

1
Kern-Teilchen- und Astrophysik 1

Stefan Schönert (Experiment)

Lehrstuhl E15 - Astroteilchenphysik

Wolfgang Heilig (Theorie)

Max-Planck-Institut für Physik

Organisatorisches

- No 8³⁰ - 10⁰⁰, Ri 10¹⁵ - 1145
- Vorlesung: ~ 60% Experiment, ~ 40% Theorie
- Planungs- & Arbeitsgruppen
- Übungsaufgaben werden nicht korrigiert, werden im Übungsangriffsgruppen im Detail besprochen
- Achtung: Prüfungsvorbereitung!

• Sprechstunde : nach Vereinbarung

• Webseite mit Vorlesungsmaterial

EIS -> Lechner -> KTA

-> gesamte Vorlesung mit Skript

-> Übungsaufgaben

-> Skript : KTA Schöwaß + Hollich

http://www.e18.physik.tu-muenchen.de/skript

Hinwi gesucht zur Überarbeitung (LaTeX)

Prüfung : • Stoff des WS wird in Schriftlichen

Klausur abgeprüft. (25.2.?)

• Stoff des SS in mündlicher Prüfung

Literatur:

③
• Povh et al.: Teilchen + Kerne
• D. Parkas : Introduction to high energy physics

- F. Halzen u. A.D. Martin : Quarks + leptons
- P. Martin : Kernphysik
- G. Knoll : radiation detection and measurement
- E. Segre : Kerne u. Teilchen
- H. Frauenfelder, Henley : Teilchen + Kerne
- T. Rayer - Kuchuk : Kernphysik

1. Entdeckungen

Ende 19. Jh. : Entdeckt ≈ 100 Elemente mit periodischem
wiederholender Eigenschaften \Rightarrow innere Struktur
sind nicht unterl. (bes)

Anfang 20. Jh (Rutherford)

1932 (Chadwick) : Entdeckung des Neutrons, Kerne
bestehen aus Protonen + Neutron
(Nucleonen)

1930 (Poli) : um Energieerhaltung, Impuls-, Drehimpuls-
erhaltung \Rightarrow β^- -Zerfall \Rightarrow Neutrino postuliert

1956 (Peres + Cowan) : $\bar{\nu}$ -Nachweis

1936 (Anderson + Neddermeyer) : "Schweres Elektron" μ
Kosm. Strahlung

\Rightarrow Neutron \Rightarrow μ -Neutrino \Rightarrow μ (Mion) (Lepton)

1935 Yukawa schlägt Ersterz von Mesone

als Träger der Kernkräfte vor

Masse $\approx 100 m_e$

1947 (Oschwin, Powell, ...) Pionen \approx der leichten Strahlung

1948 Berkeley Cyclotron $\Rightarrow \pi$

50/60 Jahre: Protonen u. Neutronen sind ~~unterschiedlich~~
zwei große Teilchenfamilien.

Hadronen ähnlicher wie Stone \approx

Gruppen mit ähnlichen Eigenschaften

\Rightarrow keine fundamentale Bausteine d.
Materie!!

1964 (Gell-Mann): brachte Quarkmodell ins Spiel

^o Hadronen-Zoo: alle Hadronen können als
Kombinationen von Quarks beschrieben werden

6

Zwei Quarks ($q\bar{q}$) : Mesonen
Drei Quarks (qqq) : Baryonen

Leptonen und Quarks

Zwei fundamentale Bausteine : Quarks und Leptonen

Alle

Spin experimente : Kleiner als 10^{-18} m, tragen Spin $1/2 \Rightarrow$ Fermionen

Wenig Anregungszustände von Leptonen bzw. Quarks gefunden
 \Rightarrow (schwere also) elementar z.B.

