

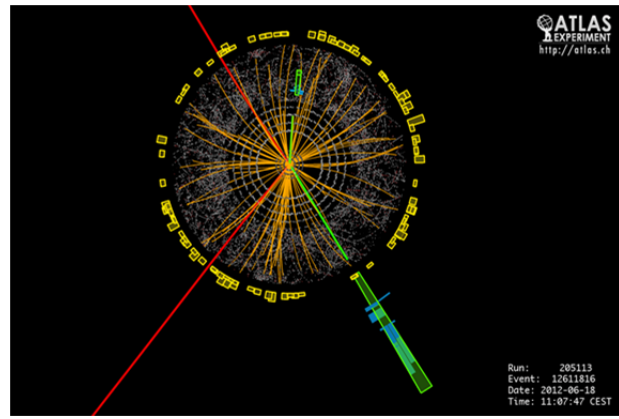
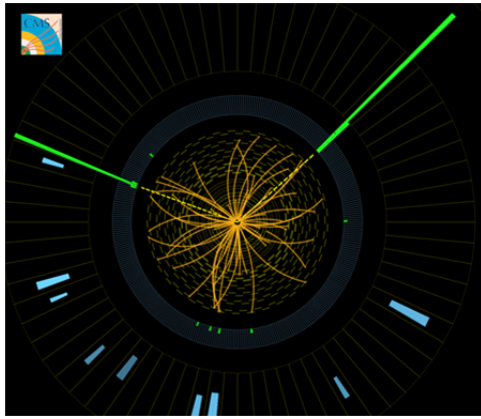
Higgs-Boson in zwei Experimenten am LHC nachgewiesen !?

In den Abschnitten 18.1-18.4 dieses Buches haben wir dargelegt, wie die zunächst masselosen Teilchen im Standardmodell bei spontaner Symmetriebrechung durch Einführung eines skalaren Bosonfeldes, des sogenannten Higgs-Feldes, die erforderlichen Massen erhalten. Dieses Phänomen, auch Higgs-Mechanismus genannt, hat eine interessante Vorgeschichte, die mit der Feststellung beginnt, dass das Auftreten der Supraleitung ein Beispiel für eine gebrochene Symmetrie ist, bei der keine extra masselosen Teilchen vorkommen und somit eine Ausnahme zum Goldstone-Theorem (s. Seite 223) darstellt. Hiervon ausgehend hat Ph.W.Anderson 1963 darauf hingewiesen, dass dies auch allgemein für lokal symmetrische Eichtheorien zutreffen könnte. ¹ Die für die Teilchenphysik bedeutsamen Arbeiten wurden dann 1964 im Band 13 von Physical Review Letters publiziert. ² Die Autoren entwickelten hier unabhängig voneinander den formalen Mechanismus, durch den masselose Elementarteilchen in Wechselwirkung mit einem Hintergrundfeld Masse erhalten. Bei unterschiedlicher Betrachtung lieferte jede der Arbeiten einen Beitrag zu dieser Vorstellung. Wohl der Kürze halber wurde später das Hintergrundfeld als Higgs-Feld bezeichnet. Zunächst war dieser Mechanismus nur für abelsche Eichtheorien formuliert worden. Er konnte erst dann auf die schwache Wechselwirkung angewendet werden, nachdem T.W.B.Kibble ihn 1967 auf nichtabelsche Eichtheorien übertragen hatte. Der Higgs-Mechanismus wurde dann 1968 von A.Salam auf die elektroschwache Theorie von S.L.Glashow und S.Weinberg angewandt und führte somit zum vereinheitlichten Standardmodell der Elementarteilchen. ³

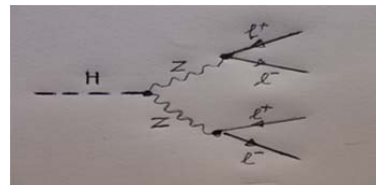
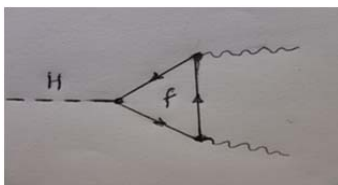
Durch die Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld erhalten die W- und Z-Bosonen der schwachen Wechselwirkung die erforderlichen Massen. Auch die von Null verschiedenen Massen der Quarks und Leptonen können dadurch erklärt werden. Das Photon bleibt ohne Masse. Der Higgs-Mechanismus sagt in seiner minimalen Formulierung die Existenz eines dem Higgs-Feld entsprechenden neutralen, CP geraden, skalaren Teilchens voraus. So wurde die Suche nach diesem für die Theorie wichtigen neuen Teilchen zu einer zentralen Aufgabe der Teilchenphysik, die mit Hilfe des Large Hadron Collider (LHC) am CERN gelöst werden sollte. Im Standardmodell ist die Masse des Higgs-Bosons ein freier Parameter, der wesentliche Eigenschaften des Teilchens bestimmt, insbesondere die Kopplungskonstanten an alle Teilchen. Durch die Kopplungsstärken, die proportional zur Masse des jeweils in einem Prozess betrachteten Teilchens sind, werden alle Produktionsraten und Zerfallswahrscheinlichkeiten bestimmt.

