

Kapitel 6

Die Quark-Lepton-Familien

6.1 Charm

6.1.1 Der Cabibbo-Winkel und der GIM-Mechanismus

Obwohl das Quarkmodell der 3 leichten Quarks u , d , s sehr erfolgreich war, hatte man bald vermutet, daß es noch unvollständig ist. Insbesondere ist die Unsymmetrie zwischen den $-1/3$ -geladenen d - und s -Quarks und dem $2/3$ -geladenen u -Quark aufgefallen und schon bald wurde die Hypothese eines vierten Quarks mit Ladung $2/3$ und einer neuen Flavour-Quantenzahl, Charm, diskutiert.

Das theoretische Argument für Charm basierte auf der Analyse von flavour-ändernden schwachen Zerfällen. Bei leptonischen Zerfällen hatte man beobachtet, daß die Kopplung universell ist, unabhängig davon, ob Elektronen oder Myonen (heute schließen wir auch die τ -Leptonen ein) mit ihren Neutrinos beteiligt sind (die Kopplungsstärke wird durch die Fermi-Kopplungskonstante G_F festgelegt, wie wir später besprechen werden). Der Vertex $W^\pm \rightarrow l^\pm \nu_l$ (Abb. 6.1 oben) ist von Struktur (linkshändige Leptonen und rechtshändige Antileptonen) und Kopplungsstärke für alle Leptonen, $l = e, \mu, \tau$ gleich.

Bei den entsprechenden Quarkdiagrammen in Abb. 6.1 unten ist das anders: die Kopplung an das $u\bar{s}$ -Paar (zum Beispiel im K^0 -Zerfall, Abschnitt 5.5.1) ist unterdrückt gegenüber der Kopplung an das $u\bar{d}$ -Paar (zum Beispiel im Neutron-Zerfall, Abb. 4.1). Um das bei Leptonen beobachtete Konzept der **Universalität der schwachen Wechselwirkung** auch auf Quarks übertragen zu können, hat Cabibbo postuliert, daß die schwache Kopplung eigentlich zwischen dem u -Quark

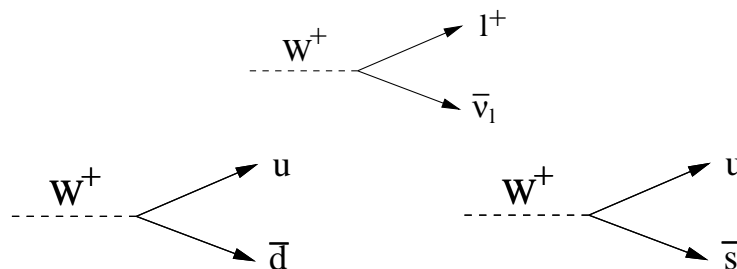


Abbildung 6.1: Diagramme für die Kopplung von W-Bosonen an Leptonen (oben) und Quarks (unten).

und einem Mischungszustand d' aus d - und s -Quarks besteht:

$$|d' \rangle = \cos \theta_c \cdot |d \rangle + \sin \theta_c \cdot |s \rangle \quad (6.1)$$

mit einem Mischungswinkel θ_c , dem Cabibbo-Winkel. Der Cabibbo-Winkel wird zum Beispiel aus dem Vergleich des Neutron-Zerfalls ($\sim \cos \theta_c$) mit Hyperon-Zerfällen ($\sim \sin \theta_c$) bestimmt:

$$\sin \theta_c = 0.22$$

Die Unterdrückung von Hyperon-Zerfällen ist also $(\sin \theta_c / \cos \theta_c)^2 \approx 0.05$.

Wie die Leptonen bezüglich der schwachen Wechselwirkung immer in Dubletts auftreten, die an das W -Boson koppeln,

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}, \quad (6.2)$$

gibt es dann ein Quarkdublett

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}. \quad (6.3)$$

Die Frage liegt nahe, ob es nicht ein entsprechendes Dublett gibt mit einem Zustand s' , der orthogonal zu d' sein sollte:

$$|d' \rangle = \cos \theta_c \cdot |d \rangle + \sin \theta_c \cdot |s \rangle \quad (6.4)$$

$$|s' \rangle = -\sin \theta_c \cdot |d \rangle + \cos \theta_c \cdot |s \rangle \quad (6.5)$$

Das 2/3-ladige Quark im Dublett sollte dann das Charm-Quark sein:

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}. \quad (6.6)$$

Mit dieser Erweiterung des Cabibbo-Modells haben Glashow, Iliopoulos und Maiani (GIM) 1970 die Unterdrückung sogenannter flavour-ändernder neutraler Ströme (FCNC) erklären können. Zum Beispiel konnte man nicht verstehen, daß der Zerfall $K_L \rightarrow \mu^+ \mu^-$ stark unterdrückt ist, obwohl er eigentlich über das sogenannte Box-Diagramm (Abb. 6.2) ablaufen sollte.

