

6. Starke Wechselwirkungen

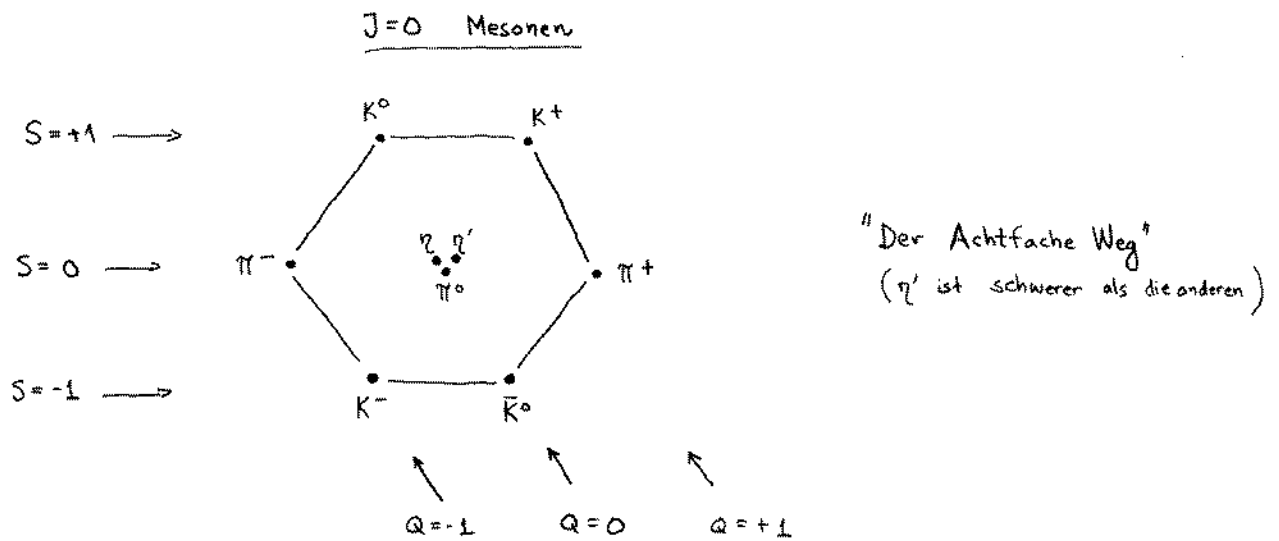
Ganz im Gegensatz zur QED, sind starke Wechselwirkungen äußerst kompliziert — und darum auch sehr interessant! Sie führen zu viel "Phänomenologie", vielen theoretischen Näherungsmethoden, und auch vielen neuen Begriffen. Wir können hier leider nur ganz oberflächlich sein.

6.1 Das Quarkmodell [Gell-Mann, Ne'eman, Zweig 1959-64]

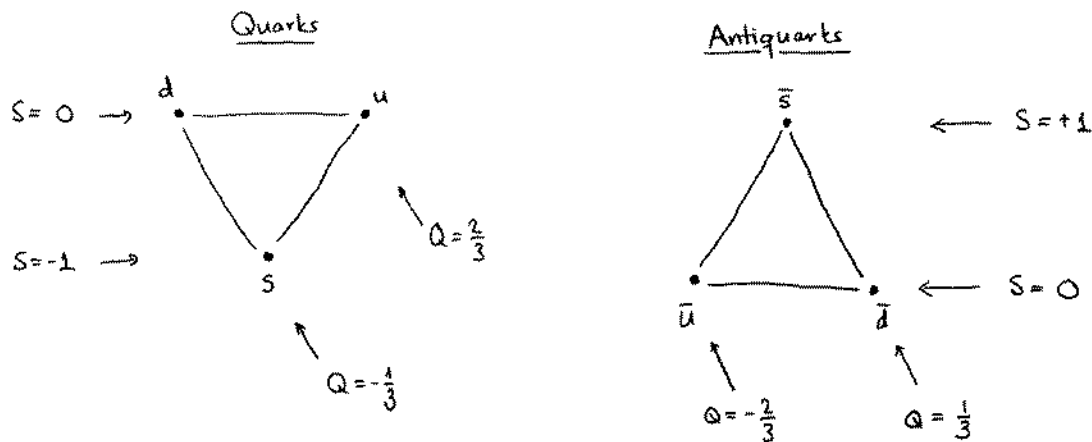
Es gibt zwei Arten von Quarks: die leichten Quarks u, d, s (mit Masse ≤ 500 MeV) und die schweren Quarks c, b, t (Masse ≥ 1 GeV).

Was wissen wir über die leichten Quarks durch die Beobachtung von leichten Hadronen (Mesonen mit $J=0,1$; Baryonen mit $J=\frac{1}{2}, \frac{3}{2}$)?

