

9. e^+e^- - Kollisionen

Kinematik, Detektoren, $e^+e^- \rightarrow l^+l^-$, Resonanzen

Kinematik: ~ frontale Stöße

$$s = (P_1 + P_2)^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2E_1E_2 - 2\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2$$

$$s = 4E^2 \quad \text{für } E_1 = E_2 = E \gg m$$

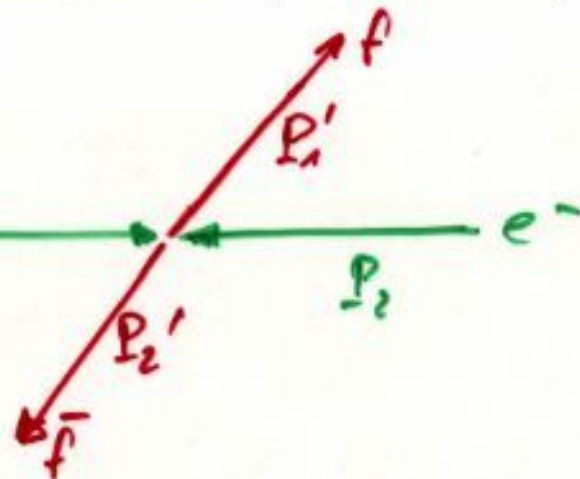
CHS = LAB

⇒ Detektor

für 4 π -Abdeckung

symmetrisch, frontal,
hochoenergetisch

Erzeugung schwerer
Leptonen, Quarks



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

Fermion -
Antifermion

$f = q : u, d, s, c, b, t$

$f = l : e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$

Anlage

Energie

Ort

CESR

6+6, 8+8

Cornell (USA)

PEP

18+18

SLAC, Stanford

1980 - ~ 1986

PETRA

22+22

DESY, Hamburg

1979 - ~ 1986

TRISTAN

30+30

Tsukuba, Japan

1986 - ~ 1990

SLC

50+50

SLAC, Stanford

1990 - 1996

LEP I

50+50

CERN, Genf

1989 - 1995

LEP II

100+100

CERN, Genf

1995 - 2001

~~ILC~~ ILC

500-1000

??

DAΦNE

0.5+0.5

Frascati

B-Fabriken
(asymmetrisch)

BaBar (SLAC)

BES

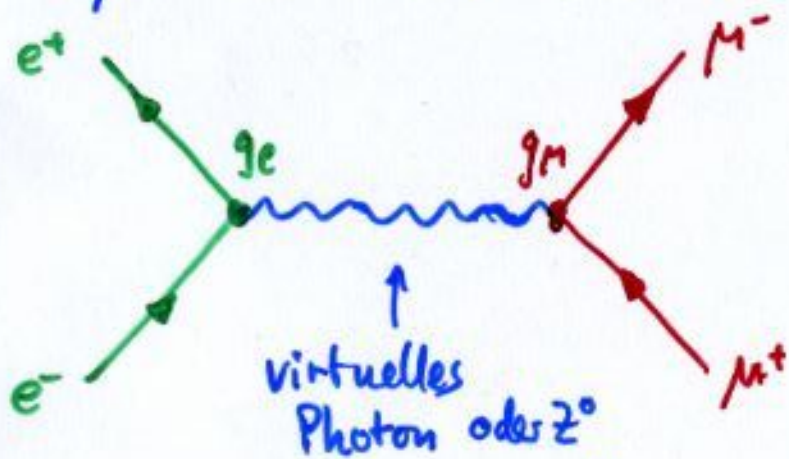
1.6+1.6

Beijing

Belle (KEK, Japan)

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

$m_\mu = 106 \text{ MeV}$, Erzeugung leicht, $\tau_\mu \approx 2\mu\text{s} \Rightarrow$ langlebig; große Reichweite in Materie, leicht identifizierbar



virtuelles Photon oder Z^0

Propagator $\frac{1}{\tilde{q}^2 + m^2}$

Matrixelement $\mathcal{M}_f \propto$
(Feynman-Regeln)

$$\frac{g_e g_\mu}{\tilde{q}^2 + m^2}$$

$m = 0$ für γ -Austausch

$m = m_Z = 91.2 \text{ GeV}$
für Z -Austausch

Goldene Regel: $\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{4\pi^2 h^4} |\mathcal{M}_f|^2 \frac{p_f^2}{v_i v_f}$

ohne Spin:
(Photon-Austausch) $\mathcal{M}_f = \frac{e^2}{q^2} = \frac{4\pi\alpha}{q^2}$
 $\Rightarrow \frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\alpha^2}{4s}$

