagen.

Dann in vier Jahren?

Das können Sie nicht machen.

Wieso nicht?

Ich glaube, die generelle Öffentlichkeit versteht nicht, warum wir hier zögern. Man würde mich dann sofort fragen, warum wir vier Jahre gewartet haben. Wir haben jetzt ein neues Teilchen gefunden. Ich weiß nur nicht, ob ich ein H davorschreiben kann.

Und was passiert, wenn sich in einigen Jahren zeigt, dass Sie das doch nicht können?

Das wäre eine Sensation. Dann müssten wir vermutlich etwas umschreiben.

Hätte die Physik dann ihre Glaubwürdigkeit verloren?

Ich weiß nicht, aber deswegen habe ich ja genau diese Ausdrucksweise gewählt, damit ich anschließend sagen kann: Leute, ich habe genau das gesagt, weil ich vorsichtig war.

Sehen Sie sich als CERN-Direktor denn als Wissenschaftler oder als Manager?

Komplett als Manager. Gleichzeitig bin ich aber Bürgermeister von einem großen Ort, Außenminister, Innenminister, Präsident. Man ist eigentlich fast alles für dieses Institut.

Seit Kurzem sind Sie auch Popstar des CERN, zumindest posierten Sie zum Beispiel auf der ESOF-Konferenz in Dublin im Sommer schon mal mit jungen Leuten auf Fotos und geben Autogramme. Ist die Physik mittlerweile Popkultur?

Nein, ich würde eher sagen, sie wird wieder Teil der Kultur. Anfang des 20. Jahrhunderts hat man in Cafés über Einstein geredet, über die Relativitätstheorie, über Quantenmechanik. Ich glaube nicht, dass die Leute damals mehr davon verstanden

haben als Leute heutzutage vom Higgs-Boson. Aber sie haben darüber geredet!

Und dank dem LHC ist das jetzt wieder so?

Die ganzen Jahre fehlte etwas Neues. Und das ist jetzt zurück. Das Higgs-Teilchen kann unter Umständen helfen, das Fenster ins dunkle Universum zu öffnen, das heißt, Dunkle Materie und Dunkle Energie zu erforschen, die 96 Prozent des Kosmos ausmachen!

Gleichzeitig hat das Higgs aber auch das Potenzial, die Tür zuzumachen – nämlich dann, wenn es genau den Vorhersagen des Standardmodells entspricht und sich am LHC keine neuen Teilchen zeigen, die Dunkle Materie und so weiter erklären können. Haben Sie einen Plan für diesen Fall?

Das kann passieren, aber das wissen wir erst in ein paar Jahren. Normalerweise arbeite ich ohne Plan B. Denn wenn Sie einen Plan B haben, rutschen Sie automatisch irgendwann hinein.

Was müsste denn am LHC gefunden werden, damit man den nächsten Beschleuniger baut, den über 30 Kilometer langen International Linear Collider (ILC)?

Im Prinzip würde die Entdeckung des Higgs-Teilchens dies schon rechtfertigen. Man kann natürlich debattieren, ob Sie das jetzt schon entscheiden wollen oder ob Sie nicht warten wollen, ob sich nochmal etwas Neues zeigt, wenn wir ab 2015 zu noch höheren Energien gehen. Aber einige Zerfälle des Higgs können wir am LHC sicherlich nicht so genau vermessen, wie wir müssten. Das ginge erst mit dem ILC.

Und wo würde man den ILC bauen?

Dort, wo das erste Land »hier« schreit. Er könnte sicherlich am CERN gebaut werden, aber momentan haben wir alle Hände voll zu tun mit dem LHC. Außerdem bin ich mir nicht sicher, ob es gut ist, alles in einer Region zu konzentrieren. Ich denke mir, dass die Japaner größtes Interesse hätten. <

Herr Heuer, vielen Dank für das Gespräch.



BESCHLEUNIGER

Die Weltmaschine von morgen

von Matthew Chalmers

Physiker planen bereits neue, besonders leistungsstarke Teilchenbeschleuniger. Denn nur damit können sie das Higgs-Boson und seine Wechselwirkungen im Detail untersuchen.

Als die Teilchenphysiker am 5. Juli 2012 aufwachten, beschäftigte wohl viele eine besondere Frage im Hinterkopf: War der am Vortag bekannt gegebene Fund eines schweren Bosons tatsächlich das vom Standardmodell der Physik vorhergesagte Higgs-Teilchen? Oder ist es vielleicht sogar etwas noch Komplexeres und Interessanteres, das auf eine umfassendere Theorie hindeutet? Die Antworten darauf könnten die Zukunft der Teilchenphysik definieren.

Viele Physiker hoffen – und erwarten –, dass ihnen der Large Hadron Collider (LHC) in Genf in den nächsten Jahren ein paar Antworten liefern wird. Dennoch verfeinern sie bereits ihre Verkaufstaktiken, um eine Nachfolgemaschine für den LHC zu erhalten: eine Higgs-Fabrik, die eine neue Theorie mit deutlich präziseren Messungen als heute ausleuchten könnte.

»Wir wissen, dass es eine neue Physik jenseits des Standardmodells geben muss«, erklärt [Barry Barish vom California Institute of Technology](#) in Pasadena. Das

sei garantiert, argumentieren er und einige Kollegen, durch bestimmte Phänomene, die kaum ins gängige Standardmodell passen, wie das unsichtbare Gerüst an Dunkler Materie, das ein Viertel der gesamten Massendichte des Universums ausmachen soll, oder dass Neutrinos problemlos von einer Form zur anderen wechseln können. Barish leitet das weltweite Konsortium, das den International Linear Collider (ILC) entwickelt: einen der Kandidaten für die nächste Weltmaschine. Verschiedene Planungstreffen wie vom 10. bis 12. September in Krakau oder im Juni 2013 in den USA sollen die Forschungsprioritäten der Teilchenphysiker für die nächsten Jahre festzurren.

Pläne sind eine Sache, die Realität aber eine andere: In Zeiten wirtschaftlicher Krisen werde es eine gewaltige Herausforderung, überhaupt einen neuen Teilchenbeschleuniger finanziert zu bekommen, warnt [Christopher Llewellyn-Smith von der University of Oxford](#) und ehemaliger Direktor am CERN. »Es hängt davon ab, welche weiteren Teilchen im LHC detektiert werden, ob die neue Anlage einstim-

mig von der gesamten Physikergemeinschaft unterstützt wird und wie viel sie letztendlich kostet. Selbst wenn die theoretischen Überlegungen genauso fundiert sind wie beim LHC und die Kosten gedeckt sind, wird das ein harter Job«, erklärt er.

Der LHC lebt

Zu den zentralen Fragen gehört, wie weit die LHC-Teams gehen können, um die Eigenschaften ihres neuen Teilchens messen zu können. Die beteiligten Physiker dürfen jedenfalls in den nächsten zehn Jahren noch viel mehr Daten und entscheidende Aufrüstungen an ihrem Gerät erwarten. Und sie konnten schon eine gute Nachricht verkünden: Die Masse des Higgs-Bosons liegt mit rund 125 Gigaelektronvolt (GeV) am leichten Ende der Gewichtsspannweite, die Theoretiker geschätzt hatten. Das hat zwei wichtige Folgen, denn es bedeutet, dass schon ein relativ bescheidener neuer Teilchenbeschleuniger Higgs-Partikel in Massen produzieren könnte. Und es stattet das neue Teilchen mit vielfältigen Zerfallsmöglichkeiten aus, so dass die Forscher

einfacher seine Wechselwirkungen mit anderen Bestandteilen des Standardmodells vergleichen können.