(7)

6 Leptonen u. 6 Quarks
in Familie (Generatoren)

Eigenschaften sind in jedem Generator wiederholbar

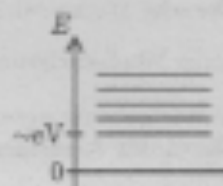
$$\begin{pmatrix} u(p) \\ d(down) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c(charm) \\ s(strange) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t(top) \\ b(bottom) \end{pmatrix} \begin{matrix} Q/e \\ +2/3 \\ -1/3 \end{matrix} \begin{matrix} Spin \\ 1/2 \\ 1/2 \end{matrix}$$

$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix} \begin{matrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix}$$

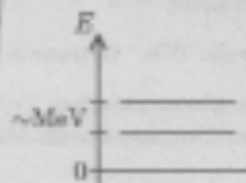
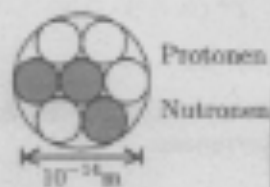
Bausteine der Materie

Hierarchie der Struktur der Materie

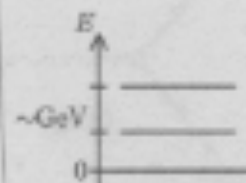
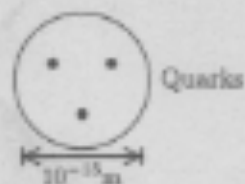
- Atom:



- Kern:



- Nukleon:



Wechselwirkung durch Teilchenaustausch © TUM TUM

- Abstoßung



- Anziehung



Kräfte der Natur: Wechselwirkungen

(• Gravitation)

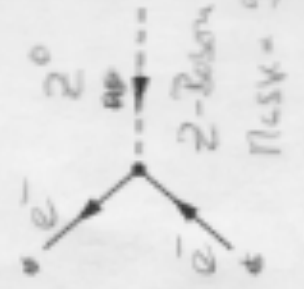
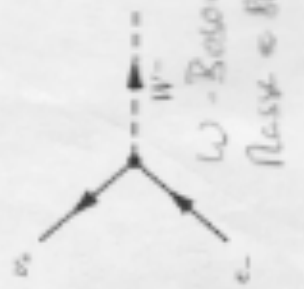
- Elektromagnetismus: alle geladenen Teilchen — elekt. Ladung
- schwache Wechselwirkung: alle Teilchen (Leptonen & Quarks) — schwache Ladung
- starke Wechselwirkung: Hadronen —

Bild der Wechselwirkungen:

- Kräfte durch den Austausch von Bosonen (Austauschbosonen)
- EM-Wechselwirkung: Photonen ($m_\gamma = 0$)
 - schwache WW: W^+ , W^- , Z^0 ($m \approx 90 \text{ GeV}$)
 - starke WW: Gluonen ($m = 0$)

WW durch

Zusammenhang zwischen Heftigkeit und Masse der Austauschbosonen wird beschrieben über Feynman-Diagramme:



Beispiele für Kopplungen

Zu jeder WW gehört eine

elekt. Ladung
schwache Ladung

starke Oxyd. Farbladung
(Quarks, Str. mit Leptonen)
mit Farbladung

	QED	Schw. WW	QCD	Gen
Austauschboson	γ	W^{\pm}, Z^0	g	(Quarks)
Mass	0	80/90 GeV	0	0
Reichweite	∞	10^{-18} m	$\leq 10^{-15}$ m	∞
Relat. Stärke (zu Stärke WW)	$1/137$	$\leq 10^{-5}$	1 für 10^{-15} m	$5 \cdot 10^{-3}$

Reich.

Reichweite $r \lesssim c \Delta t$
 $\lesssim c \frac{t_{\text{fl}}}{Mc^2}$

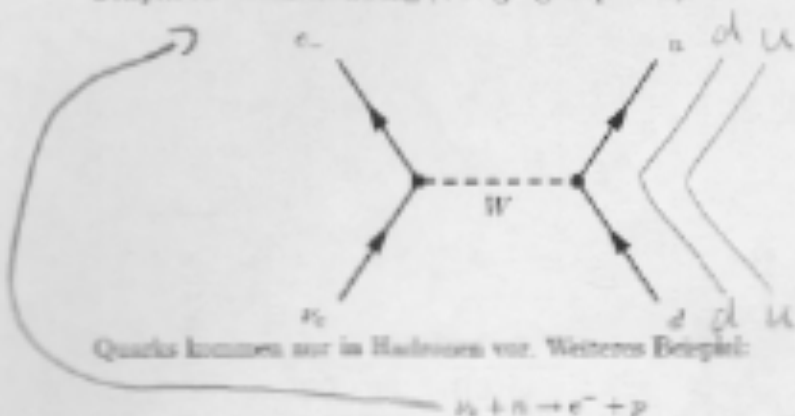
$t_{\text{fl}} \approx 200 \text{ fm} \quad (\text{für } 10^{-15} \text{ m})$

