

# Einführung in die Teilchenphysik

## Das Standardmodell

**Daniel Meister**

03/28/2014

## Masterclass 2014

---

<b>Vormittag</b>	<b>Hörsaal Y24-G55</b>
9:00 – 9:05	Begrüssung (Ulrich Straumann)
9:05 – 9:50	Einführung in die Teilchenphysik (Daniel Meister)
9:50 – 10:35	Detektoren und Beschleuniger (Milena Quittnat)
10:35 – 11:00	Kaffeepause im Foyer
11:00 – 12:30	Führung durch das Physik-Institut
12:30 – 13:30	Mittagspause

---

<b>Nachmittag</b>	<b>Hörsaal Y24-G55</b>
13:30 – 14:00	Einführung “Scannen” (Milena Quittnat)

---

<b>Nachmittag</b>	<b>Computerräume Y01-F08 und Y01-F50</b>
14:00 – 15:15	Eventanalyse

---

<b>Nachmittag</b>	<b>Hörsaal Y35-F51</b>
15:15 – 15:30	Kaffeepause im Foyer
15:30 – 17:00	Diskussion der Ergebnisse + Video-Konferenz (Daniel Meister, Ulrich Straumann)

---

## 1 Was ist Teilchenphysik

Was sind elementare Bausteine der Materie?

Welche Kräfte wirken zwischen diesen Bausteinen?

## 2 Das Standardmodell (SM)

## 3 Das Higgs-Boson

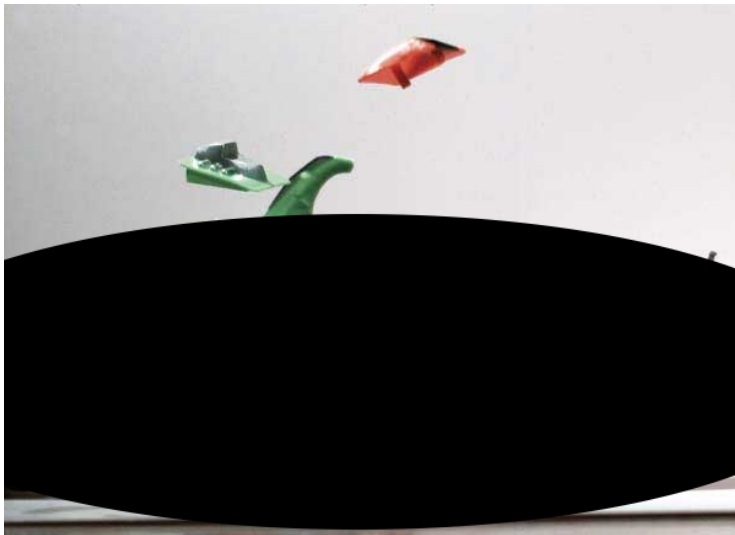
## 4 Wichtig für heute: W und Z

## 5 Fragen

# Was ist Teilchenphysik?

- Grundlagenforschung
  - oft keine direkte Anwendungsmöglichkeiten im täglichen Leben
  - aber oft Grundlage für spätere Entwicklungen oder nützliche Entdeckungen
- Überprüfung von theoretischen Modellen
  - es gibt verschiedenste Vorhersagen aus der Theorie der Teilchenphysik
  - mit Experimenten können wir Theorien überprüfen und ausschliessen
- *Dass ich erkenne, was die Welt  
Im Innersten zusammenhält  
[. . .]*

- “Aufeinanderschliessen” von verschiedenen Teilchen
  - bei möglichst grossen Energien
- “Anschauen” der “Überreste” der Kollision
- Modellvorstellung: Kollision von 2 Autos
  - Was hatten die beiden Autos für eine Farbe?
  - Welches Auto ist vor der Kollision stillgestanden?







- “Aufeinanderschiesen” von verschiedenen Teilchen
  - bei möglichst grossen Energien
- “Anschauen” der “Überreste” der Kollision
- Modellvorstellung: Kollision von 2 Autos
  - Was hatten die beiden Autos für eine Farbe?
  - Welches Auto ist vor der Kollision stillgestanden?
- Mehr dazu im nächsten Vortrag
  - über Detektoren und Beschleuniger

## Louis de Broglie (1924):

$$E \sim \frac{1}{\lambda}$$

- Grössere Energie  $\rightarrow$  kleinere Wellenlänge
- Die Wellenlänge entspricht dem Auflösungsvermögen  
 $\rightarrow$  d.h. je kleiner die Wellenlängen desto kleinere Dinge sind "sichtbar"
- Grosse Energien  $\rightarrow$  Grosses Auflösungsvermögen

