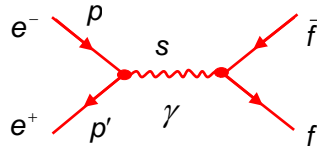


VI. Teilchenerzeugung in e^+e^- Annihilation

1. Fermionpaar-Erzeugung

Allgemein:

$$e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$$

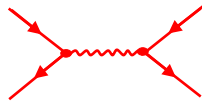


Kinematik:
 $s = (p + p')^2$
 $s > 4m_f^2$

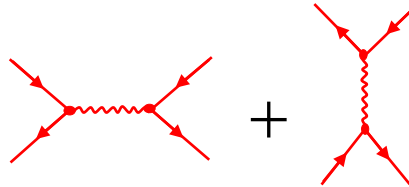
Mögliche Fermionpaare

$$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$$

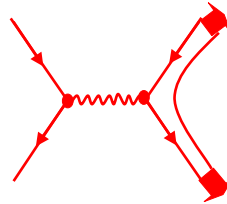
$$\rightarrow \tau^+\tau^-$$



$$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$$



$$e^+e^- \rightarrow q\bar{q} \rightarrow \text{Hadronen}$$

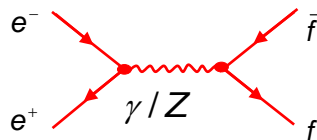


Hadron jets

Bemerkung:

Neben dem γ Austausch trägt für $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$ auch der Z-Austausch bei.

Bei Energien $s < M_Z^2$ ist aber der Z-Beitrag für den totalen WQ vernachlässigbar. Der differentielle WQ wird aber durch den Z Beitrag leicht verändert.



2. Myonpaarproduktion

Wirkungsquerschnitt für $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{(2\pi)^2} |M_{fi}|^2 \frac{|\vec{p}_f|^2}{\beta_i \beta_f} = \frac{1}{(2\pi)^2} |M_{fi}|^2 \frac{s}{4}$$

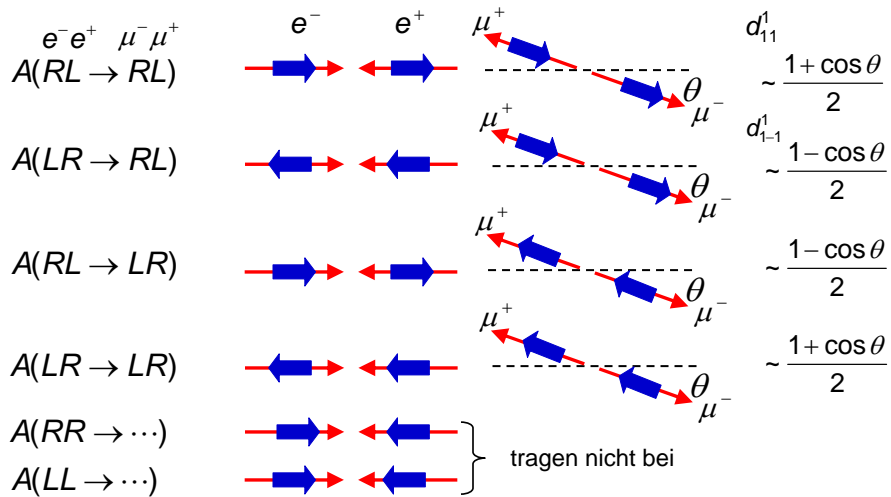
Für $s \gg m_\mu^2$: $\beta_e \approx \beta_\mu \approx 1$, $|\vec{p}_\mu| = \sqrt{s}/2$

Übergangsamplitude M_{fi}

(i) Vernachlässige Spins:
$$M_{fi} = \frac{e^2}{q^2} = \frac{4\pi\alpha}{q^2}$$

(ii) Unter Berücksichtigung der möglichen Spinamplituden:
aufgrund des Photonspins $J=1$ können nicht alle
Spinzustände koppeln.

