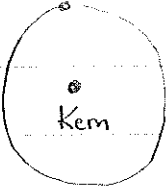


# I. Kern- und Teilchenphysik

## 1. Einführung

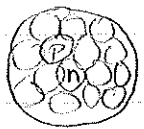
### 1.1 Struktur der Materie - Überblick



typ. Anregungsenergien  
eV... keV

Atom:  $10^{-10}$  m  
Elektron:  $< 10^{-18}$  m  
(Strukturlos bis  $10^{-18}$  m  $\rightarrow$  punktförmig)  
 $m_e = 511 \text{ keV}/c^2$

$10^{-10}$  m



$10^{-14}$  m

Atomkern:  $A = \text{Massenzahl} \sim \text{MeV}$   
 $Z = \text{Kernladungszahl}$   
 $N = \text{Neutronenzahl}$   
 $A = Z + N$

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  $> 200 \text{ MeV}$

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

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

$s = u, d$  Quarks

Strukturlos bis  $10^{-18}$  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
	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	0
	$e^-$	$\mu^-$	$\tau^-$	-1
	511 keV/c <sup>2</sup>	106 MeV/c <sup>2</sup>	1,78 GeV/c <sup>2</sup>	

$\nu_\mu$   
 $< 2 \text{ eV}/c^2$

$e^-$  511 keV/c<sup>2</sup>     $\mu^-$  106 MeV/c<sup>2</sup>     $\tau^-$  1,78 GeV/c<sup>2</sup>    -1

(2) Quarks

	u	c	t	+2/3
	$\sim 3 \text{ MeV}/c^2$	$\sim 1,3 \text{ GeV}/c^2$	17 GeV/c <sup>2</sup>	
	d	s	b	-1/3
	$\sim 6 \text{ MeV}/c^2$	104 MeV/c <sup>2</sup>	4,2 GeV/c <sup>2</sup>	

d  $\sim 6 \text{ MeV}/c^2$     s 104 MeV/c<sup>2</sup>    b 4,2 GeV/c<sup>2</sup>    -1/3

• Nur Quarks- und Leptonen der ersten Familie stabil (Ausnahme  $\nu$ )

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 sonst gleichem Eigenschaften:

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

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

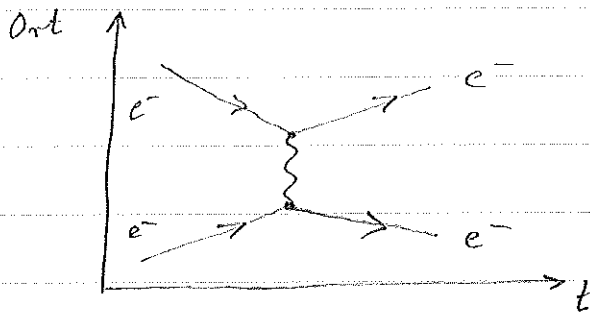
Die uns umgebende Materie ist nur aus Teilchen der 1. Generation aufgebaut. II + III Generation zerfallen (schw. WW) in I.

Higgs

### 1.3 Fundamentale Wechselwirkungen

In der Quantenfeldtheorie behandelt man Kräfte als quantisierte Felder. Wechselwirkungen zwischen Elementarteilchen werden durch Austausch dieser Feldquanten (ganzzahliger 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	$\infty$
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	$\infty$

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

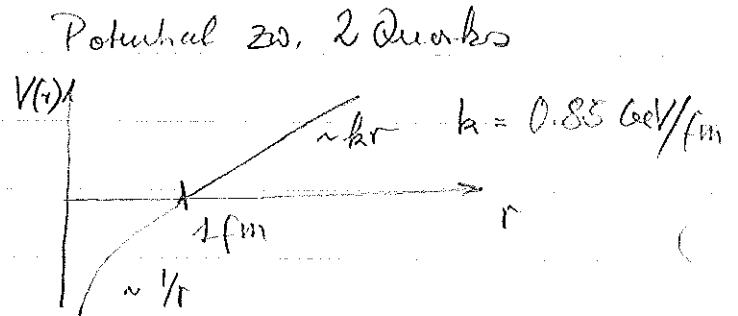
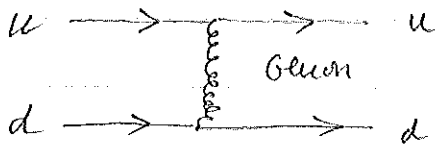
#### Bem. zur Gravitation