## Albert Einstein (1905):

$$E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2$$

mit Energie  $E$ , Masse  $m$ , Impuls  $p$  und Lichtgeschwindigkeit  $c$

- Bekannter ist der Spezialfall für ruhende Teilchen  
→ ruhendes Teilchen ( $p = 0$ ):  $E = mc^2$
- Masse ist eine Form von Energie  
→ d.h. Masse ist nicht erhalten sondern kann erzeugt und vernichtet werden
- Mehr Energie → schwerere Teilchen erzeugbar

# Was sind elementare Bausteine der Materie?



# Periodensystem der Elemente

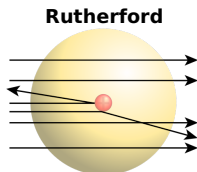
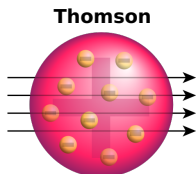
Periode	Nebengruppen																Hauptgruppen										Schale	
1	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>Ordnungszahl</p> <p>Elementsymbol</p> <p>Elementname</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>20</p> <p>Ca</p> <p>Calcium</p> </div> <div> <p>Relative Atommasse (g/mol)</p> <p>Elektronenaffinität</p> </div> </div>																<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>Fe</p> <p>O</p> <p>Hg</p> <p>Tc</p> </div> <div> <p>Feste Elemente</p> <p>Gasförmige Elemente</p> <p>Flüssige Elemente (20°C)</p> <p>Radioaktive Elemente/</p> <p>Atommasse des stabilsten Isotops</p> </div> </div>										2	K
2	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>3</p> <p>Li</p> <p>Lithium</p> </div> <div> <p>4</p> <p>Be</p> <p>Beryllium</p> </div> </div>																<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>5</p> <p>B</p> <p>Bor</p> </div> <div> <p>6</p> <p>C</p> <p>Kohlenstoff</p> </div> <div> <p>7</p> <p>N</p> <p>Stickstoff</p> </div> <div> <p>8</p> <p>O</p> <p>Sauerstoff</p> </div> <div> <p>9</p> <p>F</p> <p>Fluor</p> </div> <div> <p>10</p> <p>Ne</p> <p>Neon</p> </div> </div>										L	
3	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>11</p> <p>Na</p> <p>Natrium</p> </div> <div> <p>12</p> <p>Mg</p> <p>Magnesium</p> </div> </div>																<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>13</p> <p>Al</p> <p>Aluminium</p> </div> <div> <p>14</p> <p>Si</p> <p>Silicium</p> </div> <div> <p>15</p> <p>P</p> <p>Phosphor</p> </div> <div> <p>16</p> <p>S</p> <p>Schwefel</p> </div> <div> <p>17</p> <p>Cl</p> <p>Chlor</p> </div> <div> <p>18</p> <p>Ar</p> <p>Argon</p> </div> </div>										M	
4	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>19</p> <p>K</p> <p>Kalium</p> </div> <div> <p>20</p> <p>Ca</p> <p>Calcium</p> </div> </div>																<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>21</p> <p>Sc</p> <p>Scandium</p> </div> <div> <p>22</p> <p>Ti</p> <p>Titan</p> </div> <div> <p>23</p> <p>V</p> <p>Vanadium</p> </div> <div> <p>24</p> <p>Cr</p> <p>Chrom</p> </div> <div> <p>25</p> <p>Mn</p> <p>Mangan</p> </div> <div> <p>26</p> <p>Fe</p> <p>Eisen</p> </div> <div> <p>27</p> <p>Co</p> <p>Kobalt</p> </div> <div> <p>28</p> <p>Ni</p> <p>Nickel</p> </div> <div> <p>29</p> <p>Cu</p> <p>Kupfer</p> </div> <div> <p>30</p> <p>Zn</p> <p>Zink</p> </div> </div>										N	
5	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>37</p> <p>Rb</p> <p>Rubidium</p> </div> <div> <p>38</p> <p>Sr</p> <p>Strontium</p> </div> </div>																<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>39</p> <p>Y</p> <p>Yttrium</p> </div> <div> <p>40</p> <p>Zr</p> <p>Zirkon</p> </div> <div> <p>41</p> <p>Nb</p> <p>Niob</p> </div> <div> <p>42</p> <p>Mo</p> <p>Molybdän</p> </div> <div> <p>43</p> <p>Tc</p> <p>Technetium</p> </div> <div> <p>44</p> <p>Ru</p> <p>Ruthenium</p> </div> <div> <p>45</p> <p>Rh</p> <p>Rhodium</p> </div> <div> <p>46</p> <p>Pd</p> <p>Palladium</p> </div> <div> <p>47</p> <p>Ag</p> <p>Silber</p> </div> <div> <p>48</p> <p>Cd</p> <p>Cadmium</p> </div> </div>										O	
6	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>55</p> <p>Cs</p> <p>Cäsium</p> </div> <div> <p>56</p> <p>Ba</p> <p>Barium</p> </div> </div>																<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>57-71</p> <p>Lanthanide</p> </div> <div> <p>72</p> <p>Hf</p> <p>Hafnium</p> </div> <div> <p>73</p> <p>Ta</p> <p>Tantal</p> </div> <div> <p>74</p> <p>W</p> <p>Wolfram</p> </div> <div> <p>75</p> <p>Re</p> <p>Rhenium</p> </div> <div> <p>76</p> <p>Os</p> <p>Osmium</p> </div> <div> <p>77</p> <p>Ir</p> <p>Iridium</p> </div> <div> <p>78</p> <p>Pt</p> <p>Platin</p> </div> <div> <p>79</p> <p>Au</p> <p>Gold</p> </div> <div> <p>80</p> <p>Hg</p> <p>Quecksilber</p> </div> </div>										P	
7	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>87</p> <p>Fr</p> <p>Francium</p> </div> <div> <p>88</p> <p>Ra</p> <p>Radium</p> </div> </div>																<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>89-103</p> <p>Actinide</p> </div> <div> <p>104</p> <p>Rf</p> <p>Rutherfordium</p> </div> <div> <p>105</p> <p>Db</p> <p>Dubnium</p> </div> <div> <p>106</p> <p>Sg</p> <p>Seaborgium</p> </div> <div> <p>107</p> <p>Bh</p> <p>Berkelium</p> </div> <div> <p>108</p> <p>Hs</p> <p>Hassium</p> </div> <div> <p>109</p> <p>Mt</p> <p>Moscovium</p> </div> <div> <p>110</p> <p>Ds</p> <p>Darmstadtium</p> </div> <div> <p>111</p> <p>Rg</p> <p>Röntgenium</p> </div> <div> <p>112</p> <p>Cn</p> <p>Copernicium</p> </div> </div>										Q	

