

KAPITEL I

Teilchenzoo: eine Übersicht

-
- I.1 **Inventar der Elementarteilchen** 3
 - I.1.1 **Leptonen** 3
 - I.1.2 **Quarks** 3
 - I.1.3 **Austauschteilchen** 4
 - I.1.4 **Higgs-Boson** 4
 - I.2 **Zusammengesetzte Teilchen** 4
 - I.3 **Teilcheneigenschaften** 4
 - I.3.1 **Außere Freiheitsgrade** 4
 - I.3.2 **Innere Freiheitsgrade** 4
-

In diesem (noch zu ergänzenden, insbesondere mit weiteren Beispielen) Kapitel werden zunächst die nach unserem heutigen (Herbst 2019) Wissen bekannten Elementarteilchen sowie deren Wechselwirkungen vorgestellt (Abschn. I.1). Dann werden in Abschn. I.3 die Eigenschaften von (Elementar)Teilchen eingeführt.

Liste der experimentell beobachteten Teilchen in der *Review of Particle Properties* [1], online verfügbar unten <https://pdg.lbl.gov>

I.1 Inventar der Elementarteilchen

I.1.1 Leptonen

I.1.1 a Elektrisch geladene Leptonen

Mit elektrischer Ladung $Q = -1$:

Elektron e^- — stabil, Masse $m_e \simeq 0,511 \text{ MeV}/c^2$

Myon μ^- — instabil, Masse $m_\mu \simeq 106 \text{ MeV}/c^2$

Tauon (oder Tau-Lepton) τ^- — instabil, Masse $m_\tau \simeq 1777 \text{ MeV}/c^2$

Jeweilige Antiteilchen: e^+ (*Positron*), μ^+ (Antimyon), τ^+ (Antitauon)

kollektive Bezeichnungen: für ein beliebiges geladenes Lepton: ℓ^- , Antilepton: ℓ^+

I.1.1 b Elektrisch neutrale Leptonen: Neutrinos

Elektron-Neutrino ν_e , Myon-Neutrino ν_μ , Tauon-Neutrino ν_τ

Antiteilchen: Elektron-Antineutrino $\bar{\nu}_e$, Myon-Antineutrino $\bar{\nu}_\mu$, Tauon-Antineutrino $\bar{\nu}_\tau$

I.1.2 Quarks

6 *Flavors*: u (Up), d (Down), s (Strange), c (Charm), b (Bottom), t (Top) — in Anordnung nach wachsender Masse.

Jedes Quark (q) eines gegebenen Flavors kann in drei sogenannten *Farben* (oft als rot, blau, grün bezeichnet, obwohl diese Farben nichts mit Licht irgendeiner Wellenlänge zu tun hat) vorkommen.

Antiquarks \bar{u} , \bar{d} , \bar{s} , \bar{c} , \bar{b} , \bar{t} .

I.1.3 Austauschteilchen

3 relevante Wechselwirkungen:⁽²⁾ elektromagnetische; starke; schwache

In einer quantisierter Beschreibung, werden durch sog. *Austauschteilchen* (oder auch *Eichbosonen*) vermittelt:

- in der Quantenelektrodynamik (QED): Photon γ
koppelt nur an elektrisch geladenen Teilchen / Antiteilchen
- in der Quantenchromodynamik (QCD): 8 Gluonen g
koppeln nur an farbgeladenen Teilchen / Antiteilchen, d.h. Quarks und Gluonen. Nicht an Leptonen
- in der schwachen Wechselwirkung (manchmal: Quantenflavordynamik, QFD): W^+ , W^- , Z^0
koppeln an allen bekannten Teilchen / Antiteilchen

Das Photon, das Z^0 -Boson und jedes Gluon sind ihre eigenen Antiteilchen. Das W^+ und das W^- sind „ladungskonjugiert“ zu einander

I.1.4 Higgs-Boson

h

I.2 Zusammengesetzte Teilchen

nur durch Gluonen gebundene Zustände aus Quarks und Antiquarks (nicht Top) sind bekannt:

- *Baryonen*: bestehen aus 3 Quarks / 3 Antiquarks (im naiven Quark-Modell)
z.B. Proton (p): uud ; Neutron (n): udd ; Antiproton $\bar{p} = \bar{u}\bar{u}\bar{d}$, usw.
- *Mesonen*: bestehen aus einem Quark und einem Antiquark
z.B. Pionen (geladene: $\pi^+ = u\bar{d}$, $\pi^- = d\bar{u}$; neutrales: π^0)
- „Exotica“: Tetraquarks? Pentaquarks? Glueballs?

