

Higgs-Boson entmystifiziert

Freitag, 21. September 2012 - 02:10 | Autor: [wabis](#) | Themen: [Wissen](#), [Physik](#), [QM](#)

In den Nachrichten wurde viel über die Entdeckung des Higgs-Bosons berichtet. Um auch Nichtphysikern zu erklären, was das ist, werden allerlei Vergleiche angestellt, die weder physikalisch noch korrekt sind. Es wird sogar von einem "Gottesteilchen" gesprochen.

Was ist ein Higgs-Boson und wie funktioniert der Higgs-Mechanismus? Dies versuche ich in diesem 5-teiligen Crashkurs zu erklären.

Module

Auf den folgenden Seiten führe ich den Leser schrittweise an das Thema Higgs-Mechanismus und Higgs-Boson heran.

- **Crashkurs in Quantenmechanik**
- **Das Standardmodell**
- **Mechanismen zur Erzeugung von Masse**
- **Der Higgs-Mechanismus**
- **Das Higgs-Boson**

Einleitung

Nur um das klarzustellen: Der Enthusiasmus ist gerechtfertigt. Die Geschichte, die zum Nachweis des Higgs-Bosons geführt hat, ist fantastisch. Es ist ein unglaubliches Ereignis. Dies hat mich dazu motiviert, diesen Beitrag zu schreiben.

Dieser Beitrag ist meine Deutsch-Übersetzung des Vortrages Demystifying the Higgs Boson von Prof. Leonard Susskind vom 30.07.2012 an der Stanford University:

- **Demystifying the Higgs Boson with Leonard Susskind; Youtube**

Prof. Leonard Susskind

Prof. Leonard Susskind ist ein US-amerikanischer theoretischer Physiker und Mitbegründer der Stringtheorie. Er gibt seit vielen Jahren öffentliche Vorlesungen in Physik für ein interessiertes Publikum. Dabei vermittelt er das theoretische Minimum, damit man sich danach näher mit der Materie befassen kann. Alle Vorträge können auf



Leonard Susskind beim Vortrag über das Higgs-Boson

Youtube und iTunes-U gratis bezogen werden.

- Leonard Susskind; *Wikipedia (de)*
- Demystifying the Higgs Boson with Leonard Susskind; *Youtube*

Es gibt jeweils mehrstündige (10-20 Stunden) Vorträge in Englisch zu den Themen:

- Classical Mechanics
- Statistical Mechanics
- Quantum Mechanics, Quantum entanglement
- The Standard Model
- New Revolutions in Particle Physics
- Supersymmetry, Grand Unification & String Theory
- String Theory & M-Theory
- Topics in String Theory
- Special Relativity
- Einstein's Theory

Crashkurs in Quantenmechanik

Freitag, 21. September 2012 - 01:44 | Autor: [wabis](#) | Themen: [Wissen](#), [Physik](#), [QM](#)

Die Quantenmechanik ist eine physikalische Theorie zur Beschreibung der Materie, ihrer Eigenschaften und Gesetzmässigkeiten. Sie erlaubt im Gegensatz zu den Theorien der klassischen Physik eine präzise Berechnung der physikalischen Eigenschaften von Materie auch im mikroskopischen bis hin zum subatomaren Grössenbereich^[1].

Der Higgs-Mechanismus^[2] ist ein quantenmechanischer Effekt. Man kann ihn nicht wirklich verstehen ohne Quantenmechanik. Also beginne ich mit einem Crash-Kurs in Quantenmechanik.

Quantisierte Eigenschaften

Das erste Konzept der Quantenmechanik ist: Dinge sind quantisiert!^[Video 1] Quantisiert heisst, dass alle Eigenschaften in diskreten ganzzahligen Einheiten auftreten. Ein prominentes Beispiel dafür ist der Spin^[3] eines Teilchens. Der Spin hat alle Eigenschaften eines mechanischen Drehimpulses, ausgenommen die, dass er durch die Drehbewegung einer Masse hervorgerufen wird. Der Spin kann jedoch nicht beliebige Werte annehmen, sondern erscheint in diskreten Schritten von sog. Plank-Einheiten. Der Spin kann nur ganze Werte 0, 2, 3, -1, -2 -3 in Planks Einheiten annehmen. Genaugenommen gibt es auch Spin 1/2, 3/2 usw. aber das spielt hier keine Rolle. Man hätte einfach halbe Plank-Einheiten wählen können, dann gäbe es nur ganze Zahlen.

Quanten-Felder

Das Zweite Konzept der Quantenmechanik sind Felder^[4]^[Video 2]. Ein Feld ist einfach ein Zustand des Raumes. Felder können von Ort zu Ort variieren und sie beeinflussen zum Beispiel die Flugbahn von Objekten oder Teilchen. Zum Beispiel beeinflusst ein elektrisches Feld wie sich ein geladenes Teilchen bewegt. Weitere Beispiele für Felder sind das magnetische Feld und das Gravitationsfeld. Was auch immer im Raum vorhanden ist, was das Verhalten des Raumes an dieser Stelle und zu diesem Zeitpunkt beeinflusst, kann man sich als Feld in der Raum-Zeit vorstellen. Raum kann also voll von Feldern sein.

Normalerweise spricht man bei einem Leeren Raum, einem Raum der keine Materie enthält, von einem Vakuum^[5]. Aus quantenmechanischer Sicht ist Vakuum der Zustand niedrigster Energie. Gewöhnlich stellt man sich vor, dass die Felder im leeren Raum Null sind. Physikalisch gibt es aber keinen Grund, weshalb dies so sein muss.

Stellen wir uns eine Welt vor, die mit einem elektrischen Feld gefüllt ist. Wie könnte das elektrische Feld entstehen? Zum Beispiel durch zwei gegensätzlich elektrisch geladene Platten eines Kondensators. Die Platten können wir uns unendlich gross und unendlich weit weg vorstellen, sodass der ganze leere Raum dazwischen gefüllt ist mit einem homogenen elektrischen Feld. An jedem Punkt des Raumes hätte das Feld einen bestimmten Wert, der sich auf die Bewegung

geladener Teilchen auswirkt. In einer solchen Welt würden wir sagen, dass sich geladene Teilchen auf seltsame Art bewegen. Aber dies wäre einfach eine Naturgegebenheit.

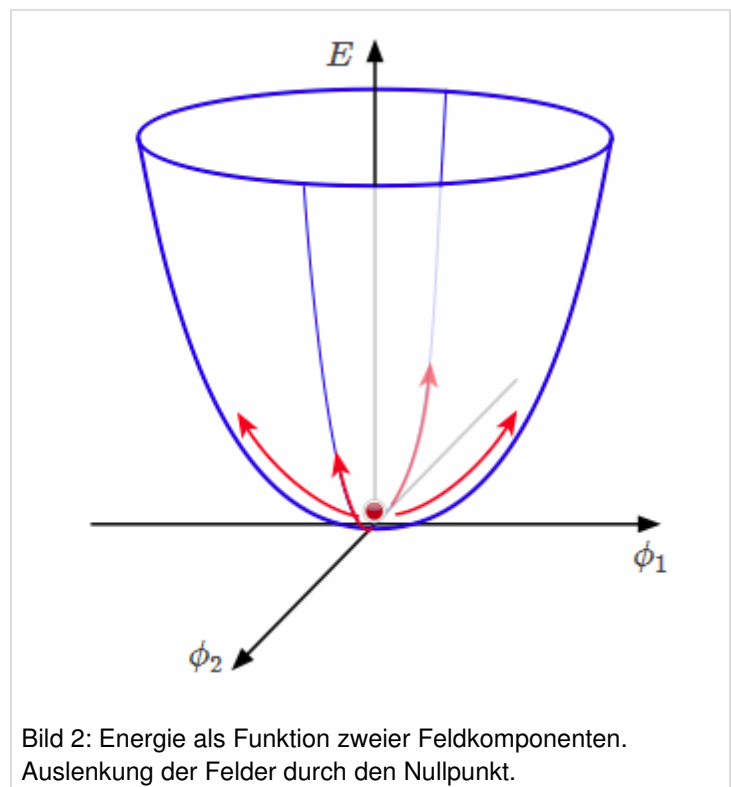
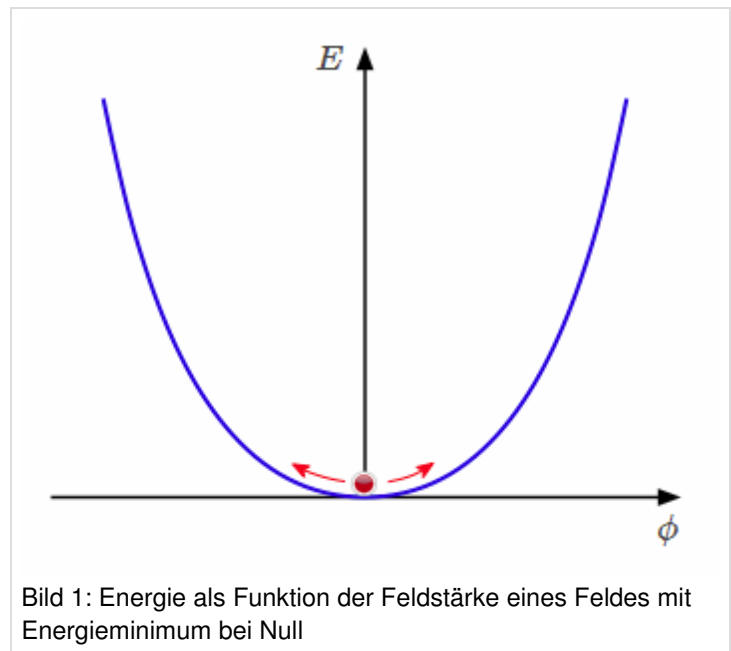
Generell kann man sagen: Felder kosten Energie. Raum ohne ein elektrisches Feld hat Null Energie. Mit einem elektrischen Feld hat der Raum eine Energie. Wenn wir die Energie E eines typischen Feldes als Funktion der Feldstärke ϕ aufzeichnen, erhalten wir das Bild 1. Dort wo das Feld ϕ Null ist, ist seine Energie minimal. Jede Abweichung des Feldes von Null vergrößert seine Energie.

