

KAPITEL 7 :

Quarks in Hadronen

- 7.1 Quarkstruktur der Nukleonen**
- 7.2 Mesonen und Baryonen**
- 7.3 Mesonen aus leichten Quarks (u,d,s)**
- 7.4 Baryonen aus leichten Quarks (u,d,s)**
- 7.5 Vektormesonproduktion in e^+e^- Kollisionen**
- 7.6 Mesonen aus schweren Quarks (c,b)**
- 7.7 Breite und Lebensdauer hadronischer Zustände**
- 7.8 Das Top Quark**

7.1 Quarkstruktur der Nukleonen

- Tiefinelastische Streuung:

Information über Struktur und Zusammensetzung der Nukleonen

Aus Strukturfunktion $\longrightarrow$ Nukleonen bestehen aus punktförmigen Teilchen (Partonen)

Aus Verhältnis des elektrischen zum magnetischen Anteil der Strukturfunktion $\longrightarrow$ Konstituenten haben Spin = $1/2$

- Komplementäre Information aus Hadronspektroskopie:

Aussage über Eigenschaften der starken Wechselwirkung
Feldquanten = Gluonen: beschreiben innere Dynamik der Hadronen und Kräfte zwischen ihnen

Hadronen: stark wechselwirkende Teilchen (z.B.: p, n, ..)

- 1963: Gell-Mann führte Quarks ein zur Deutung und Systematisierung aller bekannten Hadronen

Zweig entwickelte diese Idee unabhängig

Es gab einen 'Teilchenzoo': p, n, π , K, Δ , Σ , ..

u, d, s Quarks vorhergesagt

Schönheit des Quarkmodells liegt in der Einfachheit

Eigenschaften der Hadronen gegeben durch

Quantenzahlen der Quarks

Ω^- (sss) vorhergesagt, 1964 entdeckt $\Rightarrow$ Erfolg des Quarkmodells

Geladene Partonen von Feynman und Bjorken entsprechen Quarks von Gell-Mann

Elektrisch neutrale Partonen entsprechen Gluonen

Isospin der Nukleonen

$$m_p = 938.27231 \text{ MeV}/c^2 \quad m_n = 939.56563 \text{ MeV}/c^2$$

$$m_n - m_p = 1.29332 \text{ MeV}/c^2$$

Unterschied aufgrund der elektromagnetischen Wechselwirkung

Aus Streuexperimenten: Kräfte $pp \equiv nn$
wenn elm Effekte abgezogen
→ Starke Kraft $\neq f(\text{Ladung der Nukleonen})$

Existiert nur starke Kraft: p und n sind ununterscheidbar
damit: p, n als 2 Zustände ein und desselben Teilchens
interpretieren $\equiv$ Nukleon

Zur Beschreibung der beiden Zustände: Isospin I
 I ist Vektor im abstrakten Isospinraum ($\vec{I} = I_1, I_2, I_3$)
Orientierung dieses Vektors gibt Ladungszustand an

	Spin 1/2 Teilchen im Ortsraum	Nukleon im Isopin-Raum
Orientierung	nach oben: $\uparrow$	nach oben: $p \Rightarrow I_3 = +\frac{1}{2}$
	nach unten: $\downarrow$	nach unten: $n \Rightarrow I_3 = -\frac{1}{2}$

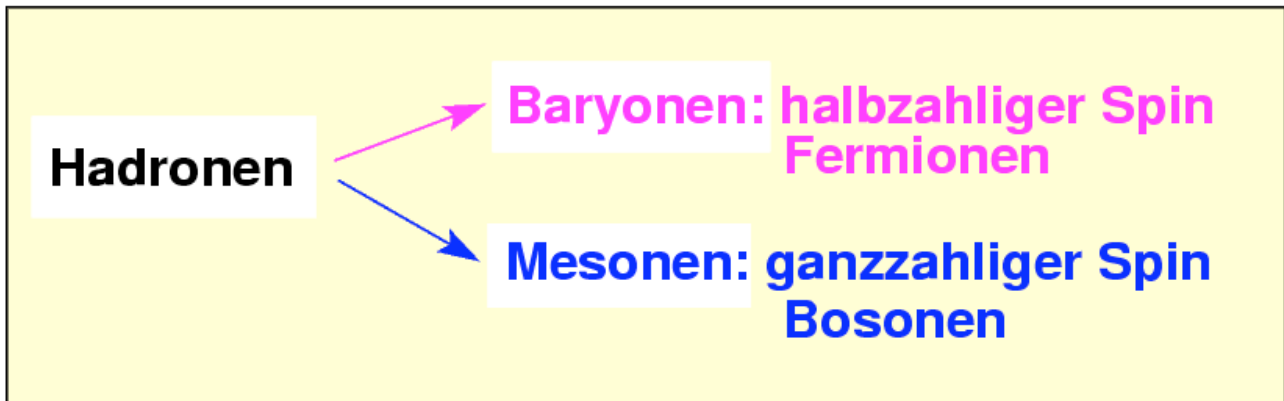
In Dirac Bra-Ket Notation: Zustand $|I, I_3\rangle$: $p = |\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}\rangle$
 $n = |\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}\rangle$

Starke WW: Rotationsinvariant im Isospin-Raum

→ Isospin-Erhaltung

Symmetrie durch Anwesenheit von elm und schwacher Kraft gebrochen → $m_p \neq m_n$
kann zwischen n und p unterscheiden

7.2 Mesonen und Baryonen



Spin – Statistik – Theorem (Pauli 1940):

Grundlegendes Konzept bei der Analyse der Wechselwirkung von Teilchen und Feldern

- Teilchen mit halbzahligem Spin ($\frac{1}{2}\hbar, \frac{3}{2}\hbar, \dots$)
gehören der Fermi – Dirac Statistik $\longrightarrow$ Fermionen
- Teilchen mit ganzzahligem Spin ($0, \hbar, 2\hbar, \dots$)
gehören der Bose – Einstein Statistik $\longrightarrow$ Bosonen

Statistik bestimmt Symmetrie der Wellenfunktion Ψ für Paar von identischen Teilchen (1 und 2) bei Vertauschung beider Teilchen

Sind Teilchen identisch: $|\Psi|^2$ nicht geändert: $\Psi \xrightarrow{1 \leftrightarrow 2} \pm \Psi$

Es gilt folgende Regel:

Für identische Bosonen: $\Psi(1, 2) \xrightarrow{1 \leftrightarrow 2} +\Psi(2, 1)$ symmetrisch

Für identische Fermionen: $\Psi(1, 2) \xrightarrow{1 \leftrightarrow 2} -\Psi(2, 1)$ antisymmetrisch

Pauli–Prinzip: Die Wellenfunktion eines Zustandes, welcher zwei (oder mehrere) identische Teilchen mit halbzahligem Spin beschreibt, ist antisymmetrisch unter Vertauschung zweier Teilchen.