Vorrangig wollen die Wissenschaftler zum Beispiel prüfen, wie das Higgs mit den Fermionen des Standardmodells interagiert, also mit Elektronen, Myonen und Quarks, deren Spin-Quantenzahl 0,5 beträgt. Die Wahrscheinlichkeit einer Wechselwirkung mit jedem Teilchen sollte proportional zu dessen Masse sein – nicht zuletzt weil laut Standardmodell erst diese Interaktion mit dem Higgs-Teilchen die eigentliche Masse erzeugt. Als zweite Priorität gilt es zu testen, ob der eigene Spin des neuen Teilchens dem Wert 0 aus dem Standardmodell entspricht. Die LHC-Physiker können bereits sagen, dass das neue Teilchen ein Boson ist, das einen Spin von 0, 1, 2 oder einer anderen ganzen Zahl aufweisen muss. Einen Spin von 1 können sie bereits ausschließen, da die Bosonen in Photonenpärchen zerfielen, die ebenfalls jeweils Bosonen und folglich Spin-1-Teilchen sind. Noch kein Physiker habe bislang verrückte Theorien aufgestellt, die Bosonen mit einem Spin von mehr als 2 einschließen, sagt Albert de Roeck vom CERN, der den Compact Muon Solenoid Detector am

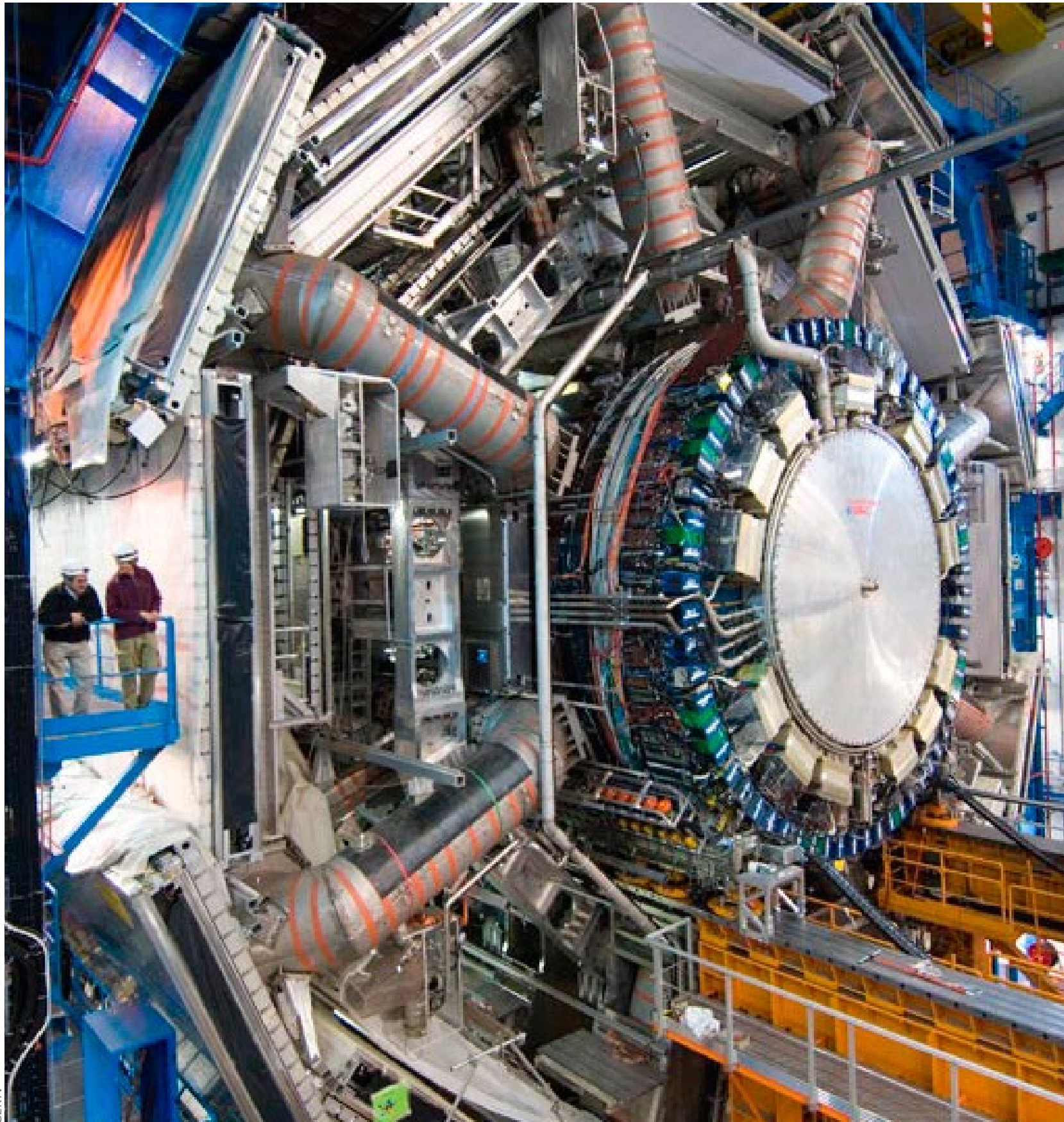
LHC koordiniert. Deshalb versuchten die Forscher nun festzustellen, ob es sich um ein Spin-2- oder Spin-0-Boson handele wie vorhergesagt. Der LHC werde diese Frage klären, betont Rolf Heuer, der Generaldirektor des CERN. Noch unklar sei aber, wie weit seine Maschine gehen könne, um die Verbindungen zwischen dem Boson und anderen Teilchen aufzulösen – vor allem, was dem Higgs die eigene Masse verleiht. Bislang können die beteiligten Physiker nur belegen, dass sich die Wechselwirkungen des Higgs-Boson mit anderen Teilchen innerhalb der gegenwärtigen Messunsicherheiten von 30 bis 40 Prozent einigermaßen konsistent zu den Vorhersagen des Standardmodells verhalten. Laut de Roeck dürfte der Beschleuniger diesen Wert auf etwa 20 Prozent bis zum Ende 2012 drücken; innerhalb der nächsten 10 bis 15 Jahre liegen sogar »sehr wenige Prozent« im Bereich des Möglichen. Aber genau aus diesem Grund fordern viele Physiker einen neuen Teilchenbeschleuniger. Ein wirklich bindender Test des Standardmodells – der auch winzigste Abweichungen offenlegen und so den Weg zu einem noch besseren Theoriegebäude zeigen würde – verlangt Messgenauigkeiten der Higgs-Wechselwir-

kungen von maximal ein Prozent Abweichung. Optimal wären sogar Werte bis 0,1 Prozent, sollten sich die theoretischen Vorhersagen in den nächsten Jahren ebenfalls verbessern. Und das ist ein Niveau, das der LHC kaum erreichen kann.

Der Grobklotz unter den Maschinen

Denn die Maschine arbeitet wie ein Vorschlaghammer: In ihr prallen Ströme aus hunderten Milliarden Protonen auf einem Energieniveau zusammen, das sieben Teraelektronvolt (TeV) pro Strahl erreicht. Das begünstigt die Entdeckung neuer schwerer Teilchen, erschwert aber präzise Messungen, denn die Protonen bestehen aus einem chaotischen Schwall aus Quarks und Gluonen, die die Kollisionen chaotisch machen.