$\Rightarrow r \lesssim \frac{200 \text{ fm}}{Mc^2}$

für Photonen (EM WW) $r \rightarrow \infty$

für W^{\pm}, Z^0 (Schw. WW) $r \sim 10^{-3} \text{ fm}$

Beispiel für Wechselwirkung (Übergangsamplitude):



$$p = (u, u, d)$$

$$n = (u, d, d)$$

Reichweite r mit M der Ruhemasse des Austauschbosons

$$\Delta E \cdot \Delta t \gtrsim \hbar$$

$$r \lesssim c \cdot \Delta t \lesssim c \cdot \frac{\hbar}{Mc^2}$$

höchste
Stärke

mit $\hbar c \approx 200 \text{ MeV fm} \Rightarrow r \lesssim 200 \text{ MeV fm} / Mc^2$. Für Photonen mit Ruhemasse $M = 0$ ist also die Reichweite $r \rightarrow \infty$.

	WW	QED	schw. WW	QCD	Grav.
Boson		γ	W^{\pm}, Z^0	g	Graviton ?
Masse		0	80-90 GeV	0	0 ?
Reichweite		∞	10^{-16} m	$\leq 10^{-15} \text{ m}$	∞
rel. Stärke (zur starken WW)		1/137	$\approx 10^{-5}$	1	$5 \cdot 10^{-39}$

Grundlagen (Wiederholung)

Abbildung Nuklidkarte (siehe Abbildung 1, Seite 8)

Halbwertszeit und Aktivität A :

$$A = -\frac{dn}{dt} = \lambda n(t)$$

mit $n(t)$ = Zahl der vorhandenen Kerne und $n_0 = n(t=0)$

$$\Rightarrow A(t) = \lambda \cdot n(t) = \lambda n_0 e^{-\lambda t}$$

Lebensdauer $\tau = 1/\lambda$ und Halbwertszeit $T_{1/2} = \tau \cdot \ln 2$.

Isomere: Nukleare Anregungen haben in der Regel kurze Halbwertszeiten.

($T_{1/2} \approx 10^{-9}$ bis 10^{-12} s)



Welle-Teilchen-Dualismus: Teilchen mit Impuls \vec{p} , Wellenvektor \vec{k} mit $\vec{p} = \hbar \vec{k}$ und Wellenlänge λ :

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi \hbar}{p} = \frac{h}{p}$$

(De Broglie)

