

1. Einführung

1.1 Größenordnungen in der Kern- & Teilchenphysik

eV: Energie, die ein e^- gewinnt, wenn es eine Potentialdifferenz von 1V durchläuft

$$1\text{eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

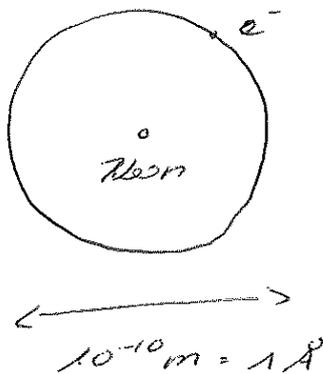
(Bsp. Bindungsenergie des e^- im Wasserstoff 13.6 eV)

eV Basiseinheit für Energie

eV/c Basiseinheit für Impuls

eV/c² Basiseinheit für Masse (z. B. $m(e^-) = 511\text{keV}/c^2$
 $m(p) = 938 \text{ MeV}/c^2$)

Atom



Elektron punktförmig (ohne Substruktur)

Substruktur kann aufgelöst werden, wenn

De Broglie Wellenlänge $\lambda \sim \frac{h}{|p|}$

($\hbar = 197 \text{ MeV}/c \text{ fm}$)

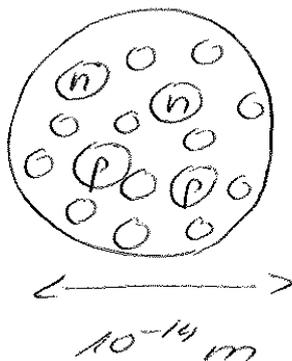
typische Impulse an Hochenergie-

beschleunigern: $\sim 100 \text{ GeV}/c$ (Abb 1.1)

$\Rightarrow \Delta x \sim 10^{-18} \text{ m}$

(Messgenauigkeit für punktförmig)

Atomkern



$$\begin{matrix} A & X \\ Z & N \end{matrix}$$

A: Atommassenzahl

Z: Kernladungszahl

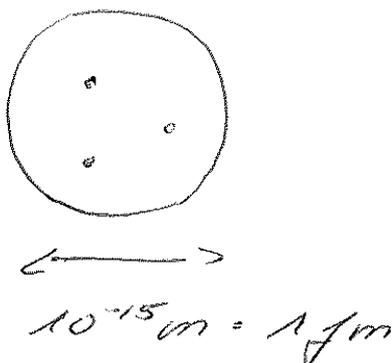
N: Neutronenzahl

$$A = Z + N$$

Kernradius

$$R_K^3 \sim V \sim A \Rightarrow R_K = 1.22 \text{ fm } A^{1/3}$$

Nukleon



Proton und Neutron

$|uud\rangle$ $|ddu\rangle$

$$m_p = 938.3 \text{ MeV}/c^2$$

$$m_n = 939.6 \text{ MeV}/c^2$$

(Quarks sind punktförmig.)

(Definition: Fermionen: Teilchen mit halbzahligem Spin (1/2, 3/2, 5/2, ...)
 Bosonen: Teilchen mit ganzzahligem Spin (0, 1, 2, ...))

1.2 Elementarteilchen

Fermionen ($s = 1/2$)

(1) Leptonen

	I	II	III	Q
	ν_e	ν_μ	ν_τ	0
	$m < 2 \text{ eV}/c^2$	$m < 200 \text{ keV}/c^2$	$m < 18 \text{ MeV}/c^2$	
	e^-	μ^-	τ^-	-1
	$m = 511 \text{ keV}/c^2$	$m = 106 \text{ MeV}/c^2$	$m = 1.75 \text{ GeV}/c^2$	

(2) Quarks

	u	c	t	Q
	(up)	(charm)	(top)	+ 2/3
	$\sim 3 \text{ MeV}/c^2$	$\sim 1.3 \text{ GeV}/c^2$	$173 \text{ GeV}/c^2$	
	d	s	b	- 1/3
	(down)	(strange)	(bottom)	
	$\sim 6 \text{ MeV}/c^2$	$\sim 104 \text{ MeV}/c^2$	$4.2 \text{ GeV}/c^2$	

Neutrinos sind im Standardmodell masselos; es wurden aber im Experiment $m \neq 0$ nachgewiesen.