Metalle	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	
Nichtmetalle	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	
Übergangsmetalle	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	
Elemente der f-Reihe	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	
Actinide	Actinide	Thorium	Protactinium	Uran	Neptunium	Plutonium	Americium	Curium	Berkelium	Californium	Einsteinium	Fermium	Mendelevium	Nobelium	Lanthanum

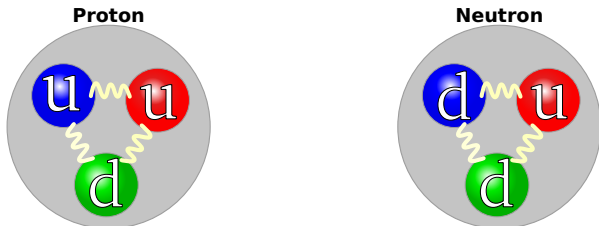
Quelle: basf.ch

- Atom (von griechisch  $\alpha\tau\omicron\mu\omicron\varsigma$  – das Unteilbare)  
→ aber Periodensystem hat eine gut sichtbare Struktur
- Thomsonsches Atommodell (Rosinenkuchenmodell)  
→ Thomson hat im Jahr 1897 das Elektron in Kathodenstrahlen “entdeckt”  
→ Atom ist positiv geladene Masse, in der sich negativ geladene Elektronen bewegen
- Rutherford'sches Atommodell (fast alle Masse im Kern)  
→ Rutherford'scher Streuversuch im Jahr 1909



Quelle: wikipedia.org

- Keine Substruktur für das Elektron bekannt  
→ auch bei den höchsten Energien wird das Elektron immer noch als Punktteilchen gesehen
- Der Atomkern besteht aus
  - Protonen und Neutronen
  - welche wiederum aus up- und down-Quarks bestehen→ noch keine Substruktur der Quarks gefunden



Quelle: wikipedia.org

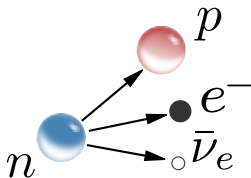
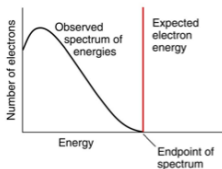


