
KAPITEL 4

Die Entdeckung des Higgs-Bosons

Wir haben jetzt also den großen Hadronbeschleuniger und die Detektoren. Alles wurde eingeschaltet und hat mehr oder weniger¹⁸ von Anfang an funktioniert. Milliarden von Ereignissen wurden aufgezeichnet. Und was passiert dann? Wie finden wir ein Higgs-Boson (Abbildung 4.1)? Nun beginnt die lange Analysearbeit.



Abbildung 4.1: Wenn man nur eine Nadel im Heuhaufen finden müsste, wäre das noch nicht so schlimm. Aber was tun, wenn so viele Heuhaufen da wären, um Scheunen, so weit das Auge reicht, zu füllen?

Quelle: Marion Hamm

18. Alles funktionierte bestens nach dem Start am 10. September 2008, jedoch trat neun Tage später eine größere Panne auf. Es entstand beträchtlicher Schaden, der den Beschleuniger für fast zwei Jahre stillstehen ließ.

Das Higgs-Boson ist ein höchst instabiles Teilchen, das kaum 10^{-22} Sekunden nach seiner Erzeugung überlebt (also ein Zehntausendstel Milliardstel einer Milliardstelsekunde kurz gesagt, nicht lange). Es zerfällt also praktisch sofort, indem es sich in andere Teilchen verwandelt. Wie wir gesehen haben, heißt das nicht, dass diese Teilchen ursprünglich im Higgs-Boson vorhanden waren, sondern lediglich, dass das Energieäquivalent der Masse des Higgs-Bosons in Form von leichteren Teilchen erscheint, ähnlich wie wenn man eine große Münze in mehrere kleine umwechselt. Man beobachtet also das Higgs-Boson nicht direkt, sondern nur seine Zerfallsprodukte. So wie eine Ein-Euro-Münze in verschiedene Kombinationen von 5, 10, 25 oder 50 Cent-Münzen umgewechselt werden kann, können Teilchen wie etwa das Higgs-Boson Kleingeld auf verschiedene Arten herausgeben. Jede dieser Arten wird Zerfallskanal genannt.

Zerfallskanäle

Gestützt auf das Standardmodell können die Theoretiker und Theoretikerinnen die Wahrscheinlichkeit für die Beobachtung jedes Zerfallskanals (wie oft ein Teilchen in diesen Kanal zerfällt) vorhersagen, jedoch hängen diese Voraussagen vom genauen Wert der Higgs-Boson-Masse ab. Vor der Entdeckung war sie aber nicht bekannt. Das ist so, wie wenn man versuchte, wichtige Radiomeldungen zu empfangen, aber deren Sendefrequenz nicht kennt. Das ist nicht leicht, insbesondere wenn das Signal schwach ist und es viel Rauschen und Knistern gibt. Als die Detektoren ATLAS und CMS mit ihren Messungen begannen, kannte man die „Radiofrequenz“ des Higgs-Bosons nicht. Man wusste nur, dass seine Masse zwischen 114 und 157 GeV liegen müsste, was etwa 100 bis 150 Protonmassen entspricht, da frühere Experimente Werte außerhalb dieses Bereichs schon ausgeschlossen hatten.

Wie wir im 2. Kapitel gesehen haben, besagt die Theorie, dass die Masse eines Teilchens von der Stärke seiner Wechselwirkung mit dem Brout-Englert-Higgs-Feld abhängt. Schwere Teilchen interagieren demnach stärker mit diesem Feld. Unter der Annahme, dass die Vorhersagen des Standardmodells richtig seien, hat man somit eine gute Vorstellung der möglichen Higgs-Boson-Zerfälle, auch wenn man seine genaue Masse nicht kennt. Das schwerste Teilchen ist das *top*-Quark, mit einer Masse von 173 GeV. Ein Higgs-Boson mit einer Masse zwischen 114 und 157 GeV würde sich schwer tun, ein *top*-Quark und ein *top*-Antiquark zu erzeugen, wenn man bedenkt, wie schwer diese sind.

Die bessere Option ist es deshalb, in ein Paar aus einem b -Quark und einem b -Antiquark zu zerfallen, den nächstschwersten Quarks nach den top -Quarks.

Zerfall in Quarks

Leider können b -Quark-Antiquark-Paare auf viele verschiedene Arten entstehen. Man kann sie nicht von jenen unterscheiden, die von Higgs-Bosonen herrühren. Darüberhinaus ist der Durchblick schwieriger, wenn sich Quarks unter den Zerfallsprodukten befinden, weil Quarks niemals alleine auftreten. Sie umgeben sich immer mit anderen Quarks, um Hadronen (die Kategorie von Teilchen, die aus Quarks bestehen) zu bilden.

Quarks werden in der Regel paarweise erzeugt und durch Gluonen, die wie Gummibänder wirken, zusammengehalten. Die Enden der Bänder stellen die Quarks dar. Wenn sie sich zu weit voneinander entfernen, reißt das Gummiband und es entstehen zwei kleinere Stücke mit je zwei Enden. Insgesamt liegen dann vier Quarks vor. Da sie mit großen Energien produziert werden, werden sich diese Quarks ihrerseits voneinander entfernen, bis ihr kurzes Gummibandstück ebenfalls reißt. All die entstehenden Quarks bilden leichtere Hadronen.

Am Ende bleiben Teilchenbündel übrig, die aus mehreren Hadronen bestehen. Da viele Teilchen im Spiel sind, ist die Messung der Energien dieser Teilchenbündel schwieriger als für Einzelteilchen wie Elektronen, Photonen oder Myonen. Es ist somit nicht leicht, hochpräzise Ergebnisse mit diesen Teilchenbündeln zu erzielen. Aus diesem Grund wurden Zerfallskanäle mit Quarks zur Entdeckung des Higgs-Bosons nicht verwendet.

Die Wahl zwischen Häufigkeit und Eindeutigkeit

Da das Higgs-Boson vornehmlich in schwere Teilchen zerfällt, entstehen selten leichte Teilchen wie Elektronen oder Myonen. Manche Zerfallskanäle sind sehr häufig, andere wiederum haben klare Signale, selten trifft aber beides zu. Obwohl es logisch erscheint, das Higgs-Boson in den häufigsten Zerfallskanälen zu suchen, ist dies nicht unbedingt die beste Vorgangsweise, da man den Untergrund berücksichtigen muss.

Ziehen wir das Beispiel des Radiosenders mit unbekannter Frequenz wieder heran. Es ist besser, sein Signal mit einem geeigneten Apparat aus den Hintergrundgeräuschen herauszufiltern als einen hochsensiblen Empfänger

zu verwenden, mit dem man nur Rauschen hört. Nichtsdestotrotz werden alle Möglichkeiten in Betracht gezogen, denn man muss auch ein Gesamtbild erhalten, also die Masse des Higgs-Bosons in mehreren Zerfallskanälen messen und sich vergewissern, dass alles kohärent ist. Selbstverständlich muss auch geprüft werden, ob die Realität mit den Vorhersagen der Theorie übereinstimmt.

Signal und Untergrund

Das Standardmodell sieht vor, dass ein Higgs-Boson manchmal in zwei Z-Bosonen zerfällt. Das Modell besagt aber auch, dass es viel leichter ist, direkt zwei Z-Bosonen zu erzeugen, die nicht von einem Higgs-Boson stammen. Wenn man zwei Z-Bosonen in einem Ereignis findet, heißt das also nicht unbedingt, dass ein Higgs-Boson im Spiel gewesen ist. Es ist in der Tat viel wahrscheinlicher, dass diese beiden aus anderen bekannten Prozessen stammen und somit hinderlich sind, wenn man etwas viel Selteneres wie den Zerfall eines Higgs-Bosons in zwei Z-Bosonen sucht.

Es gibt also zwei Kategorien von Ereignissen mit zwei Z-Bosonen: Man spricht von Signal, wenn sie von einem Higgs-Boson stammen, und von *Untergrund* im Fall von allen anderen Quellen. Beim Beispiel des Radiosenders ist das Signal die Meldung und das Rauschen oder Knistern der Untergrund. Wenn das Rauschen zu stark ist und das Signal zu schwach, gelingt es einem nicht, das Signal aus dem Untergrund herauszuhören. Man empfängt nichts.