Stellen wir uns nun vor, wir können an einem Ort im Raum die Feldstärke ändern; wir geben ihr einen Stoss. Das Feld würde dann an dieser Stelle um den Nullpunkt hin und her schwingen. Diese Schwingungen nennt man Quanten^[6] des Feldes oder Teilchen des Feldes!^[Video 3]

Quanten einer Schwingung eines Feldes sind Teilchen.

Nun kann man sich auch Situationen vorstellen, wo mehr als ein Feld zur Energie beiträgt. Nennen wir diese Felder ϕ_1 und ϕ_2 . Diese Felder und die zugehörige Energie kann man in einem dreidimensionalen Bild 2 darstellen. Achtung: Dieses Bild hat nichts mit einem dreidimensionalen Raum zu tun! Zwei der Achsen stehen für die Stärke einer Feldkomponente, die dritte Achse gibt die Energie dieses Feldes an. Die Energie hängt also von der Stärke beider Feldkomponenten ab.

Bild 2 zeigt: Egal wie die beiden Feldkomponenten von Null aus verändert werden, es kostet Energie. Der niedrigste energetische Zustand an einem Ort ist dann erreicht, wenn dort beide Feldkomponenten Null sind. An jedem Punkt im Raum kann man sich so eine Energie-Kurve vorstellen.



Im Unterschied zu Bild 1 kann man jetzt jeder Feldkomponente separat einen Stoss geben oder beiden Komponenten gleichzeitig. In jedem Fall wird es durch den Nullpunkt hin und her schwingen. Auch diese Schwingungen entsprechen Teilchen-Quanten.

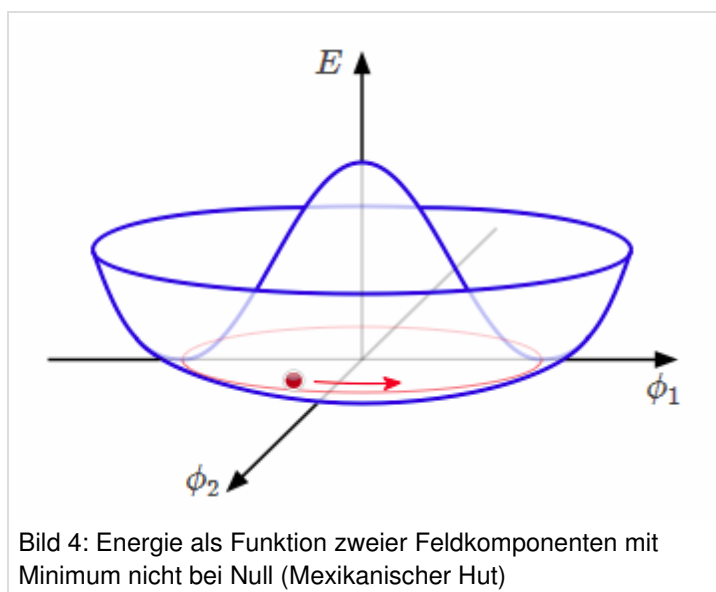
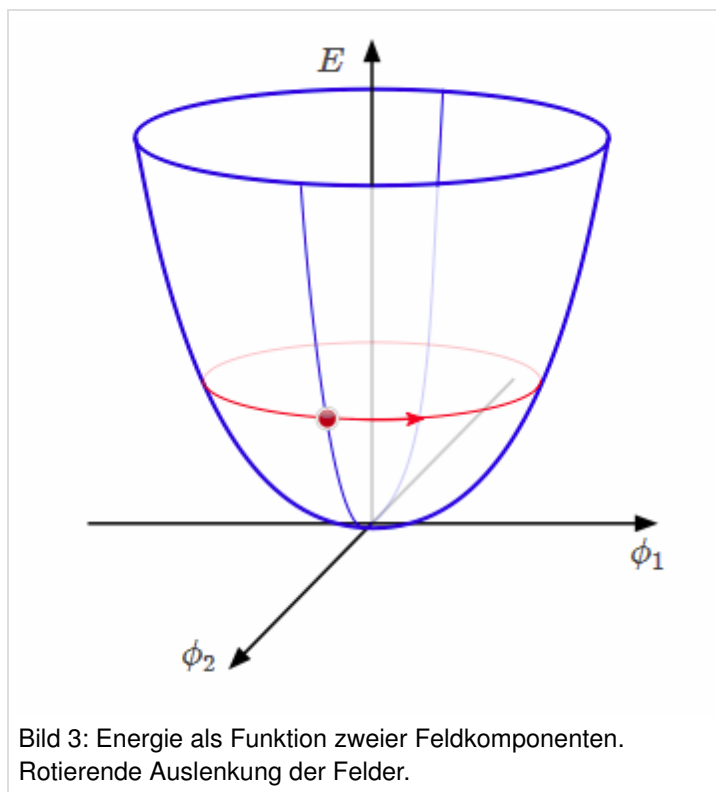
Bei einer Konstellation wie in Bild 2 kann man das Feld noch auf eine andere Art anregen, nämlich so wie in Bild 3 gezeigt: Das Feld schwingt nicht mehr durch den Nullpunkt, sondern auf konstantem Energielevel in einem Kreis. Diese kreisförmige Bewegung erinnert an ein Drehmoment. Es handelt sich dabei nicht um ein Drehmoment im Raum, sondern um eine Art Drehmoment im Feld-Raum. Wie alle Drehmomente in der Quantenphysik ist auch dieses Drehmoment quantisiert. Es kann nur ganze Vielfache der Plank-Konstanten annehmen.

Dieses quantisierte Drehmoment entspricht etwas, was in der Natur ebenfalls quantisiert vorkommt: zum Beispiel dem Wert einer elektrischen Ladung.^[Video 4]

In der modernen Physik stellt man sich ein geladenes Teilchen an einem bestimmten Punkt des Raumes als eine Anregung des Feldes vor, wobei die Felderregung im internen Raum des Feldes kreisförmig ist. Dies ist der Hauptmechanismus wie man sich Ladung vorstellt; als eine Art Rotation in einem internen Feld-Raum.

Nun kann man sich noch andere Formen von Potentialfunktionen vorstellen, zum Beispiel eine wie in Bild 4 gezeigt wird, die wie ein mexikanischer Hut aussieht. Diese Funktion hat die Eigenschaft, dass an der Stelle, wo die Feldkomponenten Null sind, die Energie nicht minimal ist. An dieser Stelle herrscht ein instabiles Gleichgewicht. Würde man einen Ball auf die Spitze im Zentrum legen, würde er bei der kleinsten Abweichung auf den Rand herunter rollen.

Wenn aus irgend einem Grund die potentielle Energie eines Feldes die Form wie in Bild 4 hat, würde der Zustand kleinster Energie



nicht bei einer Feldstärke von Null liegen, sondern in einem ringförmigen Bereich um den Nullpunkt. Dies würde einer Welt mit einem Vakuum entsprechen, in welchem der Wert eines Feldes an jedem Punkt des Raumes ungleich Null ist. Dies würde man feststellen können, weil das Feld Einfluss auf die Dinge im Raum ausüben würde.

Kondensat oder spontane Symmetriebrechung

Bei einer Funktion wie in Bild 4 kann man etwas tun, was man bei einer Funktion wie in Bild 3 nicht tun kann^[Video 5]: Wenn man in Bild 3 das Feld in eine rotationsförmige Erregung versetzen will, muss man es zuerst aus dem Nullpunkt auslenken, was Energie kostet. Das heisst, um ein Teilches zu erzeugen, muss Energie aufgewendet werden. Bei einer Funktion wie in Bild 4 kann man das Feld in rotationsförmige Erregung versetzen, ohne dass dazu Energie aufgewendet werden muss! Auch diese Erregung entspricht einer Art von Ladung. Da das Feld an jedem Punkt des Raumes diese Form hat, hat auch jeder Punkt des Raumes eine bestimmte Ladung pro Volumen = Ladungsdichte ungleich Null.

Dieses Phänomen bezeichnet man als Kondensat oder Spontane Symmetriebrechung^[7]

[Video 6]

Wie findet man heraus, wo der Zustand niedrigster Energie dieses Vakuums ist? Dazu nehmen wir an, dass sich das Feld zeitlich nicht ändert. Dies entspricht bildlich einem Ball, der irgendwo im Rand des mexikanischen Hutes liegen bleibt. Denn eine zeitliche Änderung würde dem Rollen des Balles entlang der niedrigsten Energie entsprechen. Aber Rollen ist auch eine Form von Energie, nämlich kinetische Energie. Das heisst, das Feld in rotierende Erregung zu versetzen würde auch eine Art kinetischer Energie kosten. Man könnte also sagen, der wirklich niedrigste Energiezustand des Feldes ist dann erreicht, wenn das Feld an irgend einem beliebigen Punkt des Kreises mit niedrigster Energie verharrt, ohne Drehmoment und somit ohne Ladung. Der leere Raum sollte ohne Ladung sein.

Heisenbergsche Unschärferelation

Das Problem dabei ist die Heisenbergsche Unschärferelation^[8]^[Video 7]: Die Heisenbergsche Unschärferelation oder Unbestimmtheitsrelation ist die Aussage der Quantenphysik, dass zwei komplementäre Eigenschaften eines Teilchens nicht gleichzeitig beliebig genau messbar sind. Das bekannteste Beispiel für ein Paar solcher Eigenschaften sind Ort und Impuls.

Wenn wir zum Beispiel von einem Objekt seine Position \mathbf{x} im Raum und seine Geschwindigkeit oder seinen Impuls \mathbf{p} wissen wollen, besagt die Unschärferelation, dass die Unschärfe der Position $\Delta\mathbf{x}$ mal die Unschärfe des Impulses $\Delta\mathbf{p}$ grösser oder gleich das planksche Wirkungsquantum^[9] \hbar sein muss:

$$(1) \quad \Delta\mathbf{x} \cdot \Delta\mathbf{p} \geq \hbar$$

Man kann also in der Quantenmechanik nichts haben, das sowohl still steht, also keinen Impuls hat, und gleichzeitig an einem bestimmten Ort ist! Dies gilt auch für Felder. Wenn man genau weiss, wie ein Feld ausgelenkt ist (seine Position ist bekannt), ist die Unsicherheit sehr gross, wie schnell es sich verändert (seine Geschwindigkeit ist unbekannt). Oder im Falle des Feldes von Bild 4: Wenn wir die Position des Feldes, repräsentiert durch den roten Ball, mit hoher Genauigkeit wissen, können wir nicht sagen, wie schnell der Ball auf dem Kreis niedrigster Energie rotiert.

