

①

elektromagn. WW: $\sigma \propto |e \cdot e|^2 \propto \frac{\alpha^2}{(\text{alpha!})}$

Einflussabhängigkeit: $\propto \frac{1}{E_0^2} = \frac{1}{s}$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\alpha^2}{4s} \cdot (1 + \cos^2 \Theta)$$

↑ spin- $\frac{1}{2}$ Teilchen

Integriert über Ω

$$\Rightarrow \sigma = \frac{4\pi \alpha^2}{3s}$$

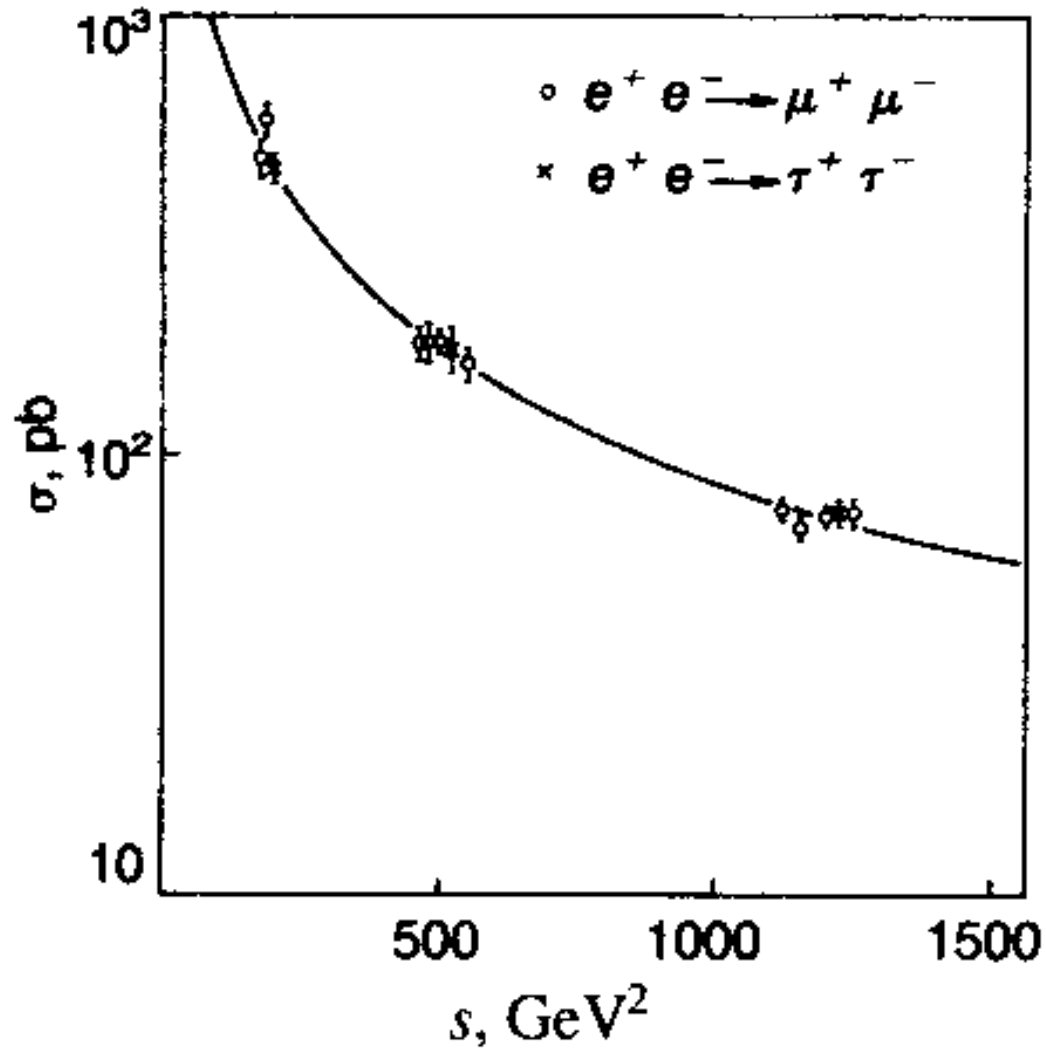
- Punktförmige Teilchen
- Anihilation via Single-Photon
- $\sigma = 86,8 \frac{\text{nb}}{s}$, s in GeV

Wenn \sqrt{s} so hoch ist, dass unterschiedliche Masse von ν_μ, ν_τ vernachlässigt werden können, sind die WW für $\mu^+\mu^-$ und $\tau^+\tau^-$ -Erzeugung identisch

=> Leptonuniversalität

d.h. e, μ, τ verhalten sich (abgesehen von ihren Massen) in allen Reaktionen gleich.

