

Woche eins nach der Higgs-Entdeckung

An den Morgen des 4.7.2012 werden wir uns noch lange erinnern. Im Seminarraum am Heidelberger Philosophenweg sorgen Studierende und Wissenschaftler aus allen Teilgebieten der Theoretischen Physik dafür, dass die Stimmung hoch und der Sauerstoffgehalt der Luft niedrig ist. Das Wort 'discovery' ist das Stichwort: statistisch gesehen bedeutet es eine Wahrscheinlichkeit von weniger als eins in einer Million, dass es sich doch nicht um ein Higgs-Signal handelt. Wichtiger ist jedoch was Physiker und Laien damit wirklich meinen, dass es sich nämlich zweifelsfrei um die Entdeckung eines neuen Teilchen handelt. Vergessen wir Analyse-Details, Photon- und Elektron-Energiespektren oder Wahrscheinlichkeits-Definitionen. Fabiola Gianotti (ATLAS), Joe Incandela (CMS) und Rolf-Dieter Heuer (CERN-Direktor) verkünden eine Entdeckung, auf die wir seit Jahrzehnten hingearbeitet haben. Peter Higgs wischt noch schnell eine Träne weg und bedankt sich in der für ihn typischen und manchmal irreführend bescheidenen und sympathischen Art bei den Experimenten. Der Rest der Hochenergiephysik verneigt sich vor CERN und vor Peter Higgs und seinen Kollegen, die vor fast 50 Jahren dieses Teilchen postuliert haben. Aber es wird wohl noch eine Weile dauern, bis wir alle diese Nachricht verdaut haben.

Manche meiner experimentellen Kollegen haben mehr als zwei Jahrzehnte damit verbracht, das Higgs am LEP-Ring (CERN), am Tevatron (Fermilab), und jetzt am LHC (CERN) zu suchen. Viele Jahre lang haben die beteiligten Forscher immer neue Ideen für Higgs-Suchen entwickelt, vielleicht ein Grund, warum die Suche am LHC schneller ging als man erwartet hatte. Wir alle müssen uns nun daran gewöhnen, dass unsere wissenschaftliche Kernfrage nicht mehr lautet *Wie finden wir das Higgs-Teilchen?* Diese riesige Leistung ist erbracht. Welchen Fragen wird sich also die Higgs-Physik in den kommenden Jahren widmen?

Ein Teilchen mit langer Geschichte

Rolf-Dieter Heuer hat es schon während der CERN-Pressekonferenz angedeutet: Für Teilchen-Physiker und interessierte Leser ist die Beobachtung einer Higgs-artigen Resonanz bei ATLAS und CMS eine der wichtigsten Entdeckungen der letzten hundert Jahre. Als Enrico Fermi 1934 seine inzwischen Fermi-Modell genannte Beschreibung von Wechselwirkungen zwischen Elementarteilchen veröffentlichte, hatte er nicht ein universelles Standardmodell der Teilchenphysik im Sinn. Hideki Yukawas Arbeit von 1935 erlaubt eine Interpretation des Fermi-Modells in der modernen Sprache von Austauscheteilchen, die Kräfte zwischen Teilchen moderieren. Gerard 't Hooft und Martinus Veltman zeigten 1972, dass man mit einigen Modifikationen aus dem Fermi-Modell eine Theorie aller Elementarteilchen-Wechselwirkungen machen kann. Diese Modifikationen entsprechen zwei neue Elementarteilchen: schwere W - und Z -Austauschteilchen der schwachen Kernkraft, die 1983 am SPS-Beschleuniger des CERN entdeckt wurden, und das Higgs-Teilchen, das am 4.7.2012 an dessen Nach-Nachfolgeprojekt LHC entdeckt wurde. Mit diesen beiden Entdeckungen ist das Standardmodell der Teilchenphysik jetzt komplett.

Aus Sicht der Theoretiker bedeutet die Higgs-Entdeckung, dass sich knapp 80 Jahre nach dem Fermi-Modell die Teilchenphysik als ein Triumph einer einzigartigen mathematischen Beschreibung herausstellt. Dieser Zugang heißt Quantenfeldtheorie und ist die Verbindung von Werner Heisenbergs Quantenmechanik und Albert Einsteins spezieller Relativitätstheorie. So folgerichtig diese Entwicklung aus heutiger Sicht scheint, wir verdanken diesen Erfolg Menschen wie Peter Higgs, die Quantenfeldtheorie vorangetrieben haben, auch als es für eine Weile nicht gut für ihr Modell aussah.