Stattdessen rufen die Physiker in ihren Anträgen nach einer Art Leptonen-Beschleuniger, denn die Leptonen – eine Gruppe leichter Partikel wie Elektronen, Myonen oder Neutrinos – entgehen dem Chaos, weil sie nicht an den starken Quark-Gluon-Interaktionen beteiligt sind, die wiederum diese Unordnung produzieren. Leptonen sind Elementarteilchen, die nur relativ gering über elektromagnetische



und schwache Kräfte aufeinander einwirken. Deshalb funktionieren Leptonen-Beschleuniger eher wie Skalpelle und nicht wie Presslufthämmer: Ihre Zusammenstöße lassen sich fein auf die Masse des jeweiligen Teilchens einstellen, und die entstehende Wolke aus Teilchen wäre vergleichsweise sauber und einfach zu interpretieren.

Um Kosten zu sparen, plädieren einige Physiker dafür, die Röhren des neuen Beschleunigers einfach neben die des LHC zu setzen und darin gegenläufige Strahlen von Elektronen und Positronen kollidieren zu lassen. Dieser Vorschlag – als LEP3 bezeichnet (zu Ehren des Large Electron-Positron Colliders, der vor dem LHC den Tunnel unter Genf einnahm) – kam erst letztes Jahr auf, als sich erste Belege für das neue

DER ATLAS-DETEKTOR AM TEILCHEN-BESCHLEUNIGER 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.

Teilchen ansammelten. LEP3 könnte Higgs-Bosonen mit nur 120 GeV pro Strahl erzeugen – einer Gesamtenergie von 240 GeV: Verglichen mit dem ursprünglichen LEP-Maximum von 209 GeV müsste er also nur einen kleinen Zahn zulegen. Neuere technische Entwicklungen könnten die Produktionsrate noch weiter steigern, denn sie ermöglichen eine Kollisionsrate, die 500-mal größer ist als die des ursprünglichen LEP.

Baute man LEP3 in den bestehenden LHC-Tunnel, könnten die Forscher nicht nur einige der Detektoren wiederverwerten, sondern auch die Infrastruktur des CERN nutzen, etwa die Stromversorgung oder die Datenverarbeitung. Diese Synergieeffekte brächen die geschätzten Kosten von LEP3 herunter auf ein bis zwei Milliarden Dollar – weit weniger als die sechs Milliarden Dollar, die der LHC am Ende gekostet hat. »Der Vorschlag hat etwas Überzeugendes«, betont LEP3-Befürworter Alain Blondel von der Universität Genf. Er weist darauf, dass ohnehin genügend Platz für den Leptonen-Beschleuniger vorhanden sei, ohne dass man den LHC entfernen müsse: Ursprünglich wurde der Tunnel darauf ausgelegt, beide Beschleuniger gleichzeitig aufzunehmen.

Myonen oder Elektronen

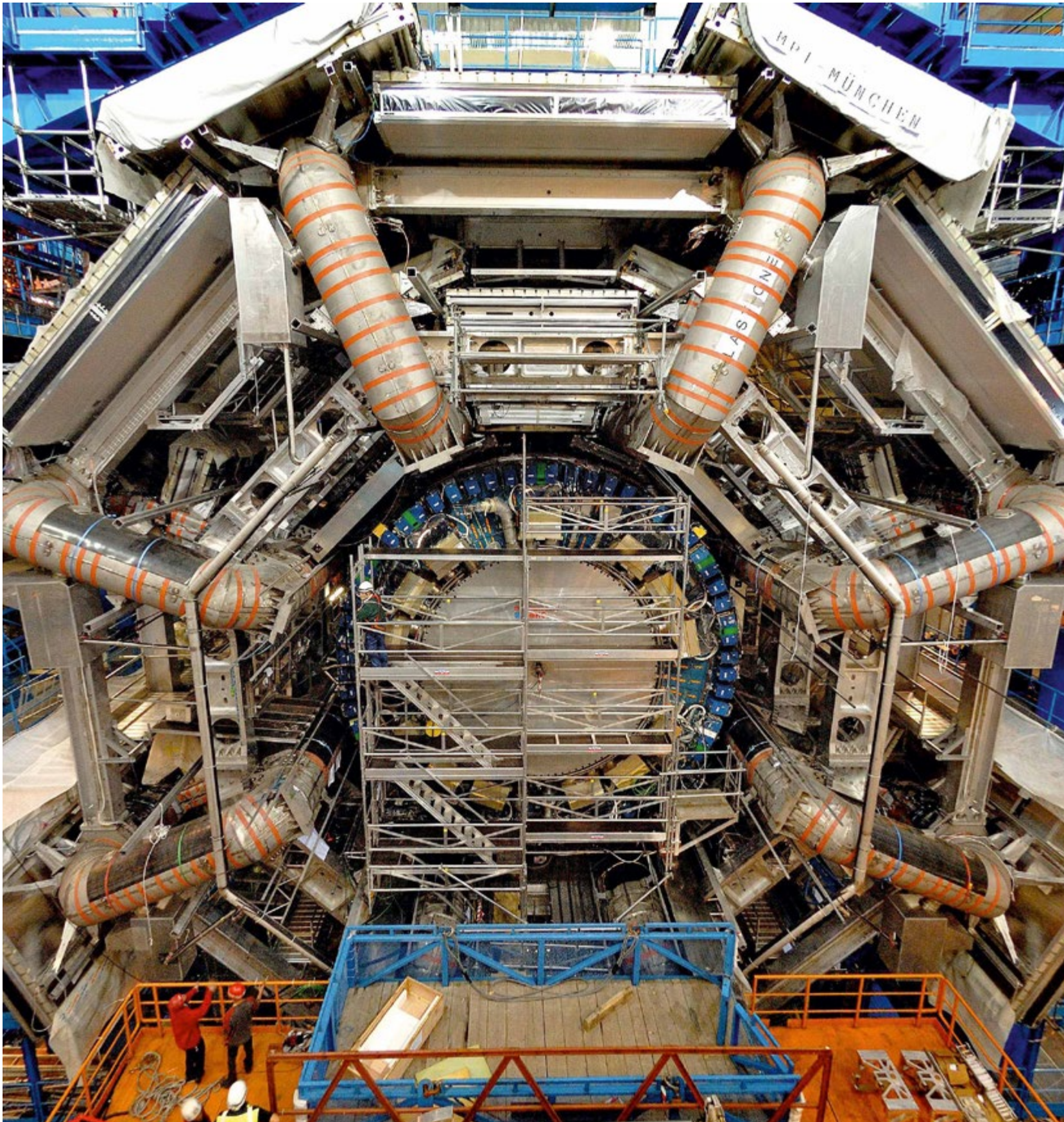
Allen Vorteilen als hochproduktive Higgs-Fabrik zum Trotz besitzt LEP3 jedoch auch einen großen Nachteil: Damit können keine Partikel untersucht werden, die schwerer als ein Higgs-Teilchen sind. Und das würde zum Problem, wenn das LHC weitere schwere Teilchen entdeckt, die Theoretiker anhand der Supersymmetrie prognostizieren, beziehungsweise wenn der Beschleuniger sogar Hinweise auf weitere Dimensionen liefern sollte. Es ist praktisch unmöglich, das Energieniveau von LEP3 so weit hochzuschrauben, dass er auch das Studium schwererer Teilchen erlaubt, da es dabei zum Verlust an Synchrotronstrahlung käme: jener elektromagnetischer Wellen, die Elektronen oder Positronen »ausstoßen«, wenn diese durch ein Magnetfeld rasen und abgelenkt werden.