Gell-Mann hat entdeckt, daß es eine Struktur gibt, falls man bestimmte Quantenzahlen zu den (damals) bekannten Hadronen zuteilt:



Nachher hat er eine Erklärung für die Struktur gegeben: jedes Meson besteht aus einem Quark und einem Antiquark!



Nimmt man alle Kombinationen, bekommt man tatsächlich $3 \times 3 = 9$ Mesonen [oder, in der Gruppentheorie, $3 \otimes \bar{3} = 8 \oplus 1$, wobei 1 das η ist]. Dies funktioniert nicht nur für Spin-0 ($\uparrow\downarrow$) und Spin-1 ($\uparrow\uparrow$) Mesonen, sondern auch Spin- $\frac{1}{2}$ ($\uparrow\uparrow\downarrow$) und Spin- $\frac{3}{2}$ ($\uparrow\uparrow\uparrow$) Baryonen, usw!

Der große Erfolg: Es gab eine Ecke (Ω^- , sss) ohne ein experimentell entdecktes Teilchen. Gell-Mann machte eine Vorhersage, und tatsächlich wurde Ω^- bald entdeckt!

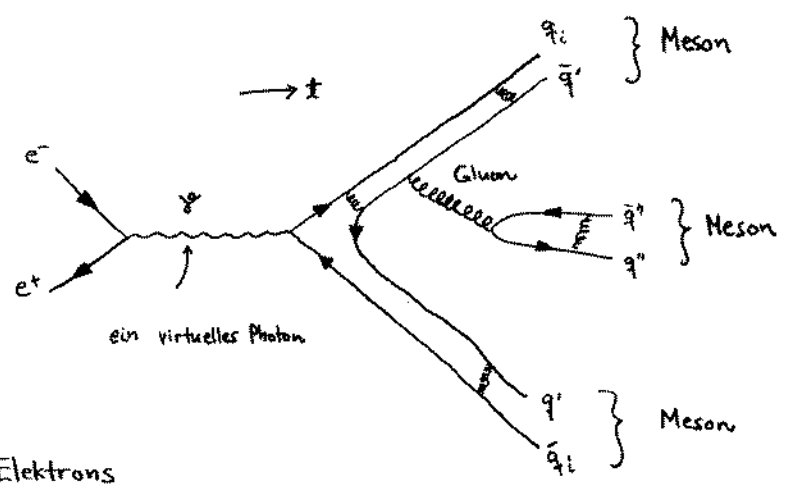
- Große Probleme:
- * Warum sieht man keine freien Quarks??
 - * Widerspricht "sss" nicht dem Pauli-Prinzip??

Als Lösung wurde eine neue Eigenschaft, "Farbe", vorgeschlagen: Quarks haben drei Farben / Antifarben, jedoch treten nur farblose Kombinationen als freie Teilchen auf.

Um sicher zu sein, daß dieser Vorschlag richtig ist, brauchen wir jetzt Methoden, die uns erlauben, die innere Struktur der Hadronen quantitativ zu studieren!

6.2 Hadronerzeugung in e^-e^+ -Kollisionen [SLAC, LEP]

Was passiert?



$E \equiv$ Energie des einlaufenden Elektrons im Schwerpunktsystem

$Q_i \equiv$ Ladung von q_i in Einheiten von e

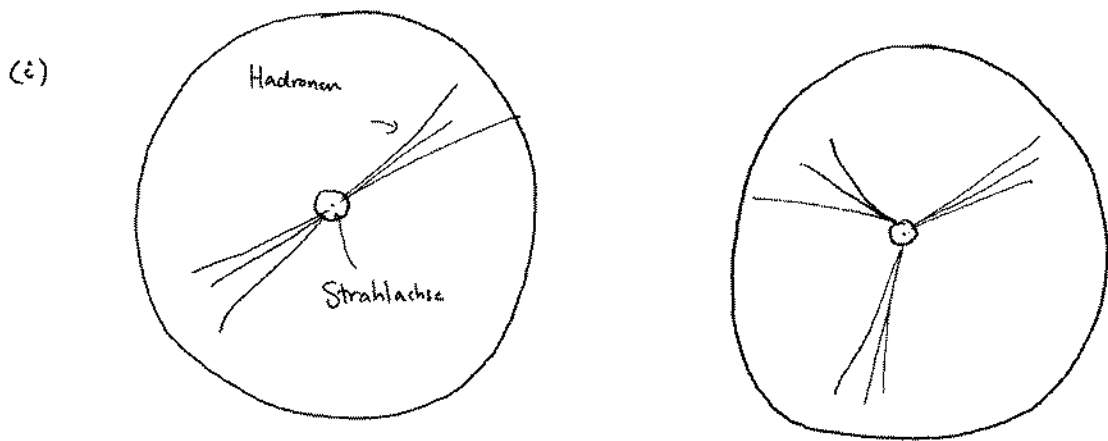
$$\Rightarrow \sigma_{\text{tot}} = \sum_{\substack{\text{Farben} \\ \text{Flavors } i}} Q_i^2 \frac{\pi}{3} \left(\frac{\alpha_{EM}}{E}\right)^2 \sqrt{\frac{1 - m_q^2/E^2}{1 - m_e^2/E^2}} \left(1 + \frac{m_q^2}{2E^2}\right) \left(1 + \frac{m_e^2}{2E^2}\right) \Theta(E - m_q)$$