Weil es so eine lange Geschichte hat, ist das Higgs-Teilchen keineswegs der große Unbekannte. Wir wissen ja genau, was das Higgs-Feld leisten soll: es soll die Massen der Elementarteilchen wie zum Beispiel der Austauscheteilchen der schwachen Kernkraft beschreiben. Dazu bedient es sich eines Tricks, zu dem uns die Bedingungen von 't Hooft und Veltman zwingen. Statt die Massen den Teilchen direkt zuzuschreiben, produziert man sie indirekt mit Hilfe der Wechselwirkung der Teilchen mit dem umgebenden Vakuum. Diese Eigenschaft des Vakuums kann man mit einem Temperaturfeld vergleichen. Jeder Punkt im Universum hat

eine bestimmte 'Temperatur', oder einen praktisch konstanten Wert des Higgs-Feldes. Masse bedeutet, dass sich ein massiveres Teilchen träger bewegen lässt. Im Higgs-Mechanismus geschieht das dadurch, dass durch die Higgs-Temperatur sich manche Teilchen mehr in ihrer Bewegung beeinträchtigen lassen und andere weniger. An einem heißen Sommertag können wir uns in solche träge und damit massive Teilchen problemlos hineinversetzen, wenn durchtrainierte Jogger quasi masselos an uns vorbeiziehen. Interessant ist, dass wir praktisch alle Massen der Elementarteilchen gemessen haben und damit schon fast alles über dieses Higgs-Feld wissen.

Das neue Higgs-Teilchen ist eine Folge der Quantenphysik. Wie Quantenmechanik die Eigenschaften von (Licht-) Wellen und (Licht-) Teilchen vermischt, erscheinen uns kleine schnelle Änderungen des Higgs-Temperaturfelds als Higgs-Teilchen. Obwohl dieses Wellen-Teilchen-Konzept fast hundert Jahre alt ist, erscheint es uns immer noch als ein Mysterium. Für Higgs-Teilchen in unserem Standardmodell bedeutet es, dass wir auch über dieses Teilchen praktisch alles schon wissen. Die Frage, die die LHC-Experimente in den kommenden Jahren beantworten werden lautet also *Ist das gerade beobachtete Teilchen genau dieses Higgs-Teilchen?*

Ist es das Higgs-Teilchen?

Auf diese Frage gibt es eine einfache soziologische oder psychologische Antwort: Wenn man nach dem Higgs-Teilchen mit seinen bekannten Eigenschaften sucht und dann mit Hilfe dieser Suchstrategien etwas findet, dann wird es schon das Higgs-Teilchen sein. Physiker möchten das natürlich mathematischer und genauer wissen. Die wichtigste Eigenschaft des Higgs-Feldes sind seine Wechselwirkungen mit den verschiedenen Elementarteilchen, die diesen Teilchen ihre Masseneigenschaften geben. Wenn das Higgs-Teilchen nichts anderes als eine komplizierte Schreibweise für eine kleine Änderung im Higgs-Temperaturfeld ist, dann wechselwirkt es mit anderen Teilchen genau wie das Higgs-Feld es tut. Wechselwirkungen des Higgs-Teilchens kann man aber am LHC messen. Wenn es in der Kollision zweier Protonen produziert wird, dann beobachten wir ganz einfach mehr Higgs-Teilchen, wenn es stärker mit den Bausteinen der Protonen wechselwirkt; wir müssen nur Higgs-Teilchen zählen. Aber es gibt noch einen besseren Trick. Das Higgs-Teilchen weist man experimentell nicht direkt nach. Es zerfällt in Sekundenbruchteilen, und wir rekonstruiert es aus seinen Zerfallsprodukten. Wenn nun das Higgs-Teilchen nicht nur auf einem Weg, sondern über verschiedene Zwischenschritte in die bekannten Materiebausteine wie Protonen und Elektronen zerfällt, dann kann man aus dem Vergleich dieser Zerfallskanäle die verschiedenen beteiligten Kopplungen bestimmen.