Bei den Protonen des LHC ist dies kein Problem, da Energieverluste durch Synchrotronstrahlung bei Teilchen höherer Masse drastisch abnehmen und Protonen 2000-mal so schwer sind wie Elektronen; beim LEP3 wäre dies aber schwer wiegend. Das Energieniveau des Beschleunigers ließe sich nur steigern, wenn sein Radius größer würde – was nicht ohne einen weiteren

Tunnel ginge. Einige Physiker hatten deshalb schon vorgeschlagen, eine neue Röhre auch unter den Genfer See zu bohren, um eine Elektron-Positron-Maschine mit 80-Kilometer-Radius zu installieren. In absehbarer Zukunft sähe er dafür aber keine Chance, meint Heuer.

Rund um die Welt erörtern daher viele Wissenschaftler alternative Konzepte für die Higgs-Fabrik, die mit einem Umfang von 1,5 Kilometern deutlich kleiner wäre als der LEP3. Darin stoßen Myonenströme zusammen, die die 207-fache Masse eines Elektrons besitzen, ohne dass es dabei zu nennenswerten Synchrotronstrahlungsverlusten kommt. Zehntausende Higgs-Bosonen könnten dabei entstehen, obwohl die gesamte Kollisionsenergie nur 125 GeV und nicht 240 GeV wie beim LEP3 beträgt. Außerdem könnten die Techniker die Energiemengen so weit hochdrehen, dass sich auch schwerere Teilchen untersuchen lassen.

Ein Myonen-Beschleuniger trägt allerdings sein eigenes Bündel an Problemen. So zerfallen die Myonen bereits nach 2,2 Mikrosekunden in Elektronen, Myonneutrinos und Anti-Elektronneutrinos – was prinzipiell eine lange Lebensdauer im sub-



atomaren Reich mit seinen milliardsteln Nanosekundenbereichen darstellt, das bedeutet für Ingenieure praktisch unmitelbar. Man müsste die Myonen produzieren, indem man einen Protonenstrahl in ein metallisches Ziel jagt, das Ergebnis dann in einen geregelten Strahl umwandelt und anschließend auf die nötige Energie beschleunigt. Und das alles muss innerhalb eines Zeitrahmens geschehen, der kürzer als ein Wimpernschlag andauert. Das [Muon Ionization Cooling Experiment](#) (MICE) am Rutherford Appleton Laboratory nahe Oxford geht diese Herausforderung immerhin an. Bis 2016 sollen Ergebnisse vorliegen und das Verfahren soll ausgereift sein, so dass es das CERN nutzen kann, um eine Neutrinoproduktion zu beginnen, die Strahlen aus Myonneutrinos durch die Erde zu Detektoren zu schicken, die tausende Kilometer entfernt stehen.

DETEKTOR ATLAS

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

Der Linearbeschleuniger

Dennoch sind viele Physiker skeptisch. »Ich bezweifle, dass ich noch während meines Lebens einen Myonen-Beschleuniger sehen werde«, sagt Brian Foster von der University of Oxford. »Wir versuchen seit mehr als zehn Jahren, Myonen zu ‚kühlen‘, was einfach nur extrem schwierig ist.« Foster ist der europäische Regionaldirektor für das konkurrierende Projekt eines linearen LEP-Beschleunigers: ein langer, gerader Elektronenbeschleuniger, der direkt auf die Röhre eines genauso langen und geraden Positronen-Beschleunigers feuert, so dass sich ihre Strahlen genau in der Mitte treffen. Da es keine Kurven gibt, entstehen auch keine Verluste durch Synchrotronstrahlung. Außerdem kann man sie beliebig oft aufrüsten, indem man einfach ihre Endpunkte verlängert.

Erstmals tauchte diese Idee in den 1980er Jahren auf, die schließlich in zwei Konzepten mündeten. Der ILC etwa wäre 30 Kilometer lang und würde in der Praxis erprobte Technologien nutzen, um eine Energie von 0,5 TeV zu erreichen – mit der Möglichkeit, auf 2 TeV aufzustocken. Kostenpunkt: etwa 6,7 Milliarden Dollar. Der vom CERN favorisierte Compact Linear Col-

lider (CLIC) erstreckte sich dagegen auf 50 Kilometer, würde aber auf neue Beschleunigertechnologien setzen, mit denen er auf eine Gesamtenergie von 3 TeV käme. Dessen Kosten sind bislang noch völlig unklar, aber immerhin eröffnet sein Energieniveau völlig neue Entdeckungsmöglichkeiten und präzisere Messungen. Um Kräfte zu bündeln, arbeiten Teilchenphysiker von ILC und CLIC unter Federführung des ehemaligen LHC-Direktors Lyn Evans daran, einen Vorschlag für einen einzigen Linearbeschleuniger bis 2015 auszuarbeiten.

Vernünftigerweise beginnt man mit einem Linearbeschleuniger, der 250 GeV erreicht, um damit das Higgs-Boson zu testen; anschließend wird dann die Energie schrittweise bis zu einem Wert von 500 GeV gesteigert, denkt Evans. Dann könnte er Higgs-Boson-Paare erzeugen, die Forscher hinsichtlich ihrer Bindungseigenschaften untereinander und Wechselwirkungen mit dem schwersten Materieteilchen überhaupt – dem top-Quark – untersuchen können. Höhere Energielevel sind dabei technisch machbar, verschlingen aber mehr Elektrizität, etwa die Produktionskapazität eines mittleren Kraftwerks. »Die Obergrenze für eine derartige Anlage liegt wohl

im Bereich der maximal möglichen Energieversorgung am CERN. Gegenwärtig sind dies 300 Megawatt«, so Evans.

Wo soll aber dieser Leptonen-Beschleuniger stehen? Die Faustformel lautet, dass das gastgebende Land etwa die Hälfte der Kosten übernimmt – in Erwartung langfristiger wirtschaftlicher Gewinne. Das ökonomische Umfeld erschwert momentan jedoch diese Argumentation, was vor allem für Projekte gilt, die in den Augen von Politikern kaum kurzfristige Vorteile für ihre Wähler versprechen.

Globalisierung der Beschleuniger

Sollte tatsächlich ein neuer Linearbeschleuniger in den nächsten Jahren beschlossen werden, so werde er wahrscheinlich nicht in Genf gebaut, denkt Evans. Trotz der überwältigenden technischen und politischen Infrastruktur hat das CERN noch lange genug mit dem LHC zu tun, der zudem frühestens 2014 seine maximale Energie von 7 TeV erreicht. Sogar erst für 2022 ist der Höhepunkt seiner schöpferischen Brillanz anvisiert.

Unwahrscheinlich sei auch, dass die USA zum Zuge kommen, vermutet Pier Oddone, der Direktor des Fermilabs: »Da

müsste schon ein drastisches Umdenken einsetzen.« Nachdem der Tevatron-Beschleuniger des Fermilabs geschlossen wurde, verlagerte sich der Schwerpunkt der Hochenergiepartikelphysik nach Europa. Die amerikanischen Forscher konzentrieren sich hingegen auf das Intensitätsgebiet und untersuchen, wie sich seltene Teilchen untereinander verhalten, indem sie beispielsweise intensive Neutrinoströme produzieren. Und dennoch, so Oddone, »wurde unser Budget dieses Jahr stark gekürzt, und wir hatten Schwierigkeiten, eine Einrichtung standesgemäß zu betreiben, die nur ein Zehntel des ILC kostet«. Außerdem sei es »sehr schwierig« zurzeit, dass die USA nennenswert zu einem Leptonen-Beschleuniger beitragen könnten, der andernorts gebaut wird.