Lepton-Universalität



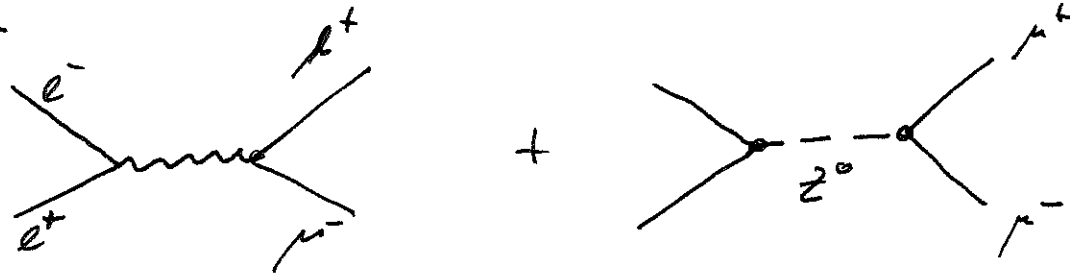
(aus Perkins)

Formfaktoren identisch 1 (\Rightarrow punktförmige Teilchen)

(2)

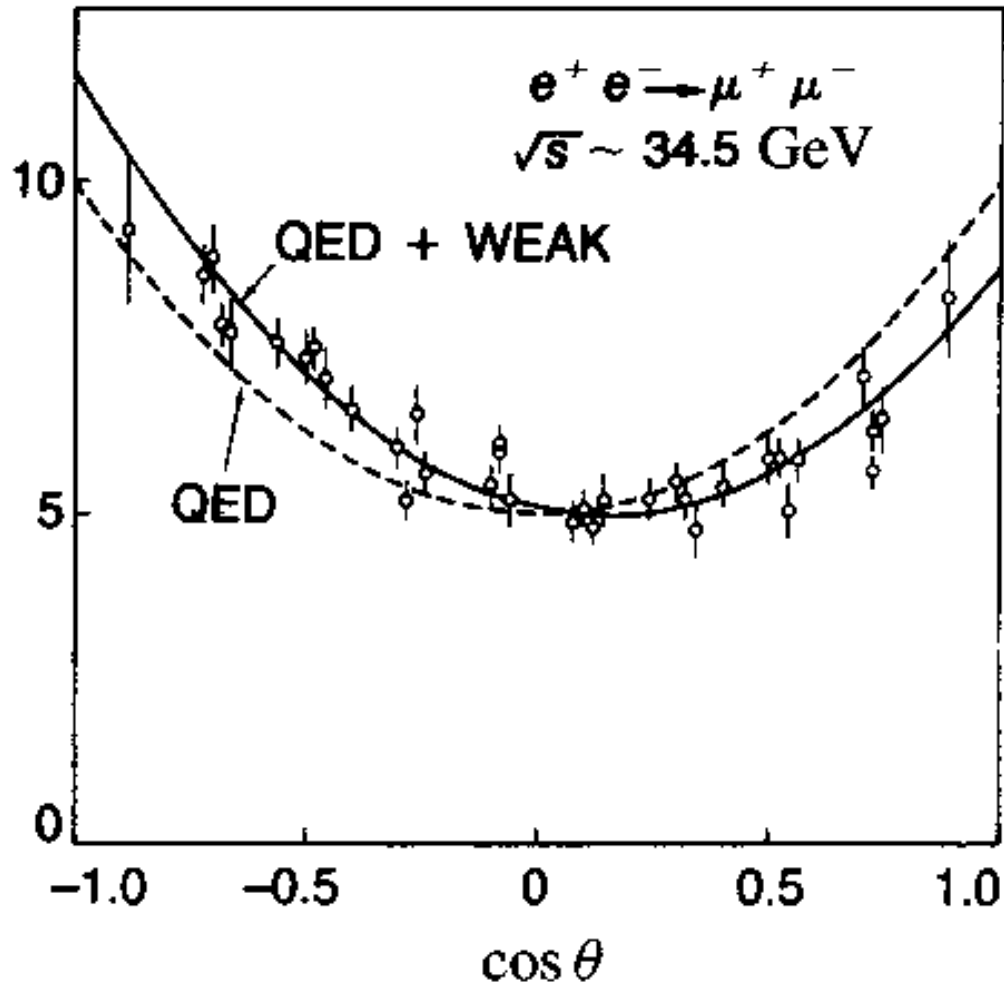
Ausdehnung des Elektronens : exp. Obergrenzen $< 10^{-18}$ m
außerdem : keine angeregte Zustände der Leptonen beobachtet
 \Rightarrow Leptonen sind punktförmige Teilchen und nicht zusammengesetzt!

