

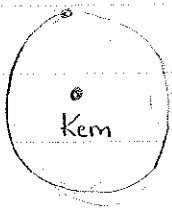
I. Kern- und Teilchenphysik

1. Einführung

1.1 Struktur der Materie - Überblick

typ. Annergewichten

eV... keV



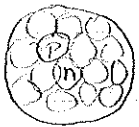
10^{-10} m

Atom: 10^{-10} m

Elektron: $< 10^{-18} \text{ m}$

(Strukturlos bis $10^{-18} \text{ m} \rightarrow$ punktförmig)

$$m_e = 511 \text{ keV}/c^2$$



10^{-14} m

Atomkern: $A =$ Massenzahl $\sim \text{MeV}$

$\begin{matrix} A \\ Z \times N \end{matrix}$

$Z =$ Kernladungszahl

$N =$ Neutronenzahl

$$A = Z + N$$

Kernradius: $R_K^3 \sim V \sim A$

$$\rightarrow R_K = 1.22 \cdot 10^{-15} \text{ m} \cdot A^{1/3}$$

$$= 1.22 \cdot \text{fm} \cdot A^{1/3}$$



10^{-15} m

Nucleon = Proton od. Neutron

$> 200 \text{ MeV}$

$$m_p = 938.3 \text{ MeV}/c^2 = 1,00728 \text{ u}$$

$$m_n = 939,6 \text{ MeV}/c^2 = 1,00867 \text{ u}$$

$u =$ u, d Quarks

Strukturlos bis $10^{-18} \text{ m} \rightarrow$ punktförmig

Atommassen

häufig in [u]:

$$1 \text{ u} = \frac{1}{12} \left[{}^{12}_6\text{C} - \text{Atom} \right]$$

berücksichtigt Bindungsenergie und e^- Masse

1.2 Fundamentale Bausteine

→ punktförmige Spin $\frac{1}{2}$ Teilchen = Fermionen

(1) Leptonen	I	II	III	Q
	ν_e	ν_μ	ν_τ	0
	$< 2 \text{ eV}/c^2$			
	e^-	μ^-	τ^-	-1
	$511 \text{ MeV}/c^2$	$106 \text{ MeV}/c^2$	$1,78 \cdot 10^9 \text{ GeV}/c^2$	

(2) Quarks				
	u	c	t	$+\frac{2}{3}$
	$\sim 3 \text{ MeV}/c^2$	$\sim 1,3 \text{ GeV}/c^2$	$173 \text{ GeV}/c^2$	
	d	s	b	$-\frac{1}{3}$
	$\sim 6 \text{ MeV}/c^2$	$104 \text{ MeV}/c^2$	$\sim 4,2 \text{ GeV}/c^2$	

• Nur Quarks- und Leptonen der ersten Familie stabil (Ausnahme ν)

Für Quarks existiert neben der elektr. Ladung die sogenannte Farbladung = Ladung der starken WW. Sie kann 3 verschiedene Werte annehmen, die man als r, g, b bezeichnet.

Quarks existieren nicht frei sondern nur in Hadronen gebunden

Zu allen fundamentalen Teilchen existieren Anti-Teilchen mit entgegengesetzter Ladung aber gleicher Masse

$$e^- \rightarrow e^+ \quad \nu \rightarrow \bar{\nu}$$

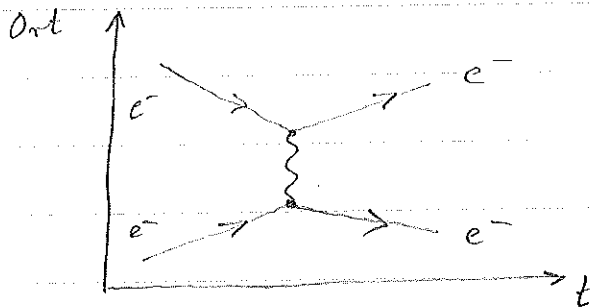
$$u \rightarrow \bar{u} \quad d \rightarrow \bar{d}$$

Die uns umgebende Materie ist nur aus Teilchen der 1. Generation aufgebaut. II + III Generation zerfallen (schw. WW) in I.

1.3 Fundamentale Wechselwirkungen

In Quantenfeldtheorie behandelt man Kräfte als quantisierte Felder. Wechselwirkungen zwischen Elementarteilchen werden durch Austausch dieser Feldquanten (ganzzahlige Spin, Austauschbosonen) übertragen.