Zerfall in vier Leptonen

Die Z-Bosonen können ihrerseits in Leptonenpaare (entweder zwei Elektronen oder zwei Myonen) zerfallen, obwohl sie zehnmal häufiger in Quarks zerfallen. Man kann aber nicht genug betonen, dass es so viele Untergrundereignisse mit Quarks gibt, dass es fast unmöglich ist, in diesen Fällen ein Signal herauszufiltern. Es ist so ähnlich, wie wenn man versuchen würde, das Zirpen eine Grille während eines Heavy-Metal-Festivals herauszuhören! Letztendlich ist es einfacher, wie wir im Kapitel 3 gesehen haben, seltenere, aber dafür leichter identifizierbare Ereignisse auszuwählen, wie solche mit vier Myonen, vier Elektronen oder auch einem Myonpaar und einem Elektronenpaar. Davon gibt es gewiss weniger, jedoch ist im Gegenzug der Untergrund viel kleiner. Man findet also den richtigen Radiosender leichter.

Man muss bestimmte Selektionskriterien anwenden, um tatsächlich nur Ereignisse mit zwei Z-Bosonen auszuwählen. Die Energie jedes Myon- oder

Elektronenpaares muss der Masse eines Z -Bosons entsprechen oder nahekommen. Nehmen wir wieder die Analogie zwischen einem Teilchenzerfall und dem Wechseln einer Münze zur Hand. Wenn das Kleingeld aus der Umwechslung eines einzigen Geldstücks stammt, ergibt die Summe der Werte der kleinen Münzen immer den Wert des großen Geldstücks. Wenn man aber das Kleingeld beliebig aus einer Schublade entnimmt, wird man zufällige Summen erhalten, da es nicht von einer einzigen großen Münze stammt.

Das Gleiche gilt für zwei Elektronen oder zwei Myonen, die aus einer anderen Quelle als einem Z -Boson-Zerfall stammen. Ihre errechnete Masse wird zufällige Werte ergeben. Man eliminiert also alle Ereignisse, bei denen die errechnete Masse eines Paares nicht mit der eines Z -Bosons vereinbar ist. Sobald man alle Ereignisse mit zwei Z -Bosonen selektiert hat, muss man nur noch diejenigen identifizieren, die vom Zerfall eines Higgs-Bosons stammen. Das Szenario ist das gleiche: Man kombiniert Masse und Energie der beiden Z -Bosonen. Wenn sie von einem Higgs-Boson herrühren, ergeben diese Kombinationen in etwa denselben Massenwert (mit einer bestimmten Unsicherheit, siehe Infobox), der der Masse des Higgs-Bosons entspricht.

Die Masse, ein zufälliger Wert

Nur um die Sache noch etwas zu verkomplizieren – die Masse eines Teilchens hat im Gegensatz zu einer Münze keinen exakten Wert. In der Teilchenphysik haben Teilchenmassen eine bestimmte Unschärfe. Beim Zerfall geben die Teilchen das Geld wie in Kanada üblich heraus: durch Runden auf 5 Cent oder manchmal mehr.

Diese Unschärfe des Massenwertes nennt man die *Breite* eines Teilchens. Die Z -Bosonen haben nicht alle dieselbe Masse. Wie so oft in der Teilchenphysik ist alles eine Frage von Wahrscheinlichkeiten. Die Kurve in Abbildung 4.2 zeigt die Wahrscheinlichkeit, einen bestimmten Massenwert für ein Teilchen zu messen. Der wahrscheinlichste Wert ist der Wert in der Mitte, zum Beispiel 91 GeV für ein Z -Boson. Man erhält diese Kurve, indem man die uns interessierende Teilchenmasse misst und diese Messung wiederholt, wenn man ein weiteres Teilchen gefunden hat. Dies wird so lange wiederholt, bis man die Massen von Hunderten oder Tausenden Z -Bosonen bestimmt hat.

Die Distanz zwischen den zwei Punkten der Kurve auf halber Höhe, gekennzeichnet durch die horizontale Linie in der Grafik, definiert die *Breite*. Diese ist mit der Lebensdauer eines Teilchens gekoppelt. Mathematisch berechnet man die Lebensdauer eines Teilchens aus dem Inversen der Breite. Je mehr Zerfallskanäle einem Teilchen offen stehen, desto schneller wird es zerfallen. Seine Lebensdauer nimmt ab und seine Breite vergrößert sich. Das ist ein bisschen so, wie wenn mehrere Luftlinien Flüge zum selben Zielort anbieten: Es ist in diesem Fall leicht, einen Flug zu finden. Wenn die Auswahl jedoch beschränkt ist, kann es passieren, dass man keinen Platz bekommt. Genauso braucht ein Teilchen länger zu zerfallen, wenn es schwer einen Zerfallskanal findet. Seine Lebensdauer ist somit größer.

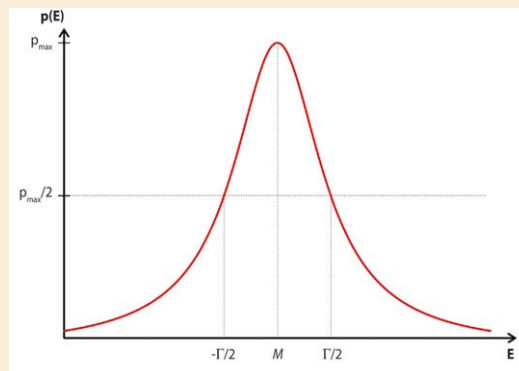


Abbildung 4.2: Die Masse eines Elementarteilchens hat keinen fixen Wert, sondern variiert, kann also so verschiedene Werte annehmen. Die Wahrscheinlichkeit für einen bestimmten Wert ist durch die vertikale Achse dieser Kurve gegeben. Der wahrscheinlichste Wert ist der Wert in der Mitte, M , den man angibt, wenn man von der Masse eines Teilchens spricht.

Quelle: Wikimedia

Das Standardmodell besagt, dass die Breite des Higgs-Bosons 4 MeV ist. Das ist viel weniger als die Breiten der W - oder Z -Bosonen, die 2500 beziehungsweise 2000 MeV betragen, was in etwa $2,5$ Prozent ihrer Masse entspricht. Das natürliche Spektrum des Higgs-Bosons, mit einem Maximalwert bei ungefähr 125 GeV , ist deshalb viel schmaler als jenes der Z - und W -Bosonen. Wenn man ihre Breite experimentell misst, kommt die Detektorauflösung zur natürlichen Breite hinzu. Der Unterschied in der Breite

gibt dem Higgs-Boson eine Lebensdauer, die 500 mal so lange ist wie jene der Z - und W -Bosonen.

Man rekonstruiert die Masse des Higgs-Bosons mit Ereignissen, die zwei Z -Bosonen enthalten. Wenn man die Masse mehrerer Higgs-Bosonen in verschiedenen Ereignissen misst, wird die Verteilung der Massenwerte eine ähnliche Kurve wie die auf der vorhergehenden Seite liefern. Wenn jedoch die beiden Z -Bosonen vom Untergrund herrühren, erhält man zufällige Werte.