N.B. $\mu^+\mu^-$ -Paare können auch über Schwache WW produziert werden



Wegen Paritätsverletzung d. schw. WW variiert die Winkelverteilung von $1 + \cos^2\theta$ ab.

EM & Schwache WW



Wiederholung | Natürliche Linienbreite / Breit-Wigners Resonanz (3)

Lebensdauer eines instabilen Zustandes

$$\tau = \frac{1}{\omega} \quad \Gamma = \frac{\hbar}{\tau} = \hbar \omega = 2\pi \hbar |\mathcal{M}|^2 \int S_f d\Omega$$

Energie-Zeit-Unschärfe $\Delta E \Delta t \approx \hbar$

Zerfallsrate eines Zustandes (oder Teilchens) λ

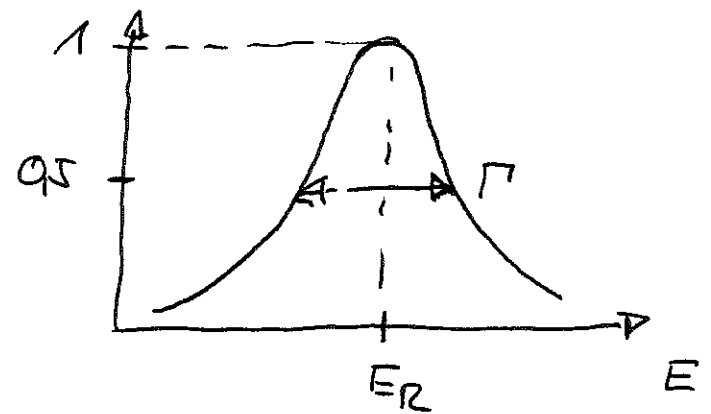
$$\Gamma = -\hbar \frac{dN_{\#}}{dt} \frac{1}{N_{\#}} \quad , \quad N_{\#}(t) = N_{\#}(t=0) \exp\left(-\frac{\Gamma}{\hbar} t\right)$$