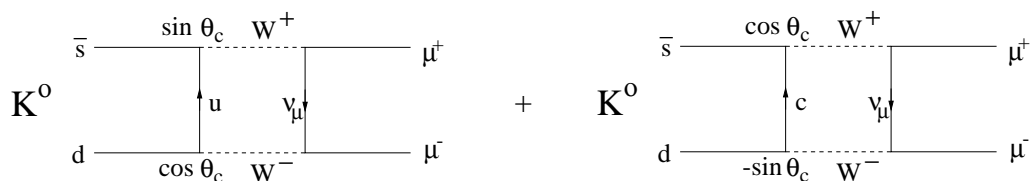


Abbildung 6.2: Box-Diagramme für den Zerfall $K_L \rightarrow \mu^+ \mu^-$.

Das zweite Diagramm in Abb. 6.2 mit dem Austausch des Charm-Quarks trägt mit dem umgekehrten Vorzeichen bei. Wenn die Massen der u - und c -Quarks genau gleich wären, würden sich beide Diagramme exakt auslöschen (GIM-Mechanismus). Aus der nicht vollständigen Unterdrückung des Zerfalls berechneten GIM eine Vorhersage für die c -Quarkmasse:

$$m_c = 1 \dots 3 \text{ GeV.}$$

6.1.2 Entdeckung des Charm-Quarks

Im November 1974 ist das Charm-Quark simultan in Stanford (B. Richter et al.) und Brookhaven (S.Ting et al.) entdeckt worden. Man hat danach von der ‘November-Revolution’ der Teilchenphysik gesprochen, weil mit einem Schlage viele Probleme und Ungereimtheiten gelöst wurden.

Beide Gruppen haben den niedrigstliegenden Vektormeson-Zustand $c\bar{c}$, das J/ψ bei einer Masse von etwa 3.1 GeV beobachtet. Das Teilchen bekam einen Doppelnamen, weil die Gruppe an der Ostküste das Teilchen J (ähnlich dem chinesischen Zeichen für Ting) und die Gruppe an der Westküste das Teilchen ψ genannt hatte.

Die Richter-Gruppe hatte das J/ψ an dem e^+e^- -Speicherring SPEAR als scharfe Spitze im Wirkungsquerschnitt bei einem Energie-Scan um 3 GeV in folgenden Reaktionen beobachtet (Abb. 6.3):

$$e^+e^- \rightarrow e^+e^- \quad (6.7)$$

$$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^- \quad (6.8)$$

$$e^+e^- \rightarrow \text{Hadronen} \quad (6.9)$$

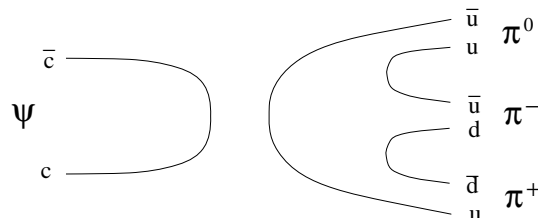
Überraschend war die geringe Breite der Resonanz (entsprechend einer langen Lebensdauer) von $\Gamma = 87$ keV, die auf eine neue, erhaltene Quantenzahl hinwies. Man ordnet dem c -Quark die Charmquantenzahl $C = +1$ und dem c -Antiquark $C = -1$ zu.