$$q^2 = -E_0^2 = -s$$

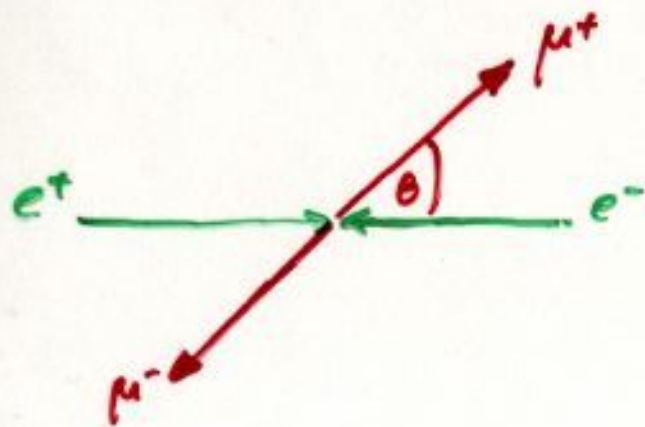
$$v_i = v_f = c$$

$$E_0 = 2p_f c$$

Wirkungsquerschnitt fällt mit $1/s = 1/E^2$

$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ mit Spin : über Anfangszustände mitteln und über Endzustände summieren.

Helizitätserhaltung für masselose Fermionen $H = \frac{\vec{\sigma} \cdot \vec{p}}{|\vec{p}|} = \pm 1$



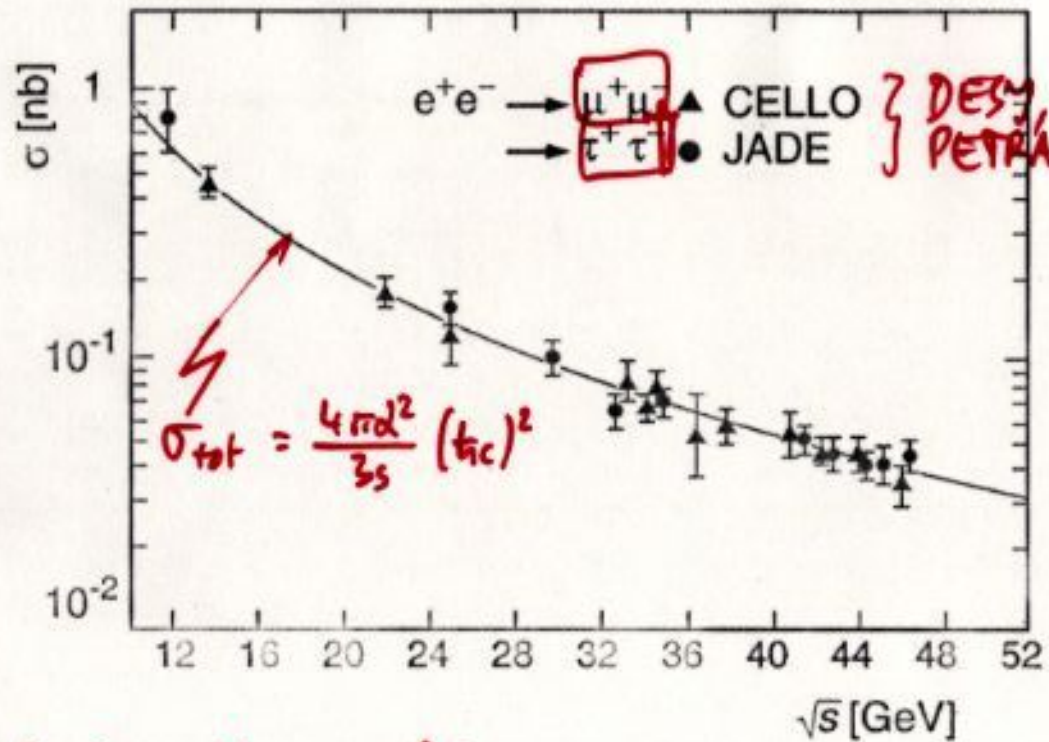
$$A_{LR} \rightarrow A_{LR} = \frac{1}{2} (1 + \cos \theta)$$

$$A_{LR} \rightarrow A_{RL} = \frac{1}{2} (1 - \cos \theta)$$

quadrieren und summieren: $P(\theta) = \frac{1}{2} (1 + \cos^2 \theta)$
 $LR \rightarrow LR$ und $RL \rightarrow RL$ berücksichtigen: $\times 2$