7.3 Mesonen aus leichten Quarks

- Pionen sind leichteste Mesonen: $m_\pi \sim 140 \text{ MeV}/c^2$
- Spin der Pionen = 0 $\longrightarrow$ bestehen aus $q\bar{q}$ -Paar
- Pion: 3 Ladungszustände: $|\pi^+ \rangle = |u\bar{d} \rangle$
 $|\pi^- \rangle = |\bar{u}d \rangle$
 $|\pi^0 \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} [|u\bar{u} \rangle - |d\bar{d} \rangle]$
- Allgemein: Mesonen bestehen aus $q\bar{q}$ -Paaren,
Spin der Mesonen : ganzzahlig
- Keine Mesonzahlerhaltung: da Mesonen = $|q\bar{q} \rangle$
d.h. Zahl der q - Zahl der $\bar{q} = 0$

Mesonmultipletts: $J^P = 0^-, J^P = 1^-$

Betrachten Mesonen aus 3 leichten Quarks (u, d, s) aufgebaut:
Erwarte aus Kombination von 3 q + 3 $\bar{q}$: **9 Mesonen** (Nonett)

Quantenzahlen der Mesonen: (Betrachte nur $L = 0$ Zustände)

- Parität: $P = (-1)^{L+1} = -1$
- Spin: $S = J$, da $L = 0$:
 $J^P = 0^-$: **Pseudoskalare Mesonen**: z.B.: $\pi^\pm, \pi^0, K^\pm, K^0$
 $J^P = 1^-$: **Vektormesonen**: z.B.: $\rho^\pm, \rho^0, \omega$
- Isospin: betrachte u, d: u: $I_3 = +\frac{1}{2}$ d: $I_3 = -\frac{1}{2}$
 $\longrightarrow 2 \times 2$ Kombinationen aus u, $\bar{u}$, d, $\bar{d}$
 $\longrightarrow$ Für s-Quarks: $I_3 = 0$
- Strangeness: S erhalten bei der starken Wechselwirkung
 $S = -1$ für s-Quark
 $S = +1$ für $\bar{s}$ -Quark

7.4 Baryonen aus leichten Quarks

- p, n... Baryonen mit kleinster Masse ('Grundzustände')
es existieren auch angeregte Zustände
- Bestehen aus 3 Quarks $\longrightarrow$ Spin der Baryonen ist
halbzahlig
- **Baryonzahl B :** additive Quantenzahl
 $B = +1$ für Baryonen $\longrightarrow$ für Quarks: $B = +\frac{1}{3}$
 $B = -1$ für Antibaryonen $\longrightarrow$ für Anti-Quarks: $B = -\frac{1}{3}$
alle andere Teilchen haben $B = 0$
Bis heute: B ist Erhaltungsgrösse !
z.B.: $p \not\rightarrow \pi^0 + e^+$: Damit $\tau_p > 5.5 \cdot 10^{32}$ Jahre

Baryonen aus u, d Quarks: p, n, Δ
u, d, s Quarks: Hyperonen: Λ , Σ , Ξ , Ω

Beispiel: Δ^{++} : $|u^\uparrow u^\uparrow u^\uparrow\rangle$ $J^P = \frac{3}{2}^+$
Symmetrische Ortswellenfunktion ($L = 0$)
Symmetrische Spinwellenfunktion
Symmetrische Flavourwellenfunktion
 $\longrightarrow$ **Gesamtwellenfunktion ist symmetrisch**
Widerspruch zum Pauli-Prinzip

Lösung des Problems:

Führe neue Quantenzahl Farbe ein:

rot
blau
grün } für Quarks

Antiquarks tragen entsprechende Antifarbe

Bemerkung: Baryonen und Mesonen sind jedoch farbneutral!

Hadronen als farbneutrale Objekte

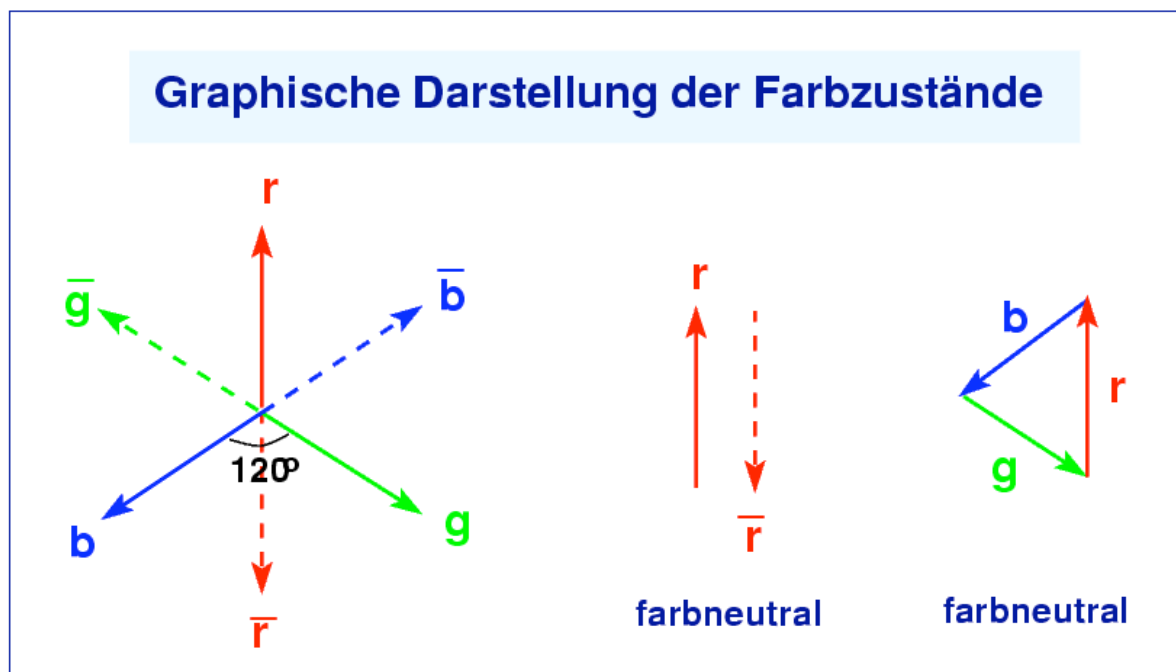
Daten: es existiert nur eine Sorte von Teilchen: $p, n, \pi, \dots$