Bsp.: Beschreibung der e.m. Streuung zweier Elektronen



"Feynman-Diagramm":
Austausch eines Photons

WW	relative Stärke	Austauschboson	Spin	Masse	Reichweite
starke	1	8 Gluonen	1	0	$< 1 \text{ fm}$
e.m.	$\sim 10^{-2}$	Photon	1	0	∞
schwache	$\sim 10^{-7}$	W^\pm, Z	1	$80, 91 \text{ GeV}/c^2$	$\sim 10^{-3} \text{ fm}$
Gravitation	$\sim 10^{-39}$	Graviton?	2	0	∞

$$l \approx 10^{-35} \text{ m}$$

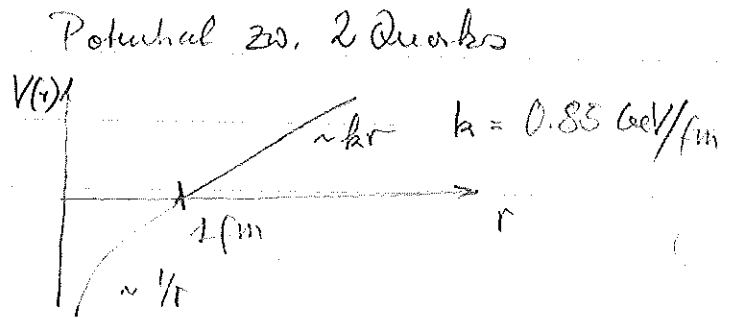
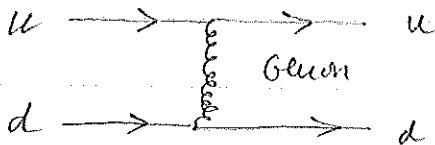
Bem. zur Gravitation

- spielt auf großen Skalen eine wichtige Rolle, kann aber bei Behandlung von Elementarteilchen vernachlässigt werden (zumindest für Energien weit unterhalb der Planck Skala: $2 \cdot 10^{18} \text{ GeV}$)
- Es ist bis heute nicht gelungen die Gravitation im Rahmen einer QFT konsistent zu behandeln (Problem = nicht lineare Effekte: attraktives Potential zweier Massen \rightarrow Beschleunigung $\rightarrow m = m_0 \dots$)

WW zwischen den fundamentalen Teilchen:

a) e.m. WW zwischen allen elektr. geladenen Teilchen.

b) starke WW nur zwischen Teilchen mit Farbcady: Quarks



→ entfernt man 2 Quarks voneinander wirken sehr große Kräfte:

→ Quarks sind in farbneutrale Hadronen eingeschlossen: Confinement

3 Typen von Hadronen:

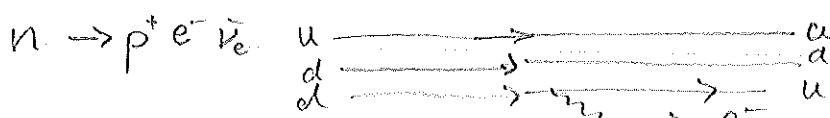
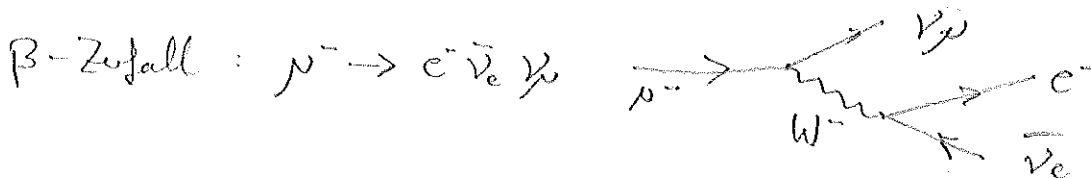
(1) 3 Quark-System = Baryonen: $r + g + b = \text{farbneutral}$

Bsp: $p = |uud\rangle$ $n = |udd\rangle$ $\Delta^0 = |uds\rangle$
 $\Sigma^+ = |uus\rangle$

(2) Quark-Antiquark System = Mesonen: $r + \bar{r} = \text{farbneutral}$

$\pi^+ = |u\bar{d}\rangle$ $\pi^- = |\bar{u}d\rangle$
 $K^+ = |u\bar{s}\rangle$ $K^- = |\bar{u}s\rangle$

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



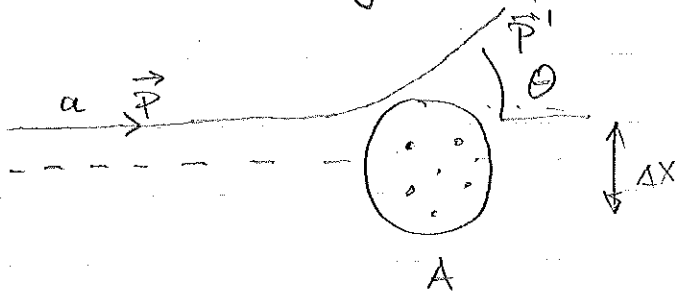
Teilchen	starke WW	em. WW	Schwache WW
ν	0	0	X
e^-	0	X	X
u-typ Q	X	X	X
d-typ Q	X	X	X

→ Neben den Austauschbosonen: Higgs-Boson - verleiht den Teilch. Masse.