Was wir für diese Messung brauchen ist eine Wieder-Entdeckung des Higgs-Teilchens in einem oder zwei Dutzend verschiedener Produktions- und Zerfallskanäle. Diese Aufgabe ist offensichtlich eng verknüpft mit der bisherigen Frage *Wie finden wir das Higgs-Teilchen?* Für junge Forscher hat sie aber einen nicht zu überschätzenden Vorteil: Es geht nicht mehr um nur einen goldenen Kanal, sondern um eine lange Liste von Messungen. Jede dieser Messungen kann von frischen neuen Ideen profitieren. Weitere Fragen nach Eigenschaften des Higgses, wie seinem Eigendrehimpuls oder Spin oder seinen Transformationseigenschaften unter Umkehr von Zeit- und Raumkoordinaten sind noch größere experimentelle und theoretische Herausforderungen.

Bemerkenswert ist in dieser Hinsicht die beobachtete Masse des Higgs-Teilchen selbst: Sie liegt genau so, dass wir die größtmögliche Anzahl von Higgs-Eigenschaften messen können. Genau dort haben wir uns das Higgs-Teilchen gewünscht. Seitens der Theoretischen Physik könnte es durchaus einen tieferen Grund für diese perfekte Masse geben; oder es ist ganz einfach das experimentelle Glück der Tüchtigen.

Abweichungen von den im Standardmodell vorhergesagten Wechselwirkungen müssen nicht notwendigerweise zu einem Widerspruch mit dem Higgs-Mechanismus führen. Sie können kombiniert mit der gemessenen Higgs-Masse Hinweise auf den Ursprung des Higgs-Mechanismus geben. Die Struktur und die Parameter des Standardmodells haben bis heute keinen experimentell etablierten tieferen Grund. Theoretiker

versuchen seit jeher, zum Beispiel die verschiedenen Wechselwirkungen auf eine gemeinsame Struktur zurückzuführen. Manche Modelle für den Ursprung des Higgs-Mechanismus sind mit dem jetzt beobachteten Higgs-Teilchen kaum in Übereinstimmung zu bringen. Andere, wie Supersymmetrie, sagen kleine Abweichungen voraus, die man eventuell am LHC beobachten kann. Für die Teilchenphysik ist das hin und her zwischen Entdeckung und Präzisionsmessungen übrigens nichts neues. Nach der Entdeckung des Z -Teilchens wurde dieses neue Teilchen am LEP-Ring in Genf im Detail studiert und hat uns zum Beispiel wichtige Hinweise zur Masse des Higgs-Teilchens gegeben.

Die Neugier der Physik

Jetzt haben wir also vermutlich das Higgs-Teilchen entsprechend der Vorhersage entdeckt. Der große Umsturz im Weltbild der Elementarteilchenphysik bleibt aus — zum Glück? Hier und dort hört man bei abgeschalteten Mikrophonen Worte des Bedauerns über diese verpasste Gelegenheit zur großen Revolution. Interessierte Beobachter und Wissenschaftspolitiker neigen in solchen Augenblicken wohl dazu, an der Wissenschaft zu verzweifeln. Offensichtlich schlagen zwei Herzen in der Brust der Wissenschaft. Natürlich ist eine Higgs-Entdeckung ein Triumph für die Teilchenphysik, der letzte Puzzlestein in unserem mathematischen Verständnis der fundamentalen Wechselwirkungen zwischen Elementarteilchen, der heilige Gral der Teilchenphysik. Der LHC hat sich in den Geschichtsbüchern der Physik verewigt.

Auf der anderen Seite sind Forscher vor allem von wissenschaftlicher Neugier getrieben. Vielleicht können wir noch verstehen woher das Higgs-Feld kommt? Und können wir nicht doch noch dunkle Materie erklären? Das alles ist kein Widerspruch zum letzten Higgs-Puzzlestein unseres Standardmodells. Beobachten wir nicht bei den neugierigsten Mitgliedern unserer Gesellschaft, nämlich Kindern, ein ganz ähnliches Verhalten? Niemand ist so stolz wie ein Kind, wenn der letzte Baustein eines wunderschönen Hauses endlich passt. Und wir umstehenden Erwachsenen staunen, wenn mit ebenso großer Begeisterung dieses Bauwerk am nächsten Tag eingerissen wird; der heilige Gral nach Indiana Jones.

Die Welt einer neugierigen Wissenschaft kann nicht stillstehen, jede Entdeckung und jede Präzisionsmessung ist unabhängig vom Ergebnis automatisch eine offene Frage. Welche Art von Ergebnis uns mehr begeistert entscheidet sich manchmal jeden Morgen neu — nach dem Higgs ist vor dem Higgs.