Die Ting-Gruppe hatte das J/ψ in Proton-Kern-Reaktionen als Resonanz in der invarianten e^+e^- -Masse beobachtet (Abb. 6.4):

$$p + Be \rightarrow e^+e^- + X. \quad (6.10)$$

6.1.3 Charmonium

Aufgrund der großen Masse des Charm-Quarks entkoppeln die $c\bar{c}$ gebundenen Zustände, die auch Charmonium-Zustände genannt werden, weitgehend von den leichten Quarks. Die Spektroskopie von Quark-Antiquark-Systemen (‘Onia’) wird deshalb beim Charmonium besonders übersichtlich. Solange ein Charmonium-Zustand noch nicht in Teilchen mit ‘offenem’ Charm (zum Beispiel D-Mesonen mit einem c -Quark und einem leichten Quark, siehe weiter unten) zerfallen kann, sind ‘starke’ Zerfälle unterdrückt. Zwar ist es möglich, dass das $c\bar{c}$ -Paar annihiliert und leichte Quarks erzeugt werden, wie in dem Diagramm gezeigt wird,



aber diese ‘disconnected diagrams’ sind so stark unterdrückt, dass elektromagnetische Prozesse konkurrenzfähig sind. Damit kommt die Lebensdauer beziehungsweise die Massenbreite in einen Bereich, der eher typisch für elektromagnetische Zerfälle ist. Dadurch werden unterhalb der Schwelle für offenen Charm radiative Übergänge

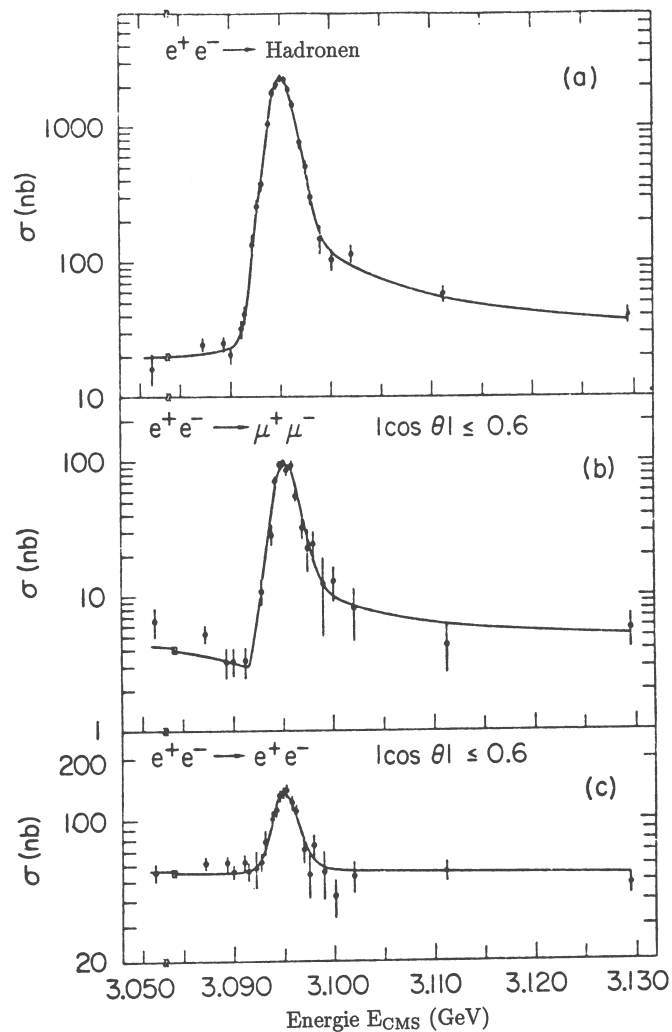


Abbildung 6.3: Elektron-Positron-Wirkungsquerschnitt im Bereich der J/ψ -Resonanz.

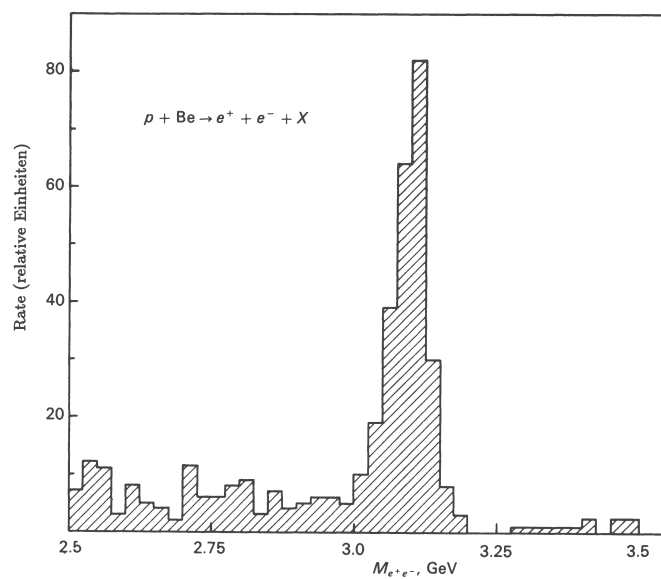


Abbildung 6.4: Entdeckung des J/ψ durch die Ting-Gruppe.

