

Vorlesung Elementarteilchenphysik

Gernot Alkemann

Kontakt: alkemann@physik.uni-bielefeld.de, 106-6202, E5-129

Vorlesungen: dienstags 8:30 - 10:00 in D01-249

freitags 12:30 - 14:00 in H6

Übungen: donnerstags 8-10 in D6-135 C. Jansen

16-18 in D6-135 P. Henkenjohann

Übungszettel u. Kopie des Skriptes: Webseite Ma-Phys Gruppe

→ teaching → Elementarteilchen

zum Bestehen: aktive Teilnahme an Übung & mündl. Prüfung

Literaturhinweise: D. Griffiths Elementarteilchenphysik

O. Nachtmann, Phänomene u. Konzepte der ν

N. Borghini, Vorlesungsskript → pers. Webseite

Wichtige Termine: Keine Vorlesungen am

24.10., 5.12. (Absolvententag), 12.12.,

* geplant: Exkursion zum Osy (zusammen mit der Vorlesung Kernphysik)

grobes Inhaltsverzeichnis:

- 1) Einführung
- 2) Relativistische QM freier Teilchen
- 3) Zerfälle und Streuung: wechselwirkende Teilchen
- 4) Quantenelektrodynamik
- 5) Starke WW
- 6) Schwache WW
- 7) Das Standardmodell der Elementarteilchen u. Erweiterungen

"Aus welchem kleinsten Baustein besteht die Materie?"

(→ atomos, Demokrit, 5 Jh v. Chr.)

• Ein paar Beispiele:

e^-	Elektron	[1897, Thomson]	} Bausteine d. Atome → Periodensystem d. Elemente
p	Proton	[1911, Rutherford]	
n	Neutron	[1932, Chadwick]	

e^+ Positron = Antielektron [1932 Anderson] } Antimaterie

μ Myon [1937, Anderson; Street] } instabile Teilchen

(radioaktive Atome sind ebenfalls instabil [M+P Curie] aber diese sind zusammengesetzt)

ν Neutrino [1930-53, Cowan, Reines] } Teilchen die (fast) nicht wechselwirken

ab dem 50er Jahren wird ein "Zoo" von Teilchen entdeckt

q quarks [1964 Gell-mann, Zweig] auch p und n sind zusammengesetzt

Liste aller bekannten (u. experimentell bestätigten) Elementarteilchen

3 Familien

von Fermionen
(alle spin $\frac{1}{2}$)

u up	c charm	t top	} Quarks (6 Flavours)
d down	s strange	b bottom	
e	μ	τ	} Leptonen
ν_e	ν_μ	ν_τ	

Higgs boson ϕ [Higgs, Brout, Englert]

Eidobosona die die WW vermitteln $\gamma, W^\pm, Z^0, G, (Graviton)$

m γ Photon - Elektromagnetische WW masselos

--- $W^{\pm} Z^0$ W- u Z-Bosonen - Träger der schwachen WW massiv! = Higgs Mechanismus

--- g Gluonen - Träger der starken WW masselos

[Graviton - Träger der Gravitation
→ [Vorlesung Gravitationswellen]

- alle diese Elementarteilchen tragen eine Vielzahl von Quantenzahlen: Ladung, Spin, Farbe, Strangeness etc. (später genauer)
- alle Teilchen WW unter Gravitation und schwacher Kraft
- nur geladene Teilchen WW elektromagnetisch
- alle aus Quarks (u. Gluonen) zusammengesetzten Teilchen = Hadronen WW unter der starken Kraft.

Hadronen / Mesonen, ganzzahlige Spin (z.B. π , K-Meson)
 \ Baryonen, halbzahlige Spin (z.B. p, n)

* die 4 Kräfte unterscheiden sich durch Stärke, Reichweite u. Objekte auf die sie wirken

Sind das alle Elementarteilchen die es gibt?