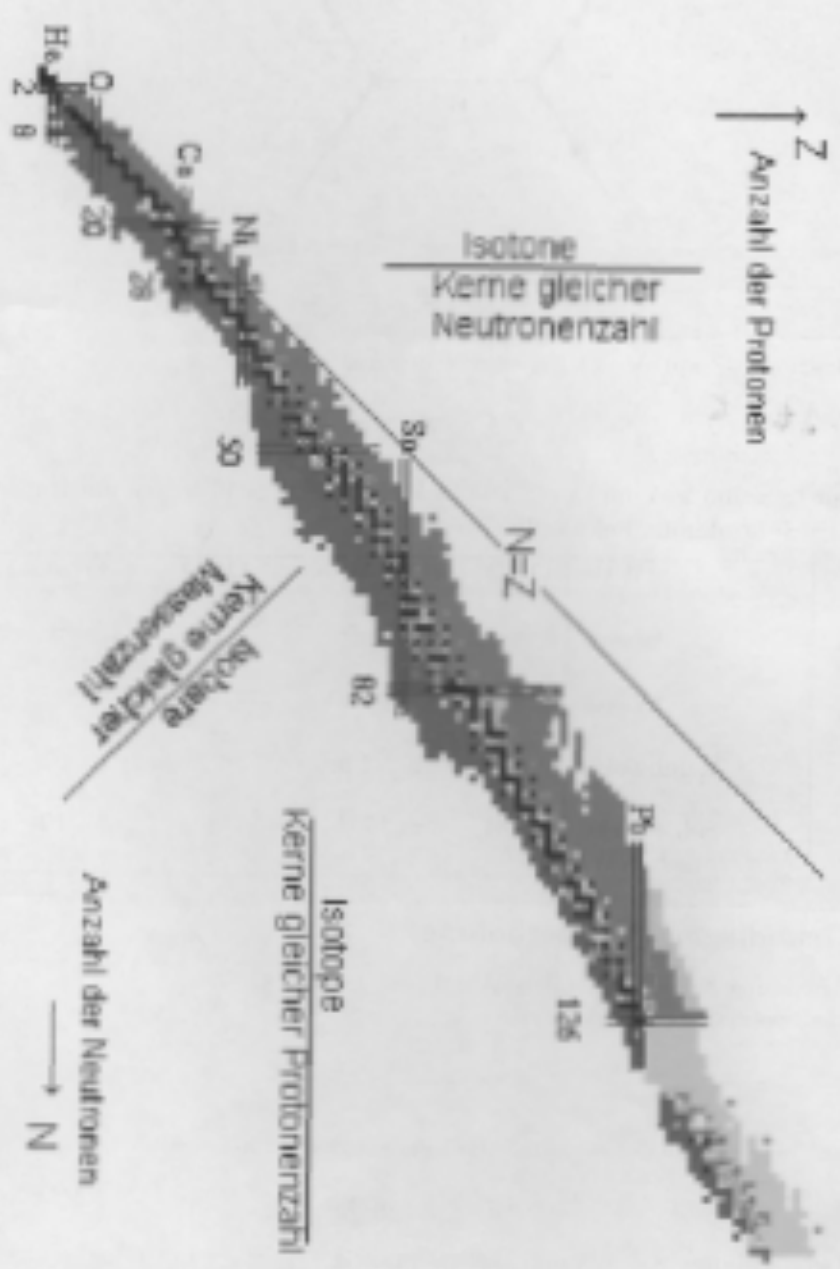


Abbildung 1: Abbildung einer Nuklidkarte

Einheiten

jetz üblich sind

Länge: Femtometer (fm, auch Fermi) $\cdot 10^{-15}$ m

Energie: Elektronvolt (eV)

Energie die ein Teilchen mit Ladung $1e$ beim Durchlaufen einer Potentialdifferenz von 1V bekommt.

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

keV, MeV, GeV, TeV, ...

Massen ~~von~~ von Teilchen werden gemäß
Masse-Energie-Äquivalenz $E=mc^2$
in eV/c^2 (bzw. MeV/c^2 , GeV/c^2)
angegeben

Verknüpfung von Länge- und Energie steht in
Heisenbergsche Unschärferelation verknüpft.
($\hbar c \approx 200 \text{ MeV fm}$)

Vierervektoren

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

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

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

Das Skalarprodukt zweier Vierervektoren
ist Lorentz-invariant!

z.B.: $p^2 = p \cdot p = \frac{E^2}{c^2} - \vec{p}^2 = \text{const}$

Im Ruhesystem gilt $\vec{p} = \emptyset$ und

$$p^2 = \frac{E^2}{c^2} = \frac{m^2 c^4}{c^2} = m^2 c^2$$

$m = \sqrt{p^2}/c$ „invariante Masse“

mit $E^2 - \vec{p}^2 c^2 = m^2 c^4$

Energie- und Impulserhaltung

Gesamtenergie $E = \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2}$

$$p = |\vec{p}|$$

z.B. Elektron ($m_0 c^2 = 511 \text{ keV}$) mit

$$pc \approx 200 \text{ MeV} \quad \text{ist}$$

$$E \approx pc \approx 200 \text{ MeV.}$$

Photon ($m = 0$) : $E = pc$

Für $pc \ll m_0 c^2$ gilt

$$E \approx m_0 c^2 + \frac{p^2}{2m_0} \quad (\text{nicht rel. Näherung})$$

Geschwindigkeiten $\beta = v/c$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$\Rightarrow E_{\text{tot}} = \gamma m_0 c^2 \quad \text{und}$$

relativ.
Impuls $p = \gamma m_0 v$

Drehimpuls

klassisch $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$

quantenmech. $\hat{L} = -i\hbar (\hat{r} \times \nabla)$

Erwartungswerte: $\langle \hat{L}^2 \rangle = l(l+1)\hbar^2$

$$\langle L_z \rangle = m\hbar$$

mit $m = -l, -l+1, \dots, +l$

Bildung der Nukleonen und Kerne

Urknalltheorie der Entstehung
des Universums

Stützen: kosmische Hintergrundstrahlung
primordiale Nukleosynthese
(Bildung der leichten $A \leq 7$
Kerne)