(Emission von Photonen) zwischen verschiedenen $c\bar{c}$ -Anregungszuständen (Abb. 6.5) beobachtbar.

Das Studium der Charmonium-Spektroskopie hat zu wesentlichen Erkenntnissen über die QCD, die verantwortlich für die Quarkbindungen ist, geführt. Es zeigt sich, daß die QCD-Wechselwirkung durch ein Potential beschrieben werden kann, das einen Coulomb-artigen kurz-reichweitigen und einen lang-reichweitigen Term hat:

$$V(r) = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s(M^2)}{r} + ar \quad (6.11)$$

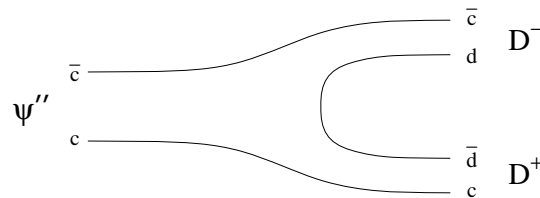
Die Skala für die Kopplungskonstante α_s ist die Charmonium-Masse M . In Abbildung 6.6 wird die resultierende Farbkraft in Quarkonium-Systemen mit der elektromagnetischen Kraft verglichen.

6.1.4 Offener Charm

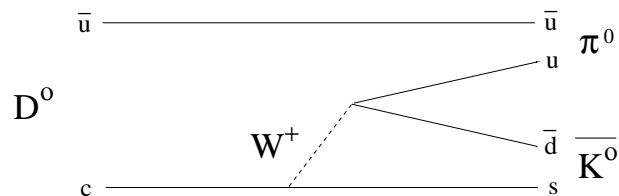
Die leichtesten Teilchen, die Charm besitzen, also mit $C \neq 0$, sind die D-Mesonen mit $J^P = 0^-$ (wie die leichtesten Mesonen bei den anderen Flavours). Die Masse der D-Mesonen ist etwa 1865 MeV und damit ist die Schwelle für die assoziierte Produktion von offenem Charm bei etwa 3730 MeV. Die zweite radiale Anregung des J/ψ , das ψ'' (3770), liegt oberhalb der Schwelle und zerfällt deshalb bevorzugt in $D\bar{D}$ -Paare:

$$\begin{aligned} \psi'' &\rightarrow D^0 \bar{D}^0 \\ \psi'' &\rightarrow D^+ D^- \end{aligned}$$

Ein entsprechendes Quarkdiagramm sieht wie folgt aus:



Die leichtesten Hadronen mit Charm können nur schwach zerfallen, wobei das c -Quark bevorzugt in ein s -Quark übergeht ('Cabibbo-erlaubte' Zerfälle). Man erwartet also in Charm-Zerfällen bevorzugt die leichtesten Mesonen mit s -Quarks, also K-Mesonen, zum Beispiel:



Die drei leichten Quarks bilden zusammen mit dem Charm-Quark weitere Meson- und Baryonzustände. Als Beispiel sind die entsprechenden 16-pletts für die pseudoskalaren und Vektormesonen in Abb. 6.7 gezeigt (aus Review of Particle Physics [34]). Die entsprechenden Multipletts müssen dreidimensional dargestellt werden, entsprechend den Quantenzahlen I_3 , S und C . Mit dem Einschluß des vierten Quarks erhält man allerdings keine höhere Symmetrie, weil die Masse des Charm-Quarks sehr hoch ist (≈ 1.5 GeV).