1.4 Strukturuntersuchung durch Streuexperimente

Streuexperimente liefern über die Reaktionsraten, die Energie- und Winkelverteilung der Reaktionsprodukte Informationen über die Dynamik der Wechselwirkung und über den Aufbau des Teilchens.

a) elastische Streuung eines "Probe" Teilchens: $a + A \rightarrow a + A$



$$\Delta p_x = \sin \theta |\vec{p}|$$

Um Strukturen in A aufzulösen muß die DeBroglie Wellenlänge des Probesteilchens $\lambda = \frac{h}{|\vec{p}|}$ in der Größenordnung der Struktur sein.

(Aus Optik, $\lambda < \Delta x$ $\lambda = \frac{h}{2\pi p}$)

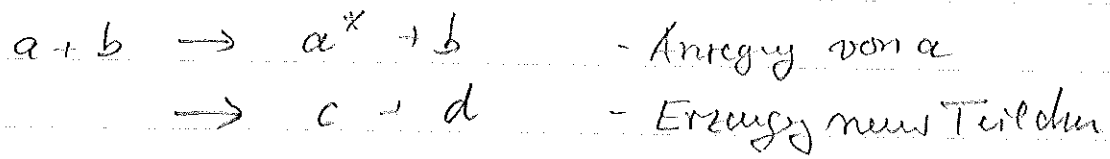
Auflösungsvermögen: $\Delta x \approx \frac{h}{\Delta p_x}$

Zur Abschätzung benutzt man:

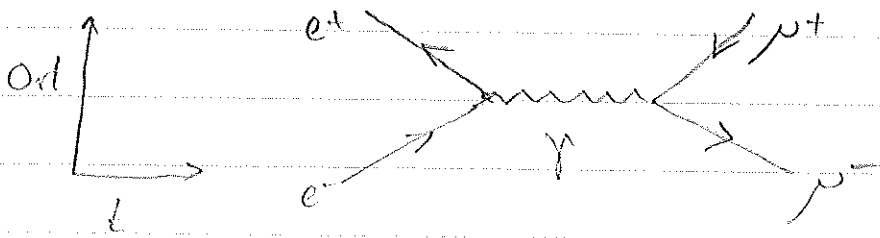
$$hc = 197 \text{ MeV fm}$$

p	$\Delta x (\theta = 45^\circ)$
1 GeV/c	$0.3 \cdot 10^{-15} \text{ m}$
100 GeV/c	$3 \cdot 10^{-18} \text{ m}$
200 GeV/c	$1.5 \cdot 10^{-18} \text{ m}$

b) inelastische Streuexperimente



Beispiel: $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$



1.5 Relativistische Kinematik

Im Teilchenphysik i. d. R. $E \gg m \cdot c^2 \rightarrow$ hochrelativistisch

$$\boxed{E^2 = p^2 \cdot c^2 + m^2 c^4} \quad \text{Relat. Energi-Impuls-Bez.}$$

4er-Vektoren: (Zeit, Ort): $x = (ct, \vec{x}) = x^\mu$

(E, Impuls): $p = (E/c, \vec{p}) = p^\mu$

allg. $a = (a_0, \vec{a})$

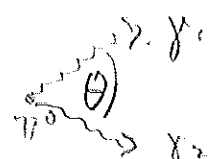
Skalarprodukt: $a \cdot b = a_0 \cdot b_0 - \vec{a} \cdot \vec{b}$

$$= \sum_{\mu, \nu=0}^3 g_{\mu\nu} a^\mu b^\nu$$

mit $g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & -1 & & \\ & & -1 & \\ & & & -1 \end{pmatrix}$

Das so definierte Skalarprodukt ist Lorentz invariant.

Bsp1: $p = (E/c, \vec{p}) \quad p \cdot p = E^2/c^2 - \vec{p}^2 = m^2 c^2$
 = "invariante" Masse
 \rightarrow in allen Systemen gleich

Bsp2: $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$  $p_2 = (E_1/c, \vec{p}_1)$
 $p_2 = (E_2/c, \vec{p}_2)$

$$M^2(\pi^0) = \frac{1}{c^2} (p_1 + p_2)^2 = \frac{1}{c^2} \left[\frac{1}{c^2} (E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2 \right]$$

für Photonen: $|\vec{p}_i| = E_i/c \rightarrow = \frac{2E_1 E_2}{c^4} \cdot (1 - \cos\theta)$
 (masselos)