Dies würde also bedeuten, dass wir kein Vakuum ohne Ladung darin haben könnten!^[Video 8]

Denn wenn wir ein Feld bei einem Minimum festlegen würden, wüssten wir wo es ist und damit hätten wir eine Unsicherheit, wie schnell es sich bewegt. Das heisst, es könnte nicht still stehen und damit hätten wir eine Ladung im Raum. Wir hätten damit nicht nur eine Ladung im leeren Raum, sondern die Stärke der Ladung wäre total Unsicher. Dies ist ein Quanteneffekt.

Die Wahrscheinlichkeit für eine bestimmte Menge an Ladung in einem bestimmten Raumvolumen könnte damit sein:

..., -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, ...

Wenn wir in einem solchen Fall die Ladung messen könnten, würde ein beliebiger Wert zwischen minus Unendlich und plus Unendlich resultieren.

Nun stellen wir uns vor, wir haben ein separates geladenes Teilchen und wir werfen dieses in ein solches Feld. Wir wissen nicht, was die Ladung des Feldes genau ist. Durch das Einwerfen des geladenen Teilchens würde sich aber die Ladung des Feldes um eine Einheit verschieben, sodass die Ladung wäre:

..., -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, ...

Damit ist aber die Ladung des Feldes genauso unbekannt wie vorher.

Ein Kondensat ist also eine interessante Konfiguration des Raumes. Egal welche Ladung der Raum hat, sie ist so unscharf, dass man keinen Unterschied feststellen kann, wenn man eine extra Ladung hinzufügt oder entfernt!

In Bezug auf elektrische Ladung ist die wirkliche Welt nicht so. Aber es gibt Materialien, die sich genau so verhalten: zum Beispiel Supraleiter.

Quelle: Prof. Leonard Susskind

Diese Seite ist Teil meiner Deutsch-Übersetzung Higgs-Boson entmystifiziert des Vortrages Demystifying the Higgs Boson von Prof. Leonard Susskind vom 30.07.2012 an der Stanford University.

Prof. Leonard Susskind ist ein US-amerikanischer theoretischer Physiker und Mitbegründer der Stringtheorie. Er gibt seit vielen Jahren öffentliche Vorlesungen in Physik für ein interessiertes

Publikum.

- Leonard Susskind; *Wikipedia (de)*
- Demystifying the Higgs Boson with Leonard Susskind; *Youtube*



Leonard Susskind beim Vortrag über das Higgs-Boson

Video-Links

1. Demystifying the Higgs Boson with Leonard Susskind; *Youtube*; Position 2:27
I will begin with a course in quantum mechanics.
2. Demystifying the Higgs Boson with Leonard Susskind; *Youtube*; Position 3:16
The next concept [...] is the of a field.
3. Demystifying the Higgs Boson with Leonard Susskind; *Youtube*; Position 8:33
Those vibrations are quanta of the field.
4. Demystifying the Higgs Boson with Leonard Susskind; *Youtube*; Position 11:20
They correspond to something else that is also quantized in nature, the value of electric charge.
5. Demystifying the Higgs Boson with Leonard Susskind; *Youtube*; Position 14:09
There is something interesting you can do...
6. Demystifying the Higgs Boson with Leonard Susskind; *Youtube*; Position 15:37
That phenomenon is called a condensate, it's called spontaneous symmetry breaking,...
7. Demystifying the Higgs Boson with Leonard Susskind; *Youtube*; Position 16:37
The problem of that is the uncertainty principle...
8. Demystifying the Higgs Boson with Leonard Susskind; *Youtube*; Position 17:53
That would say that you can't have empty space with no charge in it!

Weitere Informationen

1. Quantenmechanik; *Wikipedia (de)*
2. Higgs-Mechanismus; *Wikipedia (de)*
3. Spin; *Wikipedia (de)*
4. Feld (Physik); *Wikipedia (de)*
5. Vakuum; *Wikipedia (de)*
6. Quant; *Wikipedia (de)*
7. Spontane Symmetriebrechung; *Wikipedia (de)*
8. Heisenbergsche Unschärferelation; *Wikipedia (de)*
9. Plancksches Wirkungsquantum; *Wikipedia (de)*

Das Standardmodell

Freitag, 21. September 2012 - 01:44 | Autor: [wabis](#) | Themen: [Wissen](#), [Physik](#), [QM](#)

Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik (SM) ist eine physikalische Theorie, welche die bekannten Elementarteilchen und die Wechselwirkungen zwischen ihnen beschreibt. Die Voraussagen des SM sind durch teilchenphysikalische Experimente recht gut bestätigt^[1]^[Video 1].

Teilchen des Standardmodells

Die Teilchen des Standardmodells werden in die zwei Varianten *Fermionen*^[2] und *Bosonen*^[3] eingeteilt. Die Fermionen machen jene Teilchen aus, die wir üblicherweise als Materie bezeichnen. ^[Video 2]

Fermionen (Spin = 1/2)		Bosonen (Spin = 1)	
e, μ, τ	Elektron, Myon, Tau Es gibt drei Arten von negativ geladenen Teilchen: das Elektron, das Myon und das Tau.	γ	Photon Das Photon γ (Gamma) ist das Teilchen des elektromagnetischen Kraftfeldes. Unter Anderem besteht Licht aus Photonen.
ν	Neutrinos Und es gibt drei entsprechende elektrisch neutrale Arten von Teilchen: das Elektron-Neutrino, das Myon-Neutrino und das Tau-Neutrino.	g	Gluon Das Gluon ist ähnlich wie ein Photon, aber es hat nichts mit Atomen sondern mit Atomkernen zu tun. Gluonen halten die Quarks zusammen zu Protonen und Neutronen und halten diese zu Atomkernen zusammen.
q	Quarks Von den Quarks gibt es sechs unterschiedliche Varianten: <i>up</i> , <i>down</i> , <i>charm</i> , <i>strange</i> , <i>top</i> , <i>bottom</i> . Drei <i>up</i> und <i>down</i> Quarks bilden zusammen ein <i>Proton</i> oder <i>Neutron</i> .	W	W-Bosonen
		Z	Z-Boson

In dieser Aufstellung fehlt nur noch ein Teilchen, um das es in diesem Beitrag hauptsächlich geht, das *Higgs-Boson*.

Das Spezielle an dieser Aufstellung der Teilchen des Standardmodells ist, dass sie nach der Theorie alle eine Masse von **Null** haben sollten! Wir können überall lesen, dass das Higgs-Bosons den Teilchen Masse gibt.

Warum muss den Teilchen Masse gegeben werden? Warum haben sie nicht einfach selbst eine Masse?

Nun, es stellt sich heraus, dass diese Teilchen gerade die Gruppe aller masselosen Teilchen bilden, wenn es das Higgs-Boson nicht gäbe. Dies ist teilweise auch eine Erklärung dafür, weshalb diese Teilchen verglichen mit der Planck-Masse so extrem leicht sind. Weil sie eigentlich keine Masse haben. Aber das stimmt nicht ganz. Wir wissen ja, dass diese Teilchen eine kleine Masse haben.

Masse der Teilchen

Teilchen können eine Masse von 0 bis zu einer maximalen Masse haben, der sog. Planck-Masse m_P . Hätte ein Teilchen eine grössere Masse als die Planck-Masse, würde es ein schwarzes Loch bilden. ^[Video 3]

Die Planck-Masse^[4] ist: $1.2209 \cdot 10^{19} \text{ GeV}/c^2 = 2.176 \cdot 10^{-8} \text{ kg}$

Dies entspricht etwa dem Gewicht eines Staubteilchens. Die folgende Tabelle zeigt die Massen einiger Teilchen im Vergleich mit der Planck-Masse:

Teilchen	Masse	
Elektron	$0.000511 \text{ GeV}/c^2$	$9.107 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
Up-Quark	$0.0024 \text{ GeV}/c^2$	$4.3 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$
Down-Quark	$0.0048 \text{ GeV}/c^2$	$8.6 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$
Proton	$0.938 \text{ GeV}/c^2$	$1.672 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Neutron	$0.940 \text{ GeV}/c^2$	$1.675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Top-Quark	$171.2 \text{ GeV}/c^2$	$3.051 \cdot 10^{-25} \text{ kg}$
Teilchen der dunklen Materie?		
Planck-Masse	$1.221 \cdot 10^{19} \text{ GeV}/c^2$	$2.176 \cdot 10^{-8} \text{ kg}$

Die Masse des schwersten bekannten Elementarteilchens, des Top-Quarks, ist etwa 10^{17} mal kleiner als die Planck-Masse!

Warum sind alle diese Teilchen so extrem leicht?

Eine Antwort ist: um schwere Teilchen nachweisen zu können, braucht man viel Energie. Um diese Energie zu erzeugen braucht es grosse Teilchenbeschleuniger. Bisher wurden erst Beschleuniger bis zu einer bestimmten Grösse gebaut. Also konnten damit noch keine schwereren Teilchen entdeckt werden. Aber vielleicht ist die Gewichtsskala bis zur Planck-Masse voll von Teilchen (Dunkle Materie?).

Prozesse des Standardmodells

Das Standardmodell beschreibt, wie Fermionen das Aussenden von Bosonen veranlassen^[Video 4]. Dies wird graphisch in sog. Feynman-Diagrammen^[5] dargestellt (Bild 1 bis 3). Gerade Linien stehen für den Weg den Fermion nehmen. Fermionen haben Masse, daher werden sie durch gerade solide Linien dargestellt. Bosonen werden durch Wellenlinien dargestellt.



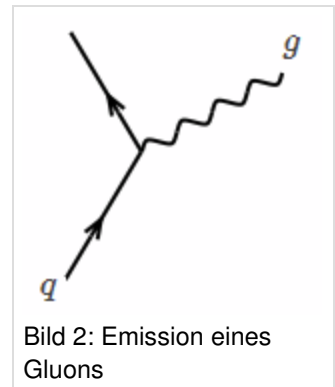
Bild 1: Emission eines

In Bild 1 emittiert ein Elektron e ein Photon γ . Die Zeitachse zeigt im Bild nach oben.