Viele Beobachter denken daher, dass Japan der aussichtsreichste Kandidat für den Standort der zukünftigen Maschinen sein wird. Das Land habe zum Beispiel Mitte der 1990er Jahre einen gewichtigen Beitrag zum LHC geleistet, als dieser in finanzielle Schwierigkeiten geriet. »Jetzt ist es vielleicht an der Zeit, dass Europa sich dafür revanchiert«, meint Evans. Der japani-

sche Premierminister äußerte sich im letzten Dezember ebenfalls positiv über ILC, kurz nachdem die vorläufigen Ergebnisse zum neuen Boson veröffentlicht wurden. Und es gibt sachte Hinweise auf zusätzliche Fördergelder, da der neue Beschleuniger als Teil eines größeren Wirtschaftsplans diskutiert wird: Er soll die im letzten Jahr von einem Erdbeben und Tsunami verwüstete Region ökonomisch wieder auf die Beine bringen.

Die Maschine soll als Dreh- und Angelpunkt einer »internationalen Stadt« dienen, die weitere Forschungseinrichtungen, Industriegebiete und Bildungszentren umfasst. Und schließlich blieb der ILC auf der Wunschliste japanischer Teilchenphysiker weiterhin ganz oben, als sie ihren neuesten Fünf-Jahres-Plan vor Kurzem aufgestellt hatten.

Kann man den ILC also als sichere Wette bezeichnen? »Guter Gott, nein!«, ruft Foster aus. »Aber er ist unsere größte Chance, die wir seit langer Zeit haben.« Womersley schätzt die Wahrscheinlichkeit, dass die Maschine gebaut wird, auf 50 zu 50. »Wir sollten die Finanzierung nicht als gegeben betrachten, nur weil das Higgs gefunden

wurde.« Zehn Jahre würde es vom Spatenstich bis zum funktionsfähigen ILC dauern, schätzt Oddone; dazu käme die Vorbereitungszeit. »Wir sprechen also frühestens über das Jahr 2025. Aber wer startet schon ein derartiges Projekt, bevor bekannt ist, was der LHC noch entdecken könnte? Vielleicht existieren ja noch Dinge, die viel exotischer als das Higgs-Boson sind.«

Insgesamt träumen viele Teilchenphysiker von einer Gesamtkonstellation, die alle drei Bereiche umfasst: Das LHC forscht an der Hochenergiefront in Europa, verschiedene Neutrinoexperimente in den USA gehen die Intensitätsgrenze an, und ein neuer Leptonenbeschleuniger in Japan nagelt alle Details weiterer exotischer neuer Teilchen fest, die das LHC bislang nicht detektiert hat. Ob dieser Traum jedoch wahr wird, hänge nicht nur von den Wissenschaftlern ab, denkt Oddone: »Wahrscheinlich entscheidet darüber ein Telefongespräch zwischen einem Präsidenten und einem Ministerpräsidenten.«

Der Originaltext erschien unter dem Titel »The new particle landscape« in Nature 488, S. 572-575.

NOBELPREISE

Higgs-Teilchen und – Mechanismus preisgekrönt

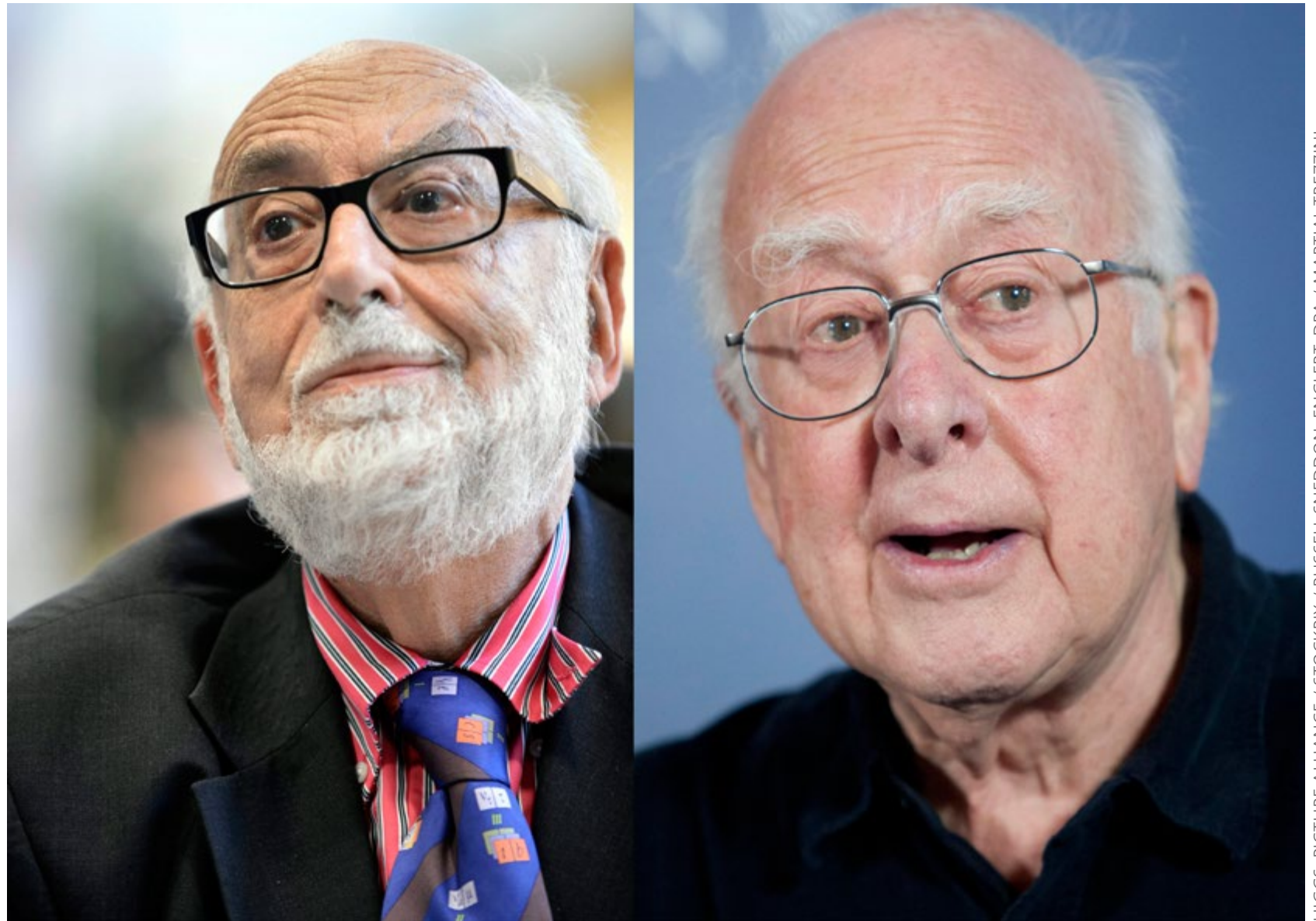
von Thomas Bührke

Das Nobelkomitee ehrt François Englert und Peter Higgs für ihre theoretische Arbeit zum Verständnis des Ursprungs der Masse.

Bei einem Besuch am CERN schreibt Peter Higgs Formeln auf: Seine in den 1960ern veröffentlichte Theorie wartete über vierzig Jahre lang auf die experimentelle Bestätigung.

Ungewöhnlich lange ließ sich das Nobelkomitee dieses Mal Zeit, bis es die diesjährigen Physik-Nobelpreisträger verkündete. Und dann waren es genau jene Kandidaten, mit denen die meisten Fachleute gerechnet hatten: Peter Higgs und François Englert für die Entdeckung eines Mechanismus, der Elementarteilchen ihre Masse verleiht.