Kosmologie: \exists dunkle (Vakuum) Energie
und \exists dunkle Materie, d.h. nur gravitativ WW } ~70% in univ.


Kandidaten: zusätzliche schwere Neutrinos, exotische Teilchen (Axionen) supersymmetrische Partner, ...

Dies ist eines der wichtigsten offenen Probleme der Teilchenphysik!

Ziel dieser Vorlesung: Überblick über die Physik der Elementarteilchen (ET)

- welche (klassischen) Bewegungsgl. erfüllen die verschiedenen freie Felder: Klein-Gordon-, Dirac-, Maxwell-Gl und Vektorpot.
- die Physik der ET spielt sich bei hohen Energien ab
=> quantenmechanische und relativistische Effekte überlagern
- unter welchen Kräften wirken die einzelnen Felder?
-> das Standardmodell (SM) der ET verbindet alle 3 Kräfte (em, schwach, stark) in einer relativistischen

QM Theorie

- * wir lassen die Gravitation außen vor, auch wenn es physikalische Situationen gibt, in denen diese und das SM wichtig werden: schwarze Löcher, Urknall, ...
- es gibt Ansätze, Gravitation & SM zu einer Theorie zu vereinfachen, z.B. Stringtheorie: 3 kleinste räuml. Auflösungen, Teilchen leben auf Strings 
- Loop gravity,
- nichtperturbative Quantisierung der Gravitation ...
- wir werden einfache Streuung betrachten
-> die systematische, störungstheoretische Berechnung der verschiedenen WW ist Gegenstand der Quantenfeldtheorie, die wir nun ansatzweise schreiben

- in der QFT können Vorhersagen nur nach Besitzung von gewissen α durch Renormierung besitzigt werden (z.B. Vakuumenergie)

trotzdem erlaubt die QFT hochpräzise Vorhersagen ($QED > 10$ Stellen)

- ein wichtiges Ergebnis der QFT ist das die Kopplungskonstante der versch. WW von der betrachteten Energieskala abhängt!

z.B. asymptotische Freiheit der starken WW [Gross, Wilczek, Politzer]

- bei niedriger Energie $\alpha(s) \rightarrow 1$ $\lim_{s \rightarrow \infty} \alpha(s) = 0$

bricht die Störungstheorie zusammen

→ nichtperturbative Methoden in der QFT: effektive QFT,

Gitter QFT = (numerische) Berechnung in diskreter Raumzeit

Eigenschaften von Elementarteilchen: → www.pdg.lbl.gov

Particle Data Group

• Masse

• Zerfalls / Lebensdauer

• Zerfallsweise (wie bei radioaktiven Kernen)

• Quantenzahlen

- Eigen Drehimpuls = 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: für Teilchen die (q) quarks enthält

Isospin $I_3 = +\frac{1}{2} (u), -\frac{1}{2} (d)$

Strangeness $S = -1 (s), 0$ falls kein s enthält (z.B. u, d, s)

Charmness $C = +1 (c), \dots$

Bottomness $b = -1 (b), \dots$

Topness $t = +1 (t), \dots$

- Leptonenzahl $L = +1$ für alle Leptone, 0 sonst

- Baryonzahl $B = +\frac{1}{3}$ für jedes Quark, 0 sonst

(z.B. hat $p = uud$ $B = +\frac{1}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{3} = 1$)

- einige Quantenzahlen sind in allen bekannten Reaktionen erhalten; andere sind verletzt (z.B. verletzt die schwache W , die Paritätserhaltung)

- alle Antiteilchen haben dieselbe Masse, Zerfallsrate und Spin wie das dazu gehörige Teilchen

z.B. hat $\bar{\nu}_e$ $L = -1$

\Rightarrow die Reaktion $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

erhält Baryon- und Leptonenzahl.

