

1.2. Einheiten

Energie

$$\text{SI: } J = \text{kg} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$\begin{aligned} \text{Teilchenphysik: } eV &= \text{Energie einer Elementarladung durch eine Spannung von 1 Volt} \\ &= 1.602 \times 10^{-19} \text{ C V} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J} \\ \text{GeV} &= 10^9 eV = 1.602 \times 10^{-10} \text{ J} \end{aligned}$$

Impuls

$$\text{SI: } [\vec{p}] = \text{kg} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{Teilchenphysik: } E = \sqrt{(mc^2)^2 + |\vec{p}c|^2}$$

$$\text{Wir nehmen die Kombination } \vec{p}c \text{ als den neuen Impuls: } \vec{p}_{\text{neu}} \equiv \vec{p}_{\text{alt}}c; \quad [\vec{p}_{\text{neu}}] = \text{GeV}.$$

Masse

$$m_{\text{neu}} \equiv m_{\text{alt}}c^2; \quad [m_{\text{neu}}] = \text{GeV} \Rightarrow E = \sqrt{m_{\text{neu}}^2 + |\vec{p}_{\text{neu}}|^2}$$

Geschwindigkeit

$$v_{\text{neu}} = \frac{p_{\text{neu}}}{E} = \frac{p_{\text{alt}}c}{E} = \frac{v_{\text{alt}}}{c} \equiv \beta_{\text{alt}}!$$

Lebensdauer

$$[\tau] = \text{s}$$

Zerfallsrate

$$\Gamma \equiv \frac{1}{\tau}, \quad [\Gamma] = \frac{1}{\text{s}}.$$

Distanz

$$[l] = \text{fm} = \text{fermi} = 10^{-15} \text{ m}.$$

In der Quantenmechanik entspricht jede Distanz einem Impuls:

$$\vec{p}_{\text{alt}} = \hbar \vec{k} = \hbar \frac{2\pi}{\lambda_{\text{alt}}} \hat{e}_{\vec{k}}, \quad \hbar = h/2\pi, \quad h = \text{Plancksche Konstante}.$$

Mit Hilfe von \hbar können Distanzen also in gleichen Einheiten wie Impulsen ausgedrückt werden. Die letzteren konvertiert man wiederum mit c ins GeV. Also:

$$l_{\text{neu}} \equiv \frac{l_{\text{alt}}}{\hbar c}, \quad \text{z.B.} \quad \frac{\text{fm}}{\hbar c} = \frac{10^{-15} \text{ m}}{1.0546 \times 10^{-34} \text{ Js} \times 2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}} = \frac{1}{197.3 \text{ MeV}}.$$

Zum Erinnerung: “GeV \times fm \approx 5”.

Zerfallsrate erneut: Mit \hbar kommt man auch von 1/s zum GeV:

$$\Gamma_{\text{neu}} \equiv \hbar \Gamma_{\text{alt}}, \quad \text{z.B.} \quad (10^{-23} \text{ s})^{-1} \hbar = 10^{23} \times 1.0546 \times 10^{-34} \text{ J} = 65.8 \text{ MeV}.$$

Temperatur

$$T_{\text{neu}} \equiv k_B T_{\text{alt}}, \quad \text{z.B.} \quad 10^4 \text{ K} \times k_B = 10^4 \text{ K} \times 1.380 \times 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}} = 0.861 \text{ eV}.$$

Wenn alle Gleichungen mit den neuen Größen geschrieben werden, hat alles die Dimensionalität der Energie, und die Konstanten \hbar, c, k_B tauchen nicht mehr auf! Diese Einheiten werden die *natürlichen Einheiten* bzw. die Konvention “ $\hbar = c = k_B = 1$ ” genannt.

1.3. Teilchenzoo

Schauen wir uns jetzt genauer an, was für Teilchen und mit welchen Eigenschaften heute bekannt sind. Die "offizielle" Liste: pdg.lbl.gov [Particle Data Group].

Was für Eigenschaften hat ein Elementarteilchen?

(1) Masse

(2) Zerfallsrate / Lebensdauer

(3) **Zerfallsweise**

Die ganze Dynamik des Standardmodelles ist sichtbar in durch welchen *Kanal* ein Teilchen zerfällt. Dies wird natürlich durch die Art (stark, schwach, elektromagnetisch) und genaue Form der Wechselwirkungen, an denen das Teilchen sich beteiligt, bestimmt. Wir können diese Eigenschaften als die *innere Struktur* des Teilchens bezeichnen. Um einige Aspekte der inneren Struktur zu beschreiben, führen wir ein:

(4) **Quantenzahlen**

- Eigendrehimpuls = Spin J
Fermionen: $J = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$
Bosonen: $J = 0, 1, \dots$
- Elektrische Ladung Q (in Einheiten von e)
- Parität $P = \pm 1$, Ladungskonjugation $C = \pm 1$
- Flavor-Quantenzahlen: \star Isospin $I_3 = +\frac{1}{2}$ (u), $-\frac{1}{2}$ (d), oder Additionen davon.
 - \star Strangeness $S = -1$ (s), 0 für alle anderen.
 - \star Charmness $C = +1$ (c), 0 für alle anderen.
 - \star Bottomness $B = -1$ (b), 0 für alle anderen.
 - \star Topness $T = +1$ (t), 0 für alle anderen.
- Leptonzahl $L = +1$ für $e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$; 0 für alle anderen.
- Baryonzahl $B = +\frac{1}{3}$ für u, d, c, s, t, b ; 0 für alle anderen.

Einige von diesen Quantenzahlen sind *exakt* in allen bekannten Reaktionen erhalten, andere nur in starken Wechselwirkungen.