Die Masse eines Z -Bosons und – wie wir später sehen werden – die eines Higgs-Bosons beträgt 91 GeV beziehungsweise 125 GeV. Im Prinzip ist ein Higgs-Boson somit zu leicht, um zwei Z -Bosonen zu erzeugen, da jedes von ihnen 91 GeV schwer ist. Jedoch addieren sich die Massen nicht einfach, indem man 91 GeV und 91 GeV zusammenzählt, denn der Massenwert kann variieren. Das ist so wie mit Geld. Wenn man nur 125 € in der Tasche hat, kann man im Prinzip nicht zwei Artikel zu je 91 € kaufen, es sei denn, man findet sie zu einem reduzierten Preis oder gebraucht, was schwieriger aber nicht unmöglich ist. Ein Higgs-Boson kann sich zwei Z -Bosonen „leisten“, aber eines davon muss zwangsweise „verbilligt“, das heißt, weit von seinem mittleren Massenwert entfernt sein. Jedoch ist die Wahrscheinlichkeit, ein Teilchen mit einer von seinem Mittelwert weit entfernten Masse zu finden, ebenfalls eher gering. In der Folge ist es ziemlich selten, dass man einen Zerfall eines Higgs-Bosons mit 125 GeV Masse in zwei Z -Bosonen beobachtet. Dieser Zerfallskanal leidet also daran, dass er nicht oft auftritt. Der Untergrund ist hingegen bewältigbar.

Ein anderer Kanal könnte sich *a priori* als eine Goldgrube erweisen: der Zerfall eines Higgs-Bosons in zwei W -Bosonen, denn das W -Boson ist leichter als das Z -Boson, mit einer Masse von 80 GeV statt 91 GeV. Dieser Zerfallskanal kommt somit häufiger vor, denn selbst wenn das Higgs-Boson vorzugsweise schwere Teilchen produziert, kann es sich dies nicht so oft erlauben. Ein W kann zerfallen, indem es ein Quark-Paar erzeugt, aber wie schon früher erwähnt, verkompliziert der hohe Untergrund die Lage. Andererseits zerfällt ein W auch in ein Myon und ein Neutrino oder auch in ein Elektron und ein Neutrino. Nachdem die Neutrinos nicht nachgewiesen werden, ist alles komplizierter und weniger präzise, da man die Energie

des Neutrinos aus der gesamten fehlenden Energie berechnen muss. Dieser Kanal wurde deshalb nur zur Verifizierung der Existenz des Higgs-Bosons verwendet und nicht zur Bestimmung der Masse, zumindest nicht zum Zeitpunkt seiner Entdeckung, als noch wenig Daten zur Verfügung standen.

Komplexere Zerfallskanäle

Das Higgs-Boson kann auch indirekt über andere Teilchen zerfallen. Dies geschieht im Fall von Photonen. Da diese keinerlei Masse besitzen, treten sie in keiner Weise direkt mit dem Higgs-Boson in Wechselwirkung. Trotzdem können sie über intermediäre Teilchen im Inneren einer „Schleife“ wie in Abbildung 4.3 erzeugt werden. Diese virtuellen Teilchen können kurzfristig entstehen, indem sie die zu ihrer Produktion notwendige Energie für einen Bruchteil einer Sekunde „ausborgen“. Deshalb kommt diese Art von Zerfall nur sehr selten vor.

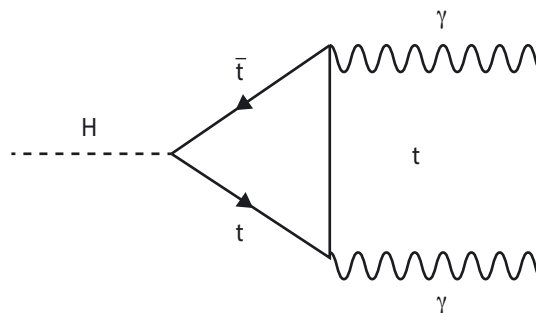


Abbildung 4.3: Illustration eines Higgs-Boson-Zerfalls in zwei Photonen, mit virtuellen top -Quarks (t) als Zwischenstufe.

Quelle: Ulrik Egede

Das Higgs-Boson, im Diagramm mit H bezeichnet, zerfällt in zwei virtuelle top -Quarks, bezeichnet mit t . Es handelt sich nicht um reelle top -Quarks, da diese mit ihrer Masse von je 173 GeV viel zu schwer für eine Erzeugung aus einem einzigen Higgs-Boson von 125 GeV wären. Ein drittes top -Quark interagiert mit den beiden anderen, sodass zwei Photonen entstehen. Letztlich agieren die drei top -Quarks nur auf virtuelle Weise, und es bleiben nur die zwei Photonen übrig, die in der Abbildung mit dem griechischen Buchstaben γ bezeichnet sind.

Man kann zwei Photonen auch entweder durch Einbringen von anderen virtuellen, schweren Teilchen oder durch weitere Prozesse, die noch komplizierter sind, erzeugen. Wegen ihrer Komplexität sind diese Prozesse extrem selten, existieren aber dennoch. Alle zeichnen sich durch die Eigenschaft aus, dass man bei Kombination der Energien der beiden Photonen das Äquivalent der Masse des Higgs-Bosons erhält. Auf den ersten Blick scheint dies nicht der beste Weg, um das Higgs-Boson zu entdecken, nichtsdestotrotz hat dieser Kanal eine wesentliche Rolle gespielt, wie wir in Kürze sehen werden.

Simulation von Ereignissen und Kalibration

Man kann nicht exakt feststellen, wie viele Ereignisse vom Signal herrühren, wenn man nicht genau weiß, wie viele vom Untergrund stammen. Deshalb greifen die Physiker und Physikerinnen auf ein unentbehrliches Werkzeug zurück: die Simulation von Ereignissen. Simulierte Ereignisse sehen genau so aus wie jene, die bei den Kollisionen zweier Protonen erzeugt werden. In ihnen stecken die gesamten Erkenntnisse aus allen Teilchenphysikexperimenten der letzten Jahrzehnte. Die Theoretiker und Theoretikerinnen berücksichtigen den neuesten Stand des Wissens und bestimmen die Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmtes Teilchen erzeugt wird und wie häufig es in einem bestimmten Kanal zerfällt.

Dann simuliert man den Durchgang aller erzeugten Teilchen durch den Detektor und erhält Bilder, die zwar völlig künstlich sind, aber wirklichen Ereignissen so nahe wie möglich kommen. Eine nahezu perfekte Kopie der Wirklichkeit erfordert beträchtlichen Aufwand, denn man muss sich ständig vergewissern, dass man alle möglichen und vorstellbaren Aspekte berücksichtigt hat. Man muss alle bekannten relevanten physikalischen Prozesse beim Durchgang der verschiedenen Teilchenarten simulieren, ebenso wie die Signalantworten der Millionen Messkanäle in den einzelnen Detektorlagen. Man darf auch nicht vergessen, dass man bei jedem Ereignis nicht eine einzelne Kollision beobachtet, sondern im Mittel etwa zwanzig weniger energiereiche, überlagerte Kollisionen, die zur gleichen Zeit stattfinden. Diese Simulationen tragen den Namen *Monte-Carlo-Simulationen*, bezugnehmend auf die Glücksspiele, die man in Kasinos wie dem vom Monte Carlo findet. In der Teilchenphysik ist alles nur eine Frage von Wahrscheinlichkeiten.

Kalibration

Bevor man weitergehen und überhaupt die Simulationen verwenden kann, muss man sich vergewissern, dass die Hunderten Millionen von Detektorkanälen richtig geeicht sind. Um dies zu tun, erfindet man das Rad neu und misst ständig eine Vielzahl von wohlbekannten Größen, um sicher zu gehen, dass man den gesamten Detektor richtig kalibriert hat. Der Arbeitsaufwand ist dabei enorm. Man muss ohne Unterlass verifizieren, dass Energie und Position eines Teilchens genau gemessen werden und nicht von äußeren Faktoren abhängen. Zu diesem Zwecke überwacht man permanent die Luftfeuchtigkeit, die Luftdruckänderungen, die Fehlfunktionen bestimmter Komponenten, die Zusammensetzung der verschiedenen Gase in den einzelnen Detektoren, die Temperatur an allen Ecken und Enden des Experiments sowie eine Menge anderer Variablen.

Sobald es die Kalibration aller Detektorlagen erlaubt, die wohlbekannten Größen exakt zu reproduzieren (Abbildung 4.4), kann man die echten Daten mit den Simulationen vergleichen, um ihrerseits die Simulationen zu kalibrieren.