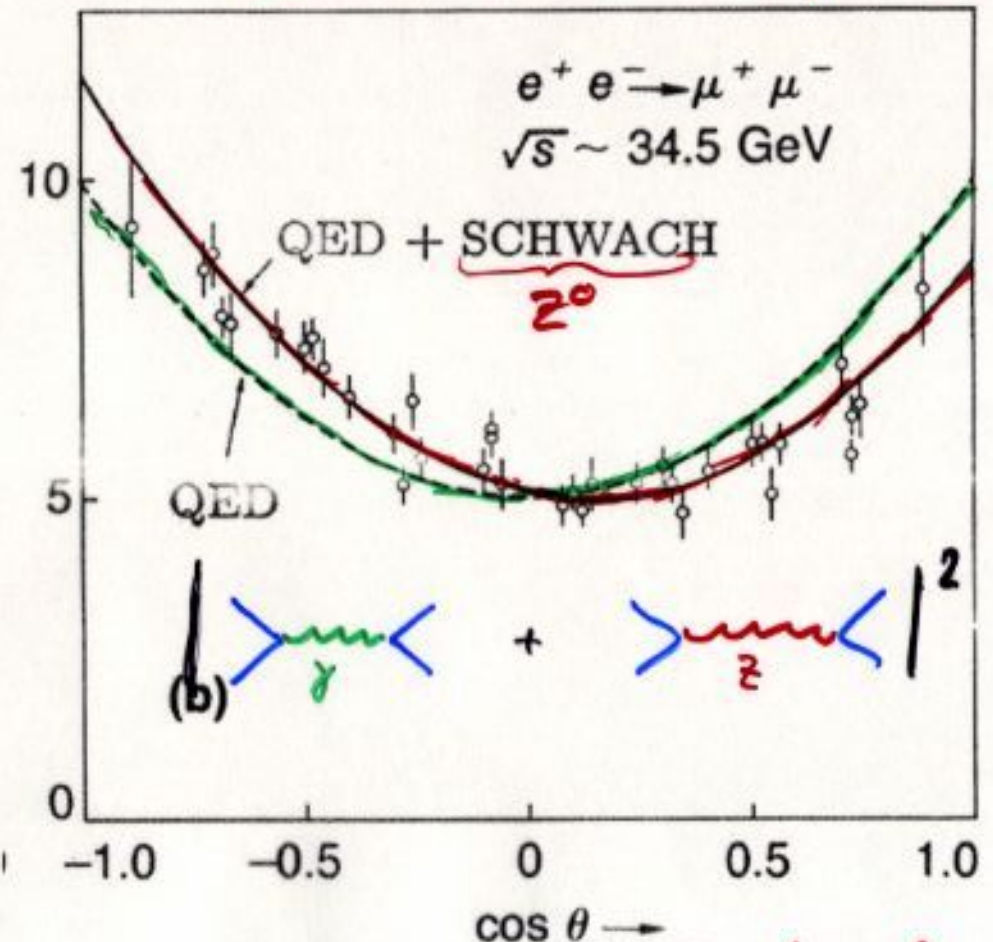
$$\Rightarrow \frac{d\sigma}{d\Omega} (e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-) = \frac{\alpha^2}{4s} (1 + \cos^2 \theta)$$

über Winkel integrieren: $\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-) = \frac{4\pi\alpha^2}{3s}$



Lepton-Universalität:
 $\sigma(\sqrt{s})$ gleich groß für μ und τ
 ➔ punktförmig ✓
 reiner γ -Austausch

Erste Hinweise auf
 „elektroschwache“ Interferenz:
 $\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto 1 + \cos^2\theta$ für γ -Austausch
 $+ A_{FB} \cdot \cos\theta$
 Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie



Asymmetrie durch γZ -Interferenz-
 Term ($|Z|^2$ vernachlässigbar) 9-4

σ_{tot} : QED (Quantenelektrodynamik) gibt sehr gute Beschreibung
 gleiches Verhalten für e, μ, τ : „alle Leptonen sind gleich“
 (außer in Masse, Lebensdauer): Lepton-Universalität

$\frac{d\sigma}{d\Omega}$: QED beschreibt Daten nicht sehr gut.
 Es gibt eine Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie

Hinweis auf Beitrag von Z^0 -Austausch (massives Spin-1-Teilchen)
 mit $m = 91 \text{ GeV}$

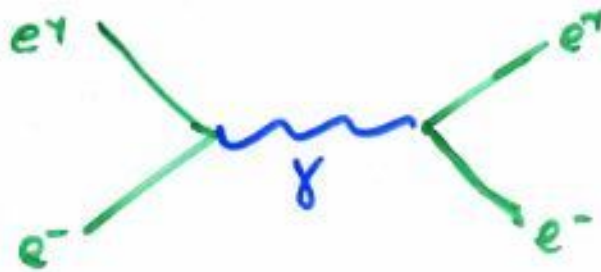
$$\begin{aligned}
 & \left| \text{Diagram 1} + \text{Diagram 2} \right|^2 \\
 = & \underbrace{\text{Diagram 3}}_{\text{QED-WQ}} + \underbrace{\text{Diagram 4}}_{\gamma Z \text{ Interferenz}} + \underbrace{\text{Diagram 5}}_{Z^0\text{-WQ (sehr klein)}}
 \end{aligned}$$

The diagrams are Feynman diagrams for electron-electron scattering. Diagram 1 and 2 are tree-level diagrams with a photon exchange. Diagram 3 is a tree-level diagram with a photon exchange and a Z boson exchange. Diagram 4 is a tree-level diagram with a Z boson exchange. Diagram 5 is a tree-level diagram with a Z boson exchange.