Photons

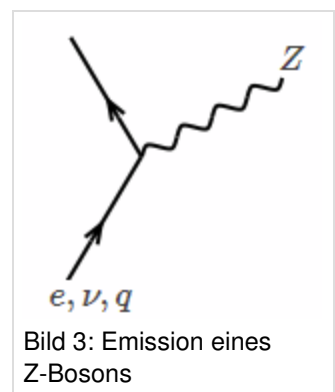
Wenn es um geladene Teilchen und Felder^[6] geht spricht man von **Quantenelektrodynamik**^[7].

Weiteres Beispiel: Ein Quark q kann ein Gluon g aussenden (Bild 2). Dies wird genau gleich wie in Bild 1 dargestellt. Das Quark ist ein Fermion und wird daher mit einer geraden soliden Linie dargestellt. Das Gluon ist ein Boson und wird daher mit einer Wellenlinie dargestellt.



Weil ein Quark auch eine elektrische Ladung hat, kann es auch ein Photon emittieren. Elektronen jedoch können keine Gluonen emittieren. Gluonen binden Quarks zu Protonen und Neutronen zusammen.

Da Neutrinos elektrisch neutral sind, können sie keine Photonen emittieren. Sie können auch keine Gluonen emittieren. Aber sowohl Elektronen e , als auch Neutrinos ν und Quarks q können Z-Bosonen^[8] Z emittieren (Bild 3).



Weil ein Z-Boson elektrisch neutral ist, ändert sich die Ladung der Teilchen beim emittieren eines Z-Bosons nicht.

Warum sind einige Bosonen masselos?

Das Photon ist masselos, weil es sich mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegt. Alles was sich mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegt, kann keine Masse haben, denn alles was Masse hat, kann Lichtgeschwindigkeit nicht erreichen.^[Video 5]

➤ Kann etwas schneller sein als Lichtgeschwindigkeit?

Könnte man eine Theorie entwickeln, in welcher Photonen eine Masse haben?

Ja! Aber viel wichtiger ist, dass wir eine Theorie entwickeln können, in welcher Photonen keine Masse haben! Warum? Weil ein Photon in der Natur nun mal keine Masse hat!

Mit der selben Theorie würden auch Gluonen und Z-Bosonen keine Masse haben. Z-Bosonen und W-Bosonen haben jedoch eine relativ grosse Masse!

Quelle: Prof. Leonard Susskind

Diese Seite ist Teil meiner Deutsch-Übersetzung Higgs-Boson entmystifiziert des Vortrages Demystifying the Higgs Boson von Prof. Leonard Susskind vom 30.07.2012 an der Stanford University.

Prof. Leonard Susskind ist ein US-amerikanischer theoretischer Physiker und Mitbegründer der Stringtheorie. Er gibt seit vielen Jahren öffentliche Vorlesungen in Physik für ein interessiertes Publikum.

- Leonard Susskind; *Wikipedia (de)*
- Demystifying the Higgs Boson with Leonard Susskind; *Youtube*



Leonard Susskind beim Vortrag über das Higgs-Boson

Video-Links

1. Demystifying the Higgs Boson with Leonard Susskind; *Youtube*; Position 21:08
Modul number 2: the standard model.
2. Demystifying the Higgs Boson with Leonard Susskind; *Youtube*; Position 23:20
The particles of the standard model.
3. Demystifying the Higgs Boson with Leonard Susskind; *Youtube*; Position 21:18
First of all, particle have mass.
4. Demystifying the Higgs Boson with Leonard Susskind; *Youtube*; Position 26:55
What do this particles do?
5. Demystifying the Higgs Boson with Leonard Susskind; *Youtube*; Position 29:26
Why are the bosons massless?

Weitere Informationen

1. Standardmodell; *Wikipedia (de)*
2. Fermionen; *Wikipedia (de)*
3. Bosonen; *Wikipedia (de)*
4. Planck-Masse; *Wikipedia (de)*
5. Feynman-Diagramm; *Wikipedia (de)*
6. Feld (Physik); *Wikipedia (de)*
7. Quantenelektrodynamik; *Wikipedia (de)*
8. Z-Boson; *Wikipedia (de)*

Mechanismen zur Erzeugung von Masse

Freitag, 21. September 2012 - 01:44 | Autor: [wabis](#) | Themen: [Wissen](#), [Physik](#), [QM](#)

Hier wird erklärt, über welche Mechanismen Elementarteilchen und andere Objekte Masse erhalten. Die vielfach gelesenen Erklärungen in Medien zum Higgs-Feld sind schlicht falsch.^[Video 1]

Unkorrekte Erklärung des Higgs-Feldes in vielen Medien

In vielen Medien wird das Higgs-Feld so erklärt, dass es den Raum wie ein zäher Sirup füllt und so bestimmte Teilchen bremst und damit den Teilchen eine Masse gibt^{[1][2][Video 2]}. Oder es wird ein Gleichnis mit einer Cocktailparty für die Erklärung bemüht^[3].

Dieses Bild ist falsch. Das Vakuum ist nicht mit einer zähen Masse gefüllt und das Vakuum bremst keine Teilchen. Wenn keine Kräfte auf ein Teilchen mit einer Masse wirken, wird es wegen seiner Masse nicht abgebremst, sondern behält seine Geschwindigkeit bei. Das Higgs-Feld bremst also keine Teilchen ab. Es gibt keine Reibung im Higgs-Feld. Dies ist nicht der Mechanismus, der Teilchen eine Masse gibt.

Wie Felder die Masse von Teilchen beeinflussen können

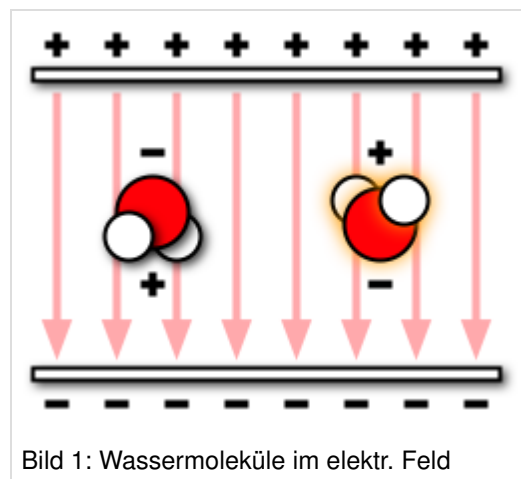
Am Beispiel eines Wassermoleküls zeige ich, wie die Masse durch ein Feld^[4] beeinflusst werden kann:^[Video 3]

Ein Wassermolekül ist gegen Aussen elektrisch Neutral, hat aber im Innern eine ungleichmässige Verteilung der Ladung. So ist ein Ende positiv geladen, das andere Ende negativ. Ein Wassermolekül hat eine bestimmte Masse. Diese Masse hängt nicht von der Orientierung des Moleküls ab. In jeder Lage hat das Molekül die selbe Masse. Warum? Wegen der Symmetrie des Raumes. Raum ist in alle Richtungen gleich, sodass es keinen Unterschied macht, wie das Molekül liegt.

Stellen wir uns für dieses Beispiel vor, das Wassermolekül sei ein Elementarteilchen und es könne nur zwei Lagen einnehmen: In der einen Lage ist das positiv geladene Ende oben, in der anderen Lage ist es unten.

Nun erzeugen wir mit Hilfe eines grossen Kondensators^[5] in einem Bereich des Raumes ein homogenes elektrisches Feld (Bild 1). Wenn wir nun die beiden Wassermoleküle in dieses Feld bringen, ist die Energie der beiden Moleküle nicht mehr die selbe! Warum?

Das elektrische Feld versucht die Moleküle so auszurichten, dass das positive Ende zur negativen Platte des Kondensators zeigt. Man muss Energie aufwenden, um das eine Molekül entgegen dieser



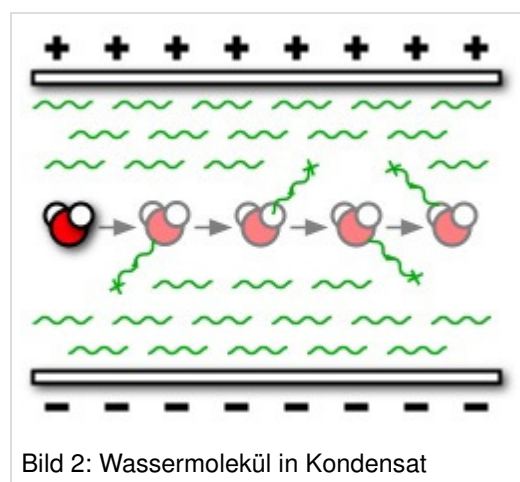
Richtung zu drehen.

Nach der Formel $E = m \cdot c^2$ ist Masse gleich Energie. Wenn also die beiden Moleküle unterschiedliche Energie haben, so haben sie auch unterschiedliche Masse! In der Praxis ist der Unterschied für dieses Beispiel winzig, aber sie haben trotzdem verschiedene Massen.

Man beachte, dass das Wassermolekül gegen aussen elektrisch neutral ist. Daher übt das elektrische Feld keine Kraft auf das Molekül aus. Es bewegt sich ungestört zwischen den beiden Platten des Kondensators. Es wird nicht gebremst. Trotzdem gibt es diesen Massenunterschied zwischen den beiden Wassermolekülen aufgrund ihrer unsymmetrischen Verteilung der Ladung und der unterschiedlichen Orientierung.

Wie ein Kondensat Masse beeinflusst

Photonen sind die Teilchen, die elektrische Kräfte zwischen elektrisch geladenen Teilchen vermitteln. Wir können uns ein elektrisches Feld auch vorstellen als ein Kondensat von Photonen, also als einen Raum, der mit Photonen gefüllt ist (siehe Bild 2)^[Video 4]. Aber nicht so, wie man einen Raum mit gewöhnlichen Teilchen füllt. Ein Kondensat bedeutet, dass es keinen Unterschied macht, ob man weitere Teilchen hinzufügt oder wegnimmt. Das Feld ist gefüllt mit einer unbestimmten Anzahl von Photonen.