<b>“Teilchen”</b>	<b>Größenordnung</b>
Materie	$\sim 10^{-2}$ m
Molekül	$\sim 10^{-9}$ m
Atom	$\sim 10^{-10}$ m
Atomkern	$\sim 10^{-14}$ m
Proton	$\sim 10^{-15}$ m
Quark	$< 10^{-18}$ m

- Beobachtung des  $\beta$ -Zerfalls zeigt, dass etwas fehlt

→  $\beta$ -Zerfall heisst z.B. ein freies Neutron zerfällt in ein Proton und ein Elektron

→ wir nehmen an, dass das Proton in Ruhe ist und schauen die Energie der Elektronen an



- Wolfgang Pauli postuliert im Jahr 1930 das *Neutrino*

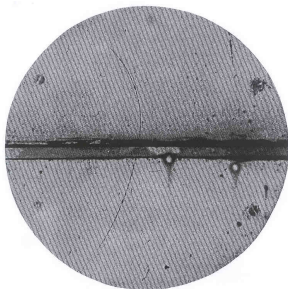
→ erst im Jahr 1956 experimentell nachgewiesen

- Im Jahr 1936 wird ein “Kopie” des Elektrons entdeckt  
→ gleiche Eigenschaften wie das Elektron aber 200x schwerer
- In den nächsten Jahrzehnten diverse weitere Teilchen  
→ z.B. ein weiteres Lepton ( $\tau$ ) sowie eine zweite und dritte Quark-Generation

Drei Generationen  
der Materie (Fermionen)

	I	II	III
Masse	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV
Ladung	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Name	u up	c charm	t top
Quarks	d down	s strange	b bottom
	$\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	$\nu_e$ Elektron- Neutrino	$\nu_\mu$ Myon- Neutrino	$\nu_\tau$ Tau- Neutrino
Leptonen	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV
	-1	-1	-1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	e Elektron	$\mu$ Myon	$\tau$ Tau

- Paul Dirac postuliert im Jahr 1926 *Anti-Materie*
  - zu jedem Teilchen soll es ein Anti-Teilchen geben mit gleicher Masse aber umgekehrter Ladung
  - dies verdoppelt die Anzahl der Elementarteilchen (Darstellung meistens nicht doppelt)
- Erster Nachweis eines Anti-Teilchens im Jahr 1932
  - zwar kann er in der kosmischen Strahlung ein Positron (Anti-Elektron) nachweisen



# Welche Kräfte wirken zwischen diesen Bausteinen?

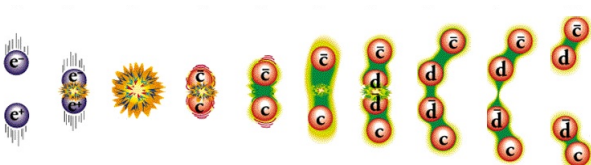
- Elektromagnetische Wechselwirkung  
→ sonst würde das Elektron nicht um den Kern kreisen (keine Atome)
- Schwache Wechselwirkung  
→ sonst würde die Sonne nicht “funktionieren”
- Starke Wechselwirkung  
→ sonst würde der Atomkern nicht zusammenhalten
- Gravitation  
→ sonst würde die Erde nicht um die Sonne kreisen

- Neue Vorstellung von Kraft (Wechselwirkungsprinzip)

→ Kräfte werden durch "Botenteilchen" übertragen; diese nennt man Wechselwirkungs-Bosonen

<b>Wechselwirkung</b>	<b>Ladung</b>	<b>Boson</b>	<b>Relative Stärke</b>
Elektromagnetische	elektrisch	Photon ( $\gamma$ )	$10^{-2}$
Schwache	schwache	$W^+, W^-, Z^0$	$10^{-15}$
Starke	Farb-	Gluon (g)	1
Gravitation	Masse(?)	Graviton??	$10^{-41}$

- Die Eichbosonen der schwachen Kraft sind massiv  
→ d.h. Masse  $\neq 0$ ; deshalb ist die Kraft so schwach
- Starke Kraft verhält sich ungewohnt  
→ die uns vertrauten Kräfte werden schwächer bei grösserer Entfernung ( $F \sim \frac{1}{r^2}$ )  
→ die starke Kraft wird stärker, je weiter sich die Teilchen voneinander entfernen  
→ Quarks kommen deshalb immer nur in gebundenen Zuständen vor