Schwere Teilchen zerfallen (mittels der schwachen Wechselwirkung) in leichtere Teilchen.
 \Rightarrow Teilchen der 1. Familie und Neutrinos sind stabil.

Leptonenquantenzahlen

	L_e	L_μ	L_τ
e^-	+1	0	0
μ^-	0	+1	0
τ^-	0	0	+1
ν_e	+1	0	0
ν_μ	0	+1	0
ν_τ	0	0	+1

Flavourquantenzahlen

U, D, C, S, B, T

Leptonenquantenzahl in allen Wechselwirkungen (WW) erhalten.

Flavourquantenzahlen in allen WW außer der schwachen WW erhalten.

Für Quarks existieren neben elektrischer Ladung auch Farbladung \equiv Ladung der starken WW. Sie kann drei Werte annehmen r – rot, g – grün, b – blau.

Zu allen Teilchen existieren Antiteilchen mit entgegengesetzter elektrischer Ladung, Farbladung und Quantenzahlen (QZ) aber selber Masse, Spin, Lebensdauer.

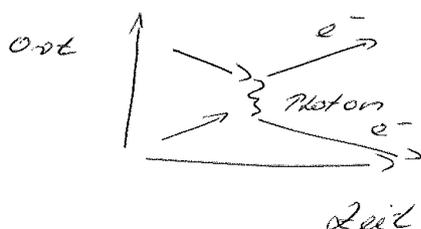
Bsp: $e^- \rightarrow e^+$ $u \rightarrow \bar{u}$
 $\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_e$ $t \rightarrow \bar{t}$

(Abb 1.2)

1.3 Fundamentale Wechselwirkungen

In Quantenfeldtheorie (QFT) behandelt man Kräfte als quantisierte Felder. WW zwischen Elementarteilchen werden als Austausch dieser Feldquanten (Austauschbosonen) übertragen.

Bsp: Beschreibung der Streuung zweier Elektronen



„Feynman-Diagramm“
Austausch eines Photons

Es gibt 4 fundamentale WW. Alle anderen Kräfte lassen sich darauf zurückführen (Kernkraft ist Effekt der starken WW, ...)

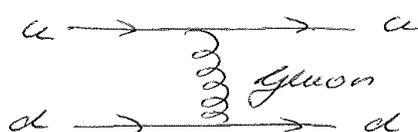
WW	rel. Stärke*	Austauschboson	Spin	Masse	Reichweite
Starke	1	8 Gluonen	1	0	< 1fm
Em	$\sim 10^{-2}$	Photon	1	0	∞
Schwache	$\sim 10^{-7}$	W^\pm, Z	1	80 GeV/c ² 91 GeV/c ²	$\sim 10^{-3}$ fm
Gravitation**	$\sim 10^{-39}$	Graviton (?)	2	0	∞

* Hängt von Abstand und Energie der Teilchen ab, hier typische Größenordnungen der TP

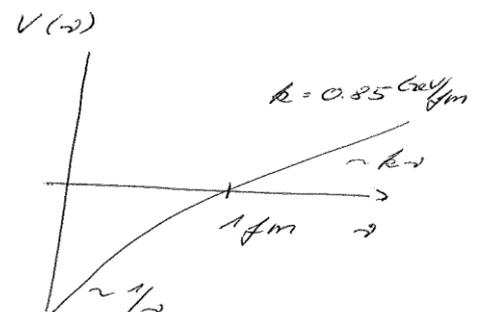
** Spielt keine Rolle auf Skala relevant für Teilchenphysik; kann bisher nicht in QFT beschrieben werden.

a) em Kraft wirkt auf alle el. geladenen Teilchen

b) starke WW nur zwischen Teilchen mit Farbladung (Quarks, Gluonen tragen selbst Farbladung)



Potential



Entfernt man 2 Quarks, wirken sehr große Kräfte

Quarks sind in farbneutralen Hadronen gebunden.