Dieser Vorgang wird ständig weiterentwickelt. Man vergleicht ohne Unterlass Hunderte im Detektor gemessene Größen mit den entsprechenden der simulierten Ereignisse. So ist gewährleistet, dass die auf die simulierten Daten angewendeten Auswahlkriterien den gleichen Effekt haben wie jene auf die wirklichen Daten. Letzte Etappe: sicherstellen, dass alle auf die Simulationen und die echten Daten angewendeten Auswahlkriterien identisch sind, angefangen mit den Kollisionsbedingungen, den Triggeralgorithmen und den Charakteristika der Teilchen.

Um Higgs-Bosonen zu finden, muss man zuerst nach zwei Z -Bosonen suchen und diese dann rekombinieren. Um Z -Bosonen zu finden, kann man alle Ereignisse mit zwei hochenergetischen Elektronen oder Myonen auswählen und diese miteinander verknüpfen, um die Verteilung der kombinierten Massen für alle Leptonpaare zu erhalten. Im Prinzip müsste man die Massenkurve eines Z -Bosons erhalten, mit einem zentralen, dem Untergrund überlagerten Maximum, das genau der Masse des Z -Bosons entspricht. Man kann prüfen, ob simulierte und echte Ereignisse genau die gleiche Kurve

ergeben. Wenn keine gute Übereinstimmung vorliegt, muss man feststellen, welche Parameter des Simulationsprogramms angepasst werden müssen.

Die geringste Änderung eines der vielen Parameter dieser Simulationen kann eine andere Messung negativ beeinflussen. Es handelt sich um eine delikate Aufgabe, die stark dem Bau eines Kartenhauses ähnelt. Sobald ein Team einen bestimmten Simulationsparameter zur besseren Übereinstimmung mit den experimentellen Daten ändern möchte, müssen alle anderen Gruppen die Auswirkungen der vorgeschlagenen Änderungen auf die anderen Detektorteile oder einen anderen physikalischen Prozess evaluieren. Man muss sicherstellen, dass die Übereinstimmung von Simulationen und echten Daten ohne unerwünschte Nebenwirkungen tatsächlich verbessert wird.

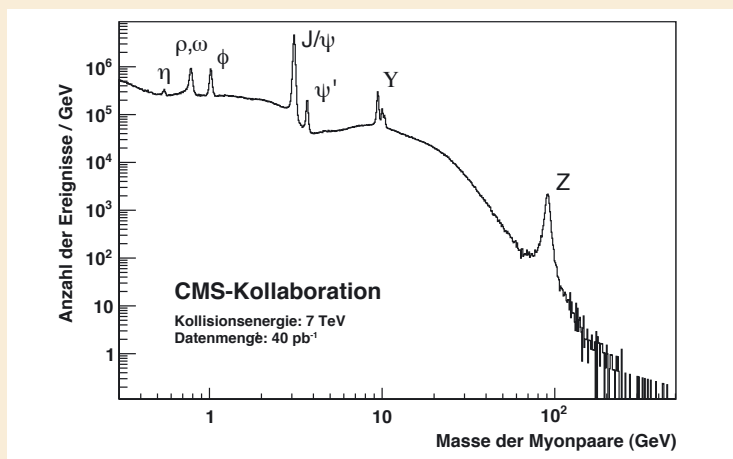


Abbildung 4.4: Dieses Diagramm zeigt auf der horizontalen Achse die kombinierten Massen von Myonpaaren, die mit dem CMS-Detektor identifiziert wurden. Die Spitzen entsprechen den Massen verschiedener Teilchen (η , ρ , ω , Φ , J/ψ , ψ' , Y und Z -Boson). Die vertikale Achse gibt die Anzahl der bei jeder Masse gefundenen Myonpaare wieder. Da diese Teilchen in der Vergangenheit von zahlreichen anderen Experimenten identifiziert worden waren, genügt es, die mit dem CMS-Detektor gemessenen Massen mit den bekannten Werten zu vergleichen, um den Detektor zu kalibrieren. Beachten Sie, dass beide Achsen logarithmische Skalen aufweisen.

Quelle: CMS

Wie man Resultate nicht verfälscht

Simulationen, die auf theoretischen Kenntnissen und einer Nachbildung der Funktionsweise des Detektors beruhen, werden für Vorhersagen der erhofften Signale verwendet. Sie erlauben es, eine Verfälschung der Messungen zu vermeiden. Alle für die Entdeckung eines neuen Teilchens wie das Higgs-Boson ins Auge gefassten Selektionskriterien werden strikt nur mithilfe von simulierten Ereignissen festgelegt. Jede Abweichung von dieser Regel ist nicht gestattet, da dadurch die Resultate beeinflusst werden könnten. Bis zur allerletzten Minute ist es den mit der Datenanalyse betrauten Physikern und Physikerinnen nicht gestattet, echte Daten zu betrachten, außer zur Prüfung von Kalibration und Qualität der Simulationen, niemals jedoch zur Erstellung der Suchstrategie.

Die Simulationen bilden nicht nur die Gesamtheit der gut bekannten Untergrundprozesse wie etwa die Erzeugung von zwei Z-Bosonen nach, sondern auch Signale wie zum Beispiel ein Higgs-Boson, das in zwei Z-Bosonen zerfällt. Alle von den Theoretikern und Theoretikerinnen ausgedachten Hypothesen, und seien sie noch so verrückt, werden simuliert und mit den experimentellen Daten verglichen, in der Hoffnung, neue Phänomene zu entdecken.

Im Zuge einer Analyse zum Auffinden des Higgs-Bosons studiert man mithilfe von Simulationen zuerst die Charakteristika von Signal und Untergrund. Dann stellt man die Selektionskriterien auf, die es erlauben, so viel Untergrund wie möglich zu eliminieren und gleichzeitig maximal viele Ereignisse, die einem Signal entsprechen, zu behalten. Sobald man einmal die Kriterien festgelegt hat, sind sie unveränderlich. Man muss deshalb sicherstellen, dass die Auswahl zum bestmöglichen Signal-Rausch Verhältnis führt.

Statistische Methoden

Wenn ich Ihnen vier 50-Cent-Stücke gebe, können Sie mir sagen, ob diese Münzen von einem Zwei-Euro-Stück oder von zwei Ein-Euro-Stücken stammen (Abbildung 4.5)? Wenn diese Münzen Teilchen wären, könnte man dies mehr oder weniger sagen, man muss dazu aber auf ausgefeilte statistische Methoden zurückgreifen.

Bei der Entdeckung des Higgs-Bosons bestand die Vorgangsweise darin zu evaluieren, wie viele Untergrundereignisse durch das Netz der Selektion schlüpfen, die vornehmlich auf die Auswahl von Signal abzielt. Dies kann auf

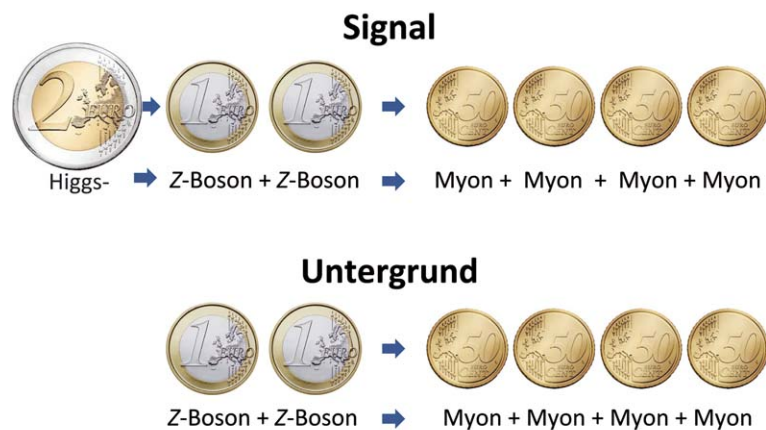


Abbildung 4.5: Die gleichen Münzen können von verschiedenen Geldstücken herrühren, genauso wie bestimmte Ereignisse (der Untergrund) die Signatur des gesuchten Ereignistyps (das Signal) vortäuschen können.