→ freie Teilchen tragen keine Nettofarbe

→ Quarks können nicht als freie Teilchen beobachtet werden

Quanten-Chromodynamik (QCD):

es können nur farbneutrale ('weisse') Zustände gebildet werden. Bsp.: $r\bar{r}, (b + r + g)$ sind farbneutral



Beispiel:

$$\left. \begin{aligned} |\pi^+ \rangle &= |u_r \bar{d}_r \rangle \\ |\pi^+ \rangle &= |u_b \bar{d}_b \rangle \\ |\pi^+ \rangle &= |u_g \bar{d}_g \rangle \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &\text{physikalisches (=messbares) } \pi \text{ ist} \\ &\text{Mischung aus 3 Farbzuständen} \\ &\longrightarrow \text{Nettofarbe ist weiss} \end{aligned}$$

Bemerkung: es gibt keine Hadronen mit $|qq \rangle$ oder $|qq\bar{q} \rangle$
→ wären nicht farbneutral

Baryon-Multiplets

Betrachte: Baryonen aus u, d, s Quarks

$L = 0$ und keine radiale Anregungen
d.h. Baryonen mit niedrigsten Massen

Gesamtwellenfunktion Ψ_{tot} muss antisymmetrisch sein:

$$\Psi_{\text{tot}} = \zeta_{\text{Ort}} \cdot \xi_{\text{Flavor}} \cdot \chi_{\text{Spin}} \cdot \phi_{\text{Farbe}}$$

$$\text{Baryon-Dekuplet: } J^P = \frac{3}{2}^+$$

- $J = S = \frac{3}{2}$: Spin $\uparrow\uparrow\uparrow \Rightarrow \chi_{\text{Spin}}$ symmetrisch
- $L = 0$: ζ_{Ort} symmetrisch
- für $|uuu\rangle$: ξ_{Flavor} symmetrisch
 $\rightarrow \phi_{\text{Farbe}}$ muss antisymmetrisch sein:

$$\phi_{\text{Farbe}} = \frac{1}{\sqrt{6}} \sum_{\alpha} \sum_{\beta} \sum_{\gamma} \epsilon_{\alpha\beta\gamma} |q_{\alpha} q_{\beta} q_{\gamma}\rangle$$
mit $\alpha, \beta, \gamma = r, b, g$ und $\epsilon_{\alpha\beta\gamma} \dots$ total antisymmetrischer Tensor
- Für Zustände mit verschiedenen Quarks: mehrere Terme für ξ_{Flavor} symmetrisch
z.B.: $|\Delta\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}} [|uud\rangle + |udu\rangle + |duu\rangle]$
- $\Rightarrow$ 10 verschiedene 3-Quarkzustände mit $J^P = \frac{3}{2}^+$ und Ψ_{tot} antisymmetrisch

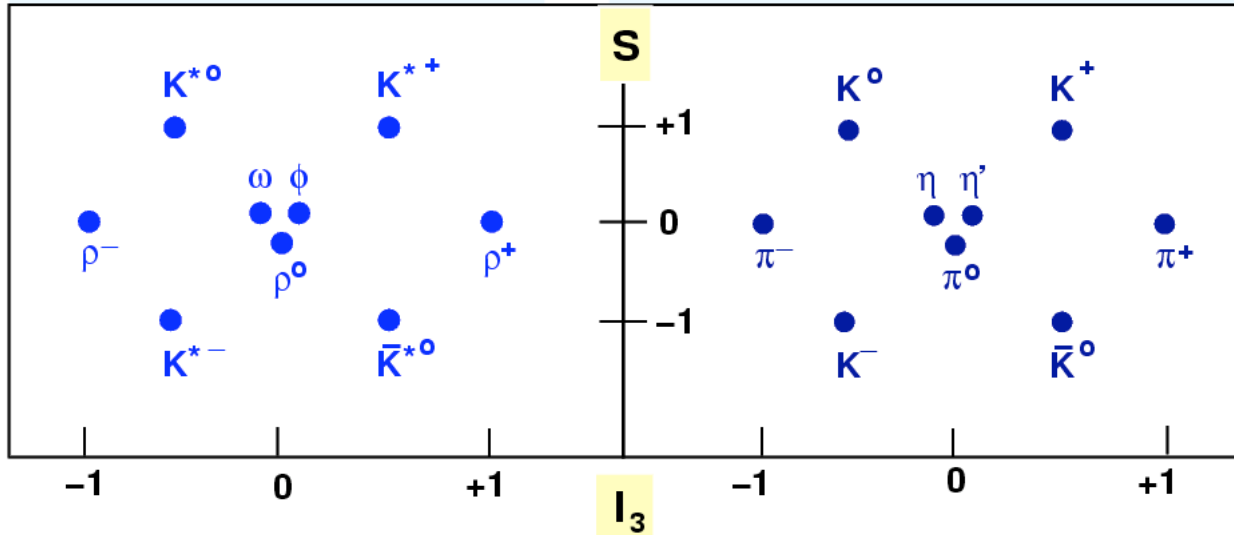
$$\text{Baryon-Oktett: } J^P = \frac{1}{2}^+$$