I.3 Teilcheneigenschaften

I.3.1 Äußere Freiheitsgrade

Masse $m \geq 0$

für instabile Teilchen: mittlere Lebensdauer τ ; Zerfallsrate Γ

Zerfallskanäle mit den partiellen Zerfallsraten Γ_i oder äquivalent den Verzweungsverhältnissen⁽³⁾ Γ_i/Γ

wichtig, denn die erlaubten Kanäle spiegeln die Wechselwirkungen wider.

Antiteilchen haben gleiche Masse und Lebensdauer wie die dazugehörigen Teilchen

⁽²⁾ Gravitation vernachlässigbar zwischen Teilchen

⁽³⁾ Auf Englisch: branching ratio (BR)

I.3.2 Innere Freiheitsgrade

I.3.2a J^{PC}

Spin J : entweder Bosonen mit ganzzahligem $J \in \{0, 1, 2, \dots\}$ oder Fermionen mit halbzahligen Spin $J \in \{\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots\}$

Quarks und Leptonen haben Spin $\frac{1}{2}$; Photon, Gluonen, W^\pm und Z^0 haben Spin 1; Higgs-Boson hat Spin 0

Spinaddition-Regel: Baryonen (und Pentaquarks) haben einen halbzahligen Spin (z.B. $\frac{1}{2}$ für p und n), Mesonen (und Tetraquarks und Glueballs) einen ganzzahligen (z.B. $J = 0$ für die Pionen π^+ , π^- , π^0)

Parität $P = 1$ oder -1 (oder kürzer $+$ oder $-$).

entspricht dem Eigenwert unter dem Paritätsoperator \hat{P} (Transformation $\vec{r} \rightarrow -\vec{r}$)

z.B. Quarks haben Parität $+$; Pionen haben Parität $-$; das Photon und die Gluonen haben Parität $-$

Ladungskonjugation $C = \pm 1$

entspricht dem Eigenwert unter dem Ladungskonjugationsoperator \hat{C} (transformiert ein Teilchen in sein Antiteilchen)

z.B. das neutrale Pion π^0 hat $C = +$; das Photon hat $C = -$

P und C sind nur dann definiert, wenn das Teilchen Eigenvektor zum entsprechenden Operator ist, d.h. nicht immer. Insbesondere nicht für Leptonen, während für Quarks nur P definiert ist

zusammenfassende Notation: J^P , J^{PC}

Antiteilchen haben den gleichen Spin und — falls sie definiert sind — die gleichen Parität und Ladungskonjugation wie die dazugehörigen Teilchen

I.3.2b Additive Quantenzahlen

Alle diese Quantenzahlen sind bei Antiteilchen entgegengesetzt zu denen der dazugehörigen Teilchen

Elektrische Ladung

Q

wird in Einheiten von der Elementarladung angegeben

-1 für die geladenen(!) Leptonen; $+\frac{2}{3}$ für die u -, c - und t -Quarks; $-\frac{1}{3}$ für die d -, s - und b -Quarks

Leptonen- und Baryonenzahl

Leptonenzahl \mathcal{L} : $+1$ für die Leptonen (s. § I.1.1), -1 für deren Antiteilchen, 0 sonst

Baryonenzahl \mathcal{B} : $+\frac{1}{3}$ für die Quarks, $-\frac{1}{3}$ für die Antiquarks, 0 für die anderen Elementarteilchen

Additivität: Baryonen — insbesondere Protonen und Neutronen — haben $\mathcal{B} = +1$, Mesonen $\mathcal{B} = 0$

Flavor-Quantenzahlen

- Isospin I_3 (oder I , z.B. in der Review of Particle Physics): $+\frac{1}{2}$ für u -Quarks, $-\frac{1}{2}$ für d -Quarks, 0 sonst.

Additivität: Protonen haben Isospin $+\frac{1}{2}$, Neutronen $-\frac{1}{2}$.

- Strangeness S : -1 für das s -Quark, 0 sonst
- Charm(ness) C : $+1$ für das c -Quark, 0 sonst
- Bottomness / Beauty B : -1 für das b -Quark, 0 sonst
- Topness T : $+1$ für das t -Quark, 0 sonst. Wird nie benutzt

Bemerkung: Dass die Strangeness des s -Quarks und die Beauty des b -Quarks -1 betragen ist rein konventionell — und hängt mit ihrer negativen elektrischen Ladung zusammen.