# Das Standardmodell (SM)

Drei Generationen der Materie (Fermionen)

	I	II	III		
Masse	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV	0	? GeV
Ladung	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
Name	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	$\gamma$ Photon	<b>H</b> Higgs Boson
Quarks	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> Gluon	
Leptonen	<2,2 eV	<0,17 MeV	<15,5 MeV	91,2 GeV	
	0	0	0	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	$\nu_e$ Elektron-Neutrino	$\nu_\mu$ Myon-Neutrino	$\nu_\tau$ Tau-Neutrino	$Z^0$ Z Boson	
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV	
	-1	-1	-1	$\pm 1$	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b>e</b> Elektron	<b><math>\mu</math></b> Myon	<b><math>\tau</math></b> Tau	<b><math>W^+</math></b> W Boson	

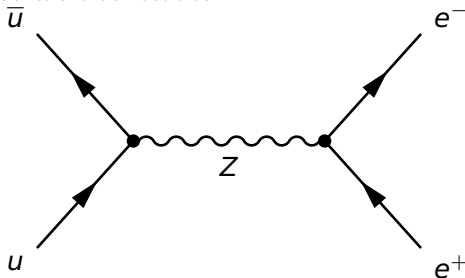
## Wir suchen

- 4. Generation
- Erklärung der Struktur

- Materie besteht aus Elektronen, Neutronen und Protonen  
→ d.h. genauer aus Elektronen, up und down Quarks
- Andere Teilchen sind “unsichtbar” ...
  - das heisst sie wechselwirken nicht mit dem Detektor  
→ z.B. Neutrinos
- ... oder sind nicht stabil
  - kann ein Teilchen zerfallen so geschieht dies
  - schwere Teilchen zerfallen in leichtere Teilchen  
→ es gibt verschiedenste Regeln, welche Zerfälle “erlaubt” sind und welche nicht

- Wichtige “mathematische”/ “theoretische” Beschreibung

→ wir brauchen sie heute nur als “Ablaufbilder”



- Wir “lesen” von **links nach rechts**

→ ein Quark und ein Anti-Quark erzeugen ein  $Z$

→ dieses zerfällt dann sofort in ein Elektron und ein Positron

- Das SM hat sogenannte *freie Parameter*  
→ d.h. gewisse (Zahlen-)Werte werden vom mathematischen Modell nicht vorhergesagt
- Das SM hat nur masselose Teilchen . . .  
→ . . . solange der Higgs-Mechanismus nicht bestätigt ist.
- Das SM hat diverse andere Schwachstellen  
→ Details siehe später

## Status vor LHC-Start

- Das Higgs-Boson  
→ oder andere bisher unbekannte Teilchen
- Supersymmetry  
→ d.h. jedes Fermion hat ein neues Boson als Partnerteilchen und umgekehrt
- Dunkle Materie  
→ Aus der Astrophysik wissen wir, dass mehr als die sichtbare Materie vorhanden sein muss

## Status heute

- Neues SM-ähnliches Higgs-Boson entdeckt  
→ mit einer Masse von ungefähr  $m = 125 \text{ GeV}$

- Gibt es eine einheitliche Theorie für alle Kräfte?
  - wir haben eine extrem gut getestete Theorie, die elektromagnetische und schwache WW beschreibt
  - zuerst Integration der starken Wechselwirkung (Grand Unification)
  - dann evtl. auch Beschreibung der Gravitation durch Teilchenwechselwirkung (Quantum Gravity)
- Gibt es zusätzliche Dimensionen?
- Warum gibt es mehr Materie als Anti-Materie?
- ...? (Überraschungen)