$$\approx N_c \cdot \sum_i Q_i^2 \cdot \frac{\pi}{3} \left(\frac{\alpha_{EM}}{E}\right)^2, \quad \text{wo } N_c \equiv \sum_{\text{Farben}}$$

$$E \gg m_q \gg m_e$$

Wichtige experimentelle Beobachtungen: (entlang der Strahlachse)

59



"Zwei-Jet-Ereignis":
 $e^+e^- \rightarrow q\bar{q} \rightarrow \text{"Hadronisierung"}$

"Drei-Jet-Ereignis"
 $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}G \rightarrow \text{"Hadronisierung"}$

(ii) Z_{tot} stimmt mit Experimenten überein, falls $N_c = 3!$

\Rightarrow Die Quark- und Farbhypothesen scheinen richtig zu sein!

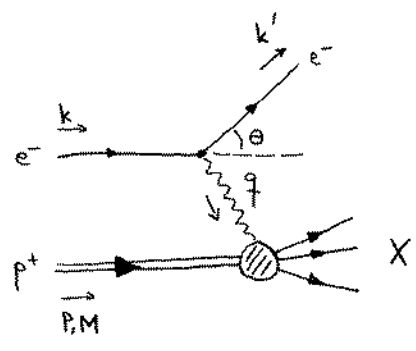
6.3 Tiefinelastische e^-p^+ -Streuung [HERA / DESY]

\equiv Das "Präzisionsinstrument" für die Untersuchung der inneren Struktur des Protons (und damit die Eigenschaften von Quarks und Gluonen).

Die Idee: In der Rutherford-Streuung deutet die Zahl der unter großen Winkeln abgelenkten Teilchen darauf hin, daß das Atom eine innere Struktur hat (einen Kern)!

In der tiefinelastischen Streuung deutet die Zahl der unter großen Winkeln abgelenkten Teilchen darauf hin, daß das Proton eine innere Struktur hat (Quarks und Gluonen)!

Die Kinematik:



$$k \equiv (E, \vec{k})$$

$$k' \equiv (E', \vec{k}')$$

ein "inklusive" Prozeß:
nur das auslaufende Photon
wird identifiziert.

Seien k, P bekannt, und alles über X unbekannt, gibt es zwei unabhängige Variablen: E', θ [so daß $k' = (E', \sqrt{E'^2 - m_e^2} \hat{e}_{k'})$, wo $\hat{e}_k \cdot \hat{e}_{k'} = \cos\theta$].

(Wenn dagegen die Streuung elastisch ist, gibt es nur eine unabhängige Variable, wegen der weiteren Randbedingung $(k+P-k')^2 \equiv m_p^2$!)

In theoretischen Überlegungen benutzt man üblicherweise

$$Q_E^2 \equiv -q^2 \quad \text{und} \quad x \equiv \frac{Q_E^2}{2q \cdot P} \quad [\text{"Bjorken } x \text{"}]$$

Es gibt eine eins-zu-eins Beziehung in zwischen (Q_E^2, x) und (E', θ) (vgl. Übungen).

Für $E \gg m_e$ wird der gemessene Wirkungsquerschnitt folgenderweise parametrisiert:

$$\frac{d^2}{dE' d\Omega} \equiv \left(\frac{\alpha_{EM}}{2E \sin^2(\theta/2)} \right)^2 \left[2W_1(Q_E^2, x) \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) + W_2(Q_E^2, x) \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]$$

Wir nennen W_1 und W_2 Strukturfunktionen des Protons. Die Eigenschaften dieser Funktionen enthalten alle mögliche Information über das Proton, und sind experimentell gut bekannt.

Vgl. mit der Mottischen Formel für elastische Streuung (S.56): für $E \gg m_e$, ist $|q_p| = E$, und damit

$$\frac{d^2}{d\Omega} = \left(\frac{\alpha_{EM}}{2E \sin^2(\theta/2)} \right)^2 \left[\cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]$$

In diesem Fall ist E' nicht unabhängig von E, θ .