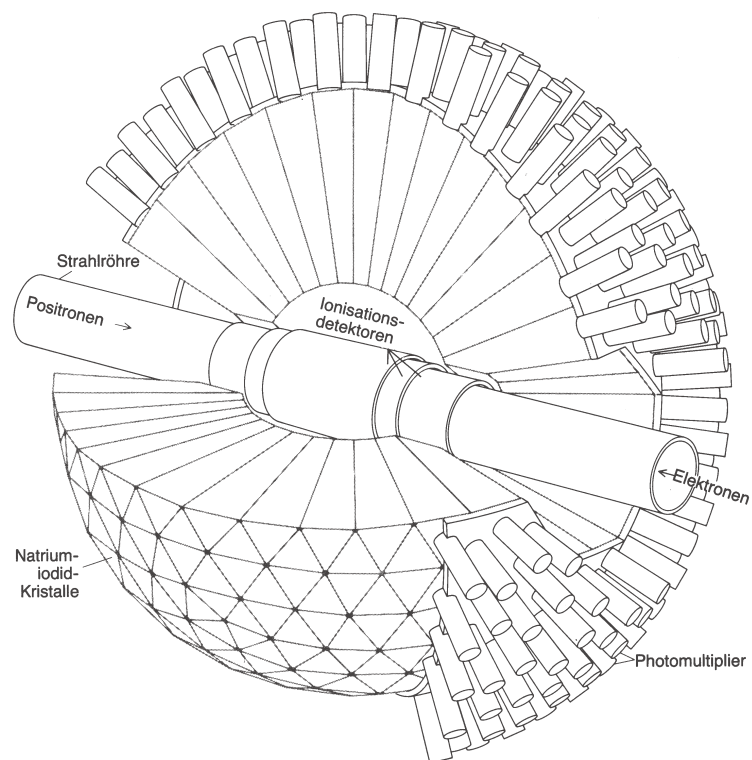
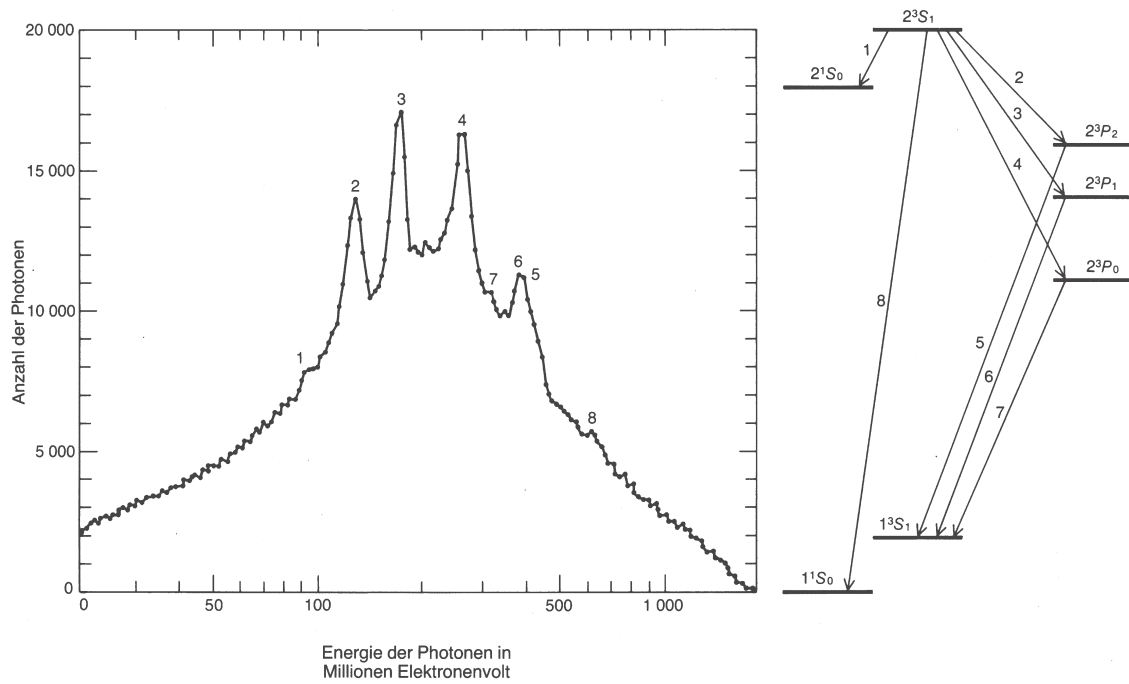


Abbildung 6.5: Photonenspektrum des Charmoniums, aufgenommen mit dem Crystal Ball Detector (SPEAR). Der Crystal Ball Detector (Abbildung unten) besteht aus NaI-Kristallen, die in dichter Packung den Wechselwirkungspunkt umgeben.