Bestimmung der möglichen Spinamplituden: Photon-Spin = 1



Summiere aller (Ausgangsamplituden)²

Mittel über 4 mögliche Eingangsamplituden

$$|M_{fi}|^2 = \frac{1}{4} \sum_i |A_i|^2 \cdot \left(\frac{4\pi\alpha}{s}\right)^2$$

$$|M_{fi}|^2 = \frac{1}{4} (1 + \cos^2 \theta) \cdot \left(\frac{4\pi\alpha}{s}\right)^2$$

$$|M_{fi}|^2 = \frac{1}{4}(1 + \cos^2 \theta) \cdot \left(\frac{4\pi\alpha}{s}\right)^2$$

Damit erhält man für den WQ:

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

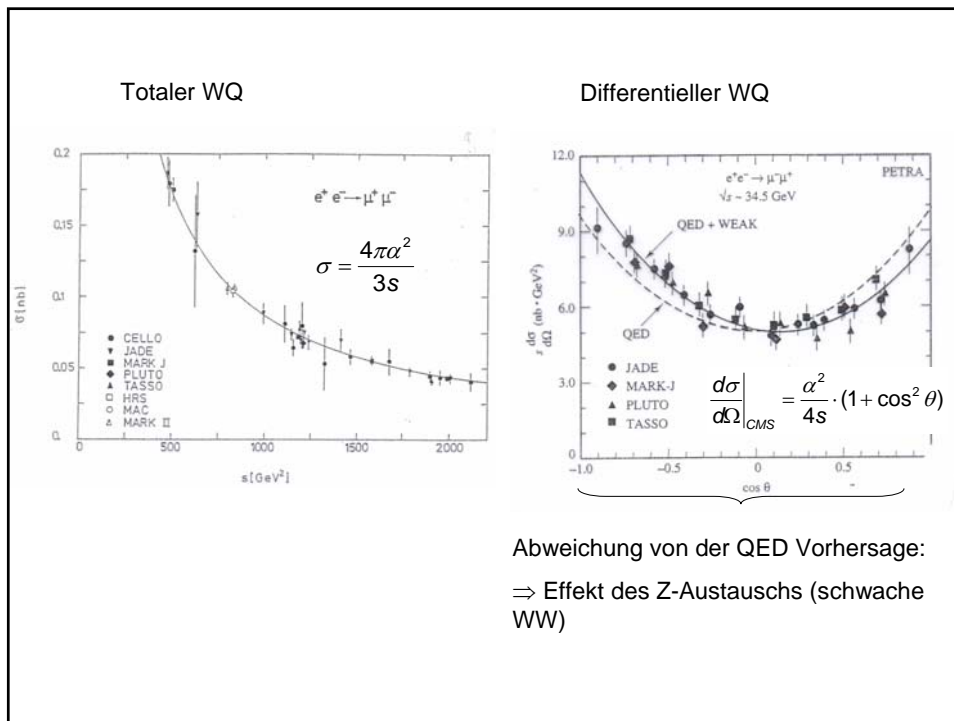
$$= \frac{\alpha^2}{4s}(1 + \cos^2 \theta)$$

Bzw.

$$\sigma_{\mu\mu} = \frac{4\pi\alpha^2}{3s} \approx \frac{87\text{nb}}{s[\text{GeV}^2]}$$

Bemerkung:

Winkelverteilung $\sim (1 + \cos^2\theta)$ wird durch die Struktur der Photonkopplung (Spin1) an die Spin $\frac{1}{2}$ Fermionen (RH-Teilchen + LH-Anteil. bzw LH-Teilchen + RH-Anteil.) gegeben

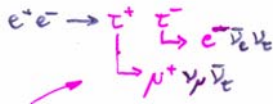


Entdeckung des Tau-Leptons

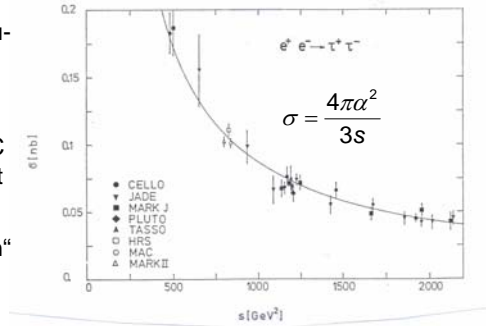
Für $\sqrt{s} > 2m_\tau \approx 3550 \text{ MeV}$ können Tau-Leptonpaare produziert werden.