Baryonen: $|qqq\rangle$ mit Farben r,g,b
 oder $|\bar{q}\bar{q}\bar{q}\rangle$ mit $\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$
 z.B. $p=|uud\rangle, n=|udd\rangle, \Lambda =|uds\rangle$

Mesonen: $|q\bar{q}\rangle$ mit Farbe und Antifarbe ($r\bar{r}$ oder $g\bar{g}$ oder $b\bar{b}$)
 z. B. $\pi^+ = |u\bar{d}\rangle, \pi^- = |\bar{u}d\rangle, B^+ = |u\bar{b}\rangle, D^0 = |\bar{u}c\rangle$

Mesonen im Grundzustand:

	u	d	s	c	b	t
\bar{u}	π^0	π^-	K^-	D^0	B^-	
\bar{d}	π^+	π^0	\bar{K}^0	D^+	\bar{B}^0	
\bar{s}	K^+	K^0	ϕ	D_s^+	\bar{B}_s^0	
\bar{c}	\bar{D}^0	D^-	D_s^-	J/ψ	B_c^-	
\bar{b}	B^+	B^0	B_s^0	B_c^+	Y	
\bar{t}						

top Quark zerfällt bevor es gebundene Zustände einget

Lebensdauer: $\tau(\text{top}) = 10^{-29} \text{ s}$ Hadronisierung: $t_{\text{had}} = 10^{-22} \text{ s}$

Mesonen werden nach schwerstem Quark benannt

u, d: Pion s: Kaon c: D-Meson b: B-Meson

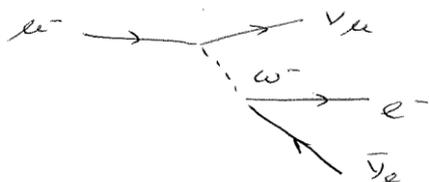
Es gibt weitere angeregte Mesonen.

[NB: Kürzlich wurden am LHC 4-Quarkzustände nachgewiesen $|qq\bar{q}\bar{q}\rangle$.]

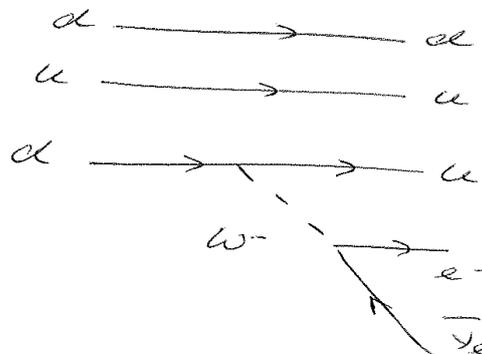
c) schwache WW koppelt an alle Quarks und an alle Leptonen

z. B. β -Zerfall

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$$



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



Teilchen (+Antiteilchen)	starke WW	em W	schwache WW
$e^- (e^-, \mu^-, \tau^-)$	0	x	X
$\nu (e, \mu, \tau)$	0	0	X
q	x	x	X

x: nimmt Teil an WW

1.4 Das Standardmodell (SM) der Teilchenphysik

SM ist QFT, die die WW zwischen den Elementarteilchen beschreibt.

Neben den Austauschteilchen gibt es noch ein weiteres Boson, das Higgsboson, das den Teilchen Masse verleiht.

Higgsmechanismus eingeführt 1964 (Higgs, Englert, Brout)

Nachweis am LHC 2012; Nobelpreis 2013;

1.5 Relativistische Mechanik

In Teilchenphysik (TP) i.d.R. $E \gg mc^2 \rightarrow$ hochrelativistisch

$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$ rel. Energie-Impuls-Beziehung

4er Vektor $(\text{Zeit}, \overrightarrow{\text{Ort}})$ $x = (ct, \vec{x}) = x^\mu$
 $(\text{Energie}, \overrightarrow{\text{Impuls}})$ $p = (E/c, \vec{p}) = p^\mu$

Skalarprodukt: $a \cdot b = a_0 b_0 - \vec{a} \cdot \vec{b}$

$$\left[\begin{array}{c} \sum_{\mu, \nu=0}^3 g^{\mu\nu} a^\mu b^\nu \\ \text{mit } g^{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & -1 & & \\ & & -1 & \\ & & & -1 \end{pmatrix} \end{array} \right]$$

Das so definierte Skalarprodukt ist lorentzinvariant.