Die Richtung des elektrischen Feldes entsteht dadurch, dass Photonen unterschiedlich polarisiert sein können.

Kommen wir wieder zu unserem Beispiel mit dem Wassermolekül, das sich frei durch das Kondensat bewegt. Das Wassermolekül enthält geladene Teilchen. Diese Teilchen können Photonen emittieren und absorbieren. Das Emittieren und Absorbieren hat auf das Feld keinen Einfluss. In Bild 2 wird das dadurch symbolisiert, dass die Photonen mit einem kleinen Kreuz enden.

Während das Wassermolekül also so durch das Kondensat schwebt, tauscht es ständig Photonen mit dem Kondensat aus, ohne das Kondensat dabei zu verändern. Abhängig davon, wie die Photonen polarisiert sind und wie das Wassermolekül polarisiert ist, wird durch den andauernden Austausch von Photonen die Energie des Moleküls verändert. Und diese Veränderung der Energie ist gleichbedeutend mit einer Änderung der Masse.

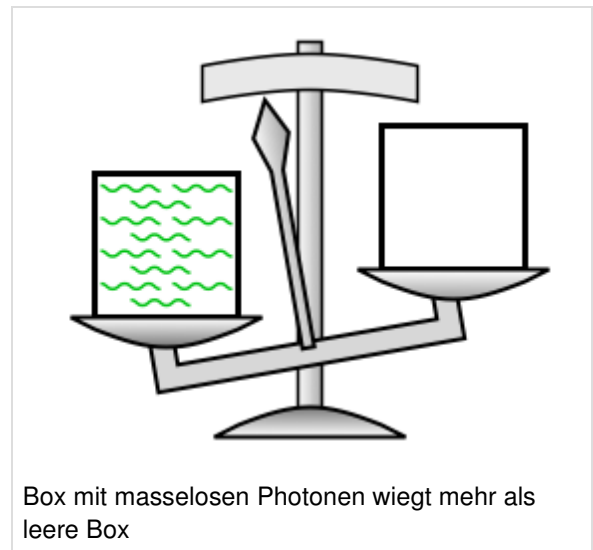
Weitere Mechanismen, die Masse erzeugen

Gibt es einen Grund, warum ein Teilchen nicht einfach keine Masse haben kann? Braucht es so etwas wie das Higgs-Phänomen um Teilchen eine Masse zu geben?^[Video 5]

Es gibt viele Dinge in der Natur die eine Masse haben, aber nichts mit dem Higgs-Phänomen zu tun haben.

Beispiel: Mit Strahlung gefüllte Box

Stellen wir uns eine masselose Box vor, deren Innenwände perfekt spiegeln. Diese Box sei mit Photonen gefüllt, welche ständig an den Wänden reflektiert werden. Das ganze Box-System besteht aus masselosem Material. Die Box ist masselos und die Photonen sind masselos. Aber die Box enthält viel Energie in Form von Strahlung. Nun gilt nach Einstein: $E = m \cdot c^2$, Energie ist gleich Masse. Also verhält sich die Box exakt so, als würde sie eine Masse haben! Wir brauchen also keinen Extra-Mechanismus um Masse zu erzeugen, Energie alleine genügt um Masse zu erzeugen.

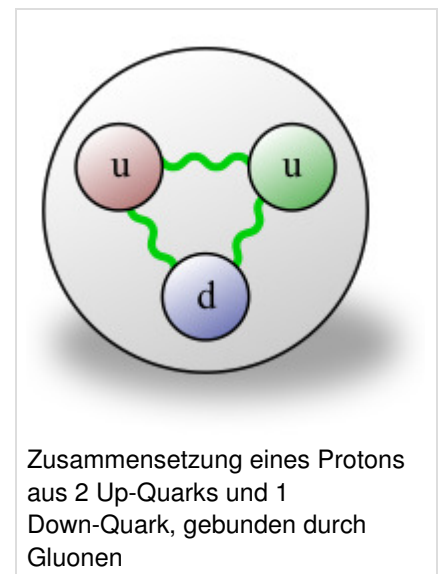


Gibt es Elementarteilchen, die eine Masse haben, obwohl sie nichts mit einem Higgs-Feld zu tun haben? Ja!

Beispiel: Das Proton

Das Proton besteht aus drei Quarks und einer grossen Menge von Gluonen, welche die Quarks zusammenhalten. Im Standardmodell sind Quarks und Gluonen praktisch masselos. Ist deshalb das Proton auch masselos? Überhaupt nicht. Wenn die Quarks und Gluonen masselos wären, würde das Proton nur weniger als 1% leichter. Der überwiegende Anteil der Masse eines Protons kommt von der kinetischen Energie der Teilchen (Quarks und Gluonen), die im Proton wie wild umherschwirren, vergleichbar den Photonen im Beispiel mit der Box.

Schwarze Löcher sind ein weiteres Beispiel für massive Objekte, die ihre Masse nicht über den Higgs-Mechanismus erhalten.



Quelle: Prof. Leonard Susskind

Diese Seite ist Teil meiner Deutsch-Übersetzung Higgs-Boson entmystifiziert des Vortrages Demystifying the Higgs Boson von Prof. Leonard Susskind vom 30.07.2012 an der Stanford University.

Prof. Leonard Susskind ist ein US-amerikanischer theoretischer Physiker und Mitbegründer der Stringtheorie. Er gibt seit vielen Jahren öffentliche Vorlesungen in Physik für ein interessiertes

Publikum.

- Leonard Susskind; *Wikipedia (de)*
- Demystifying the Higgs Boson with Leonard Susskind; *Youtube*



Leonard Susskind beim Vortrag über das Higgs-Boson

Video-Links

1. Demystifying the Higgs Boson with Leonard Susskind; *Youtube*; Position 30:15
How do fields give particles mass?
2. Demystifying the Higgs Boson with Leonard Susskind; *Youtube*; Position 35:35
Incidentally, if you read some of the literature...
3. Demystifying the Higgs Boson with Leonard Susskind; *Youtube*; Position 30:27
How a field can affect the mass of a particle.
4. Demystifying the Higgs Boson with Leonard Susskind; *Youtube*; Position 36:55
The electric field can also be pictured in terms of photons.
5. Demystifying the Higgs Boson with Leonard Susskind; *Youtube*; Position 40:03
Is there any reason why a particle just can't have a mass?

Weitere Informationen

1. Das Higgs-Teilchen - oder auf der Suche nach dem Ursprung der Masse; *WeltMaschine.de*
2. Das versteht kein Mensch; Harald Lesch über Higgs-Boson; *sueddeutsche.de*
3. Higgs-Boson Exot im Teilchenzoo; *SpiegelOnline*
4. Feld (Physik); *Wikipedia (de)*
5. Kondensator (Elektrotechnik); *Wikipedia (de)*

Der Higgs-Mechanismus

Freitag, 21. September 2012 - 01:44 | Autor: [wabis](#) | Themen: [Wissen](#), [Physik](#), [QM](#)

Der Higgs-Mechanismus ist ein weiterer Mechanismus, der einem Teilchen eine Masse geben kann. Um dies zu verstehen, müssen wir die Dirac-Theorie heranziehen und uns mit Spin und einer besonderen Ladung befassen.

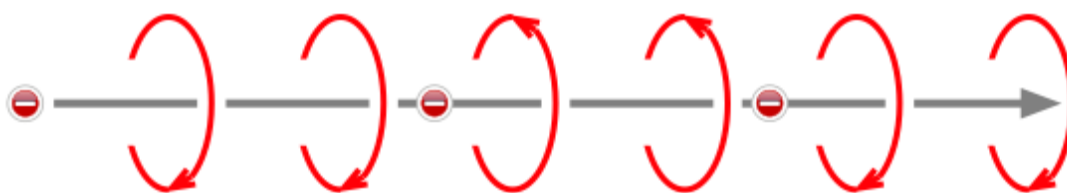
Unabhängig von **Peter Higgs** wurde der Higgs-Mechanismus von **François Englert** und **Robert Brout** in Brüssel und **Gerald Guralnik**, **Carl R. Hagen** und **T. W. B. Kibble** am Imperial College in London zur selben Zeit gefunden. Als das Standardmodell Ende der 1960er Jahre entwickelt wurde, setzte sich aber Higgs' Name für den Effekt durch Higgs-Mechanismus.

Dirac-Theorie der Elektronen

Was als nächstes erklärt werden muss, ist die Dirac-Theorie der Elektronen^[Video 1].

Alles was wir an dieser Stelle über die Dirac-Theorie wissen müssen ist, dass Elektronen einen Spin^[1] haben. Wenn sich ein Elektron annähernd mit Lichtgeschwindigkeit entlang einer Achse bewegt kann sein Spin bezüglich der Bewegungsrichtung entweder rechtsdrehend oder linksdrehend sein. Man spricht von rechtshändigen und linkshändigen Elektronen oder von der Chiralität^[2].

Nach der Dirac-Theorie^[3] kann der Spin eines Elektrons von rechtshändig zu linkshändig kippen und umgekehrt. Wenn sich ein Elektron mit Lichtgeschwindigkeit bewegen würde, könnte sein Spin nicht kippen. Denn für ein Objekt, das sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegt, bleibt die Zeit stehen. Somit kann es sich auch nicht ändern. Damit ein Elektron sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen könnte, müsste seine Masse Null sein. Bei einem masselosen Elektron könnte sich jedoch wie gesagt der Spin nicht ändern.



In der Dirac-Theorie ist dieses Kippen des Spins eng verknüpft mit der Masse des Teilchens. Tatsächlich ist die Masse eines Dirac-Teilchens proportional zur Rate, mit welcher der Spin kippt. Je schneller der Spin hin und her kippt, umso massereicher ist das Teilchen.