Der tatsächliche Nachweis des durch die Preisträger postulierten Higgs-Teilchens mit dem Riesenbeschleuniger LHC des CERN in Genf ist ein derart großer Triumph der Teilchenphysik, dass der Physik-Preis in diesem Jahr eigentlich nur nur dafür vergeben werden konnte. Immerhin war das Higgs-Teilchen nicht weniger als der letzte fehlende Stein im Baukasten der Elementarteilchen. Am Ende bedeutet die Entdeckung aber noch mehr: Sie vollendet eine seit 60 Jahren entwickelte Theorie, welche die Materie und die in ihr wirkenden Kräfte beschreibt. Alle Fortschritte auf diesem Weg – mehrere davon bereits mit dem Physik-Nobelpreis geehrt –, basieren auf der Annahme, dass Higgs' Theorie stimmt. Hätte sie sich als falsch erwiesen, wäre das ganze schöne Gebäude einge-



PETER HIGGS (RECHTS) UND FRANÇOIS ENGLERT

Die Physiknobelpreisträger 2013: Peter Higgs (rechts) und François Englert. Higgs, geboren 1929 in England, gilt heute als Theoretiker, der die Öffentlichkeit und großen Rummel scheut. Als er vor einigen Jahren nach langer Zeit einmal wieder das CERN besuchte titelte das Magazin CERN Courier »Erster Nachweis von Higgs am CERN.« Der 1932 in Belgien geborene Englert hatte in den 1960er Jahren zusammen mit seinem inzwischen verstorbenen Kollegen, dem Belgier Robert Brout, den Mechanismus formuliert, der dem Higgs-Teilchen zugrunde liegt. Etwa zeitgleich stellte Higgs eine ähnliche Theorie auf.

stürzt. Erst jetzt erstrahlt das sogenannte Standardmodell der Teilchenphysik in vollem Glanz.

Am Beginn dieser Geschichte steht die Symmetrie. Sie spielt in der Physik eine grundlegende Rolle, auch wenn uns die umgebende Natur bei weitem nicht überall symmetrisch erscheint. Physiker arbeiten jedoch mit mathematischen Symmetrien, die nach anderen Regeln funktionieren als die menschliche Anschauung. »Wenn die Mathematik die Sprache der Natur ist, dann ist die Symmetrie ihre Syntax«, schreibt der Teilchenphysiker am CERN Gian Francesco Giudice in seinem Buch »Reise in den Zeptoraum.«

In den 1950er Jahren suchten zwei Theoretiker nach einer Möglichkeit, die damals bekannten Grundkräfte in einheitlicher Weise zu beschreiben: den zwischen elektrisch geladenen Körpern wirkenden Elektromagnetismus und die im Innern der Atome wirkende Schwache Kraft. Grundlage dieser neuen Beschreibung war die Einführung von Teilchen, die die Kräfte übertragen. Demnach sorgen Lichtteilchen (Photonen) für die elektromagnetische Kraft. Für die Schwache Kraft sagte die Theorie gleich drei bis dahin unbekannte Kraftpar-

tikel voraus.

Die Symmetrie verlangte nun, dass alle vier Kraftteilchen masselos sind. Auf das Photon trifft das zu. Experimente sprachen aber eindeutig dafür, dass die Überträger der Schwachen Kraft eine Masse besitzen müssen. Die Theorie konnte also nicht stimmen.

Das Higgs-Feld stört die perfekte Symmetrie

Einen Ausweg aus dieser Sackgasse zeigten schließlich die Arbeiten von Peter Higgs sowie Robert Brout und François Englert auf. Sie sagten voraus, dass das Universum von einem Feld durchzogen ist, das manchen Teilchen Masse verleiht, anderen nicht. Man kann sich das so vorstellen, als wäre der Raum mit einer Substanz erfüllt: Einige Teilchensorten werden von diesem Stoff gebremst und gewissermaßen »schwer«, sie erhalten also Masse und können sich nur langsam bewegen. Je stärker sie in dem Feld abgebremst werden, desto schwerer sind sie. Andere Teilchen wie die Photonen spüren das Feld überhaupt nicht und bewegen sich darin völlig ungehindert. Sie sind masselos und immer mit Lichtgeschwindigkeit unterwegs. Das spä-

ter nach Higgs benannte Feld bringt also die perfekte Symmetrie in eine Schräglage, und zwar genau so, dass es die Welt der Teilchen erklärt.

Als Erste erkannten Sheldon Glashow, Steven Weinberg und Abdus Salam die volle Tragweite dieser Idee. Sie schufen eine Vereinigungstheorie für die elektromagnetische und Schwache Kraft und sagten für Letztere drei mit Masse behaftete Kraftteilchen voraus, wofür sie 1979 mit dem Physik-Nobelpreis geehrt wurden. Vier Jahre darauf entdeckten die Arbeitsgruppen um Carlo Rubbia und Simon van der Meer am CERN die drei postulierten Teilchen, genannt W- und Z-Bosonen – und erhielten prompt ein Jahr später ebenfalls die begehrte Ehrung. Auch die nobelpreisbelohnte Theorie der kleinsten Materiebausteine, der Quarks, kommt ohne Higgs nicht aus.

Die Bedeutung des ominösen Energiefelds für das gängige physikalische Erklärungsmodell des Universum wurde enorm: Ohne Feld darf es keinerlei feste Materie geben, geschweige denn Leben; der Kosmos wäre erfüllt von lichtschnell umhersausenden Teilchen. Doch anfangs war eben alles nur Theorie, geradezu ein mathematischer Trick. Die entscheidende

Wettlauf im Jahre 1964

Die Karriere von Peter Higgs hatte alles andere als verheißungsvoll begonnen: Nachdem er 1954 am King's College in London promovierte, bewarb er sich an mehreren Universitäten auf Dozentenstellen – erfolglos. Schließlich kam er 1960 an der Universität von Edinburgh unter. Auch die Veröffentlichung seiner bahnbrechender Idee sollte dann nicht ohne Hindernisse verlaufen. Vor allem befand er sich – ohne sein Wissen – im Wettlauf mit zwei Konkurrenten.

Ende Juni 1964 hatten Robert Brout und François Englert von der Freien Universität Brüssel bei der Zeitschrift *Physical Review Letters* eine Arbeit zum selben Thema wie Higgs eingereicht. Sie erschien am 31. August. Higgs schickte seine erste Arbeit Mitte Juli an die Zeitschrift *Physics Letters*, wo sie erst Ende September erschien. Währenddessen hatte Higgs seine Theorie ausgebaut und eine zweite Veröffentlichung genau an dem Tag bei der Zeitschrift *Physics Letters* eingereicht, als die Arbeit von Brout und Englert erschien. Doch der Herausgeber der Fachzeitschrift erkannte den Wert

von Higgs Theorie nicht und lehnte sie ab. Umgehend zog Higgs seine Arbeit zurück und reichte sie bei *Physical Review Letters* ein, wo schon seine erste Veröffentlichung erschienen war. Doch auch hier war ein Gutachter unzufrieden: Higgs sollte die Arbeit von Brout und Englert erwähnen, die ihm entgangen war. Er kam dieser Forderung nach. Vor allem aber wies er am Ende der nur eineinhalb Seiten langen Arbeit auf die Möglichkeit hin, dass dem Masse verleihenden Feld auch ein Teilchen zugeordnet werden müsse: das Higgs-Teilchen. Das eröffnete überhaupt erst die Möglichkeit, das nicht direkt nachweisbare Feld indirekt über dessen »Inkarnation« als Teilchen zu entdecken. Genau das gelang ein halbes Jahrhundert später mit dem LHC am CERN.

