

# Symmetriebrechung

Kevin Diekmann

5.6.2013

# Inhaltsverzeichnis

- 1 Symmetrien
  - Allgemeines
  - Noether-Theorem
- 2 Symmetriebrechung
  - spontane
  - explizite
- 3 CP-Verletzung
  - Kaon-Zerfall
- 4 Vorhersage neuer Quarks
  - Nobelpreis 2008
  - Folgerungen

# Symmetrien

*Ein Ding ist symmetrisch, wenn wir etwas mit ihm machen können, sodass es danach genauso aussieht wie zuvor. -*

Hermann Weyl

- Unterscheide:
  - diskrete Symmetrien, zB Spiegeln
  - kontinuierliche Symmetrien, zB Verschiebung in der Zeit
- mathematische Beschreibung über Gruppentheorie

# Wichtige diskrete Symmetrieoperationen

- $C : q \mapsto -q$
- $P : x \mapsto -x$
- $T : t \mapsto -t$
- Kombinationen:  $CP$ ,  $CPT$

# Noether-Theorem

Emmy Noether 1918:

*Zu jeder kontinuierlichen Symmetrie eines physikalischen Systems gehört eine Erhaltungsgrösse.*

Beispiele:

- $t \mapsto t' = t + \Delta t \Rightarrow$  Energieerhaltung
- $x \mapsto x' = x + \Delta x \Rightarrow$  Impulserhaltung
- Eichtransformation  $\Rightarrow$  Ladungserhaltung

# Definition Spontane Symmetriebrechung

Spontane Symmetriebrechung liegt vor, wenn ein System aus einem symmetrischen Zustand in den Grundzustand übergeht, der nicht mehr symmetrisch ist.

$$S(E_1) = E_1 \mapsto E_0 \neq S(E_0)$$

# Beispiele spontaner Symmetriebrechung

- spontane Magnetisierung beim Ferromagneten
- Higgs Mechanismus und Higgs-Boson

# Explizite Symmetriebrechung

- P-Verletzung der schwachen Wechselwirkung beim  $\beta$ -Zerfall
- C-Verletzung bei Fusion von Neutron und Proton

# Grundlagen Teilchenphysik um 1960

- Alle stabile Materie besteht aus  $u, d, e^-, \nu_e$
- schwerere Teilchen zerfallen
- strange-Quark  $s$  bekannt

# schwache Wechselwirkung

- sehr kurze Reichweite
- Grund für Zerfälle und Umwandlungen von Teilchen
- Austauscheteilchen  $W^{\pm}, Z^0$
- respektiert Paritätstrafo nicht

# Das Kaon

- Meson
- besteht aus zwei Quarks:  
 $K^0 = d\bar{s}$
- 1947 in der Höhenstrahlung entdeckt

# Kaon-Zustände (1955)

- Betrachte  $K^0$  und  $\bar{K}^0$  bzgl. schwacher WW
- messe physikalische Zustände  $K_S^0$  und  $K_L^0$ 
  - ⇒ Eigenzustände von  $CP$
  - ⇒ Linearkombinationen von  $K^0$  und  $\bar{K}^0$ 
    - $|K_S^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle)$
    - $|K_L^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle)$

# Kaon-Zerfall (1955)

- Zerfallsprodukte des Kaon müssen ebenfalls CP-invariant sein
- theoretische Phasenraumbetrachtung und Experiment liefern:

$$K_S^0 \rightarrow 2\pi$$

$$K_L^0 \rightarrow 3\pi$$

- Lebensdauerunterschied: Faktor 600

# Überraschung 1964

- $K_L^0$  zerfällt mit geringer Wahrscheinlichkeit ebenfalls in zwei Pionen!

$$K_L^0 \rightarrow 2\pi$$

- $\Rightarrow$  physikalische Zustände sind Mischungen aus  $|K_L^0\rangle$  und  $|K_S^0\rangle$
- $\Rightarrow |K_L^0\rangle$  und  $|K_S^0\rangle$  sind keine EZ von  $CP$
- Bruch der CP-Symmetrie!  $\curvearrowright$  Nobelpreis für Fitch & Cronin 1980

- Rettung des Formalismus: Einführung imaginärer Anteile
- ...  $\Rightarrow$  beschreibende Matrix muss komplexen Anteil haben!

## Die Arbeit von Kobayashi & Maskawa 1972



- unitäre CKM-Matrix mit  $2n^2 - n^2 - (2n - 1) = (n - 1)^2$  Freiheitsgraden
- beschreibt Übergänge zwischen Quarks durch WW mit Z-Boson
- bei  $n = 3$  entsteht die gesuchte komplexe Phase
- $\Rightarrow$  Es muss (mindestens) drei Generationen von Quarks geben, damit die CP-Verletzung beobachtet werden kann!

# Bestätigung der Theorie

- 1974 charm-quark  $c$
- 1975 dritte Leptonengeneration
- 1977 bottom-quark  $b$
- 1994 top-quark  $t$
- 2001 CP-Verletzung bei B-Mesonen bestätigt
- 2002 konkurrierende Theorie (Wolfenstein: super-schwache Kraft) falsifiziert
- 2008 Nobelpreis für Kobayashi, Maskawa & Nambu

# Standardmodell heute

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	<b>γ</b> Photon	<b>H</b> Higgs Boson
	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>Quarks</b>	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> Gluon	
	<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	
	<b>ν<sub>e</sub></b> Elektron- Neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> Myon- Neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> Tau- Neutrino	<b>Z<sup>0</sup></b> Z Boson	
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV	
	-1	-1	-1	±1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
<b>Leptonen</b>	<b>e</b> Elektron	<b>μ</b> Myon	<b>τ</b> Tau	<b>W<sup>±</sup></b> W Boson	<b>Eichbosonen</b>

# Weitere Folgerung der CP-Verletzung

Andrei Sakharov (Friedensnobelpreis 1975)  
Baryonenasymmetrie: Ansatz zu Erklärung der  
Materie-Antimaterie-Asymmetrie

# Zusammenfassung

- Symmetrien spielen in allen Gebieten der Physik eine wichtige Rolle
  - ↪ Erhaltungssätze
- (spontan) gebrochene Symmetrien sind Ursache grundlegender Eigenschaften unseres Universums
  - ↪ Higgs-Mechanismus
  - ↪ Existenz von sechs Quarks
  - ↪ mehr Materie als Antimaterie
- Symmetriebrechung ist somit hochaktuelles Forschungsthema

# Quellen

<http://particleadventure.org/german/frameless/weak.html>

<http://kworkquark.desy.de/lexikon/lexikon.strangequark/1/>

<http://www.aip.org/pnu/2003/split/633-2.html>

[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard\\_Model\\_of\\_Elementary\\_Particles.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard_Model_of_Elementary_Particles.svg)

[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2008/](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2008/)