- Für $S = J = \frac{1}{2}$: 1 Spin muss antiparallel sein: z.B.: $\uparrow\uparrow\downarrow$
dieser Spinanteil hat gemischte Symmetrie, damit muss ξ_{Flavor} ebenfalls gemischte Symmetrie haben $\Rightarrow$ nicht möglich für uuu, ddd, sss
- uds – Kombination: 2 verschiedene Teilchen durch verschiedene Spineinstellung:
 $\Sigma^0 = |u^{\uparrow} d^{\uparrow} s^{\downarrow}\rangle \quad \Lambda^0 = |u^{\uparrow} d^{\downarrow} s^{\uparrow}\rangle$
- Für korrekt symmetrisierte Form der Wellenfunktion: mehrere Terme
- $\Rightarrow$ 8 verschiedene 3-Quarkzustände mit $J^P = \frac{1}{2}^+$ und Ψ_{tot} antisymmetrisch

Zusammenfassung Multipletts

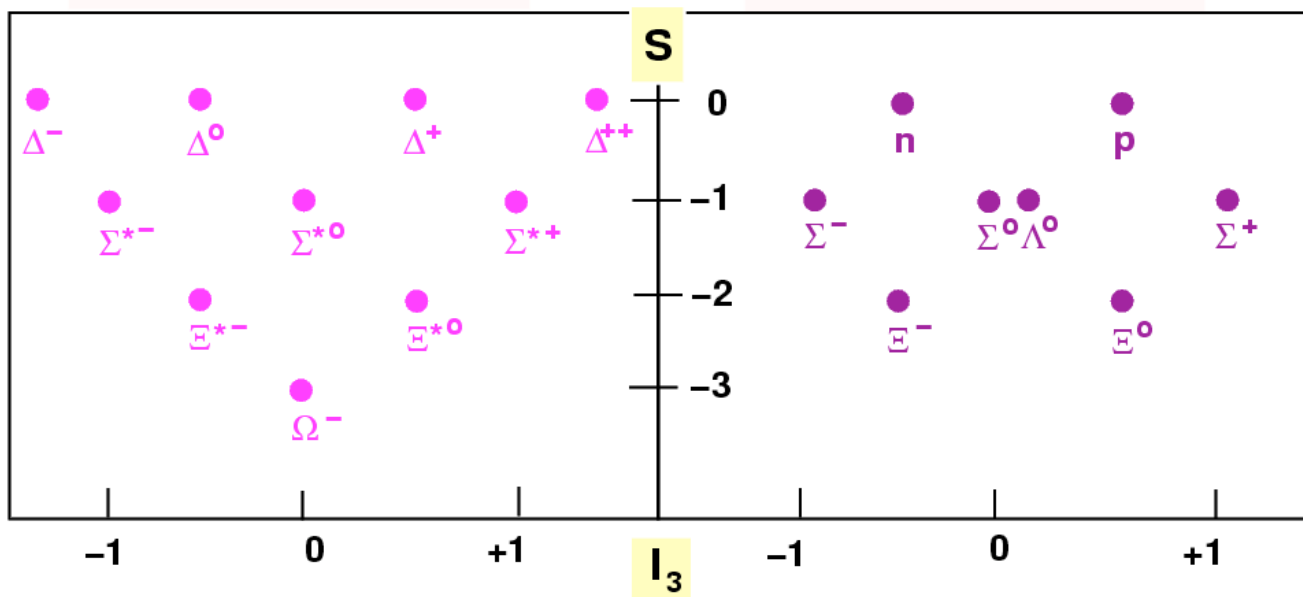
Vektormesonen $J^P = 1^-$

Pseudoskalare Mesonen $J^P = 0^-$



Baryonen $J^P = \frac{3}{2}^+$

Baryonen $J^P = \frac{1}{2}^+$



S ... Strangeness: $S = -1$ für s - Quark
 $S = +1$ für $\bar{s}$ - Quark

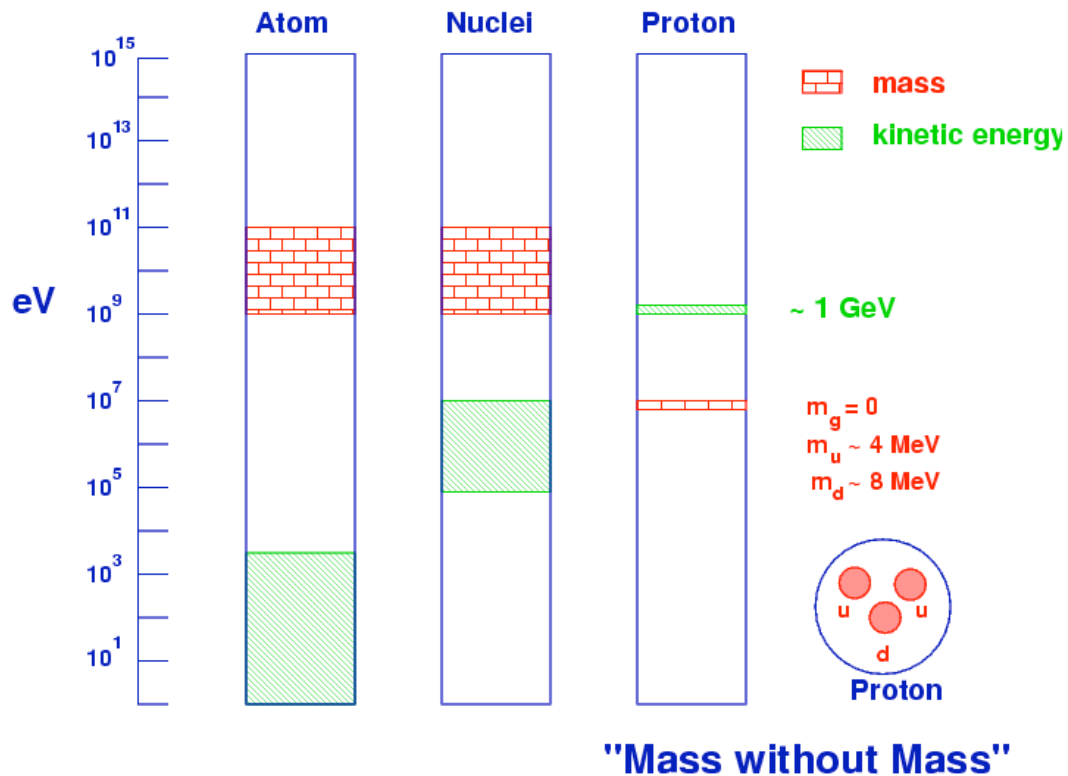
I_3 ... 3. Komponente des Isospins: $u : I_3 = \frac{1}{2}$, $d : I_3 = -\frac{1}{2}$,
 $s : I_3 = 0$