Asymmetrie
 (kein Beitrag
 zum integrierten
 Wirkungsquerschnitt)

Bhabha-Streuung : $e^+ e^- \rightarrow e^+ e^-$

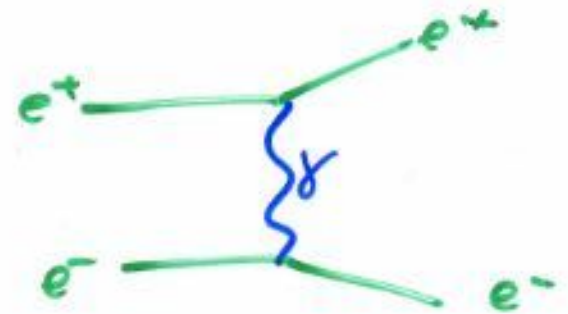
2 Komponenten:



s-Kanal

$$W_Q \propto \frac{1}{s}$$

⇒ Amplituden addieren
⇒ dann quadrieren



t-Kanal

starker Peak bei $\theta=0$:

$Q^2 \rightarrow 0 \Rightarrow$ Propagator
hat Pol
nicht von s
abhängig!

Entdeckung des τ -Leptons (Martin Perl 1974)

SPEAR @ SLAC : $e^+ e^- \rightarrow \tau^+ \tau^-$

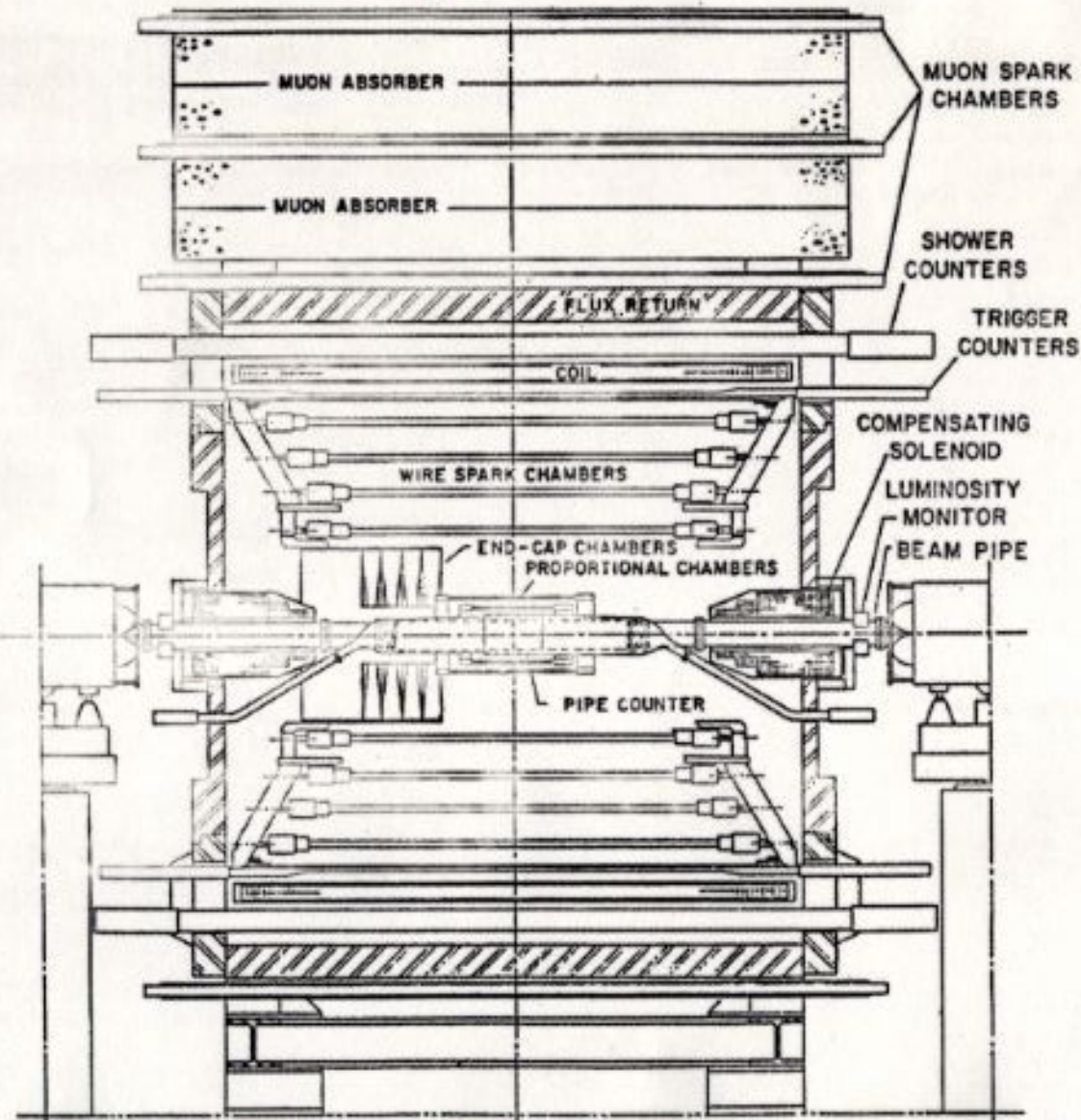


⇒ Ereignisse mit einem Elektron und einem Myon
(+ fehlende Energie)