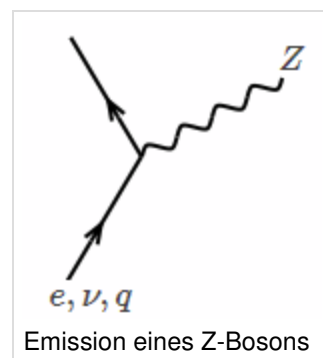
Natürlich muss berücksichtigt werden, dass die Kipp-Rate mit Annäherung an die Lichtgeschwindigkeit aufgrund der Zeitdehnung^[4] verlangsamt wird. Diese Verlangsamung verringert jedoch die Masse des Elektrons nicht, sie ist lediglich ein relativistischer Effekt^[5]. Die Kipp-Rate und somit die Masse des Teilchens ist abhängig von der sog. Kopplungskonstanten^[6], welche angibt, wie stark ein Teilchen an das Higgs-Feld gekoppelt ist.

Zilch-Ladung

Kommen wir zurück zum Beispiel, wo ein Z-Boson emittiert wird:^[Video 2]

Ein Z-Boson kann von einem Elektron e , einem Neutrino ν oder einem Quark q emittiert werden. Aber konzentrieren wir uns nur auf das Elektron. Das Z-Boson ist nicht das Selbe wie ein Photon. Und die Eigenschaft eines Teilchens, welche das Ausstrahlen eines Z-Boson verursacht, ist nicht die elektrische Ladung, sondern eine völlig andere Art von Ladung. Diese Ladungsart wird die Schwache Hyperladung^[7] (engl: *weak hypercharge*) genannt. Prof. Leonard Susskind nennt diese Ladung

Zilch (sprich: *Siltsch*)^[Video 3]. Wenn ein Teilchen, welches eine Zilch-Ladung hat, beschleunigt wird, emittiert es also ein Z-Boson. Wenn das Teilchen auch eine elektrische Ladung hat, kann es auch ein Photon emittieren.



Rechts- und linkshändige Elektronen haben die selbe elektrische Ladung. Aber in der Mathematik des Standardmodells^[8] haben rechts- und linkshändige Elektronen nicht den gleichen Zilch! Linkshändige Elektronen haben einen Zilch von 1, rechtshändige einen Zilch von 0^[Video 4].

Dies ist eine verblüffende Eigenschaft. Denn wenn der Spin eines Elektrons von linkshändig nach rechtshändig kippt, geht sein Zilch von 1 auf 0. Aber Zilch ist wie die elektrische Ladung eine Erhaltungsgrösse^[9].

Wie kann dann der Zilch von 1 auf 0 gehen oder umgekehrt?

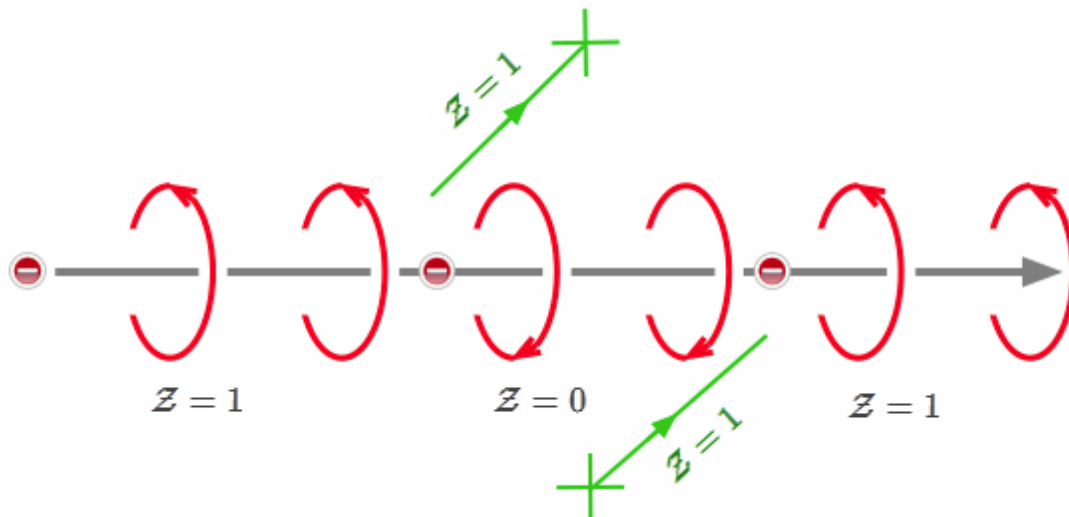
Die Antwort lautet: Er kann es nicht! Und das ist der Grund dafür, weshalb die Elektronen im Standardmodell keine Masse haben sollten. Weil rechtshändige und linkshändige Elektronen verschiedene Werte einer Erhaltungsgrösse haben, kann rechtshändig nicht zu linkshändig wechseln und umgekehrt. Folglich können Elektronen keine Masse haben. Punkt!

Und trotzdem haben Elektronen eine Masse! Wie können wir diesen Widerspruch auflösen?

Ziggs-Bosonen

Dieser Widerspruch kann aufgelöst werden, indem wir einen neuen Bestandteil hinzufügen: das Ziggs-Boson Z (sprich: *Siggs-Boson*), eine Erfindung von Prof. Leonard Susskind^[Video 5]. Achtung: nicht verwechseln mit dem Higgs-Boson!

Das Ziggs-Boson ist eng verknüpft mit der spontanen Symmetriebrechung. Es ist eine Teilchenart, die ein Kondensat bildet. Das heisst, man kann nicht sagen, wieviele Teilchen davon umherschwirren. Wir können Ziggs-Teilchen hinzufügen oder entfernen ohne das Vakuum zu verändern. Dieses Vakuum hat durch die Ziggs-Teilchen keine elektrische Ladung, sondern Zilch-Ladung.



Wenn also ein linkshändiges Elektron mit einer Zilch-Ladung von 1 zu fliegen kommt, kann es durch Emission eines Ziggs-Bosons diese Ladung an das Vakuum abgeben und damit zu einem rechtshändigen Elektron mit der Zilch-Ladung 0 werden. Später kann es aus dem Vakuum ein Ziggs-Teilchen aufnehmen und wieder zu einem linkshändigen Elektron mit Zilch-Ladung 1 werden usw. Das Vakuum ändert sich in diesem Prozess nicht, denn die Ziggs-Teilchen bzw. das Ziggs-Feld bilden ein Kondensat.

Über diesen Mechanismus erhalten alle Fermionen^[10] (Elektronen, Quarks, Müonen, usw.) ihre Masse.

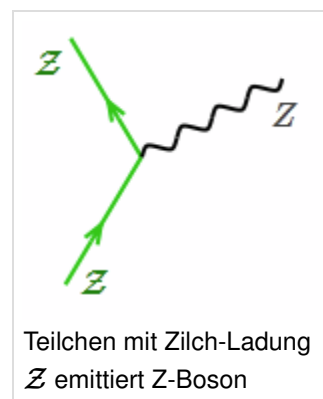
Diesen Mechanismus nennt man spontane Brechung der chiralen Symmetrie^[11] [Video 6].

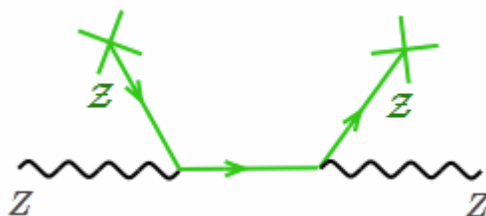
Was ist mit dem Z-Boson? Das Z-Boson ist ähnlich wie ein Photon. Ein Photon ist im Gegensatz zum Z-Boson masselos. Wie erhält das Z-Boson seine Masse?

Erinnern wir uns daran, was ein Z-Boson tun kann: Es interagiert mit jedem Teilchen, das eine Zilch-Ladung hat (e, ν, q), insbesondere mit dem Ziggs-Teilchen \mathcal{Z} . Das Ziggs-Teilchen *hat* Zilch-Ladung und kann daher ein Z-Boson emittieren.

Was bedeutet das für das Z-Boson?

Wenn ein Z-Boson zu fliegen kommt, das Z-Boson hat keine Zilch-Ladung, kann es ein Ziggs-Teilchen aus dem Kondensat absorbieren und damit Zilch-Ladung erhalten. Damit wird das Z-Boson zu einem Ziggs-Teilchen. Später kann es das Ziggs-Teilchen wieder an das Kondensat abgeben und wird wieder zu einem gewöhnlichen Z-Boson.





Über diesen Mechanismus erhalten also Teilchen ihre Massen. Dieser Mechanismus wird nach ihren Entdeckern **Englert-Brout-Higgs-Guralnik-Hagen-Kibble-Mechanismus** genannt, oder einfach nur **Higgs-Mechanismus**^[12].

Dieser Mechanismus könnte im Prinzip auch für Photonen funktionieren. Würde ein Kondensat aus elektrisch geladenen Teilchen existieren, hätten auch Photonen eine Masse. Wenn es ein solches Kondensat gäbe, würden wir allerdings nicht existieren. Es gäbe dann keine Atome wie wir sie heute kennen.

Werden wir das Ziggs-Teilchen je entdecken?

Ja, es wurde schon lange entdeckt. Es ist einfach Teil des Z-Bosons. Das Z-Boson wurde in den 1960er Jahren vorausgesagt. Der direkte Nachweis des Z-Bosons gelang erst im Jahr 1983, als nach einem Umbau des Super Proton Synchrotrons zu einem Protonen-Antiprotonen-Collider eine ausreichende Schwerpunktsenergie zur Verfügung stand^[13].

Als das Z-Boson nachgewiesen wurde und man seine Eigenschaften studierte, fand man, dass es eine Masse hat, welche durch absorbieren und emittieren eines Ziggs-Teilchens zustande kam. An diesem Mechanismus bestanden eigentlich keine Zweifel, zumindest für einige Jahre nicht.

Quelle: Prof. Leonard Susskind

Diese Seite ist Teil meiner Deutsch-Übersetzung Higgs-Boson entmystifiziert des Vortrages Demystifying the Higgs Boson von Prof. Leonard Susskind vom 30.07.2012 an der Stanford University.

Prof. Leonard Susskind ist ein US-amerikanischer theoretischer Physiker und Mitbegründer der Stringtheorie. Er gibt seit vielen Jahren öffentliche Vorlesungen in Physik für ein interessiertes Publikum.