Antiteilchen (entweder wie $\bar{p}, \bar{n}, \bar{\nu}_e$ oder wie e^+, μ^+ bezeichnet) haben dieselbe Masse, Zerfallsrate und Spin wie die Teilchen, aber die anderen Quantenzahlen sind in der Regel entgegengesetzt.

Leptonen

≡ Teilchen, die die starke Wechselwirkung gar nicht fühlen können.

Teilchen	Masse	Lebensdauer	Zerfallskanal	Quantenzahlen
e^-	0.511 MeV	$> 4.6 \times 10^{26}$ y	—	$J = +\frac{1}{2}, Q = -1, L = +1$
μ^-	105.7 MeV	2.2×10^{-6} s	$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$	$J = +\frac{1}{2}, Q = -1, L = +1$ [In guter Näherung sind L_e, L_μ <i>einzel</i> n erhalten \Leftrightarrow es gibt <i>zwei</i> Neutrinos.]
τ^-	1.78 GeV	2.9×10^{-13} s	$\tau^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau$ 17% $\tau^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\tau$ 18% $\tau^- \rightarrow \pi^- + \pi^0 + \nu_\tau$ 25% $\tau^- \rightarrow \pi^- + 2\pi^0 + \nu_\tau$ 9% \vdots	$J = +\frac{1}{2}, Q = -1, L = +1$
ν_e	< 3 eV			
ν_μ	< 0.19 MeV			
ν_τ	< 18.2 MeV			

Außerdem verlangen kosmologische Betrachtungen, daß gilt:

$$\sum_{i=e,\mu,\tau} m_{\nu_i} \lesssim 2 \text{ eV} .$$

Für Unterschiede der verschiedenen Neutrinomassen gibt es eigentliche Werte, z.B.

$$|m_{\nu_\mu}^2 - m_{\nu_\tau}^2| \approx (2 - 4) \times 10^{-3} \text{ eV}^2 .$$

Diese werden teilweise von astrophysikalischen Beobachtungen (z.B. ν 's aus der Sonne), aber auch von Beschleunigerexperimenten hergeleitet (Kapitel 9.2).

Hadronen

≡ Teilchen, die die starke Wechselwirkung fühlen.

Das Hadronenspektrum genau zu verstehen, ist vielleicht die größte theoretische Herausforderung der Teilchenphysik. Das Problem damit ist, daß Quarks nicht als frei Teilchen beobachtet werden, sondern wegen Einschluß (“Confinement”) als viele verschieden “gebundene Zustände” vorkommen.

	Teilchen	Masse	Struktur	Lebensdauer	Zerfallskanal
Mesonen ($m_u, m_d \lesssim 70$ MeV)					
$J = 0$	π^0	135 MeV	$\sim u\bar{u} - d\bar{d}$	8.4×10^{-17} s	2γ
	π^\pm	140 MeV	$u\bar{d}, d\bar{u}$	2.6×10^{-8} s	$\mu^+\nu_\mu$
	η	547 MeV	$\sim u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s}$	5.1×10^{-19} s	$2\gamma, 3\pi^0, \pi^0\pi^+\pi^-$
	η'	958 MeV	$\sim u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s}$	3.3×10^{-21} s	$\pi^+\pi^-\eta$
$J = 1$	ρ	776 MeV	$\sim u\bar{u} - d\bar{d}$	4.4×10^{-24} s	$\pi^0\pi^0, \pi^+\pi^-$
	ω	783 MeV	$\sim u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s}$	7.8×10^{-23} s	$\pi^+\pi^-\pi^0$
Strange Mesonen ($m_s \lesssim 250$ MeV)					
	K^0, \bar{K}^0	498 MeV	$d\bar{s}, s\bar{d}$	0.89×10^{-10} s	$\pi^0\pi^0, \pi^+\pi^-$
				5.2×10^{-8} s	$\pi^-e^+\nu_e, 3\pi^0$
	K^\pm	494 MeV	$u\bar{s}, s\bar{u}$	1.2×10^{-8} s	$\mu^+\nu_\mu, \pi^+\pi^0$
Charmed Mesonen ($m_c \lesssim 1800$ MeV)					
	D^0, \bar{D}^0	1864 MeV	$u\bar{c}, c\bar{u}$	4.1×10^{-13} s	$K^-\pi^+\pi^0$
	D^\pm	1869 MeV	$d\bar{c}, c\bar{d}$	1.0×10^{-12} s	$\bar{K}^0\mu^+\nu_\mu, \bar{K}^0\pi^+\pi^+\pi^-$
Quarkonium Mesonen ($m_b \sim 4$ GeV)					
	J/ψ	3097 MeV	$c\bar{c}$	7.6×10^{-21} s	$\mu^+\mu^-, \pi^+\pi^+\pi^-\pi^-\pi^0$
	Υ	9460 MeV	$b\bar{b}$	1.2×10^{-20} s	$\mu^+\mu^-, \tau^+\tau^-, \dots$
Baryonen					
$J = \frac{1}{2}$	p	938 MeV	uud	$> 2.1 \times 10^{29}$ y	
	n	940 MeV	udd	886 s	$p^+e^-\bar{\nu}_e$
$J = \frac{3}{2}$	Δ	1232 MeV	uud	5.4×10^{-24} s	$p^+\pi^0$
Strange Baryonen					
	Λ	1116 MeV	uds	2.6×10^{-10} s	$p^+\pi^-, n\pi^0$
“Exotika”					
	θ^+	1540 MeV	$udud\bar{s}$		
	Glueball	~ 1600 MeV	$ggg\dots$		

Usw, usw — hunderte von Teilchen! Wie erklärt man diese Vielfalt? Die sechs Quarks des Standardmodelles mögen viele sein, aber sind doch wesentlich weniger als hunderte von Teilchen!

	u	d	c	s	t	b
Q	$+\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$+\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$+\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$