$\Omega^- = |s^\uparrow s^\uparrow s^\uparrow \rangle$ vorhergesagt; 1964 entdeckt

Masse und Kinetische Energie

Zur Erinnerung (siehe Einleitung)

Mass and Kinetic Energy



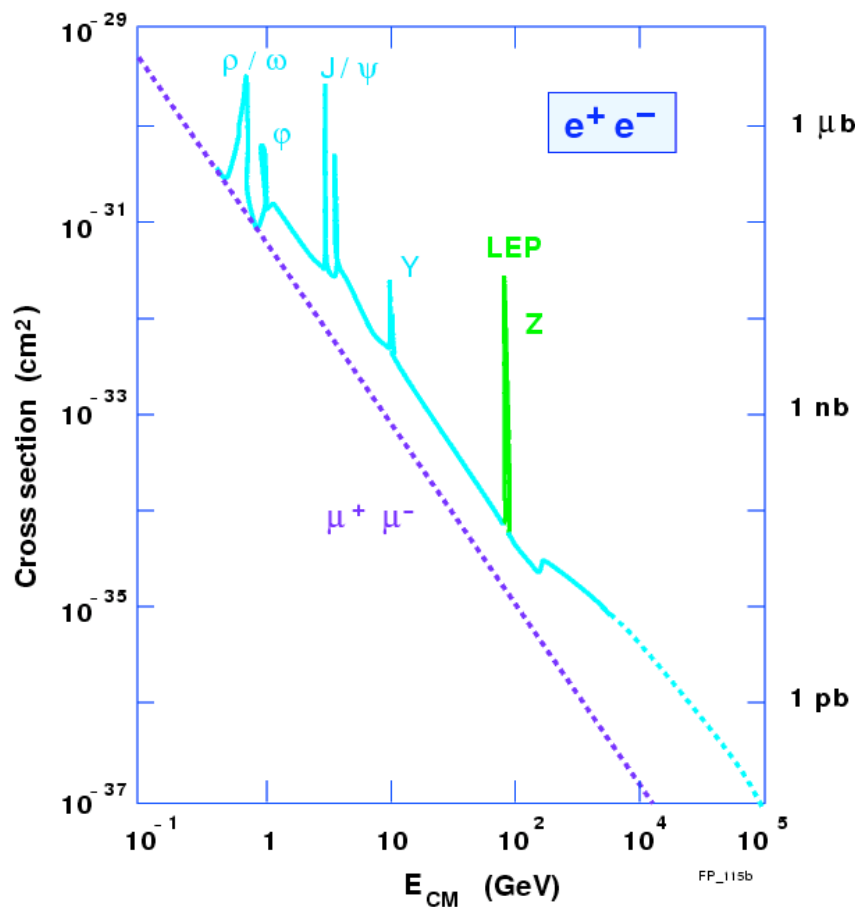
Aus gemessenen Mesonen/Baryonen Massen
 → Konstituentenmassen

$$\left. \begin{array}{l} m_{u,d} \sim 310 \text{ MeV}/c^2 \\ m_s \sim 480 \text{ MeV}/c^2 \end{array} \right\} \text{wesentlich aus Wolke von } g \text{ und } q\bar{q} \text{ Paaren}$$

$$\left. \begin{array}{l} m_{u,d} \sim 4 - 10 \text{ MeV}/c^2 \\ m_s \sim 150 \text{ MeV}/c^2 \end{array} \right\} \text{intrinsische Massen}$$

7.5 $J^P = 1^-$ – Produktion

in e^+e^- Annihilation



Vektormesonen ($J^P = 1^-$) als **Resonanzen** in e^+e^- Kollisionen

Resonanzen: kurzlebige Zustände, denen man Masse und wohldefinierte QZ zuschreiben kann

Gebundene $q\bar{q}$ – Zustände: $m_{q\bar{q}} = \sqrt{s} = 2 \cdot E_{\text{Strahl}}$ in e^+e^-

- ρ, ω Resonanzen: Mischungszustände aus $u\bar{u}$ und $d\bar{d}$
 $m_\rho = 768.5 \text{ MeV}/c^2, \Gamma_\rho = 150.7 \text{ MeV}$
 $m_\omega = 781.9 \text{ MeV}/c^2, \Gamma_\omega = 8.4 \text{ MeV}$
- $\phi = s\bar{s}$ Resonanz: $m_\phi = 1019.4 \text{ MeV}/c^2, \Gamma_\phi = 4.4 \text{ MeV}$
- $J/\psi = c\bar{c}$ Resonanz: $m_{J/\psi} = 3096.9 \text{ MeV}/c^2, \Gamma_{J/\psi} = 87 \text{ keV}$
- $\Upsilon = b\bar{b}$ Resonanz: $m_\Upsilon = 9460.4 \text{ MeV}/c^2, \Gamma_\Upsilon = 52 \text{ keV}$

Bemerkung: Z–Resonanz: $m_Z = 91.18 \text{ GeV}/c^2, \Gamma_Z = 2.49 \text{ GeV}$
 Trägerteilchen der (neutralen) schwachen Wechselwirkung: siehe Kapitel 9