Quelle: Pauline Gagnon, Pixabay.

zwei Arten geschehen: entweder mithilfe von Simulationen oder indem man den Untergrund aus den Daten selbst bestimmt.

Wenn man etwa das Higgs-Boson in einem bestimmten Massenbereich sucht, bestimmt man den Untergrund in einem anderen Massenbereich und extrapoliert dann in die Region, die einen interessiert. Sobald die Selektionskriterien sozusagen in Stein gemeißelt sind, wendet man sie auf die echten Daten an. Anschließend prüft man, ob die ausgewählten Ereignisse nur den Simulationen des Untergrunds entsprechen oder ob es einen kleinen Überschuss gibt, den man dem gesuchten Signal zuordnen könnte.

Rezept für Bosonsirup

Man hat oft von der „Jagd“ nach dem Higgs-Boson gesprochen, so als ob man eines findet, es erschießt, es ausstopft und an der Wand aufhängt. Nichts könnte weiter von der Realität entfernt sein. Es handelt sich nicht um eine Jagd, sondern um ein Sammeln. Eigentlich ähnelt die Suche ausgesprochen gut der Erzeugung von Ahornsirup (Abbildung 4.6). Hier ist also mein Boson-Sirup-Rezept.

Um guten Ahornsirup zu machen, muss man zuerst Zuckerahornbäume finden und es vermeiden, andere Ahornsorten oder andere Baumarten wie Birken oder Eschen anzuritzen. Der Zucker stellt unser Signal dar, das Wasser den Untergrund. Andere Bäume, insbesondere andere Ahornsorten, die dem Zuckerahorn ähneln, deren Saft aber viel weniger süß ist, vergrößern nur den Untergrund und verwässern unser Signal. Dann muss man den Ahornsirup Tropfen für Tropfen einsammeln, so wie man die Ereignisse eines nach dem anderen bei jeder Protonkollision im Lauf der Zeit aufzeichnet. Schlussendlich muss man 27 Liter Ahornsirup destillieren, um ein Liter Sirup zu erhalten. Genauso muss man sechs Millionen Ereignisse sammeln, um hoffen zu können, ein einziges Higgs-Boson zu finden.



Abbildung 4.6: Die Suche nach dem Higgs-Boson ähnelt sehr der Erzeugung von Ahornsirup, wie in dieser Zuckerahornplantage der Firma Lacoudès, in der Nähe von Sainte-Rose-du-Nord, in der kanadischen Region Saguenay.

Quelle: Yves Lagacé

Fehlergrenzen

Man muss auch die Fehlergrenzen bei den experimentellen Messungen berücksichtigen. Die Zahl der Untergrundereignisse kann fluktuieren, da man es nicht mit festen Gesetzen zu tun hat, sondern mit statistischen Regeln. Nehmen wir zum Beispiel einen Sack voll mit Kugeln. Die Hälfte von ihnen ist grün, die andere blau. Nehmen wir an, ich würde Sie bitten, den Prozentsatz der grünen Kugeln im Sack zu bestimmen, wobei Sie nur eine Stichprobe von zehn Kugeln nehmen dürfen. Wie viele von diesen Kugeln werden grün sein? Fünf? Sechs? Zwei? Alle diese Werte sind möglich, obwohl es hundertmal wahrscheinlicher ist, fünf grüne Kugeln als nur zwei zu ziehen.

Welchen Prozentsatz von grünen Kugeln würden Sie jedoch erhalten, wenn Sie statt zehn hundert Kugeln ziehen? Ein Wert zwischen 45 und 5 Prozent ist sehr wahrscheinlich, obwohl weniger oder mehr ebenfalls möglich wären. Wenn Sie aber 1000, 10000 oder noch mehr nehmen, sind die Chancen ausgezeichnet, dass sich der Anteil von grünen Kugeln immer mehr den 50 Prozent nähert. Je größer die Messprobe (die Anzahl der zufällig gezogenen Kugeln) ist, desto höher sind die Chancen, die richtige Antwort zu finden, nämlich 50 Prozent grüne Kugeln. Wenn man es aber mit sehr kleinen Messproben zu tun hat, ist es nicht verwunderlich, Werte zu erhalten, die beträchtlich von davon abweichen, zum Beispiel 20 oder 30 Prozent.

Wenn man Ereignisse mit dem Ziel auswählt, ein Signal zu extrahieren, kann die Zahl der Signalereignisse ebenso wie die Zahl der zum Untergrund gehörenden Ereignisse stark variieren, insbesondere wenn der ausgewählte Datensatz klein ist. Diese statistischen Schwankungen addieren sich zu den experimentellen Fehlern. Man muss dies bei der Bestimmung der Fehlergrenze berücksichtigen. Sie wird so definiert, dass die Wahrscheinlichkeit, die richtige Antwort innerhalb dieser Fehlergrenze zu finden, 68 Prozent beträgt. Sie wird auch eine Standardabweichung oder ein Sigma genannt. Mit 95 Prozent Wahrscheinlichkeit findet man dann die richtige Antwort innerhalb eines Intervalls, das zwei Standardabweichungen entspricht.

Wenn man nach einem neuen Teilchen sucht, vergleicht man die Stärke des Signals mit der Größe der Fehlergrenze, nachdem man den Untergrund abgezogen hat. Ein Signal, das mindestens das Fünffache der Fehlergrenze ausmacht, die durch Kombination der möglichen Fluktuationen von Signal und



Abbildung 4.7: Die Professoren François Englert und Peter Higgs in angeregter Diskussion nach der Verlautbarung der Entdeckung des Higgs-Bosons am CERN am 4. Juli 2012. Es war das erste Mal, dass sich die beiden getroffen hatten.

Quelle: CERN

Untergrund ermittelt wird, entspricht fünf Standardabweichungen oder Sigma. Die Wahrscheinlichkeit, dass das Signal von einer statistischen Fluktuation des Untergrunds herrührt, beträgt dann nur 1:3,5 Millionen. Dieses Kriterium ist in der Teilchenphysik jenes, das es erlaubt, im Fall des Falles eine Flasche Champagner zu öffnen (Abbildung 4.7).

Die Zielgerade

Natürlich wäre es leichter gewesen, mehrere Monate zu warten, größere Datenmengen aufzuzeichnen und sich Zeit zu nehmen, alles in Ruhe zu analysieren. Im Sommer 2012 war allerdings die Konkurrenz zwischen den Teams von CMS und ATLAS sehr groß. Und da die größte Teilchenphysikkonferenz des Jahres am 4. Juli beginnen würde, wollten die beiden Kollaborationen dort ihre neuesten Resultate präsentieren. Darüberhinaus stand die Glaubwürdigkeit des ganzen Projekts des großen Hadronbeschleunigers auf dem Spiel. Menschen auf der ganzen Welt warteten ungeduldig darauf, ob das Higgs-Boson sich tatsächlich zeigen würde oder ob seine Vorhersage sich als ein reines Hirngespinnst herausstellen würde. Der Druck war enorm. Die Mitglieder der

ATLAS- und CMS-Kollaborationen machten deshalb geniale, höchst effiziente Anstrengungen, um ein Maximum an Informationen aus den vorliegenden Ereignissen in Rekordzeit herauszuholen. Diese Anstrengungen waren von höchstem Erfolg gekrönt, denn die Schwelle der fünf Standardabweichungen wurde von beiden Experimenten erreicht.

Die Entdeckung

Die beiden Teams sammelten Daten bis eine Woche vor der Konferenz, um die Anzahl ihrer Ereignisse zu maximieren. Ein Minimum an Zeit musste dennoch reserviert werden, um alle Etappen der Kalibration fertigzustellen und die Qualität der gespeicherten Daten zu prüfen. Selbst mit Teams in verschiedenen Zeitzonen und einzelnen Forschern, die oft Tag und Nacht arbeiteten, war die Zeit knapp. Einige Tage vor der Konferenz hat man dann zum ersten Mal die mithilfe von Simulationen erstellten Selektionskriterien auf wirkliche Daten angewendet und endlich gesehen, wie viele Ereignisse die Auswahl passierten (Abbildung 4.8). Wir zeigen jetzt, was ATLAS präsentiert hat. Die Resultate des CMS-Experiments waren genauso überzeugend.