Wegen dieser Verzögerungen erschien Higgs' zweite Arbeit erst im Oktober 1964. Zur selben Zeit diskutierte er über das Problem mit Gerald Guralnik, Carl Hagen und Tom Kibble vom Imperial College in London, die im selben Monat ihre Lösung des Masseproblems bei den *Physical Review Letters* einreichten, wo

sie zwei Monate später erschien. Der Begriff Higgs-Mechanismus wurde in den 1970er Jahren erfunden. Sein Entdecker legte stets Wert auf die Klarstellung, dass nicht er diese Bezeichnung eingeführt hat und viel lieber alle daran beteiligten Physiker genannt sähe. Preiskomitees waren sich darin uneins. Im Jahr 2004 erhielten lediglich Englert, Brout und Higgs den angesehenen Wolf-Preis, während 2010 die Amerikanische Physikalische Gesellschaft Englert, Brout, Higgs, Guralnik, Hagen und Kibble mit dem ebenfalls renommierten Sakurai-Preis ehrte.

Da der Physik-Nobelpreis höchstens an drei Forscher vergeben werden kann, musste das Komitee auswählen und entschied sich für Higgs und Englert, Brout ist 2011 verstorben. Thomas Gehrman von der Universität Zürich hält die Auswahl für berechtigt: »Englert und Brout hatten bereits eine Anwendung auf die Schwache Wechselwirkung im Auge, Higgs hat zudem als Erster die Existenz eines dazu gehörigen Teilchens vorhergesagt.«

Frage blieb deshalb: Gibt es das Feld wirklich? Und wie könnte man es nachweisen? Nach den Regeln der Quantenphysik sind mit einem Feld stets Teilchen verbunden. Sie existieren jedoch nicht immer. Dafür muss man das Feld erst anregen: es schlägt dann Wellen, die wir als Teilchen beobachten. Allen Physikern war allerdings klar, dass man das Higgs-Feld sehr hart anschlagen muss. Das geht nur, indem man Teilchen mit extrem hoher Energie, sprich Geschwindigkeit, aufeinander schießt und sie in einem Energieblitz explodieren.

Jetzt kann an Ort und Stelle ein Higgs-Teilchen entstehen – welches aber instabil ist und in weniger als einem Tausendstel einer Milliardstel einer Milliardstel Sekunde wieder zerfällt. Das ist viel zu kurz, um es nachweisen zu können, selbst mit den haushohen Detektoren des LHC. Diese registrieren aber die Zerfallsprodukte des Higgs-Teilchens, und weil die Theorie diese sehr genau vorhersagt, können die Teilchenphysiker aus den Trümmern auf das kurzzeitig ins Leben gerufene Higgs-Teilchen schließen und sogar seine Eigenschaften, etwa die Masse, bestimmen.

Dabei hatten viele Physiker anfangs daran gezweifelt, dass es technisch einmal

möglich sein würde, das Higgs-Teilchen nachzuweisen. Noch 1976 warnte der berühmte Theoretiker John Ellis vom CERN in einem häufig zitierten Artikel davor, eine große experimentelle Suche überhaupt erst anzustrengen. Doch 1984 trafen sich Physiker erstmals, um über einen neuen Großbeschleuniger mit genau diesem Ziel zu diskutieren. Ein Vierteljahrhundert später begann die Suche, die nun zum Erfolg geführt hat. Damit ist das theoretische Gebäude der Elementarteilchen vollendet.

What comes next?

Die meisten Wissenschaftler sind aber davon überzeugt, dass die Physik mit dem Higgs-Feld nicht am Ende angekommen ist. Das Standardmodell der Teilchenphysik dürfte nur ein Übergangsstadium zu einer weitaus umfassenderen Theorie sein, schließlich erklärt der Higgs-Mechanismus zum Beispiel nicht die Werte der Teilchenmassen. Sie scheinen willkürlich zu sein und folgen keiner erkennbaren Regel, was in der Physik selten ist. Und nicht einmal die Masse des Higgs-Teilchens sagt die Theorie vorher. »Die Theorie erklärt alles sehr schön, aber sie wirkt in mancher Hinsicht etwas konstruiert«, sagt Robert Harlander

von der Universität Wuppertal, und zudem »erscheint die Masse ungewöhnlich klein«, ergänzt er. Überdies: Das Standardmodell gilt ausschließlich für die uns bekannte Materieform, aus der alle Sterne, Planeten und wir Menschen bestehen. Die macht aber nach heutiger Kenntnis nur fünf Prozent aller im Universum vorhandenen Materie aus. Fünf Mal mehr beinhaltet die Dunkle Materie. »Über das Wesen dieser Substanz macht die Higgs-Theorie überhaupt keine Aussage«, so Christoph Grab von der Universität Zürich. Vielleicht, so die Hoffnung der Physiker, wird man mit dem LHC, der 2015 mit verdoppelter Energie wieder anlaufen soll, auf weitere Teilchen stoßen, die den Weg zu einer neuen Physik weisen. <



Sie suchen eine
Mathematikerin
für ein Interview?

www.academia-net.de

PHYSIKNOBELPREIS

»Das Higgs hat viele Väter«

von Jan Dönges

Der [Physiker Thomas Naumann](#) ist Mitglied des ATLAS-Teams am LHC, das an der Suche nach dem Higgs-Teilchen beteiligt war. Mit [spektrum.de](#) sprach er über den diesjährigen Physiknobelpreis und ob das CERN dabei nicht zu kurz gekommen ist.

Nach der Verkündung des Nobelpreiskomitees hält der Generaldirektor des CERN, Rolf-Dieter Heuer, eine Ansprache vor seinen Kollegen.



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.

Spektrum.de: Herr Naumann, Ihr ATLAS-Experiment am LHC hat das von Peter Higgs vorausgesagte Teilchen mit entdeckt. Ist denn das Higgs-Teilchen mittlerweile überhaupt definitiv nachgewiesen?

Thomas Naumann: Ja, seit dem Frühjahr 2013 – nach Auswertung aller Daten der ersten Betriebsperiode des LHC – ist das Higgs-Teilchen am Large Hadron Collider LHC des CERN in Genf definitiv nachgewiesen.

Peter Higgs ist der deutlich prominentere der beiden Forscher, auf ihn geht auch die Voraussage eines entsprechenden Teilchens zurück. Halten Sie es für gerechtfertigt, dass sowohl er als auch sein Kollege Englert geehrt werden?

Englert und sein 2011 verstorbener Kollege Robert Brout sowie Higgs haben 1964 als erste und unabhängig voneinander sogenannte spontan gebrochene lokale Symmetrien in die Teilchenphysik eingeführt.

Englert sagte übrigens am Telefon, die Verkündung der Entdeckung am CERN am 4. Juli 2012 in Genf sei seine erste direkte Begegnung mit Peter Higgs gewesen – fast 50 Jahre nach ihren Veröffentlichungen im Jahre 1964.

Hätten dann nicht auch noch die Amerikaner Kibble, Guralnik und Hagen bedacht werden müssen? Auch sie formulierten ähnliche Theorien.

Ihre Beiträge sind ebenfalls wichtig, ebenso wäre Jeffrey Goldstone hier zu nennen, doch der Preis kann nur an drei Personen vergeben werden. Aber auch mehrere Physiker, die bereits den Nobelpreis erhielten, wie Anderson, Nambu, Weinberg sowie t'Hooft und Veltman haben an der Ausarbeitung dieser Aspekte der Theorie mitgewirkt. Die Theorie der Bausteine der Welt und ihrer Kräfte hat viele Väter ...

