

## 5. Charakterisierung von Elementarteilchen

Teilchen werden durch ihre Masse, Spin und Quantenstatistik, el. Ladung und einen Satz 'ladungsträger' Quantenzahlen und, wenn sie instabil sind, ihre Lebensdauer charakterisiert. Auch durch die Wechselwirkungen, denen sie unterliegen

### • Verschiedene Typen:

Elementarteilchen: unteilbar, keine Struktur und Anregung, punktförmig  $\leftarrow$  soweit meßbar, derzeit  $r < 10^{-18}$  m Elektron, Neutrino, Quark

Austausch- und Feldteilchen: Vermittler z.B. WW Photon

Zusammengesetzte Teilchen: gebundene Zustände von Elementar- oder zus.ges. Teilchen  
Atom, Proton, Neutron etc.

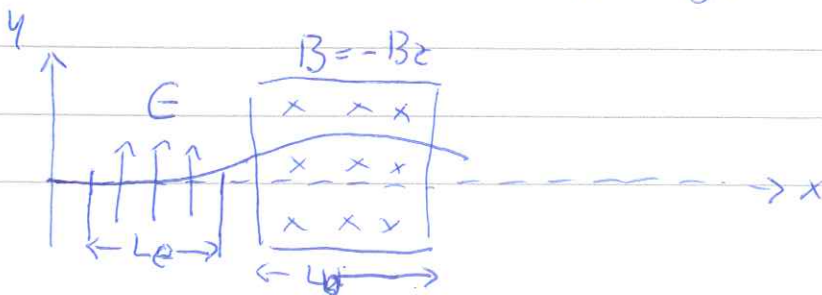
### 5.1 Masse

charakteristisch für jede Teilchensorte  $m_0 c^2$  Ruhemasse  
z.B. Elektron 0.511 MeV Proton 938.3 MeV Neutron 939.6 MeV

Messung:

a) stabile Teilchen, Atomkerne

Aston'sches Massenspektrometer, kombinierte E- und B-Felder  $\perp$  zueinander, Focuss durch elektrostatisches Potential (einige 10 kV) vorbeschleunigt,  $v_x$



\* Entdeckung des ersten Isotops ( $^{20,22}\text{Ne}$ ) 1912 durch Thomson; Entwicklung der Methode durch seinen Schüler Aston, der 1922 Nobelpreis Chemie erhielt

Kraft E-Feld  $\vec{F}_E = q\vec{E} \leadsto$  Beschleunigung  $a_y = \frac{qE}{m}$   
 am Ende des E-Feldes

$$v_y = a_y \cdot t = \frac{qEL_e}{mv_x} \equiv v_{0y} \ll v_x \quad \text{mit } t = \frac{L_e}{v_x}$$

dannach B-Feld in z-Richtung

Kraft B-Feld  $\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B} \approx qv_x B \leadsto a_y = \frac{qv_x B}{m}$   
 am Ende des B-Feldes

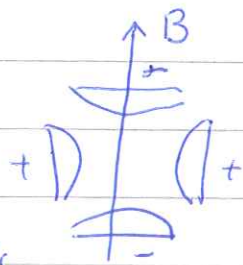
$$v_y = v_{0y} + \frac{qBL_B}{m} \quad \text{und } \tan \vartheta = \frac{v_y}{v_x} = \frac{q}{m} \left( \frac{EL_e}{v_x^2} + \frac{BL_B}{v_x} \right)$$

Felder können so gewählt werden, daß Teilchen mit gegebenem  $q/m$  auch mit etwas verschiedenen  $v_x$  in Ditektorebene (photographische Platte) auf eine Linie fokussiert werden. Genauigkeit Aston  $\Delta m/m \approx 10^{-4}$ , später bis zu  $1/20000$

genaueste Messungen von Kernmassen in Ionenfallen. Penningfalle:

Magnetfeld + elektrisches

Quadrupolfeld



bei sehr genauer Kenntnis

des Feldes aus Oszillationsfrequenz  $\rightarrow$  Masse

$\Delta m/m$  jetzt bis zu  $10^{-11}$  Kluge, Blaum, Kellermann, ...  
 (siehe z.B. Phys. Rep. 425 (2006) 1) auch für kurzlebige Kerne

b) für instabile Teilchen mittlerer Lebensdauer kombinierte Messung am Zirkus  $pc = \beta \gamma mc^2$   
 und Flugzeit  $t = L/\beta c \leadsto \beta, \gamma \leadsto m$

c) kurzlebige instabile Teilchen: Rekonstruktion der invarianten Masse aus den Zirkulsen der Zerfallsprodukte



benutze Zuordnung des (4er-Impulses)<sup>2</sup>

$$p^2 = (p_1 + p_2)^2 = E_x^2 - \vec{p}_x^2 c^2 \equiv m_x^2 c^4 \quad X \rightarrow \text{Teilchen 1 + 2}$$