In Abbildung 4.9 zeigt die vertikale Achse die Zahl der aufgezeichneten Ereignisse als Funktion der kombinierten, in GeV gemessenen Masse der vier Leptonen (Myonen oder Elektronen) an, wobei nur Ereignisse, welche die mithilfe von Simulationen erstellten Selektionskriterien erfüllen, berücksichtigt sind. Die rote Fläche entspricht der durch Simulation bestimmten Zahl von Ereignissen, die von der Erzeugung von zwei Z-Bosonen stammen und den größten Untergrundanteil darstellen. Die schwarzen Punkte stellen die mit dem Detektor aufgezeichneten wirklichen Daten dar. Der mit jedem Punkt assoziierte vertikale Strich ist ein Maß für die möglichen statistischen Schwankungen und die experimentellen Fehler. Die darüberliegende schraffierte Fläche entspricht den möglichen Fluktuationen des Untergrunds.

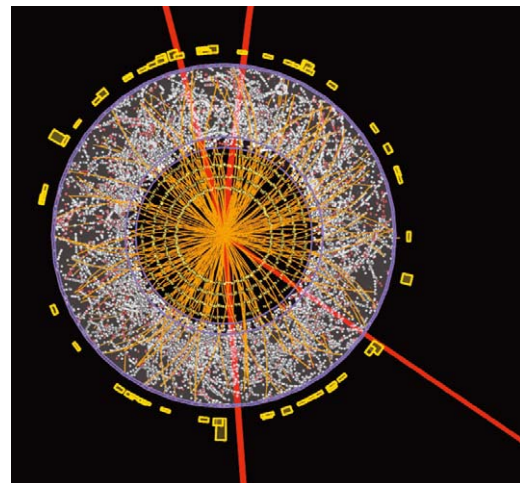


Abbildung 4.8: Ein von ATLAS aufgezeichnetes Ereignis, das die Charakteristika eines Higgs-Bosons hat, das in zwei Z-Bosonen zerfällt, von denen jedes seinerseits in zwei Myonen zerfällt. Die Myonspuren sind durch die roten Linien gekennzeichnet.

Quelle: ATLAS

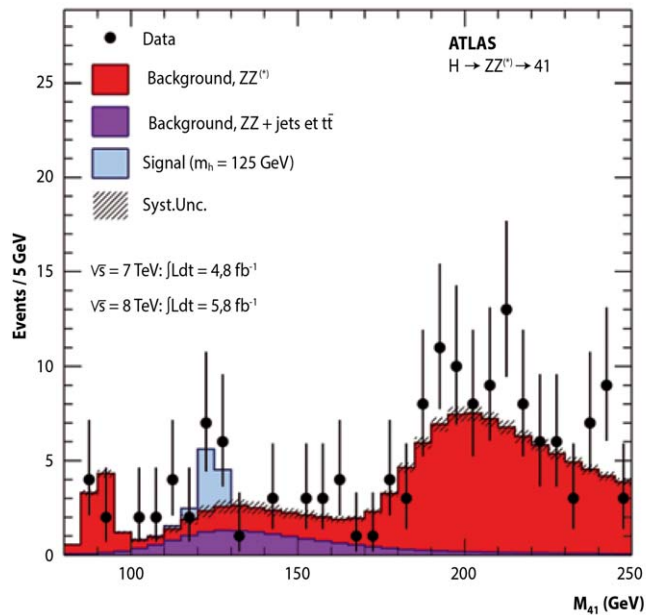


Abbildung 4.9: Eines der Diagramme, das die ATLAS-Kollaboration am 4. Juli 2012 zeigte, um die Entdeckung des neuen Bosons zu beweisen. Die vertikale Achse zeigt die Anzahl der gefundenen Ereignisse, welche die angewandten Kriterien zur Auswahl von Ereignissen mit einem Higgs-Boson, das über zwei Z -Bosonen in vier Leptonen (Myonen oder Elektronen) zerfällt, erfüllen. Die horizontale Achse zeigt die kombinierte Masse der vier Leptonen. Der Untergrund wurde aus Simulationen berechnet und ist in Rot beziehungsweise Violett gezeichnet. Er entspricht Ereignissen, welche die gleichen Charakteristika wie Higgs-Boson-Zerfälle haben, aber aus anderen Quellen stammen. Der hellblaue Überschuss entspricht der theoretischen Vorhersage für ein Higgs-Boson mit einer Masse von 125 GeV. Die schwarzen Punkte sind die experimentellen Daten. Man muss die Verteilung dieser Punkte mit den Vorhersagen aus Simulationen (in Rot und Violett) vergleichen und bestimmen, ob ein signifikanter Überschuss aus einer Quelle vorliegt, die nicht zum Untergrund gehört. In diesem Diagramm ist das nur rund um 125 GeV der Fall.

Quelle: ATLAS

Hätten die experimentellen Daten, also die schwarzen Punkte, mit der errechneten Verteilung der Untergrundwerte unter Berücksichtigung möglicher statistischer Fluktuationen übereingestimmt, hätte man daraus schließen müssen, dass es kein Higgs-Boson gibt. Im Großen und Ganzen ist dies für fast alle Messwerte der Fall: Die schwarzen Punkte liegen im Wesentlichen auf der

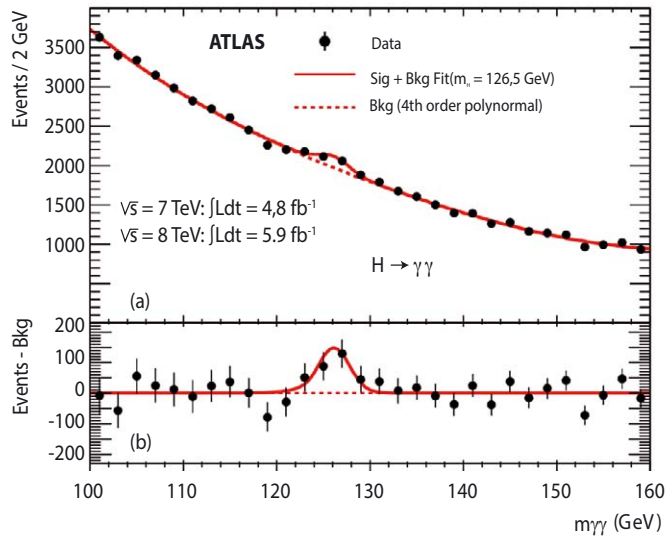


Abbildung 4.10: Das zweite von der ATLAS-Kollaboration am 4. Juli 2012 gezeigte Diagramm zum Beweis der Entdeckung des Higgs-Bosons. Die Ereignisse erfüllen die dem Zerfall eines Higgs-Bosons in zwei Photonen entsprechenden Selektionskriterien. Die vertikale Achse zeigt die Anzahl der gefundenen Ereignisse als Funktion der kombinierten Masse der beiden Photonen. Der Untergrund (rote Linie außerhalb des Bereichs 120–130 GeV im oberen Bildteil) entspricht allen Photonpaaren mit zufälligen kombinierten Massen, die aus anderen Ereignissen als von Higgs-Boson-Zerfällen stammen. Der untere Bildteil (b) zeigt den Überschuss, der dem neuen Boson nach Abzug des Untergrundes zugeordnet werden kann.

Quelle: ATLAS

Linie, die die rote Fläche begrenzt – außer im Massenbereich um 125 GeV. Dort gibt es einen klaren Überschuss an Ereignissen, den man nicht als statistische Schwankung des Untergrundes erklären kann. Dieser Überschuss ist hingegen perfekt kompatibel mit der Simulation eines Signals für ein 125 GeV schweres Higgs-Boson, das durch die hellblaue Fläche dargestellt ist.