- 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 Farbladg.: Quarks



→ entfernt man 2 Quarks voneinander, wirken sehr große Kräfte:

→ Quarks sind in farbneutrale Hadronen eingeschlossen:  
Confinement

2 Typen von Hadronen:

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

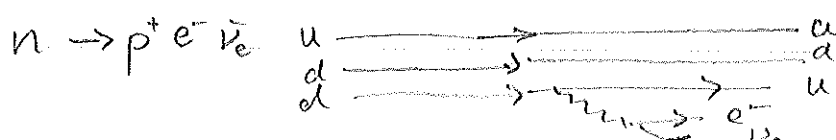
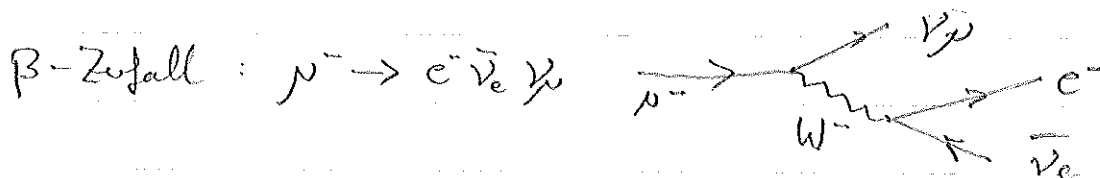
Bsp:  $p = |uud\rangle$   $n = |udd\rangle$   $\Lambda^0 = |uds\rangle$   
 $\Sigma^+ = |uus\rangle$

(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.



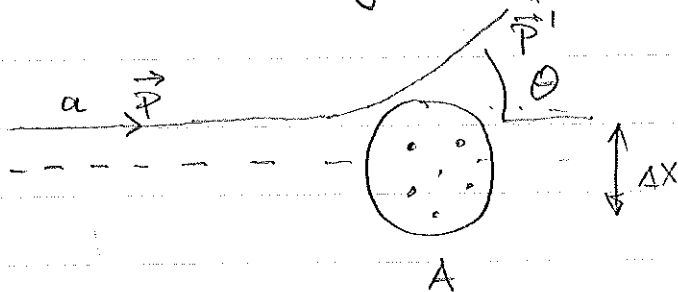
Teilchen	starke WW	e.m. WW	Schwache WW
$\nu$	0	0	X
$e^-$	0	X	X
u-typ Q	X	X	X
d-typ Q	X	X	X

→ Neben den Austauschbosonen: Higgs-Boson - verleiht den Teilchen 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 der Teilchen.

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:  $\lambda < \Delta x$   $\lambda = \frac{\lambda}{2\pi}$ )

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

Zur Abschätzung benutzt man:

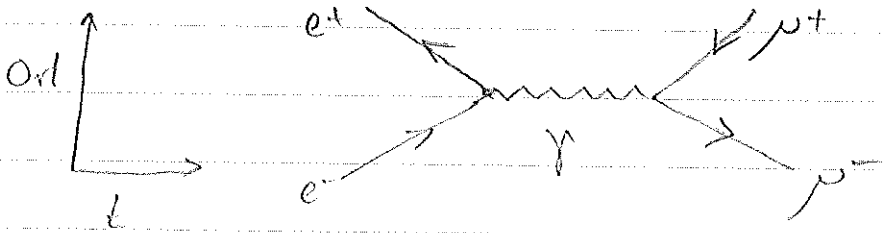
$$hc = 197 \text{ MeV fm}$$

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):  $x = (ct, \vec{x}) = x^N$

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

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  $g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & & & 0 \\ & -1 & & \\ & & -1 & \\ & & & -1 \end{pmatrix}$

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:  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$



$p_2 = (E_1/c, \vec{p}_2)$   
 $p_2 = (E_2/c, \vec{p}_2)$

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

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