Leonard Susskind beim Vortrag über das Higgs-Boson

- Leonard Susskind; *Wikipedia (de)*
- Demystifying the Higgs Boson with Leonard Susskind; *Youtube*

Video-Links

1. Demystifying the Higgs Boson with Leonard Susskind; *Youtube*; Position 42:45
What I need to tell you about is the dirac theory of electrons.
2. Demystifying the Higgs Boson with Leonard Susskind; *Youtube*; Position 45:31
You remeber the Z boson?
3. Demystifying the Higgs Boson with Leonard Susskind; *Youtube*; Position 46:09
It's called the weak hypercharge. I don't like that. Because it's the thing which emits Z bosons, I call it Zilch!
4. Demystifying the Higgs Boson with Leonard Susskind; *Youtube*; Position 46:42
But left handed and right handed electrons do not have the same Zilch... The left handed electron has Zilch of plus one and the right handed electron has zero Zilch.
5. Demystifying the Higgs Boson with Leonard Susskind; *Youtube*; Position 48:10
How do we get around this? We get around this by introducing a new ingredient and the new ingredient is called the Ziggs boson. It's not the Higgs boson, not yet!
6. Demystifying the Higgs Boson with Leonard Susskind; *Youtube*; Position 51:29
It's called the spontaneous breaking of chiral symmetry

Weitere Informationen

1. Spin; *Wikipedia (de)*
2. Chiralität (Physik); *Wikipedia (de)*
3. Dirac-Theorie; *Wikipedia (de)*
4. Zeitdehnung; *Wikipedia (de)*
5. Relativitätstheorie; *Wikipedia (de)*
6. Kopplungskonstante; *Wikipedia (de)*
7. Schwache Hyperladung; *Wikipedia (de)*
8. Standardmodell; *Wikipedia (de)*
9. Erhaltungsgröße; *Wikipedia (de)*
10. Fermionen; *Wikipedia (de)*
11. Spontane Symmetriebrechung; *Wikipedia (de)*
12. Higgs-Mechanismus; *Wikipedia (de)*
13. Z-Boson; *Wikipedia (de)*

Das Higgs-Boson

Freitag, 21. September 2012 - 01:43 | Autor: [wabis](#) | Themen: [Wissen](#), [Physik](#), [QM](#)

Auf dieser Seite beschreibe ich, was das Higgs-Boson ist, warum es so schwer zu entdecken ist, was darüber bisher herausgefunden wurde und was die Zukunft bringen könnte.

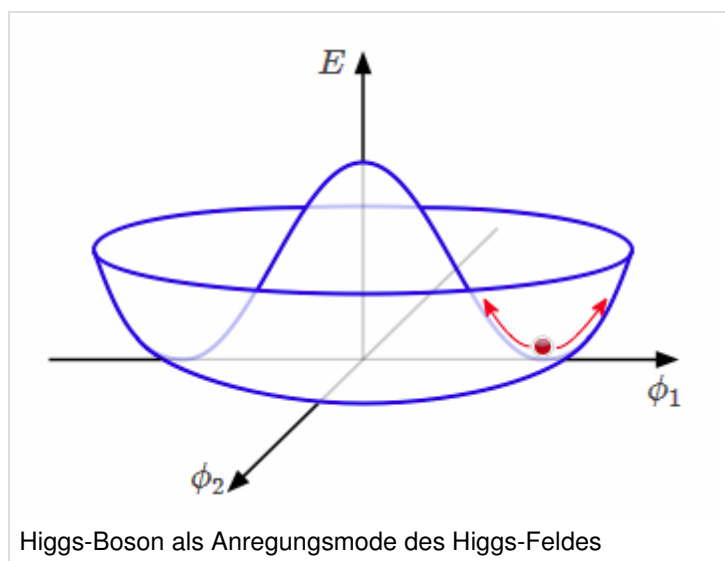
Was ist ein Higgs-Boson?

Das Higgs-Boson hat etwas zu tun mit einem Kondensat und spontaner Symmetriebrechung. Aber es ist eine andere Art der Anregung des Higgs-Feldes, als entlang eines ringförmigen Minimums.

[Video 1]

Es gibt zwei Möglichkeiten, sich den Mechanismus vorzustellen, der ein Higgs-Boson entstehen lässt.

Wir haben ein Kondensat mit einer bestimmten Dichte der fiktiven Teilchen, welche dieses Kondensat bilden. Stellen wir uns etwas vor, das die Dichte an einer Stelle irgendwie ändert, vergleichbar einer Schallwelle, eine Art Kompressionswelle, welche die Dichte an einer Stelle schwanken lässt. Diese Art Schwingung ist ein Higgs-Boson!



Eine andere Erklärung ist, sich das Higgs-Feld in Form des mexikanischen Hutes vorzustellen. Diesmal ist die Erregung des Feldes aber nicht entlang des ringförmigen Minimums, sondern wie im Bild gezeigt quer dazu. Diese Form der Erregung des Kondensats entspricht einer Kompressionswelle. Für diese Erregung muss Energie aufgewendet werden. Dieser Anregungsmodus, dieses Phänomen, diese Schwingung wird als Higgs-Boson bezeichnet.

Das Higgs-Boson ist wie eine Schallwelle, die sich durch das Kondensat ausbreitet.

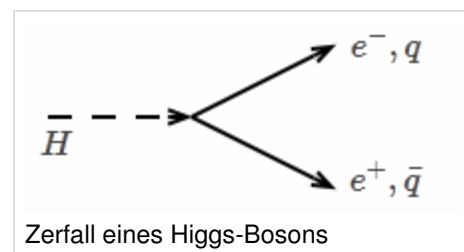
Die Entdeckung des Higgs-Boson war deshalb so wichtig, weil es das bisher einzige Teilchen war, das von der Theorie des Standardmodells vorhergesagt, aber noch nicht beobachtet worden war. Alle anderen Teilchen wie das Z-Boson, das Ziggs-Teilchen u.a. wurden schon lange nachgewiesen.

Warum ist das Higgs-Boson so schwer nachzuweisen?

Ein Higgs-Boson H kann mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit in andere Teilchen zerfallen, zum Beispiel in ein Elektron e^- und ein Positron e^+ , oder in ein Quark q und ein Anti-Quark \bar{q} . Es kann aber auch andere Teilchen produzieren, wie Müonen, Top-Quarks, Bottom-Quarks und alle anderen

Quarks. Aber auch Neutrinos und alle andere Fermionen können in Paaren erzeugt werden. Ein Higgs-Boson zerfällt sehr schnell in andere Teilchen.^[Video 2]

Die Wahrscheinlichkeit, mit der das Higgs-Boson in bestimmte andere Teilchen zerfällt, ist proportional zur Masse der erzeugten Teilchen. Je massereicher die Teilchen sind, umso eher werden sie erzeugt. Das Higgs-Boson produziert also mit Vorliebe möglichst massereiche Teilchen.



Das Feynman-Diagramm^[1] kann in beide Richtungen gelesen werden. Aus einem Paar von Teilchen kann also auch ein Higgs-Boson entstehen. Man könnte also durch die Kollision eines Elektrons mit einem Positron ein Higgs-Boson erzeugen.

Kollisionen von Elektronen mit Positronen finden schon seit langer Zeit statt. Trotzdem hat bisher noch niemand ein Higgs-Teilchen sehen können. Ein Grund dafür ist, dass das Higgs-Boson ein ziemlich massereiches Teilchen ist. Solange man also nicht genug Energie in die Kollision steckt, kann kein Higgs-Teilchen entstehen.

Es gibt aber noch einen bedeutenderen Grund, weshalb das Higgs-Boson so schwer zu detektieren ist. Man kann nämlich seit einiger Zeit genug Energie in eine Kollision stecken, um ein Higgs-Boson zu erzeugen. Das Problem ist jedoch die schwache Kopplung^[2] der Kollisionsteilchen zum Higgs-Feld. Die kleine Masse der Elektronen ist verantwortlich dafür, dass die Kopplung so schwach ist. Dies resultiert in einer sehr kleinen Wahrscheinlichkeit, dass bei einer Kollision mit Elektronen ein Higgs-Boson entsteht, selbst wenn die Energie der Kollision mehr als ausreichend ist. Es ist viel wahrscheinlicher, dass bei der Kollision andere Teilchen als das Higgs-Boson entstehen.

Wie sieht es aus, wenn wir statt Elektronen Quarks zusammenstossen lassen?

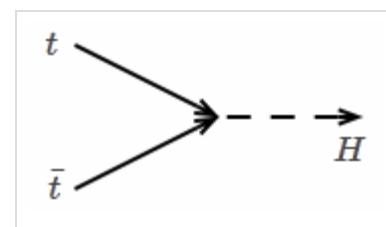
Die Quarks, aus denen Protonen und Neutronen zusammengesetzt sind (Up-Quarks und Down-Quarks), sind auch sehr leicht, nur 3 bis 12 mal schwerer als ein Elektron. Daher ist auch für diese Quarks die Wahrscheinlichkeit sehr klein, dass bei der Kollision ein Higgs-Boson entsteht. Klar entstehen ab und zu bei solchen Kollisionen Higgs-Bosonen, aber ihre Zahl ist viel zu klein, um sie mit Sicherheit detektieren zu können.

Die geringe Masse der Kollisionsteilchen war also bisher der Hauptgrund, weshalb man keine Higgs-Bosonen in genügender Menge erzeugen konnte.

Wie man Higgs-Bosonen erzeugt

Welche Teilchen bevorzugt das Higgs-Boson beim Zerfall am meisten?^[Video 3]

Die schwersten Teilchen. Das schwerste Teilchen ist das Top-Quark t . Es ist rund 340'000 mal schwerer als das Elektron. Also würde



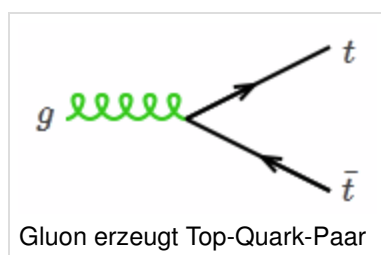
man annehmen, dass das Higgs-Boson am ehesten in Top-Quarks zerfällt. Tatsächlich zerfällt das Higgs-Boson aber nicht in Top-Quarks, weil diese einfach zu schwer sind.