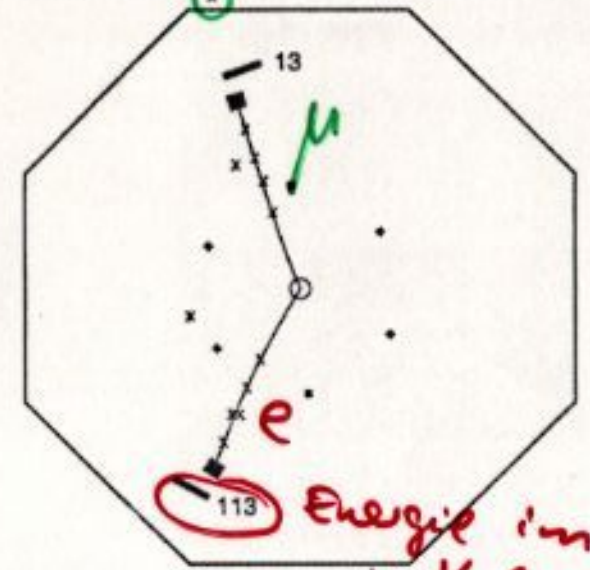
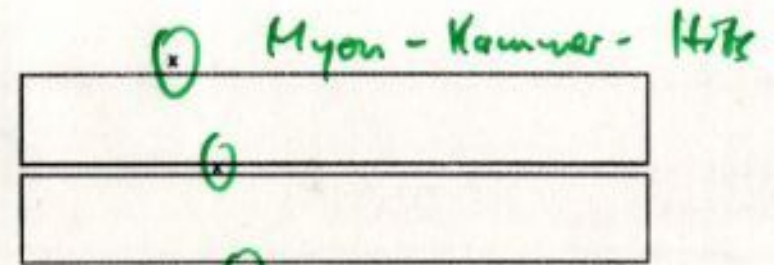
$$m_\tau = 1.78 \text{ GeV} \quad \tau(\tau) = 3 \cdot 10^{-13} \text{ s}$$

nahe an der Charmschwelle, Konfusion

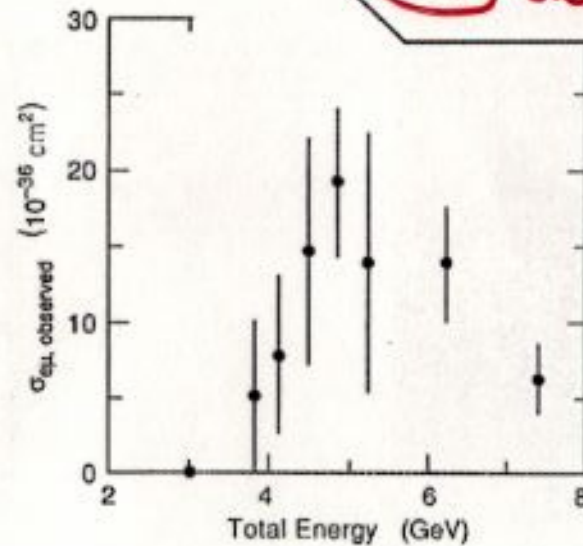
Entdeckung des τ -Leptons



SLAC-LBL-Detektor
(MARK I)