- schauen wir uns ein paar Bsp an:

LEPTONS

e

$$J = \frac{1}{2}$$

$$\text{Mass } m = (548.57990946 \pm 0.00000022) \times 10^{-6} \text{ u}$$

$$\text{Mass } m = 0.510998928 \pm 0.000000011 \text{ MeV}$$

$$|m_{e^+} - m_{e^-}|/m < 8 \times 10^{-9}, \text{ CL} = 90\%$$

$$|q_{e^+} + q_{e^-}|/e < 4 \times 10^{-8}$$

Magnetic moment anomaly

$$(g-2)/2 = (1159.65218076 \pm 0.00000027) \times 10^{-6}$$

$$(g_{e^+} - g_{e^-}) / g_{\text{average}} = (-0.5 \pm 2.1) \times 10^{-12}$$

$$\text{Electric dipole moment } d < 10.5 \times 10^{-28} \text{ e cm, CL} = 90\%$$

$$\text{Mean life } \tau > 4.6 \times 10^{26} \text{ yr, CL} = 90\% \text{ [a]}$$

μ

$$J = \frac{1}{2}$$

$$\text{Mass } m = 0.1134289267 \pm 0.0000000029 \text{ u}$$

$$\text{Mass } m = 105.6583715 \pm 0.00000035 \text{ MeV}$$

$$\text{Mean life } \tau = (2.1969811 \pm 0.0000022) \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$\tau_{\mu^+}/\tau_{\mu^-} = 1.00002 \pm 0.00008$$

$$c\tau = 658.6384 \text{ m}$$

$$\text{Magnetic moment anomaly } (g-2)/2 = (11659209 \pm 6) \times 10^{-10}$$

$$(g_{\mu^+} - g_{\mu^-}) / g_{\text{average}} = (-0.11 \pm 0.12) \times 10^{-8}$$

$$\text{Electric dipole moment } d = (-0.1 \pm 0.9) \times 10^{-19} \text{ e cm}$$

Decay parameters [b]

$$\rho = 0.74979 \pm 0.00026$$

$$\eta = 0.057 \pm 0.034$$

$$\delta = 0.75047 \pm 0.00034$$

$$\xi P_{\mu} = 1.0009^{+0.0016}_{-0.0007} \text{ [c]}$$

$$\xi P_{\mu} \delta / \rho = 1.0018^{+0.0016}_{-0.0007} \text{ [c]}$$

$$\xi' = 1.00 \pm 0.04$$

$$\xi'' = 0.7 \pm 0.4$$

$$\alpha/A = (0 \pm 4) \times 10^{-3}$$

$$\alpha'/A = (-10 \pm 20) \times 10^{-3}$$

$$\beta/A = (4 \pm 6) \times 10^{-3}$$

$$\beta'/A = (2 \pm 7) \times 10^{-3}$$

$$\bar{\eta} = 0.02 \pm 0.08$$

QUARKS

The u -, d -, and s -quark masses are estimates of so-called "current-quark masses," in a mass-independent subtraction scheme such as $\overline{\text{MS}}$ at a scale $\mu \approx 2$ GeV. The c - and b -quark masses are the "running" masses in the $\overline{\text{MS}}$ scheme. For the b -quark we also quote the 1S mass. These can be different from the heavy quark masses obtained in potential models.

u

$$I(J^P) = \frac{1}{2}(\frac{1}{2}^+)$$

$$m_u = 2.3_{-0.5}^{+0.7} \text{ MeV} \quad \text{Charge} = \frac{2}{3} e \quad I_z = +\frac{1}{2}$$

$$m_u/m_d = 0.38\text{--}0.58$$

d

$$I(J^P) = \frac{1}{2}(\frac{1}{2}^+)$$

$$m_d = 4.8_{-0.3}^{+0.5} \text{ MeV} \quad \text{Charge} = -\frac{1}{3} e \quad I_z = -\frac{1}{2}$$