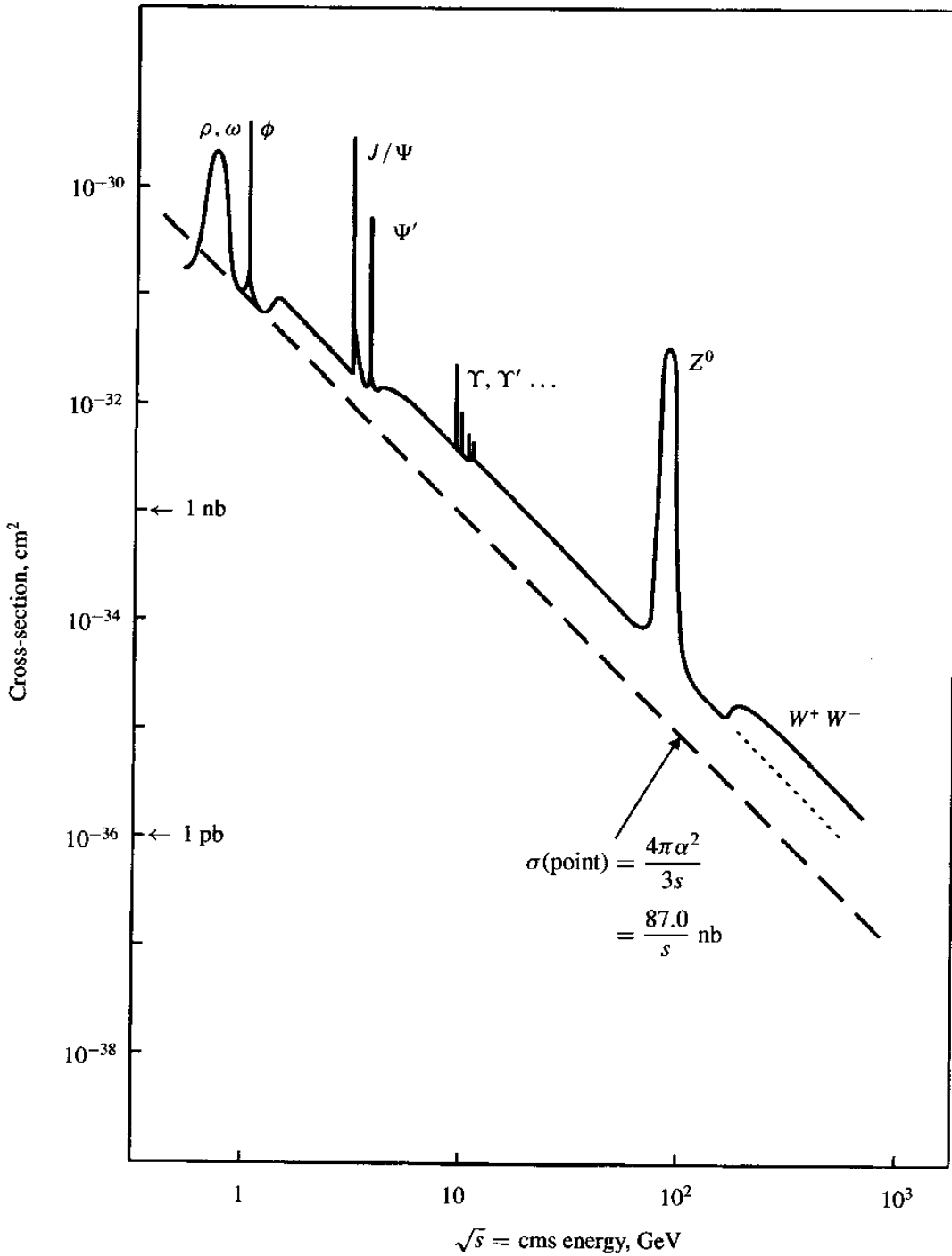
\Rightarrow exponentieller zeitlicher Verlauf von Γ bestimmt die Linienform
von Resonanz

Falls Zustand (Teilchen) zu verschiedenen Kanälen zerfallen kann

$$\Rightarrow \Gamma_{\text{ges}} = \sum_i \Gamma_i$$

$$\sigma(E) = \sigma_{\text{max}} \frac{\Gamma^2/4}{(E-E_R)^2 + \Gamma^2/4}$$





Cross section for the
 annihilation process $e^+ e^-$
 \rightarrow anything as function of
 the cms energy

Resonanzen ρ, ω, ϕ (gebundene Quark - anti-Quark Zustände)

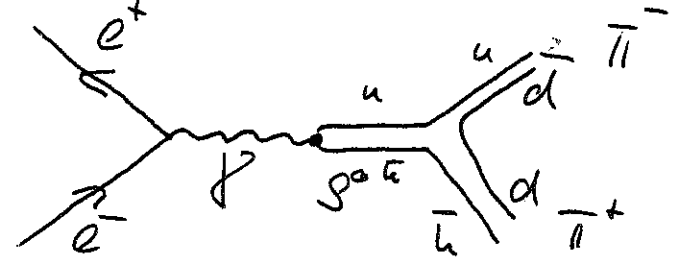
(4)

$$e^+e^- \rightarrow \rho^0 \rightarrow \pi^+\pi^- \quad \Gamma_\rho = 770 \text{ MeV}$$