Wie wir auf Seite 237 des Buches ausgeführt haben, bestand für den zu erwartenden Massenbereich des Higgs-Bosons durch Untersuchungen am LEP (CERN) sowie am Tevatron Collider (Chicago) bereits ein Fenster von 117 bis 251 GeV/c². Spätere Ergebnisse haben diesen Bereich weiter eingeschränkt. Man wusste demnach, wo am LHC zu suchen war. Seit März 2010 wurden bei den Proto-Proton-Kollisionen am LHC Schwerpunktsenergien von 7 TeV erreicht, die 2012 auf 8 TeV erhöht werden konnten. Zur Registrierung der bei den Stößen entstehenden Zerfallsprodukte waren riesige Detektoren aufgebaut worden, ATLAS (7000 Tonnen, L 45m, B 25m, H 25m) und CMS (12500 Tonnen, L 21m, B 15m, H 15m), die technische Meisterwerke sind. Erste Hinweise auf ein neues Teilchen mit der Masse von ungefähr 125 GeV/c² gab es bereits im Dezember 2011. In einer gemeinsamen Präsentation am CERN haben dann die Sprecher der beiden Experimente ATLAS und CMS ihre neuen Ergebnisse am 4. Juli 2012 öffentlich vorgestellt. Die Spektren invarianter Massen ergaben in diesen Experimenten jeweils ein deutliches Signal bei 126,5 (ATLAS) und 125,3 GeV/c² (CMS), mit einer Genauigkeit von etwa 0,6 GeV/c². In den nachfolgenden Publikationen konnte bereits eine erhöhte Signifikanz mitgeteilt werden. ⁴ Bemerkenswert ist die Konsistenz beider Experimente.

Zum Nachweis des Higgs-Boson-Kandidaten sind die beiden folgenden Zerfallsmoden besonders geeignet: H zerfällt in 2 Photonen (CMS), oder H geht in 4 Leptonen im Endzustand über (ATLAS), wie sie in den folgenden Aufnahmen zu sehen sind, links beim CMS- , rechts beim ATLAS-Detektor.



Diese für den Nachweis besonders wichtigen Zerfallskanäle des Higgs-Bosons sind in den folgenden Feynman-Graphen dargestellt. Weil das H-Boson selbst nicht mit Photonen wechselwirkt, muss der Zerfall über intermediäre elektrisch geladene Teilchen erfolgen, hier ein Fermion f . Es zerfällt dabei in zwei ungeladenen Bosonen und muss daher ein neutrales Boson sein. Da außerdem der Spin des Photons 1 ist, kann H selbst nicht Spin 1 haben. Der Zerfall eines Higgs-Bosons in vier elektrisch geladene Leptonen erfolgt mittels intermediärer Z-Bosonen, wie im Graphen rechts angedeutet.



Zur eindeutigen Identifizierung des Higgs-Teilchens hat man aber auch seine skalare Natur nachzuweisen und die CP-Quantenzahl zu bestimmen. Ferner sollte untersucht werden, wie die Wahrscheinlichkeiten beim Zerfall des Bosons in andere Teilchen von deren Massen abhängen. Dieses charakteristische Verhalten ist durch die bereits erwähnte Form der Kopplungsstärke des Higgs-Bosons an andere Teilchen bestimmt.

Obwohl die bisher am LHC beobachteten Eigenschaften mit denen des Higgs-Bosons verträglich sind, müssen weitere Daten ausgewertet werden, um entscheiden zu können, ob das gefundene Boson das im Standardmodell vorhergesagte Higgs-Teilchen ist. Es könnte schließlich auch sein, dass es sich um eines von mehreren Higgs-Teilchen handelt, die in einer Erweiterung des Standardmodells, dem minimalen supersymmetrischen Modell, vorhergesagt werden.

Zu erwähnen ist ferner, dass die Auswertungen zurückliegender Daten bei den Experimenten der CDF- und D0-Kollaborationen am Fermilab (Chicago) ebenfalls einen deutlichen Hinweis für die Existenz des Higgs-Bosons gefunden haben, dessen Masse zwischen 120 und 135 GeV/c^2 liegt.⁵ Wenn es bei der Identifizierung des im Standardmodell vorhergesagten Higgs-Bosons bleibt, wäre damit dieses Modell zwar nochmals bestätigt, es würde aber keine grundlegende Änderung der Theorie erfordern. Mit der Entdeckung des neuen Teilchens ist aber nach langer Suche ein großer Erfolg erzielt worden, der neue Herausforderungen bereithält. Darf man weitere Entdeckungen am LHC erwarten und eröffnet sich hier eine neue Welt der Teilchenphysik?

Ulrich E. Schröder

- 1) Einzelheiten zu dieser Vorgeschichte findet man in: R.P.Crease and Ch.C.Mann, The Second Creation, Quartet Books, London 1997, S. 239 ff.
- 2) F.Englert, R.Brout, Phys.Rev.Lett. 13(1964)321, P.W.Higgs, Phys.Rev.Lett.13(1964)508, G.S.Guralnik, C.R.Hagen,T.W.R.Kibble, Phys.Rev.Lett.13(1964)585.

- 3) T.W.B.Kibble, Phys.Rev. 155(1967)1554, A.Salam, Proc.Nobel Symp. 8(1968)367, S.L.Glashow, Nucl.Phys. 22(1961)579, S.Weinberg, Phys.Rev.Lett. 19(1967)1264.
- 4) ATLAS collaboration, Physics Letters B716(2012)1-29, CMS collaboration, Physics Letters B716(2012)30-61.
- 5) CDF und D0 collaboration, 2012 arXiv:1207.6436v1.