Die Rolle des CERN bei der Erforschung des Higgs ist sicher kaum zu unterschätzen. Sind Sie enttäuscht, dass das Nobelkomitee nicht über seinen Schatten ge-

sprungen ist und mit der Tradition gebrochen hat? Dann hätte auch das CERN den Preis erhalten können.

CERN ist sicher ein jahrzehntelanges Erfolgsmodell friedlicher internationaler Zusammenarbeit tausender Physiker, ein Mekka der Weltphysik. Ich denke aber, alle meine Kollegen am CERN sind zuallerst froh, dass »das Higgs« den Preis bekommen hat. Keiner von uns arbeitet für den Preis, sondern aus Neugier und innerem Antrieb. Ein lustiger Vorschlag war, dem Teilchen selbst den Preis zu verleihen, als Dank dafür, dass es uns allen Masse verleiht.

Empfinden Sie es als gute Kompromisslösung, dass das Komitee die Arbeit der CERN-Forscher in der Preisbegründung explizit erwähnt?

Ja, es ist auffällig: Die Entdeckung durch die Experimente ATLAS und CMS am LHC des CERN wird ganz ausdrücklich erwähnt. Das ist eine sehr fairer Ausweg aus dem Dilemma, den Preis nicht den Experimenten mit ihren tausenden Physikern verleihen zu können. <

KALENDER FÜR STERNFREUNDE 2014
Ahnerts Astronomisches Jahrbuch erscheint nun als **Kalender für Sternfreunde** mit überarbeiteter Struktur im DIN-A-4-Format. Die Herausgeber und Autoren liefern alle grundlegenden Informationen über das Himmelsjahr 2014 und geben eine Fülle von praktischen Tipps für die Beobachtung astronomischer Phänomene. Wer die vielfältigen Erscheinungen am Sternenhimmel selbstständig erkunden möchte, wird auf dieses Standardwerk nicht verzichten wollen.

Ca. 218 Seiten mit zahlreichen Abbildungen und Tabellen. Preis **€ 12,90** (zzgl. Versand); als **Standing Order € 10,-** (inkl. Inlandsversand)



JETZT BESTELLEN:

www.sterne-und-weltraum.de/sternfreund



Josef Honerkamp

Was können wir wissen?

Verlag: Spektrum Akademischer Verlag

ISBN: 9783827430519

24,95 €

REZENSION

Vom Verlässlichen und Unverlässlichen

von Franziska Konitzer

Aus eigener Erfahrung muss ich sagen, dass auf Partys und Feiern aller Art die Beantwortung der Frage, »Und, was machst du so?« mit »Ich bin Physikerin« nicht so gut ankommt. Meist folgt nämlich die Feststellung des Fragers, in der Schule ganz fürchterlich schlecht in Physik gewesen zu sein. Irgendwann folgen sie dann aber doch, die tatsächlich wichtigen Fragen: Wie war das eigentlich wirklich mit dem Urknall? Was kam davor? Ist Licht nun eine Welle oder ein Teilchen? Was ist das Higgs-Boson? Warum benötigt man für all das die Mathematik? Und wie kann man sich überhaupt sicher sein, dass all die schönen Theorien stimmen und die Wirklichkeit nicht doch ganz anders aussieht?

Nun ist es in einer solchen Situation kaum angebracht, seinem Gegenüber statt einer Antwort ein Buch zu geben – wenn es aber trotzdem ein Buch sein müsste, wäre man mit »Was können wir wissen?« sicher nicht schlecht beraten. Es ist kein populärwissenschaftliches Physikbuch im klassischen Sinne, denn es ist entstanden aus den Blogeinträgen von Josef Honerkamp, einem theoretischen Physiker. In seinem Blog »Die Natur der Naturwissenschaften« beschäftigt er sich mit Themen aus der Physik, aber auch, wie physikalische Erkenntnisse überhaupt gewonnen werden und wie verlässlich das Wissen an sich überhaupt ist.

Die Beschäftigung mit dem Wissen an sich ist es auch, welche die verschiedenen Kapitel im Buch vereint, die in fünf Teilen

zusammengefasst sind. Während der erste Teil eher klassische Konzepte und Theorien aus der Physik beleuchtet, wie zum Beispiel den Urknall, die Natur von Quanten oder Einsteins Formel $E = mc^2$, geht es im zweiten Teil eher um übergreifende Konzepte aus der Physik: Um emergente Phänomene etwa, also um Systeme, in dem das Ganze mehr als die Summe seiner Teile ist, um den Informationsbegriff in der Physik oder um den Zufall.

Die restlichen Teile beschäftigen sich weniger mit konkreten Themen aus der Physik, sondern mit den Methoden, die zum Erkenntnisgewinn angewandt werden: So beantwortet Honerkamp die Frage, warum Gesetzmäßigkeiten der Natur überhaupt mathematisch erfasst werden können, oder welche Rolle die Evolution bei all dem spielt. Um Wege zum verlässlichen Wissen im weitesten Sinne geht es in den beiden letzten Teilen des Buchs, die sich übergreifend mit verschiedensten Thematiken beschäftigen: Sie behandeln das Verhältnis zwischen Wissenschaft und Technik, aber unweigerlich auch die Frage nach Gott, und die Schönheit von physikalischen The-

orien an sich. An dieser Zusammenfassung wird klar, dass das Buch auf Blogeinträgen basiert; es ist also ein Sammelsurium aus Ideen, Konzepten und Themen. Somit verwundert es nicht, wenn sich manche Inhalte wiederholen. Das fällt aber nicht weiter ins Gewicht, denn »Was können wir wissen?« ist kein Buch, das von vorne bis hinten in der richtigen Reihenfolge durchgelesen werden muss.

Man kann sich die Kapitel einzeln herausuchen, die einen besonders ansprechen, denn jedes steht unabhängig für sich – besonders empfehlen möchte ich hier übrigens »Gefühle eines Physikers beim Lesen eines philosophischen Artikels«, oder »Realität und Nichtseparabilität in Quantenmechanik und Buddhismus«. Wer ein Lesebuch sucht, das klar und ansprechend formulierte Gedanken zur Physik und über sie hinaus enthält, das Altbekanntes in einen neuen Zusammenhang stellt und zum Nachdenken anregt, dem sei dieser Titel wärmstens empfohlen. Und als Gesprächsstoff auf Partys und Feiern eignet er sich auch ganz hervorragend.

ALLES WAS SIE
WISSEN MÜSSEN.
AUF IHREM BILDSCHIRM.



Jahresabonnenten (Privatnutzer) unseres Monatsmagazins **Spektrum der Wissenschaft** können nicht nur die aktuelle Ausgabe direkt als PDF abrufen, sondern haben auch noch vollen Zugriff auf das komplette Onlineheftarchiv!

www.spektrum.de/digitalabo

Deutschlands einziges wöchentliches Wissenschaftsmagazin

Spektrum DER WISSENSCHAFT **DIE WOCHE**



Jeden Donnerstag neu!

- 52 x im Jahr mehr als 40 Seiten News, Kommentare, Analysen und Bilder aus der Forschung
- Abonnenten erhalten Zugang auf das Archiv von **Spektrum – Die Woche**
- mit exklusiven Artikeln aus **nature** in deutscher Übersetzung
- nur 0,77 € pro Ausgabe*
- das Abo ist jederzeit kündbar

Lernen Sie das digitale Wissenschaftsmagazin
Spektrum – Die Woche kostenlos kennen:

www.spektrum.de/viermal

KOSTENLOS &
UNVERBINDLICH
TESTEN



*Jahrespreis € 39,95; ermäßigt € 30,- (für Schüler, Studenten und Abonnenten, die eine andere Publikation des Verlags Spektrum der Wissenschaft beziehen)