$$\rightarrow \omega^0 \rightarrow \pi^+\pi^0\pi^- \quad \Gamma_\omega = 782 \text{ MeV}$$

$$\Gamma_\rho = 154 \text{ MeV} \Rightarrow \tau_\rho = 4 \cdot 10^{-24} \text{ sec}$$

$$\Gamma_\omega = 7 \text{ MeV} \Rightarrow 7 \cdot 10^{-23} \text{ sec}$$



$$\pi^+ = u\bar{d} \quad \text{Spin } 0$$

$$\pi^- = \bar{u}d \quad \text{"}$$

$$\pi^0 = \frac{1}{\sqrt{2}} (u\bar{u} - d\bar{d}) \quad \text{"}$$

$$\rho^0 = \frac{1}{\sqrt{2}} (u\bar{u} - d\bar{d}) \quad \text{Spin } 1 \quad (\text{wie Photon!})$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{2}} (u\bar{u} + d\bar{d}) \quad \text{"}$$

Pioner triplett $\pi^+ \pi^0 \pi^-$

Spin: $J=0$; Isospin: $I=1$

φ-Resonanz : $\sqrt{s} = 1019 \text{ MeV}$

$\Gamma = 4.4 \text{ MeV} \Rightarrow 1.3 \cdot 10^{-22} \text{ sec}$ (groß!)

Zerfälle:

$\phi \rightarrow K^+ + K^-$ $m_{K^\pm} = 494 \text{ MeV}/c^2$
 $\rightarrow K^0 + \bar{K}^0$ $m_{K^0} = 495 \text{ MeV}/c^2$

Kaonen K^\pm, K^0 gehören zu sog. "seltsamen" Teilchen q_s :
(strange)

wird durch Prozesse d. stark. WW produziert, können nur
über Prozesse d. schw. WW zerfallen!

J/ψ : (1974) $\sqrt{s} = 3097 \text{ MeV}$

$\Gamma = 87 \text{ keV}$ extrem schmale Resonanz

SLAC :	$\underline{e^+e^-} \rightarrow \psi \rightarrow \text{hadronen}$	} Energie unabhängig:
	$\hookrightarrow e^+e^-, \mu^+\mu^-$	
BNL :	$p + Be \rightarrow J + \text{anything}$	} $J + \psi \Rightarrow \underline{J/\psi}$
	$\hookrightarrow e^+e^-$	