Energie im Kalorimeter

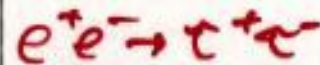
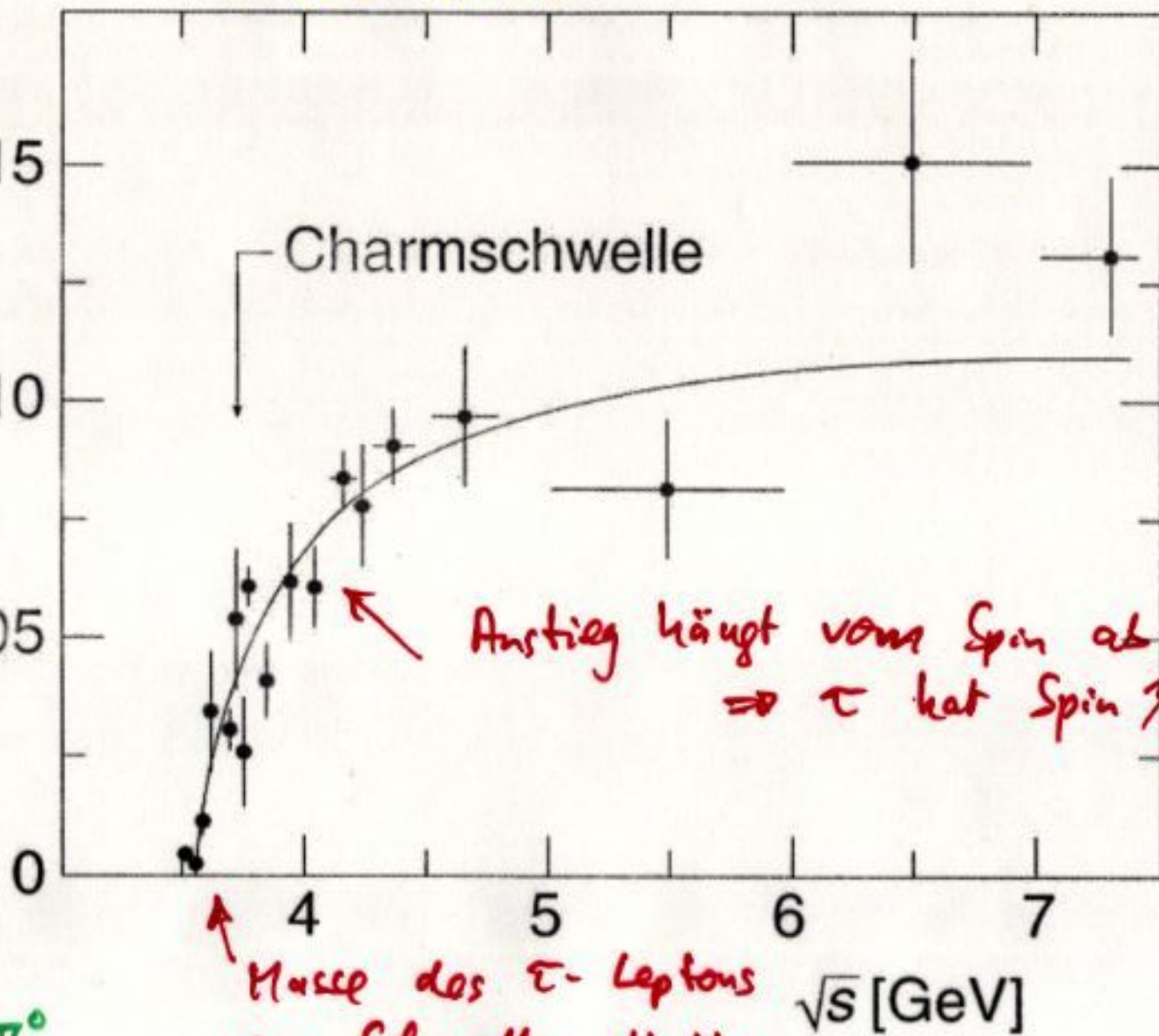


unbeobachtete
Teilchen



γ

$\sigma(e^+e^- \rightarrow e^+ + X^- + \gamma)$
 $\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-)$



- $\tau^- \rightarrow \nu_\tau e^- \bar{\nu}_e$
- $\rightarrow \nu_\tau \mu^- \bar{\nu}_\mu$
- $\rightarrow \nu_\tau \pi^-$
- $\rightarrow \nu_\tau \rho^- \rightarrow \nu_\tau \pi^- \pi^0$
- $\rightarrow \nu_\tau a_1^- \rightarrow \nu_\tau \pi^- \pi^+ \pi^-$
- $\rightarrow \nu_\tau K^- \dots$

↑ Masse des τ -Leptons
 aus Schwelle ableitbar

Resonanzen in e^+e^- - Kollisionen

= ausgeprägte Maxima im Wirkungsquerschnitt $\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{Hadronen})$

- kurzlebige Zustände
 - feste invariante Masse
 - definierte Quantenzahlen
- } Teilchen

gebundene Zustände von Quark und Antiquark
mit den Quantenzahlen des Photons ($J^{PC} = 1^{--}$)