# Das Higgs-Boson



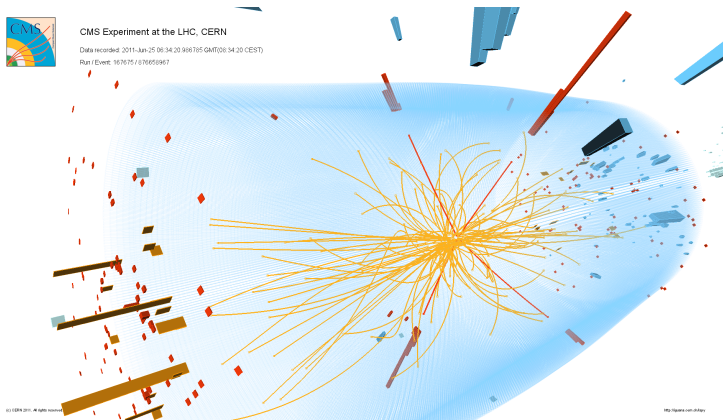
- Higgs-Mechanismus 1964 von Peter Higgs postuliert
  - beschreibt wie die Masse auf Ebene der Elementarteilchen zustande kommt
  - Masse kommt durch eine ungerichtete Kraft zustande, die das Higgs-Feld auf die Teilchen auswirkt
- Higgs-Boson ist das Quantum zum Higgs-Feld
  - z.B. ist das Photon ( $\gamma$ ) das Quantum zum elektromagnetischen Feld
  - d.h. ein Lichtstrahl kann nicht beliebig schwach sein, sondern besteht aus einer bestimmten Zahl  $\gamma$ 's
- Higgs zerfällt sehr schnell (Halbwertszeit ca.  $10^{-22}$  s)
  - z.B. zerfällt es in zwei Z, die dann jeweils in ein Elektron und ein Positron zerfallen können



CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2011-Jan-25 06:34:20 949785 GMT(06:34:20 CEST)

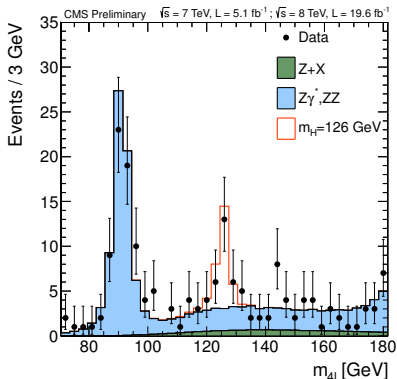
Run (Event: 167675 / 676658967)



© CERN 2011. All rights reserved.

ETH Institute for Particle Physics

- Mit Energie-/Impulserhaltung können wir “zurückrechnen”
  - gibt uns eine Masse des Higgs-Kandidaten
  - diese können wir nun mit unserem Modell (Simulationen) vergleichen

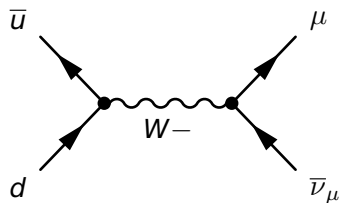
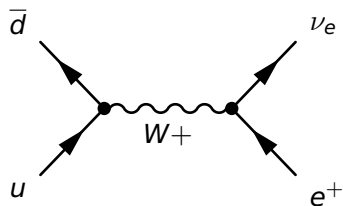


- Physiker interessiert nur das Higgs-Teilchen
- Das Higgs-Teilchen heisst offiziell auch Gottesteilchen
- Der Higgs-Mechanismus erzeugt unser gesamtes Gewicht
- Das Higgs-Teilchen hat etwas mit der Gravitation zu tun
- “Ohne” das Higgs-Feld gäbe es keine Atome

- Physiker interessiert nur das Higgs-Teilchen  
→ **Nein**, sondern vor allem das Higgs-Feld und der -Mechanismus
- Das Higgs-Teilchen heisst offiziell auch Gottesteilchen  
→ **Nein**, das benutzen nur die Medien
- Der Higgs-Mechanismus erzeugt unser gesamtes Gewicht  
→ **Nein**, nur (einige) Elementarteilchenmassen; der grösste Teil der Masse kommt von Bindungsenergien
- Das Higgs-Teilchen hat etwas mit der Gravitation zu tun  
→ **Nein**, Gravitation beeinflusst alle Masse nicht nur Elementarteilchenmassen
- “Ohne” das Higgs-Feld gäbe es keine Atome  
→ **Ja**, denn die Elektronen wären masselos und würden sich mit  $c$  bewegen und nicht um Kerne kreisen

## Wichtig für heute: W und Z

- Heute Nachmittag schauen wir W- und Z-Bosonen an
  - das sind schwere Teilchen, d.h. sie zerfallen
  - im Detektor werden wir also nur Zerfallsprodukte sehen
- Genauer konzentrieren wir uns auf  $W \rightarrow l\nu$  und  $Z \rightarrow ll$ 
  - was gibt es hier alles für Varianten?
- Damit können wir einige interessante SM-Tests machen
  - z.B. können wir die Masse vom Z bestimmen
  - z.B. ob das W öfter in ein Elektron (+ Neutrino) oder ein Muon (+ Neutrino) zerfällt
  - mehr dazu im Verlauf des Tages





# Fragen