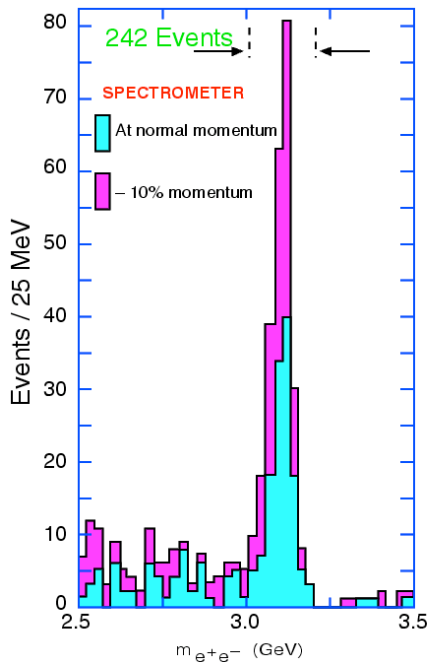
J/Ψ – Resonanz

$J/\Psi = c\bar{c}$ Zustand ($J^P = 1^-$)

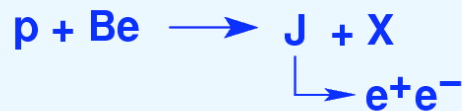
$m_{J/\Psi} = 3.097 \text{ GeV}/c^2$

$\Gamma_{J/\Psi} = 87 \text{ keV}$

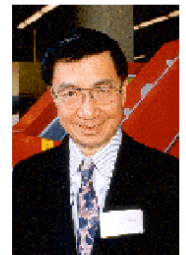
'Novemberrevolution' 1974



1974: Brookhaven ($E_p = 28 \text{ GeV}$)



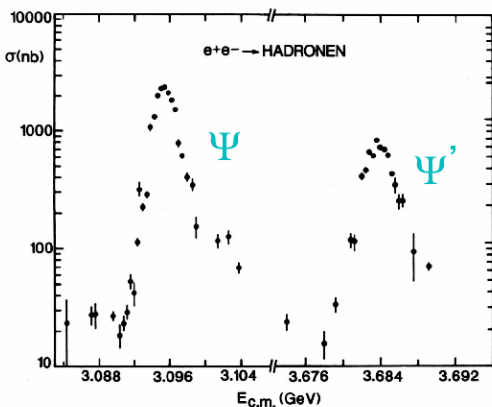
Beobachtete Breite durch experimentelle Auflösung gegeben



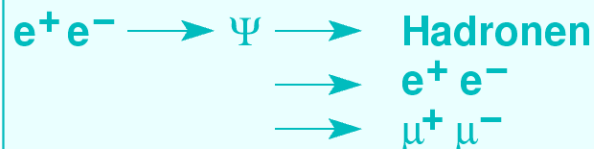
Ting

Nobelpreis 1976: S. Ting und B. Richter für

J/Ψ



1974: SLAC ($e^+e^- : E_{CM} \sim 3 \text{ GeV}$)



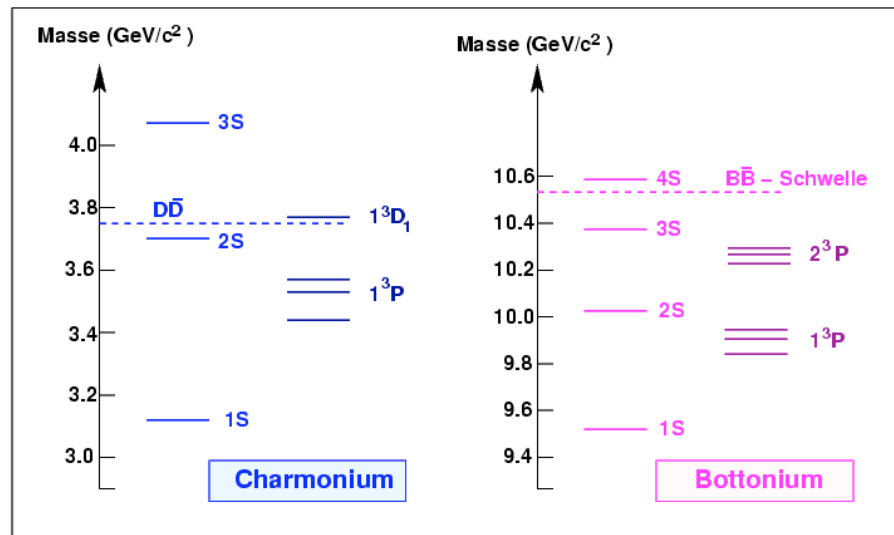
Richter

Beobachtete Breite durch Energieunschärfe der kollidierenden Strahlen gegeben

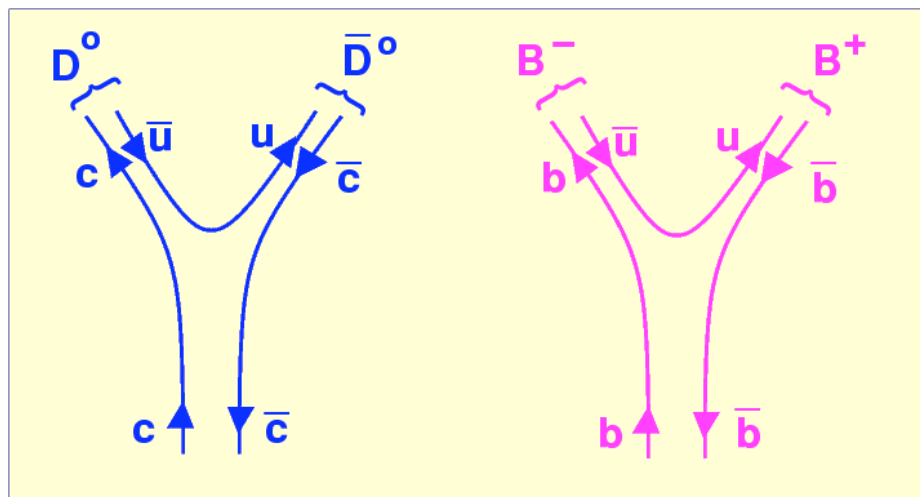
Später Ψ' und Ψ'' gefunden

7.6 Mesonen aus schweren Quarks (c, b)

- $e^+e^- \longrightarrow c\bar{c}$ oder $b\bar{b}$: Oberhalb einer Energieschwelle Produktion von Mesonen