Tau-Leptonen wurden 1975 am SLAC e^+e^- Beschleuniger PEP von M. Perl et al. entdeckt (Nobelpreis 1995):

“Anomale $e^+e^- \rightarrow e^\pm \mu^\mp$ Produktion“



nur geladene Leptonen sichtbar



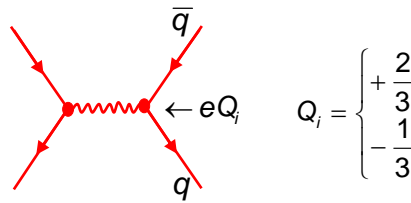
wie für $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$

Tau verhält sich wie Myon. **sequenzielles Lepton**

3. e^+e^- Annihilation in Hadronen

3.1 Unterschied zu $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$

e^+e^- Annihilation in ein Quarkpaar mit drittelzahliger Ladung



Quarks tragen Farbe: zusätzlicher Farbfaktor $N_c=3$

$$\left. \frac{d\sigma}{d\Omega} \right|_{ee \rightarrow q\bar{q}} = \frac{\alpha^2}{4s} \cdot N_c \cdot Q_i^2 (1 + \cos^2 \theta)$$

Quarks entfernen sich voneinander und erzeugen einen Farbschlauch dessen Energie stark ansteigt. Aus Energie entstehen neue $q \bar{q}$ Paare und bilden Hadronen. \rightarrow

Jets entlang der Quarkrichtung

Winkelverteilung der gemessenen Quark-Jets bestätigen die Vorstellung von Spin $\frac{1}{2}$ Quark die das virtuelle Photon koppeln

Quarks sind teilweise sehr schwer: je nach Schwerpunktsenergie tragen verschiedene Quarkflavor bei.

Quark Jets und Winkelverteilung

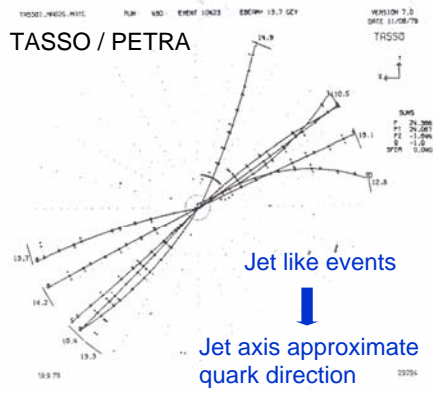


Fig.2 A typical multihadron event at 27.4 GeV recorded in the central detector. The inner 4 layers belong to the proportional chamber, the following 9 are zero degree layers of the drift chamber. The solid bars at the periphery mark time-of-flight counters.

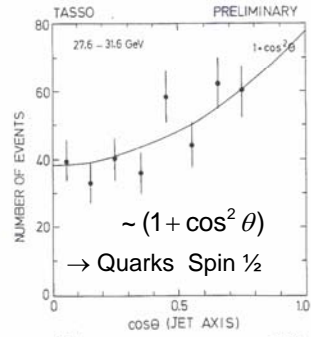
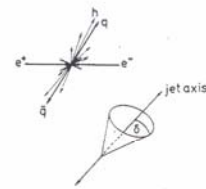
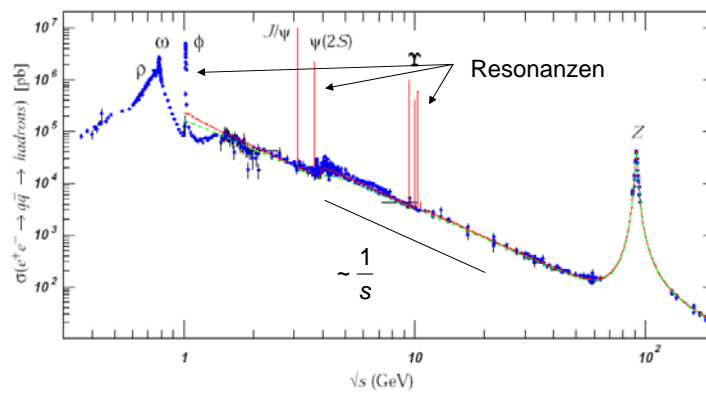


Fig.7 Angular distribution of the jet axis with respect to the beam.