Erzeugung eines Higgs-Bosons

Wenn man aber den Prozess umkehrt, also zwei Top-Quarks kollidieren lässt, kann man ein Higgs-Boson erzeugen. Das Problem dabei ist, dass es nicht so einfach ist, in der Natur Top-Quarks zu finden. Weshalb? Sie zerfallen in nur $4,2 \cdot 10^{-25}$ s in die anderen leichteren Quarks. Man kann also nicht einfach Top-Quarks hernehmen und kollidieren lassen, weil man keine Top-Quarks finden kann.

Also muss man in den Kollisionen irgendwie Top-Quarks herstellen.

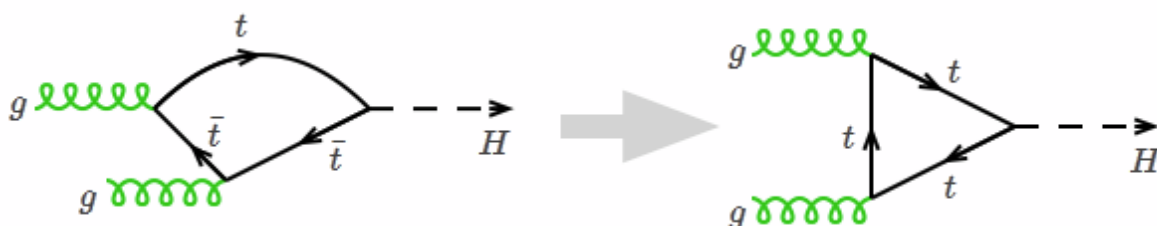
Wie erzeugt man ein Top-Quark?



Gluonen koppeln an Quarks und daher ist eine Möglichkeit, dass das Gluon g in ein Top-Quark t und ein Anti-Top-Quark \bar{t} zerfällt (siehe Bild). Beachte, dass Anti-Teilchen mit umgekehrten Pfeilen gezeichnet werden. Ein in der Zeit rückwärts fliegendes Teilchen erscheint uns als Anti-Teilchen^[3].

Gluonen kommen sehr häufig in Atomkernen vor, also warum nicht einfach Gluonen nehmen um ein Top-Quark und ein Anti-Top-Quark zu erzeugen? Der Grund ist, dass Gluonen sehr leicht sind. Sie sind beinahe masselos. Top-Quarks hingegen sind sehr schwer. Es ist einfach nicht genug Energie in einem Gluon um ein Paar von Top-Quarks zu erzeugen.

Damit das funktioniert müssen wir zwei Gluonen nehmen und mit hoher Energie zusammenstossen lassen (Bild links):



Das eine Gluon kann dann für sehr kurze Zeit ein Paar Top-Quarks erzeugen. Das eine Top-Quark kann dann das andere Gluon absorbieren. So haben wir also ein Paar Top-Quarks, die von zwei Gluonen mit hoher Energie erzeugt worden sind. Nun können die beiden Top-Quarks zusammen kommen und ein Higgs-Boson erzeugen. Im Bild rechts wird gezeigt, wie dieser Prozess üblicherweise dargestellt wird.

Dies ist der effizienteste Prozess um Higgs-Bosonen zu erzeugen. Aber es gibt noch weitere Prozesse, in denen Higgs-Bosonen entstehen können, aber ihre Wahrscheinlichkeit ist geringer.

Die Gluonen stammen aus den Protonen. Protonen bestehen aus zwei Up-Quarks und einem Down-Quark. Diese Quarks werden durch Gluonen zusammengehalten. Wenn wir also Protonen

kollidieren lassen, können die Gluonen der Protonen kollidieren und über den beschriebenen Mechanismus Higgs-Bosonen erzeugen. Dies wurde am LHC in Cern bei Genf so gemacht. LHC (engl: *Large Hadron Collider*) ist ein Proton-Proton-Collider.

Eigenschaften des Higgs-Bosons

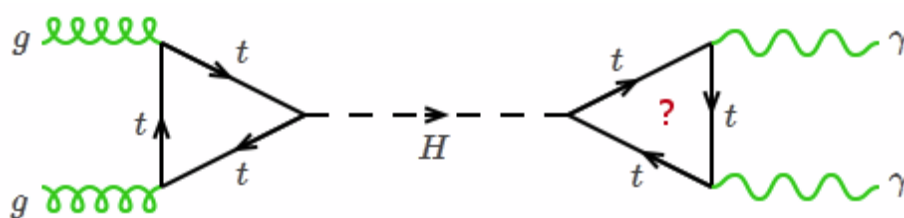
Name	Higgs-Boson H
Klassifikation	Elementarteilchen, Boson ^[4]
Ladung	neutral
Masse	ca. 125–127 GeV/c ² ; ca. $2.25 \cdot 10^{-25}$ kg
Spin^[5]	0
Lebensdauer	ca. 10^{-22} s
Wechselwirkung	Schwache Wechselwirkung ^[6] nach dem Higgs-Mechanismus mit allen Teilchen mit Masse grösser als Null ^[7]

Ausblick

Wir haben gelernt, dass das Standardmodell^[8] grundsätzlich korrekt ist. Alles passt zusammen. Beachte, dass nicht die Higgs-Bosonen den Teilchen ihre Masse verleihen, sondern die Ziggs-Bosonen! Das Higgs-Boson ist nur eine Dichte-Schwingung des Higgs-Feldes.^[Video 4]

Aber passt alles quantitativ exakt zusammen? Das wissen wir noch nicht. Es gibt einen Hinweis auf eine Diskrepanz:

Betrachten wir nochmals den effizientesten Prozess der Higgs-Erzeugung. Der selbe Prozess, der es erlaubt ein Higgs-Boson H zu erzeugen, erlaubt umgekehrt dem Higgs-Boson, wieder in seine ursprünglichen Bestandteile zu zerfallen. Aber es ist nicht so einfach, im Labor Gluonen g nachzuweisen. Das Suchen nach Gluonen, welche auf einen Zerfall des Higgs-Bosons hinweisen, nachdem eines erzeugt worden ist, ist kein einfacher Prozess. Einfacher ist es, wenn wir die Gluonen g durch Photonen γ ersetzen. Es ist genau der selbe Prozess, ausser dass statt Gluonen nun Photonen emittiert werden:



Wenn einmal ein Higgs-Boson erzeugt wurde, wie auch immer, kann es in zwei Photonen γ zerfallen. Das ist ein komplizierter Prozess. Er erfordert viel Theorie, Berechnungen und Feynman-

Diagramme. Der Prozess ist nicht einfach zu berechnen, aber man kann ihn berechnen und er hängt von den Eigenschaften der Top-Quarks t ab, die an diesem Prozess beteiligt sind.

Im Moment scheint das Higgs-Boson etwa 1.5 mal zu schnell in zwei Photonen zu zerfallen!

[Video 5]

Man ist sich einig, dass dies noch kein wirklich statistisch signifikanter Fakt ist. Aber was würde es bedeuten, wenn es so ist? Auf den ersten Blick scheint es keine grosse Angelegenheit zu sein, nur 1.5 mal zu schnell zu zerfallen. Aber der Punkt ist: die Theoretiker sind in der Lage, die Zerfallsrate sehr genau zu berechnen. Also wäre ein Faktor von 1.5 ernst zu nehmen. Er bedeutet, etwas Unbekanntes passiert da.

Das wahrscheinlichste Szenario ist, dass an diesem Prozess neben dem Top-Quark noch ein weiteres, bisher noch nicht entdecktes Teilchen beteiligt ist. Dies wäre natürlich eine grossartige Neuigkeit. Wenn da noch etwas wäre, was nicht durch das Standardmodell beschrieben wird, wäre das eine Sensation. Es könnte zum Beispiel ein supersymmetrisches^[9] Teilchen sein oder irgend etwas ganz anderes. Dies wird natürlich jetzt genauer unter die Lupe genommen.

Das Standardmodell ist nun bald 50 Jahre alt. Der Nachweis des Higgs-Bosons war vielmehr eine Bestätigung der Theorie als eine Entdeckung. Wenn aber die Zerfallsrate wirklich um den Faktor 1.5 schneller ist als berechnet, würde das bedeuten, dass man auf etwas absolut Neues gestossen ist.

Quelle: Prof. Leonard Susskind

Diese Seite ist Teil meiner Deutsch-Übersetzung Higgs-Boson entmystifiziert des Vortrages Demystifying the Higgs Boson von Prof. Leonard Susskind vom 30.07.2012 an der Stanford University.

Prof. Leonard Susskind ist ein US-amerikanischer theoretischer Physiker und Mitbegründer der Stringtheorie. Er gibt seit vielen Jahren öffentliche Vorlesungen in Physik für ein interessiertes Publikum.



Leonard Susskind beim Vortrag über das Higgs-Boson

- Leonard Susskind; *Wikipedia (de)*
- Demystifying the Higgs Boson with Leonard Susskind; *Youtube*

Video-Links

1. Demystifying the Higgs Boson with Leonard Susskind; *Youtube*; Position 55:12

What is the Higgs boson?

2. Demystifying the Higgs Boson with Leonard Susskind; *Youtube*; Position 57:25
Why it was so hard to discover the Higgs?
3. Demystifying the Higgs Boson with Leonard Susskind; *Youtube*; Position 62:02
What is the most favorable particle for the Higgs to decay in?
4. Demystifying the Higgs Boson with Leonard Susskind; *Youtube*; Position 67:06
Lets talk about the near future...
5. Demystifying the Higgs Boson with Leonard Susskind; *Youtube*; Position 69:20
At the moment, the Higgs boson [...] appears to decay into two photons a little too quickly!

Weitere Informationen

1. Feynman-Diagramm; *Wikipedia (de)*
2. Kopplungskonstante; *Wikipedia (de)*
3. Antiteilchen#Deutungen; *Wikipedia (de)*
Die Feynman-Stückelberg-Interpretation beruht auf der Vorstellung, dass Teilchen mit negativer Energie sich rückwärts in der Zeit bewegen. Mathematisch ist dies äquivalent zu einem Antiteilchen mit positiver Energie, welches sich vorwärts in der Zeit bewegt.
4. Boson; *Wikipedia (de)*
5. Spin; *Wikipedia (de)*
6. Schwache Wechselwirkung; *Wikipedia (de)*
7. Higgs-Mechanismus; *Wikipedia (de)*
8. Standardmodell; *Wikipedia (de)*
9. Supersymmetrie; *Wikipedia (de)*