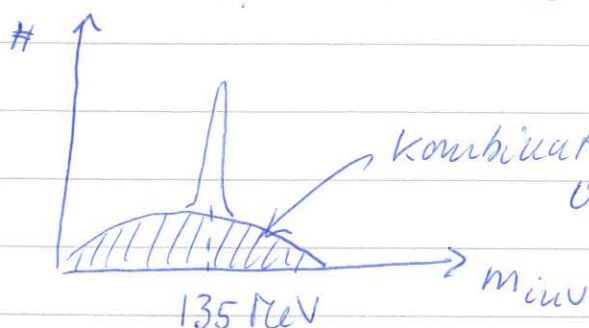
$m_x^2$  nennt man 'invariante Masse'  $p_x$   $p_i$   $p_2$

$p_1, p_2$  gemessen z.B. im Laborsystem

$$p^2 = (p_1 + p_2)^2 = (E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 c + \vec{p}_2 c)^2 \equiv m_x^2 c^4$$

$$m_x = (m_1^2 + m_2^2 + 2E_1 E_2 (1 - \beta_1 \beta_2 \cos \vartheta))^{1/2}$$

Beispiel:  $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$   $m_1 = m_2 = 0$   $\beta_1 = \beta_2 = 1$

$$m_{\pi^0} c^2 = \sqrt{2E_1 E_2 (1 - \cos \vartheta)}$$


kombinatorischer Untergrund: Kombination von 2 Photonen die nicht von Zerfall eines (desselben)  $\pi^0$  kommen

d) Verknüpfung mit einem Mutter- oder Tochter-Teilchen bekannter Masse über Messung der Zerfallsenergie, z.B. Kernmassen über  $\beta$ - oder  $\alpha$ -Zerfallsenergien

## 5.2 Spin

Teilchen sind durch ihren Eigendrehimpuls, Spin  $S$  charakterisiert. Für Elektron siehe PEP3

mit Spin ist magnetisches Moment verbunden

$$\vec{\mu}_s = g_s \mu_B \vec{S} / \hbar$$

↳ Magneton  $\frac{e\hbar}{2mc}$

↳ gyromagnetisches Verhältnis oder  $g$ -Faktor

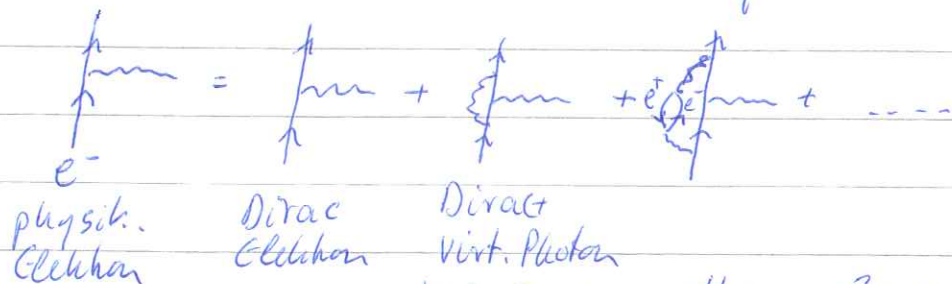
Verhältnis magnetisches Moment zu Spin in Einheiten des Magneton

Elektron: Bohrsches Magneton  $\mu_B = 5.79 \cdot 10^{-11} \text{ MeV/T}$   
 Nukleon: Kernmagneton  $\mu_N = 3.15 \cdot 10^{-14} \text{ MeV/T}$   
 $\approx 2000$  Mal kleiner wegen Nukleonmasse

Spin präzisiert um z-Achse  $\uparrow \downarrow$   $\sim$  Messung  
 des magnetischen Moments durch WW mit  
 einem Magnetfeld ergibt zeitliches Mittel, also  
 z-Komponente  $S_z = m_s \hbar$

$\langle \mu_s \rangle = g_s \mu_0 m_s$  gemessenes magn. Moment durch  
 Spin.  $m_s = \pm 1/2$

Elektron:  $g_s = -2$  Dirac Theorie, dann Korrekturen  
 auf Pro-wille-Niveau



WW des Elektrons  
 mit seinem eigenen  
 elektromagn. Feld

$|g| - 2$ : theor. Berechnung in Potenzen von  
 $\alpha$ , experimentell Präzisionsmessung in Penningfallen  
 (Dehmelt Nobelpreis, G. Gabrielse u.A.)

$$\langle \mu_s \rangle_e = \mp \mu_B$$

Proton:  $g_p = 5.58$   $\mu_0 = \mu_N$   $m_s = \pm 1/2$   $\langle \mu_s \rangle_p = \pm 2.79 \mu_N$