3.2 WQ der Hadronproduktion

$$\left. \frac{d\sigma}{d\Omega} \right|_{ee \rightarrow \text{hadrons}} = \frac{\alpha^2}{4s} \cdot N_C \cdot \sum_{\text{quarks } i} Q_i^2 (1 + \cos^2 \theta)$$

Summe über mögliche Quarks: $4m_q^2 < s$

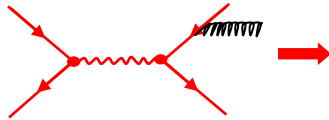
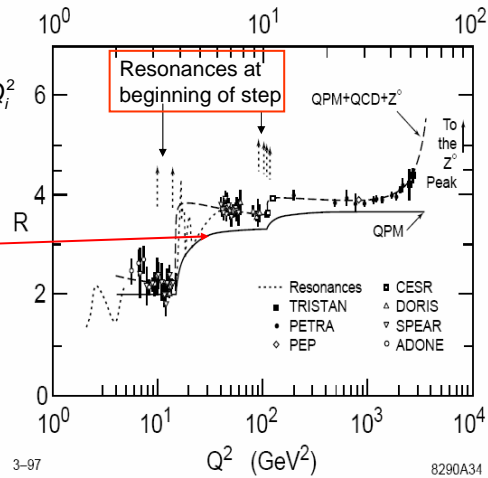


Definition:

$$R_{had} = \frac{\sigma(ee \rightarrow hadrons)}{\sigma(ee \rightarrow \mu\mu)} = 3 \cdot \sum_i Q_i^2$$

\sqrt{s}	Quarks	$R_{had} = 3 \cdot \sum Q_i^2$
$< \sim 3$ GeV	uds	$3 \cdot 6/9 = 2.00$
$< \sim 10$ GeV	udsc	$3 \cdot 10/9 = 3.33$
$< \sim 350$ GeV	udscb	$3 \cdot 11/9 = 3.67$
$> \sim 350$ GeV	udscbt	$3 \cdot 15/9 = 5.00$

Data lies systematically higher than the prediction from Quark Parton Model (QPM) \rightarrow gluon bremsstrahl.



$$\sigma(s) = \sigma_{QED}(s) \left[1 + \frac{\alpha_s}{\pi} + 1.411 \cdot \frac{\alpha_s^2}{\pi^2} + \dots \right]$$

3.3 Hadronische Resonanzen

Man beobachtet im hadronischen WQ eine Reihe sehr scharfer Resonanzen, die sich durch eine Breit-Wigner Form beschreiben lassen:

Erinnerung:

Breit-Wigner Resonanz

$$\sigma(s) = \sigma_0 \frac{\Gamma^2/4}{(\sqrt{s} - M)^2 + \Gamma^2/4}$$

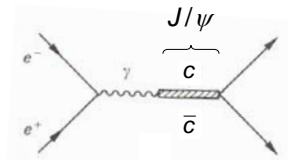
M = Masse, Γ = Breite

Resonanz	Masse	Breite	Zustand
ϕ	1019 MeV	4.2 MeV	$s \bar{s}$
J/ψ	3097 MeV	91 keV	$c \bar{c}$
Υ	9460 MeV	53 keV	$b \bar{b}$

Sehr schmal

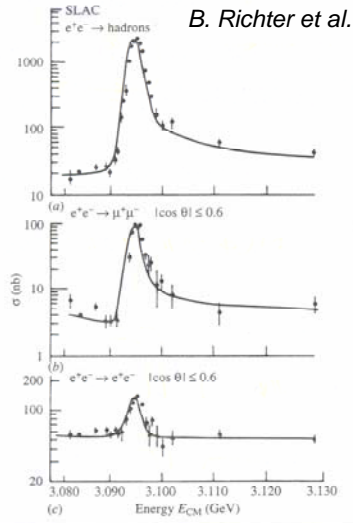
\rightarrow Verhältnismässig lange Lebensdauer

Resonanzen treten immer dann auf wenn R_{Had} eine Stufe aufweist, d.h. wenn ein neuer Quarktyp aktiv wird. Resonanzen entsprechen gebundenen $q \bar{q}$ Zuständen.



1974: "November Revolution" – Discovery of the J/ψ , bound state of new (c) quark

SLAC $e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}, e^+e^-, \mu^+\mu^-$



Until 1974

- Hadronic states explained as bound states of 3 quarks (u, d, s)
- Prediction of a fourth quark by theoreticians (GIM Mechanism)

At the same time the J/ψ was also discovered in proton Be collisions:

BNL $p(28\text{GeV}) + \text{Be} \rightarrow e^+e^- X$

S.C.C. Ting et al.



Nobel Prize in 1976 for B.Richter and S.C.C. Ting