Discovery of J/ψ

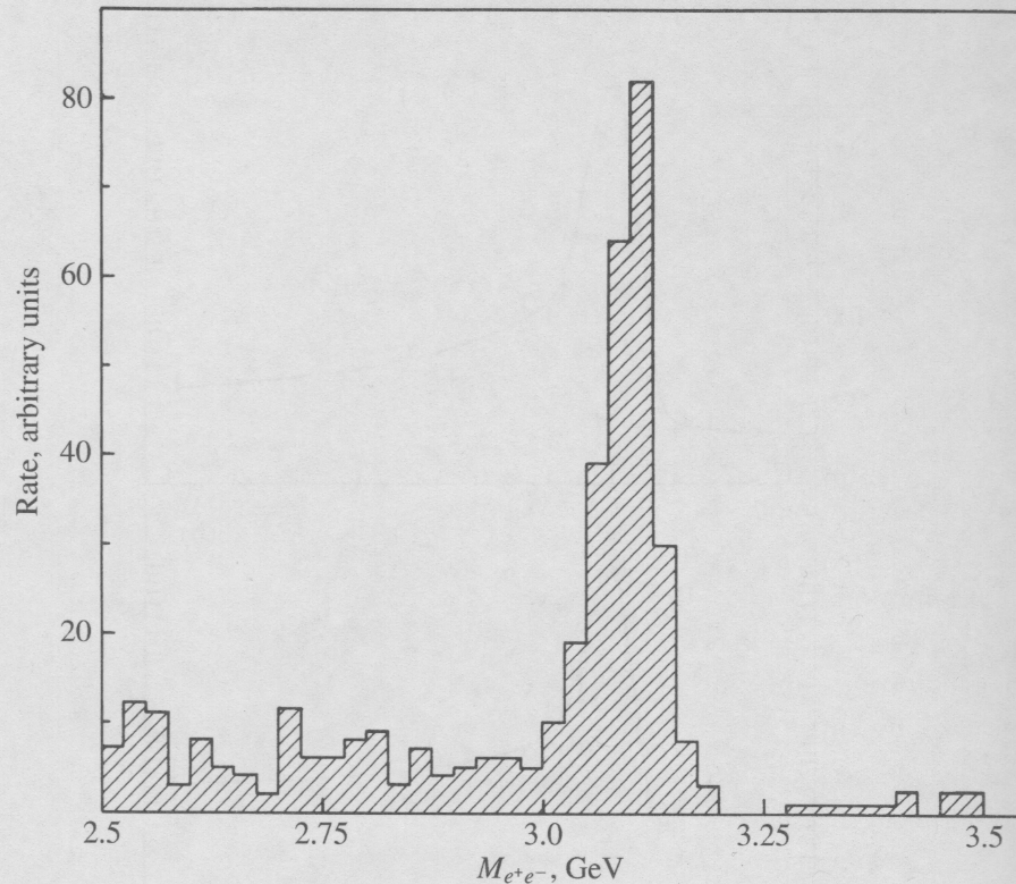


Fig. 4.2. Results of Aubert *et al.* (1974) indicating the narrow resonance J/ψ in the invariant-mass distribution of e^+e^- pairs produced in inclusive reactions of protons with a beryllium target, $p + \text{Be} \rightarrow e^+ + e^- + X$. The experiment was carried out with the 28 GeV AGS at Brookhaven National Laboratory.

Table 4.2. Charmonium states and decay modes

State	Mass, MeV	J^P, I	Γ , MeV	Branching ratio	
J/ψ (3100) = $\psi(1S)$	3097.88 ± 0.04	$1^-, 0$	0.087	hadrons	88%
				e^+e^-	6%
				$\mu^+\mu^-$	6%
$\psi(3700)$ = $\psi(2S)$	3686 ± 0.1	$1^-, 0$	0.28	$\psi + 2\pi$	50%
				$\chi + \gamma$	24%
				e^+e^-	0.9%
				$\mu^+\mu^-$	0.8%

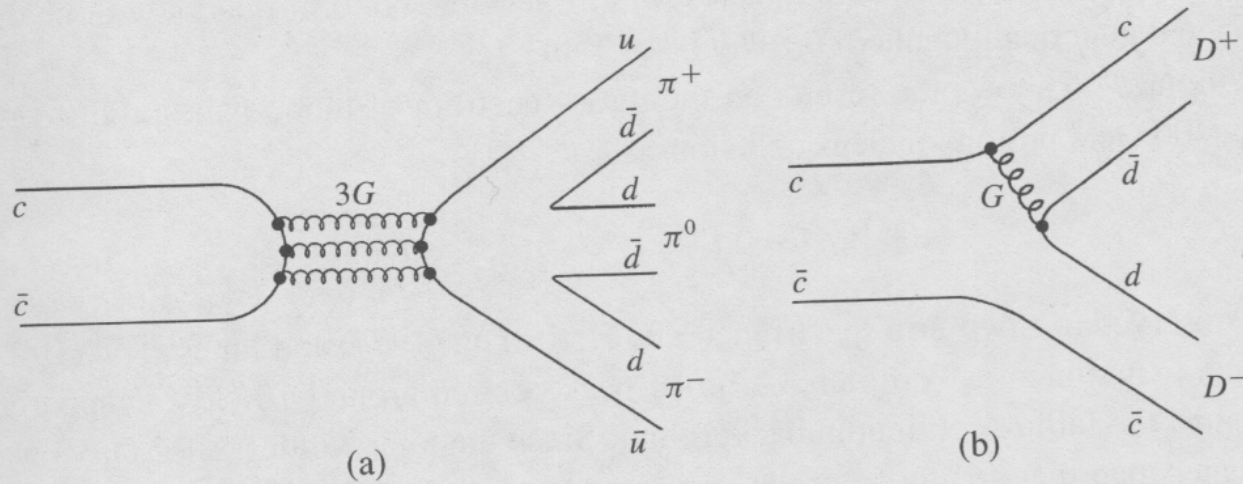
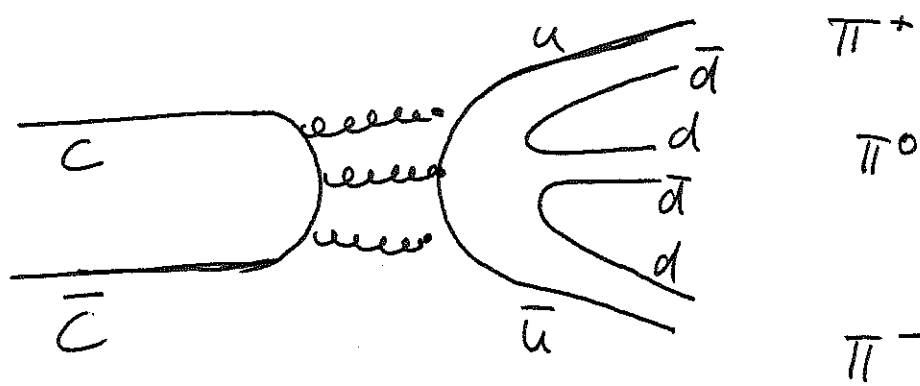