- $q\bar{q}$ – Paare aus Anregungsenergie der Quarkonia
Quarkonium = gebundenes hadronisches System aus schweren Quarks



$$m_{D^0} = 1864.4 \text{ MeV}/c^2$$

$\Psi(1^3D_1)$: Erster Zustand
oberhalb $D\bar{D}$ Schwelle

$$m = 3770 \text{ MeV}/c^2$$

$$m_{B^\pm} = 5278.7 \text{ MeV}/c^2$$

$\Upsilon(4^3S_1)$: Erster Zustand
oberhalb $B\bar{B}$ Schwelle

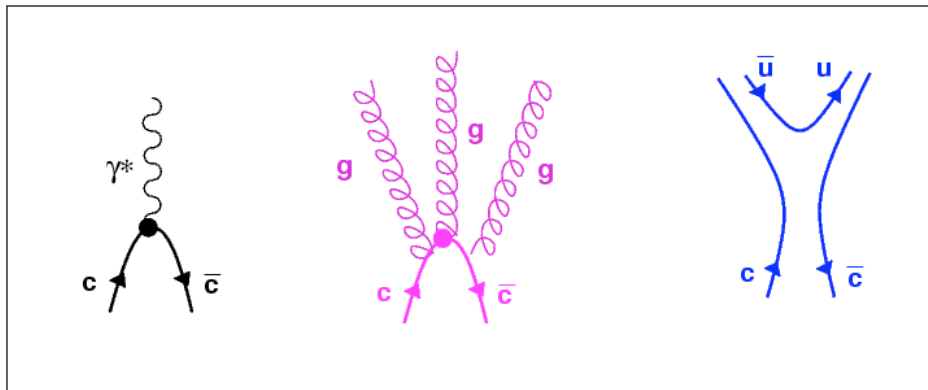
$$m = 10580 \text{ MeV}/c^2$$

Höhere Anregungsenergien $\longrightarrow$ Mesonen mit s-Quarks

Zweig – Regel: Teilchenzerfälle

Zweig –Regel: $q\bar{q}$ Annihilation und 3-Gluon Austausch unterdrückt im Vergleich zum Zerfall mit durchgehenden Quarklinien

Beispiele: J/ψ – Zerfälle



$J/\psi \rightarrow \gamma^* \rightarrow \text{Hadronen}$
 $\rightarrow \text{Leptonen}$
 BR = 30%

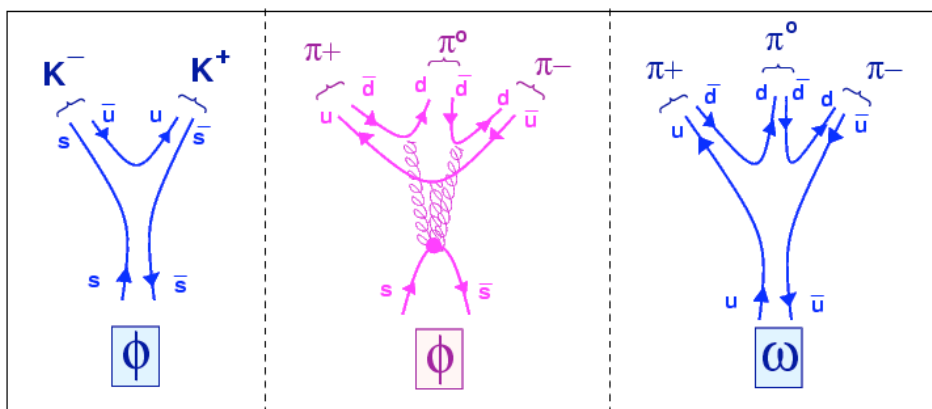
$J/\psi \rightarrow ggg \rightarrow \text{Hadronen}$
 BR = 70%

obwohl $\alpha (7 \cdot 10^{-3}) < \alpha_s (\sim 0.2)$: $J/\psi \rightarrow \gamma^* \sim 30\%$