All dies war äußerst vielversprechend. Bevor man jedoch in Jubel ausbrechen konnte, musste man verifizieren, ob man das Gleiche ebenso in anderen Zerfallskanälen sehen würde. Der überzeugendste war der mit zwei Photonen. Man sieht in Abbildung 4.10 die Verteilung der kombinierten Masse der beiden Photonen für alle Ereignisse, die in dieser Analyse ausgewählt worden waren.

Wieder stellen die schwarzen Punkte die experimentellen Daten dar. Die punktierte rote Kurve zeigt die Abschätzung der zum Untergrund aus allen Photonpaaren gehörenden Ereignissen, die nicht von einem Higgs-Boson herrühren.

Die Menge an Untergrundereignissen im Bereich zwischen ungefähr 120 und 130 GeV, dargestellt durch die punktierte rote Linie, wurde auf der Basis der Anzahl der Ereignisse außerhalb dieser Zone extrapoliert, indem echte Daten verwendet wurden. Ein Zurückgreifen auf Simulationen war somit nicht notwendig. Dies reduziert auch die Fehlergrenzen. Wenn man die berechnete Zahl der Untergrundereignisse von den Daten abzieht, erhält man den kleinen Überschuss, der in der unteren Bildhälfte sichtbar ist. Anders ausgedrückt findet man mehr Ereignisse als jene, die dem Untergrund zugeordnet werden können. Wenn die Ereignisse also nicht vom Untergrund stammen, müssen sie von einer anderen Quelle kommen. Es handelte sich um das lange gesuchte Higgs-Boson, mit zwei Photonen im Endzustand nach dem Zerfall.

Die Entdeckung wurde am 4. Juli 2012 mit großem Pomp am CERN bekannt gegeben und direkt nach Melbourne zur Eröffnung einer bedeutenden Teilchenphysikkonferenz übertragen. Aber erst acht Monate später – nachdem mehrere seiner Eigenschaften gemessen worden waren – hatten die ATLAS- und CMS-Kollaborationen genügend Daten, um die Identität dieses Teilchens zweifelsfrei bestätigen zu können. Denn obwohl es aussah wie ein Higgs-Boson, musste man sich vergewissern, dass es auch sang, lief, und tanzte wie ein Higgs-Boson.

Das ist jetzt erledigt. Die Messung seines *Spins*, seines Drehimpulses, ergab tatsächlich einen Wert null, wie es die Theorie vorhersagt. Das Higgs-Boson ist das einzige bekannte Boson mit Spin null. Im Gegensatz zu allen anderen fundamentalen Teilchen, Fermionen und Bosonen, hat es keine bevorzugte Ausrichtung. Aus diesem Grund wird das Higgs-Boson auch das *skalare* Boson genannt, um zu unterstreichen, dass sein Spin null ist.

Was noch bleibt, ist herauszufinden, ob es sich tatsächlich um *das* Higgs-Boson des Standardmodells handelt, wie es 1964 von Robert Brout, François Englert und Peter Higgs sowie ein wenig später von Tom Kibble, Gerald Guralnik und Carl Hagen vorgeschlagen wurde. Es sind nämlich mehrere Varianten von Higgs-Boson(en) möglich. Man könnte es auch mit dem leichtesten von

fünf möglichen Higgs-Bosonen zu tun haben, die eine andere, *Supersymmetrie* genannte Theorie vorsieht und die wir im Kapitel 6 im Detail beleuchten werden. Das Ende der Geschichte ist noch immer nicht geschrieben. Man braucht Zeit und muss noch viele Daten nach dem Neustart des LHC im Jahr 2015 analysieren, bevor man alles über das Teilchen weiß und vollständige Gewissheit hat.

Nobelpreis

Die Bestätigung vom März 2013, dass es sich wirklich um ein Higgs-Boson handelt, hat offensichtlich das Nobelpreiskomitee überzeugt, dass Robert Brout, François Englert und Peter Higgs 1964 richtig getippt hatten. Nachdem Robert Brout verstorben war, wurde am 8. Oktober 2013 nur den beiden anderen der Nobelpreis für Physik (Abbildung 4.11) zuerkannt. Dieser wird nicht posthum verliehen und kann maximal auf drei Personen oder Institutionen aufgeteilt werden (auch wenn abgesehen vom Friedensnobelpreis noch keine Institution ausgezeichnet wurde).



Abbildung 4.11: Der Generaldirektor des CERN, Rolf Heuer, spricht zu den zahlreichen Physikern und Physikerinnen von ATLAS und CMS, die sich versammelt hatten, um der Verkündigung des Nobelpreises für Physik am 8. Oktober 2013 beizuwohnen.

Quelle: CERN

Schade, dass das Komitee den Preis nicht den beiden Theoretikern gemeinsam mit CERN zuerkannt hat, denn ohne experimentellen Beweis ist eine Theorie nicht das Papier wert, auf das sie geschrieben wurde. Nichtsdestotrotz wurden die Anstrengungen der Tausenden an der Entdeckung beteiligten Personen vom Nobelpreiskomitee anerkannt, indem es festhielt, dass der Preis für eine Theorie vergeben wurde, die *„vor kurzem durch die Entdeckung des vorhergesagten fundamentalen Teilchens durch die Experimente ATLAS und CMS am Large Hadron Collider (LHC) des CERN bestätigt worden war“*.

Eine Zuerkennung eines Teiles des Preises wäre ein guter Weg gewesen zu unterstreichen, dass die Teilchenphysik genauso wie viele andere Disziplinen enorme Anstrengungen von multinationalen Teams erfordert. Kein einzelnes Individuum und auch keine Nation können auf diesem Gebiet die Forschung alleine voranbringen, wie wir im Kapitel 8 sehen werden. Trotzdem war CERN an jenem Tag in Jubelstimmung, denn jeder oder jede von uns wusste, dass unsere Beiträge wesentlich gewesen waren.

Ein unvergesslicher Moment

Die Ankündigung der Entdeckung eines neuen Bosons durch die Kollaborationen CMS und ATLAS am CERN wird allen Teilchenphysikern und -physikerinnen dieser Zeit im Gedächtnis bleiben. Jede dieser Personen wird nie vergessen, wo sie an diesem Tag gewesen war. Die Ankündigung erfolgte am 4. Juli 2012 um 9 Uhr morgens am CERN, in einem Auditorium, das zum Bersten voll war (Abbildung 4.12). Mehrere Personen hatten sich die ganze Nacht angestellt, um einen Platz zu ergattern, obwohl das Ereignis in mehrere andere Auditorien am CERN (die ebenfalls voll besetzt waren) und anderswo sowie im Internet übertragen wurde.

Aber niemand, nicht einmal der Generaldirektor des CERN, wusste bis kurz vor der Konferenz genau, was die Sprecher der beiden Experimente präsentieren würden. So wurde zum Beispiel das Endergebnis den Mitgliedern von ATLAS erst drei Tage vorher mitgeteilt. Die direkt an diesen Analysen beteiligten Physiker und Physikerinnen arbeiteten Tag und Nacht, um die Resultate rechtzeitig fertigzustellen, unter Ausnutzung der Zeitverschiebung zwischen den auf verschiedenen Kontinenten tätigen Forschern und Forscherinnen. Mit Sicherheit ist anzunehmen, dass sie alle sehr wenig

während der Tage vor der Verkündung der Entdeckung geschlafen hatten. Die gesamte Forschergemeinschaft setzte auf interessante Ergebnisse, zumal schon bei einem gemeinsamen Seminar im Dezember 2011 Anzeichen in den Daten der beiden Gruppen erkennbar gewesen waren.

Kurz nach meiner Ankunft in Melbourne am Montag, dem 2. Juli, suchte ich ein McDonald's-Restaurant auf, um dessen Internetverbindung zu nützen.