$$m_s/m_d = 17\text{--}22$$

$$\bar{m} = (m_u + m_d)/2 = 3.5_{-0.2}^{+0.7} \text{ MeV}$$

s

$$I(J^P) = 0(\frac{1}{2}^+)$$

$$m_s = 95 \pm 5 \text{ MeV} \quad \text{Charge} = -\frac{1}{3} e \quad \text{Strangeness} = -1$$

$$m_s / ((m_u + m_d)/2) = 27.5 \pm 1.0$$

c

$$I(J^P) = 0(\frac{1}{2}^+)$$

$$m_c = 1.275 \pm 0.025 \text{ GeV} \quad \text{Charge} = \frac{2}{3} e \quad \text{Charm} = +1$$

b

$$I(J^P) = 0(\frac{1}{2}^+)$$

$$\text{Charge} = -\frac{1}{3} e \quad \text{Bottom} = -1$$

$$m_b(\overline{\text{MS}}) = 4.18 \pm 0.03 \text{ GeV}$$

$$m_b(1S) = 4.66 \pm 0.03 \text{ GeV}$$

N BARYONS

(S = 0, I = 1/2)

$$p, N^+ = uud; \quad n, N^0 = udd$$

p

$$I(J^P) = \frac{1}{2}(\frac{1}{2}^+)$$

- Mass $m = 1.00727646681 \pm 0.00000000009$ u
 Mass $m = 938.272046 \pm 0.000021$ MeV [a]
 $|m_p - m_{\bar{p}}|/m_p < 7 \times 10^{-10}$, CL = 90% [b]
 $|\frac{q_{\bar{p}}}{m_{\bar{p}}}|/(\frac{q_p}{m_p}) = 0.99999999991 \pm 0.00000000009$
 $|q_p + q_{\bar{p}}|/e < 7 \times 10^{-10}$, CL = 90% [b]
 $|q_p + q_e|/e < 1 \times 10^{-21}$ [c]
 Magnetic moment $\mu = 2.792847356 \pm 0.000000023 \mu_N$
 $(\mu_p + \mu_{\bar{p}}) / \mu_p = (0 \pm 5) \times 10^{-6}$
 Electric dipole moment $d < 0.54 \times 10^{-23}$ e cm
 Electric polarizability $\alpha = (11.2 \pm 0.4) \times 10^{-4}$ fm³
 Magnetic polarizability $\beta = (2.5 \pm 0.4) \times 10^{-4}$ fm³ (S = 1.2)
 Charge radius, μp Lamb shift = 0.84087 ± 0.00039 fm [d]
 Charge radius, $e p$ CODATA value = 0.8775 ± 0.0051 fm [d]
 Magnetic radius = 0.777 ± 0.016 fm
 Mean life $\tau > 2.1 \times 10^{29}$ years, CL = 90% [e] ($p \rightarrow$ invisible mode)
 Mean life $\tau > 10^{31}$ to 10^{33} years [e] (mode dependent)

See the "Note on Nucleon Decay" in our 1994 edition (Phys. Rev. D50, 1173) for a short review.

The "partial mean life" limits tabulated here are the limits on τ/B_i , where τ is the total mean life and B_i is the branching fraction for the mode in question. For N decays, p and n indicate proton and neutron partial lifetimes.

p DECAY MODES	Partial mean life (10 ³⁰ years)	Confidence level	p (MeV/c)
Antilepton + meson			
$N \rightarrow e^+ \pi$	> 2000 (n), > 8200 (p)	90%	459
$N \rightarrow \mu^+ \pi$	> 1000 (n), > 6600 (p)	90%	453
$N \rightarrow \nu \pi$	> 112 (n), > 16 (p)	90%	459
$p \rightarrow e^+ \eta$	> 4200	90%	309
$p \rightarrow \mu^+ \eta$	> 1300	90%	297
$n \rightarrow \nu \eta$	> 158	90%	310
$N \rightarrow e^+ \rho$	> 217 (n), > 710 (p)	90%	149
$N \rightarrow \mu^+ \rho$	> 228 (n), > 160 (p)	90%	113