Fig. 4.5. Quark diagrams for charmonium decay. (a) $\Psi(3100) \rightarrow 3\pi$, $\Gamma = 0.076$ MeV; (b) $\Psi(3770) \rightarrow D\bar{D}$, $\Gamma = 24$ MeV. Diagram (b) is favoured but forbidden by energy conservation for charmonium states $\psi(3.1)$ and $\psi(3.7)$ with masses below threshold $2M_D = 3.75$ GeV. The 'OZI forbidden' diagram (a) is therefore the only one allowed for hadronic decay of these low-mass states.

J/ψ



6

Extrem schmale Resonanz wird mit der Erzeugung eines neuen Quarks, dem c-Quark (charm) in Verbindung gebracht.

V (Ypsilon) - Resonanz

b-Quark (bottom) $\psi V = b\bar{b}$

niedrigste Resonanz liegt 9,46 GeV mit $\Gamma = 52 \text{ keV}$

Zerfall in B-Mesonen ($b\bar{u}, b\bar{d}, \dots$) von

höheren V-Resonanzen möglich

1995: direkte Nachweis t-Quarks $p\bar{p}$ -Kollisionen an

Tevatron (Fermilab, Chicago) $m_t = 173,8 \pm 5,2 \text{ GeV}/c^2$

Vorher „indirekte“ Massebestimmung in e^+e^- (LEP) über Korrekturen höherer Ordnung
 $\sqrt{s} \leq 91,2 \text{ GeV}$

Table 4.3. *Upsilon* states $\Upsilon (= b\bar{b})$

	$\Upsilon(1S)$	$\Upsilon(2S)$	$\Upsilon(3S)$	$\Upsilon(4S)$
Mass, MeV	9460.4 ± 0.2	$10\,023.3 \pm 0.3$	$10\,355.3 \pm 0.5$	$10\,580.0 \pm 3.5$
$\Gamma_{e^+e^-}$, keV	1.32 ± 0.05	0.52 ± 0.03	—	0.25 ± 0.03
Γ_{tot} , MeV	0.053 ± 0.002	0.044 ± 0.007	0.026 ± 0.004	10 ± 4

Zusammenfassung Quarks

(7)

Q/e	Rasse		
	u	c	t
+2/3	u (0,3)	c (1,4)	t (174)
-1/3	d (0,3)	s (0,45)	b (4,4)

4Q = 1

Rasse d. Konstituenten Quarks
 (effektive Rassen v. Quarks die in Hadronen gebunden sind)

Flavor-Quantenzahlen

Quark	Flavor-QZ	Wert
s	S	-1
c	C	+1
b	B	-1
t	T	+1

Vorzeichen der Flavorquantenzahlen haben das gleiche Vorzeichen wie die Ladung ; $QZ(\text{Anti-Quark}) = -QZ(\text{Quarks})$