Neutron:  $g_n = -3.82$  " "  $\langle \mu_s \rangle_n = \mp 1.91 \mu_N$

"anomales magnetisches Moment" des Nukleons  
 wenn Nukleonen punktförmig wären, wäre  
 für Proton  $g_p = 2$  und für Neutron  $g_n = 0$

falls Teilchen auch Bahndrehimpuls hat:



$\vec{\mu} = \vec{\mu}_s + \vec{\mu}_o$  und im Magnetfeld entsprechende Zeeman-Aufspaltung der Niveaus (siehe Vorlesung 20 PEP3)

Teilchen mit halbzahligen Spin "Fermionen"  
 $s = 1/2$   $e^-, e^+, \nu, p, n, \dots$  } Fermi-Dirac Statistik  
 $s = 3/2$   $\Delta(1232)$  1. angeregter Zustand }  
 Nukleon }  $f(E) = \frac{1}{\exp((E-\mu)/kT) + 1}$

Teilchen mit ganzzahligen Spin "Bosonen"  
 $s = 0$   $\pi^\pm, \pi^0, K^\pm, \dots$  } Bose-Einstein Statistik  
 $s = 1$   $\gamma, \rho, \phi$  }  $f(E) = \frac{1}{\exp((E-\mu)/kT) - 1}$

Symmetrie der 2- bzw Viel-Teilchen-Wellenfunktion bereits i.d. Atomphysik besprochen. Gilt genauso für andere Systeme aus mehreren Fermionen, wie z.B. Atomkerne

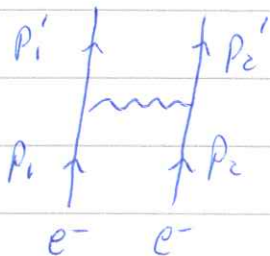
### 5.3 Klassifizierung nach Wechselwirkung

4 fundamentale Kräfte: Gravitation, elektromagnetische WW, schwache WW, starke WW

↳ z.B.  $\beta$ -Zerfall      ↳ Bindung von Nukleonen im Kern  
 ↳ Bindung von Quarks im Nukleon

Stärke charakterisiert durch dimensionslose Kopplungskonstante, "Ladung", Reichweite

em. WW  
 Austausch eines Photons



Photon überträgt 4-er Impuls  $q$  mit  $q^2 = (p_1' - p_1)^2$   
 $q^2 = (E_1' - E_1)^2 - (\vec{p}_1' - \vec{p}_1)^2$   
 $= (E_2' - E_2)^2 - (\vec{p}_2' - \vec{p}_2)^2$

$V_{em}(r) = \frac{e^2}{r}$  Fouriertransformation  $\rightarrow V_{em}(q^2)$

$V_{em}(q^2) = \int V_{em}(r) \exp(\frac{i}{\hbar} \vec{q} \cdot \vec{r}) d\vec{r} = \frac{e^2 \hbar^2}{q^2}$

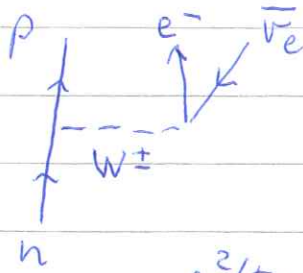
Propagator des masselosen Photons  $\frac{1}{q^2}$ , dimensionlose Kopplungskonstante  $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137}$

Schwache WW

z.B.  $\beta$ -Zerfall

des Neutrons

$m_w = 80.4 \text{ GeV}$



$V_{wk}(r) = \frac{g^2}{r} \exp(-\frac{m_w r}{\hbar c})$

$V_{wk}(q^2) = \frac{g^2}{q^2 - m_w^2}$

$g^2/\hbar c \approx 4 \cdot 10^{-3}$

Starke WW

Nukleon-Nukleon WW

Yukawa, Pion Austausch

$m_\pi \approx 140 \text{ MeV}$



$V_{strong}(r) = \frac{g_s^2}{r} \exp(-\frac{m_\pi r}{\hbar c})$

$V_{strong}(q^2) = \frac{g_s^2}{q^2 - m_\pi^2}$

auf noch kleinere Skala starke WW von Quarks durch Austausch von Gluonen

für schwere Quarks

Potentialbild sinnvoll, z.B. Charm-Qu.

$g_s^2/\hbar c \approx 15$   $\alpha_s = \frac{g_s^2}{4\pi}$

stark  $q^2$ -abhängig



$V(r) = -\frac{\alpha_s}{r} + \underbrace{kr}_{\text{Confinement}}$

Confinement  $k \approx 1 \frac{\text{GeV}}{\text{fm}}$

Coulomb-artiger Teil, bei kleinem  $q^2$  ist  $\alpha_s \approx O(1)$

WW werden durch Feldtheorien beschrieben

em WW  $\leftrightarrow$  QED (Nobelpreis 1965 Feynman, Schwinger, Tomonaga)

em + schwache WW  $\leftrightarrow$  elektroschwaches Standardmodell (Nobelpreis 1979 Glashow, Salam, Weinberg)