Abbildung 4.12: Das große Auditorium des CERN kurz vor der Ankündigung der Entdeckung eines neuen Bosons am 4. Juli 2012. Am Eingang war die Warteschlange 100 Meter lang und ging quer durch das Hauptgebäude, die Cafeteria und bis nach draußen. Manche verbrachten die Nacht vor dem Eingang, um sich einen Platz zu sichern. Quelle: CERN

Ebendort sah ich die allerletzten Resultate von ATLAS, die klar zeigten, dass das neue Boson gefunden worden war. Das war ungeheuer aufregend, aber gleichzeitig enorm frustrierend, da ich meine Freude nicht mit anderen Leuten teilen konnte. Wie auch immer, nichts durfte vor der Konferenz an die Öffentlichkeit gelangen. Jedes Kollaborationsmitglied musste die Möglichkeit haben, die Publikation vor ihrer Veröffentlichung zu lesen und zu kommentieren. Da ich keinen Zugang zu den Resultaten von CMS hatte,



Abbildung 4.13: Übertragung des CERN-Seminars mit der Ankündigung der Entdeckung des Higgs-Bosons nach Melbourne am 4. Juli 2012. Ich sitze in der ersten Reihe.

Quelle: Laura Vanags, ARC CoEPP

fragte ich mich genauso wie alle anderen Mitglieder der beiden Kollaborationen: Kommt das andere Experiment zum gleichen Ergebnis? Denn beide Gruppen arbeiteten völlig unabhängig voneinander und unter strengster Geheimhaltung. Es gab natürlich Gerüchte, aber letztlich haben nur wenige Lecks die Überraschung der offiziellen Ankündigung vorweggenommen.

In Melbourne setze ich mich am 4. Juli in die erste Reihe des Auditoriums, wo das CERN-Seminar direkt für die 900 Konferenzteilnehmer und -teilnehmerinnen übertragen wird. Meine Aufgabe ist es, direkt auf der Webseite der Quantum Diaries¹⁹ die Vorträge in einem Blog im Namen des CERN zu kommentieren (auf französisch und auf englisch). Rechts von mir, in Abbildung 4.13 nicht sichtbar, sitzt ein Journalist einer großen Presseagentur, der sich schwer tut mitzukommen. Ich blogge mit einer Hand

19. Hier ist meine Zusammenfassung des besagten Seminars, Tippfehler inklusive!
<http://www.quantumdiaries.org/2012/07/04/live-blog-on-cern-higgs-seminar-from-melbourne/>



Abbildung 4.14: CERN gibt die Entdeckung des Higgs-Bosons am 4. Juli 2012 bekannt. Hier sieht man Joe Incandela, den Sprecher der CMS-Kollaboration, vor einem zum Bersten gefüllten Auditorium. Das Seminar wurde in mehrere andere genau so volle Auditorien übertragen, ebenso wie etwa nach Melbourne in Australien, wo 900 Physiker und Physikerinnen eine große Konferenz besuchten.

Quelle: CERN

in zwei Sprachen, folge auf dem anderen Ohr dem Vortrag und helfe dem Journalisten ständig mit Erklärungen. Ich lebe von Adrenalin.

Die Stimmung ist angespannt, anders als sonst bei solchen Veranstaltungen üblich. Um 8:56 Uhr betreten François Englert und Peter Higgs, die als erste die Existenz des Higgs-Bosons postulierten, das CERN-Auditorium, unter Applaus des Saales in Genf aber auch in Melbourne, auch wenn sie uns nicht hören. Es ist das erste Mal, dass sich die beiden treffen.

Genau um 9h am CERN, 17h in Melbourne, herrscht in allen Übertragungsräumlichkeiten eindrucksvolle Stille. Joe Incandela wird aufgefordert, die Resultate der CMS-Kollaboration zu präsentieren (Abbildung 4.14). Um 9:40 Uhr wird es offensichtlich, dass CMS den unwiderlegbaren Beweis der Entdeckung eines neuen Bosons geliefert hat. Der Saal, in dem von Anfang an alle den Atem angehalten hatten, bricht in Applaus aus, ebenso



Abbildung 4.15: Die Stimmung während der Pressekonferenz, die im Anschluss an die Verkündigung der Entdeckung des Higgs-Bosons im Juli 2012 stattfand, war fröhlich und angeregt. Journalisten aus der ganzen Welt drängen sich um Peter Higgs und François Englert. Einige Minuten vorher hatte die Physikerin Sau-Lan Wu Peter Higgs freudig angesprochen und ihm gesagt: „20 Jahre lang suchte ich nach Ihnen“. Und er hatte geantwortet: „Jetzt haben Sie mich gefunden!“

Quelle: CERN

in dem am CERN und in allen anderen Sälen, in die die Ankündigung übertragen wird.

Um 10 Uhr ist dann Fabiola Gianotti, die Sprecherin von ATLAS, an der Reihe, die Resultate ihrer Kollaboration zu präsentieren. Nachdem sie genauso wie Joe Incandela die verwendeten Methoden untermauert, enthüllt sie um 10:40 Uhr endlich die Ergebnisse: ein klares, unmissverständliches Signal. Viel Geschrei und Applaus. Fabiola, von Anfang an völlig angespannt und konzentriert, entspannt sich und bricht mit dem Auditorium in Jubel aus. Peter Higgs, mit Tränen in den Augen, und ein strahlender François Englert geben unter Beifall der Menge ihre ersten Eindrücke preis, (Abbildung 4.15).

Alle freuen sich, auch in Melbourne, obwohl man sich ein wenig weit weg fühlt ... Auch die Kängurus hüpfen vor Freude. Der anschließende Empfang ist lebhaft und feuchtfröhlich. Ich gehe zum Hotel zurück und schreibe einen Blogeintrag mit einer Zusammenfassung der Resultate. Mehrere Medien aus Quebec möchten Details erfahren, und ich gebe in den Tagen danach zahlreiche Interviews, früh am Morgen oder spät am Abend, der Zeitverschiebung geschuldet. Durch ihren Kommentar „Du wurdest endlich von der Sucherin zur Finderin befördert!“, brachte es meine gute Freundin auf den Punkt.

Merzettel

Die Suche nach dem Higgs-Boson ähnelt der Herstellung von Ahornsirup: Das Signal ist der im Ahornsafte enthaltene Zucker, während das Wasser den Untergrund darstellt. Je mehr Untergrund vorhanden ist, desto verdünnter und folglich schwerer zu extrahieren ist das Signal. Darüberhinaus ist das Signal des Higgs-Bosons nicht eindeutig und kann von anderen Teilchenzerfällen, die nichts mit dem Higgs-Boson zu tun haben, imitiert werden. Ein Teilchenzerfall ähnelt dem Umtauschen einer großen Münze in Kleingeld. Vier 50-Cent-Stücke können von einer Zwei-Euro-Münze oder von zwei Ein-Euro-Münzen stammen. Nur durch ausgefeilte statistische Methoden kann man Signal und Untergrund unterscheiden.

Die Physiker und Physikerinnen benützen Simulationen, um komplett erfundene Ereignisse zu produzieren. Diese erlauben es, genau zu verstehen, was das Signal vom Untergrund unterscheidet, und entsprechende Selektionskriterien zu erstellen. Sie helfen nicht nur, den Detektor zu verstehen und zu kalibrieren, sondern auch abzuschätzen, wie viele Ereignisse vom Untergrund stammen, nachdem man die Auswahlkriterien angewendet hat. Wenn mehr Ereignisse als die für alle anderen bekannten Prozesse vorhergesagten übrig bleiben, sind die Chancen hoch, dass man ein neues Teilchen gefunden hat.

Wenn dies in mehreren Zerfallskanälen auftritt und wenn darüberhinaus noch zwei verschiedene, völlig unabhängig voneinander und unter strengster Geheimhaltung arbeitende Experimente das gleiche Signal finden,

wird der Beweis unwiderlegbar. Es ist so, wie wenn zwei unabhängige Teams ohne miteinander zu kommunizieren und mit verschiedenen Gerätetypen dieselbe Frequenz eines unbekanntes Radiosenders gefunden hätten. Genau das ist am 4. Juli 2012 mit der Ankündigung identischer Resultate der Experimente ATLAS und CMS passiert. Man wusste somit, dass man ein Teilchen mit allen Merkmalen des Higgs-Bosons entdeckt hatte.