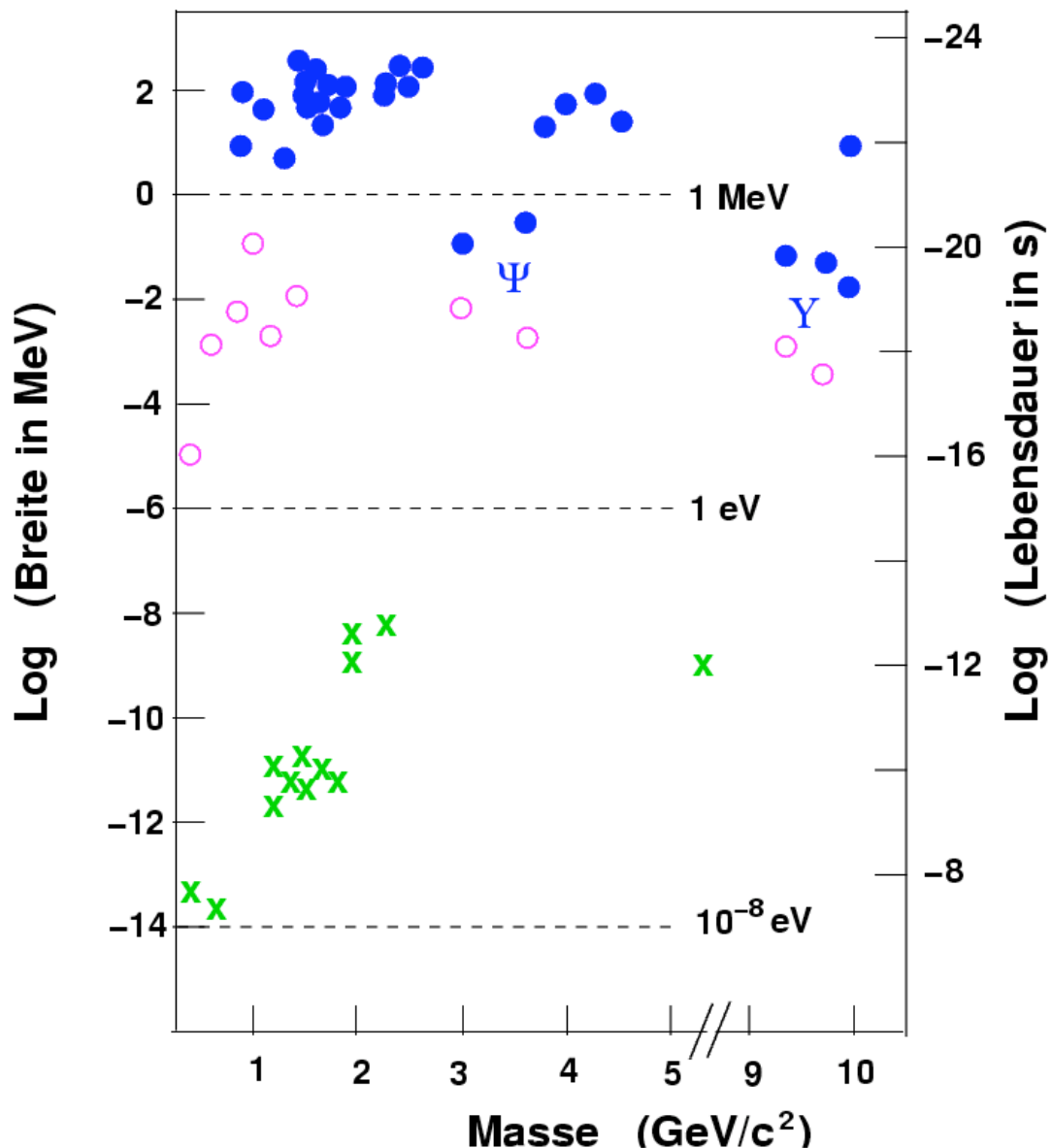
$J/\psi \rightarrow ggg$ (starke WW) wegen Erhaltung der Farbladung
 3 Gluonen notwendig

$\Gamma_{ggg} \sim \alpha_s^3 \Rightarrow \Gamma_{J/\psi} = 88 \text{ keV}$: klein unterhalb Schwelle

Bemerkung: Zweig – Regel erklärt auch: $\phi \rightarrow 3\pi \sim 15\%$
 $\omega \rightarrow 3\pi \sim 90\% \dots\dots$ dominant



7.7 Γ und τ hadronischer Zustände



- Zerfall via starker WW in Hadronen: $\Gamma > 10 \text{ MeV}$
Ausnahme: $\Psi, \Psi', \Upsilon, \Upsilon', \Upsilon''$:
starker Zerfall via 3-Gluon Austausch
- Zerfall via elektromagnetischer WW
Isospin nicht erhalten
- × Zerfall via schwacher WW
Isospin, Strangeness nicht erhalten

Für $\tau < 10^{-16}$ s: Lebensdauer aus Breite bestimmen:

$$\tau = \hbar/\Gamma$$

7.8 Das Top – Quark

Seit Entdeckung des b-Quarks: intensive Suche nach dem
t-Quark

Es gibt keine theoretische Vorhersage für die t-Quark Masse

1994: Erste direkte Evidenz für Top: CDF (Tevatron)

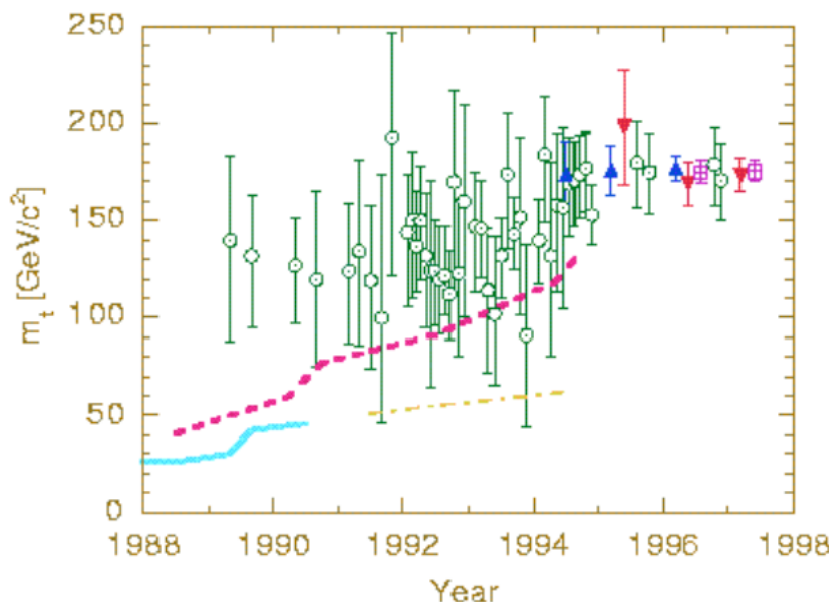
2006: $M_t = (172.5 \pm 2.3) \text{ GeV}/c^2$ CDF, D0

Bemerkung: Masse vom Top entspricht der des Goldatoms
jedoch: Goldatom besteht aus

79 p, 79 e⁻ und 118 n

Top-Quark $< 10^{-18} \text{ m}$, $\tau_t = 0.4 \cdot 10^{-24} \text{ s}$

Für $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}$: brauche Maschine mit $\sqrt{s} \geq 350 \text{ GeV}$
 $\Rightarrow$ Linear Collider Projekt



**Geschichte
des
Top – Quarks**

 DO
 CDF
 World average



— Direkte Suche an e⁺ e⁻ Speicherringen

--- $p\bar{p} \rightarrow t\bar{t}$

----- Indirekte Bestimmung aus Γ_W