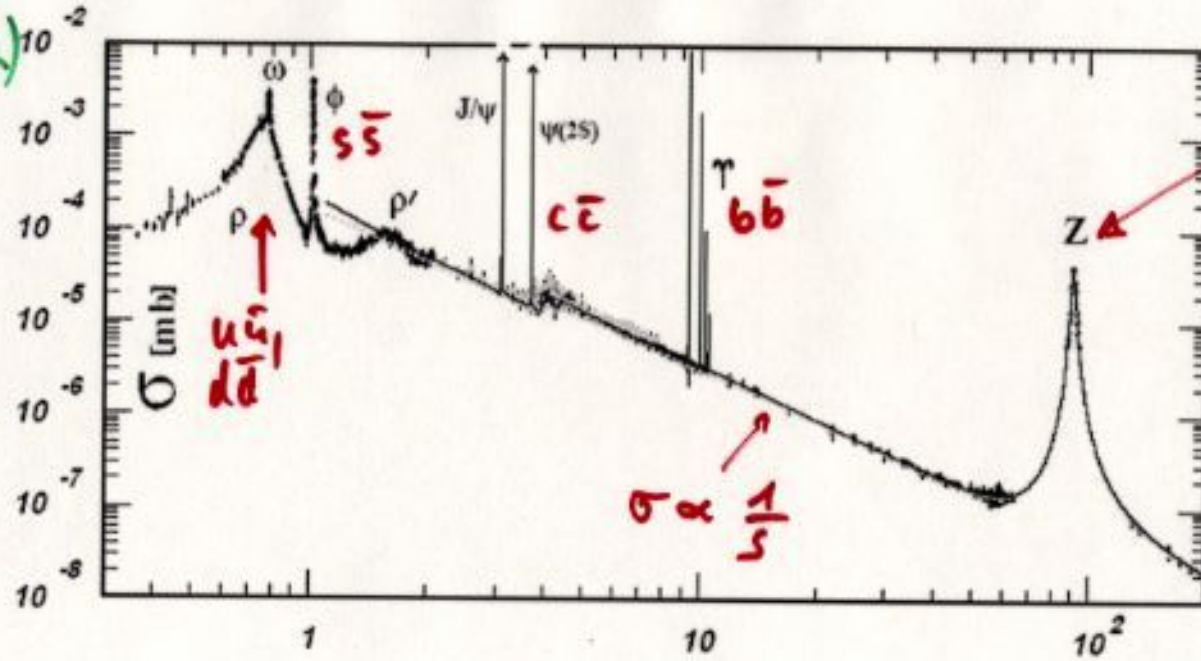
Zfall (siehe später)

Resonanz kann durch Breit-Wigner-Kurve beschrieben werden

σ and R in e^+e^- Collisions

$\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{Hadrons})$

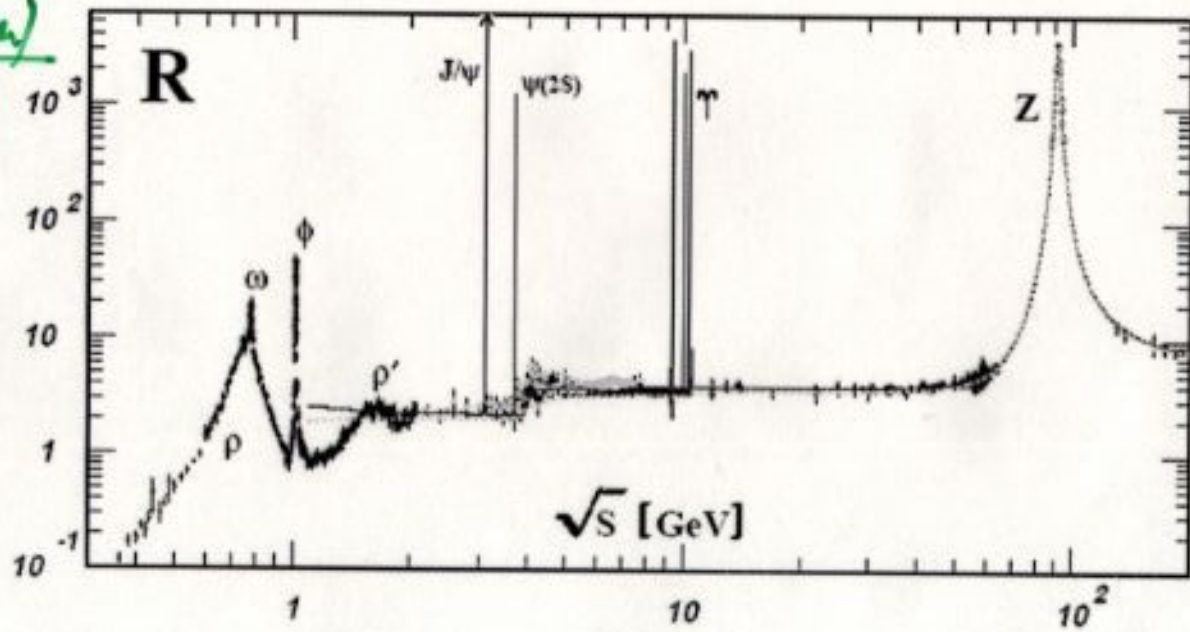
logarithmisch!



Z^0 -Boson,
Träger der
schwachen WW

$\sigma \propto \frac{1}{s}$

$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{Hadrons})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)}$



Kontinuum:
 $R = 3 \cdot \sum q_f^2$

Breit - Wigner - Resonanzkurve

exponentieller Zerfall instabiler Teilchen: $N(t) = N_0 e^{-\frac{\Gamma t}{\hbar}}$

$\Gamma = \sum \Gamma_i$
für verschiedene
Zerfallskanäle i

Wellenfunktion instabiler Teilchen:

$$\psi(t) = \psi(0) e^{-i\omega_R t} e^{-t/2\tau} = \psi(0) \cdot e^{-t(iE_R + \frac{\Gamma}{2})}$$

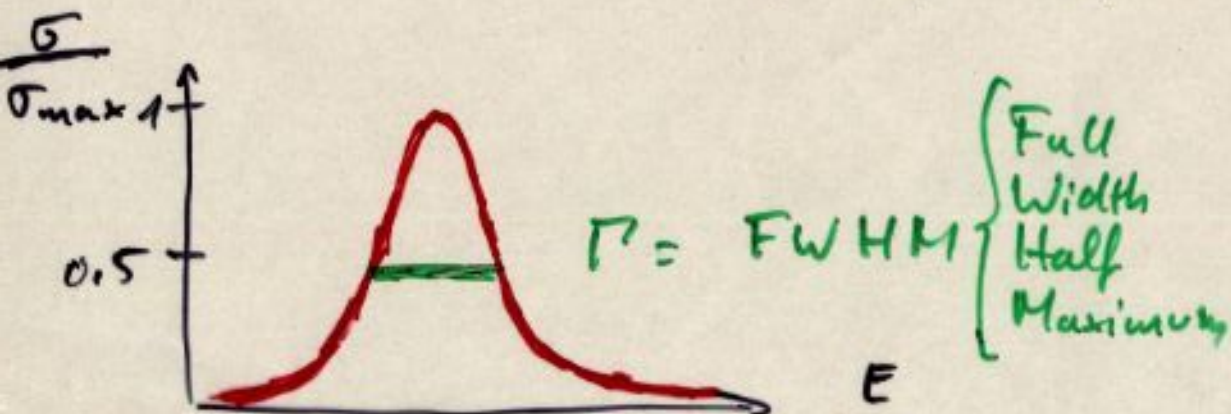
mit $\tau = \frac{\hbar}{\Gamma}$, $\omega_R = \frac{E_R}{\hbar}$ Resonanzenergie

Fourier-Transformation: $g(\omega) = \int_0^\infty \psi(t) e^{i\omega t} dt$

$$\chi(E) = \psi(0) \int_0^\infty e^{-t(\frac{\Gamma}{2} + i(E_R - E))} dt = \frac{\text{Konst.}}{(E - E_R) - i\frac{\Gamma}{2}}$$

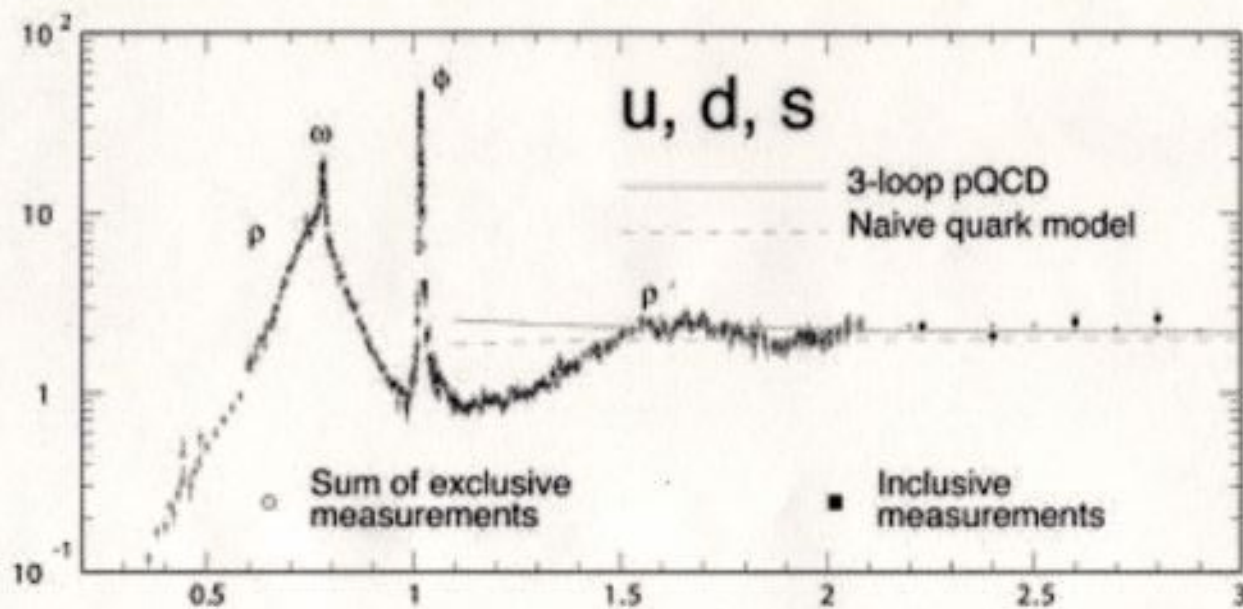
$$\sigma(E) \propto \chi^* \chi$$

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



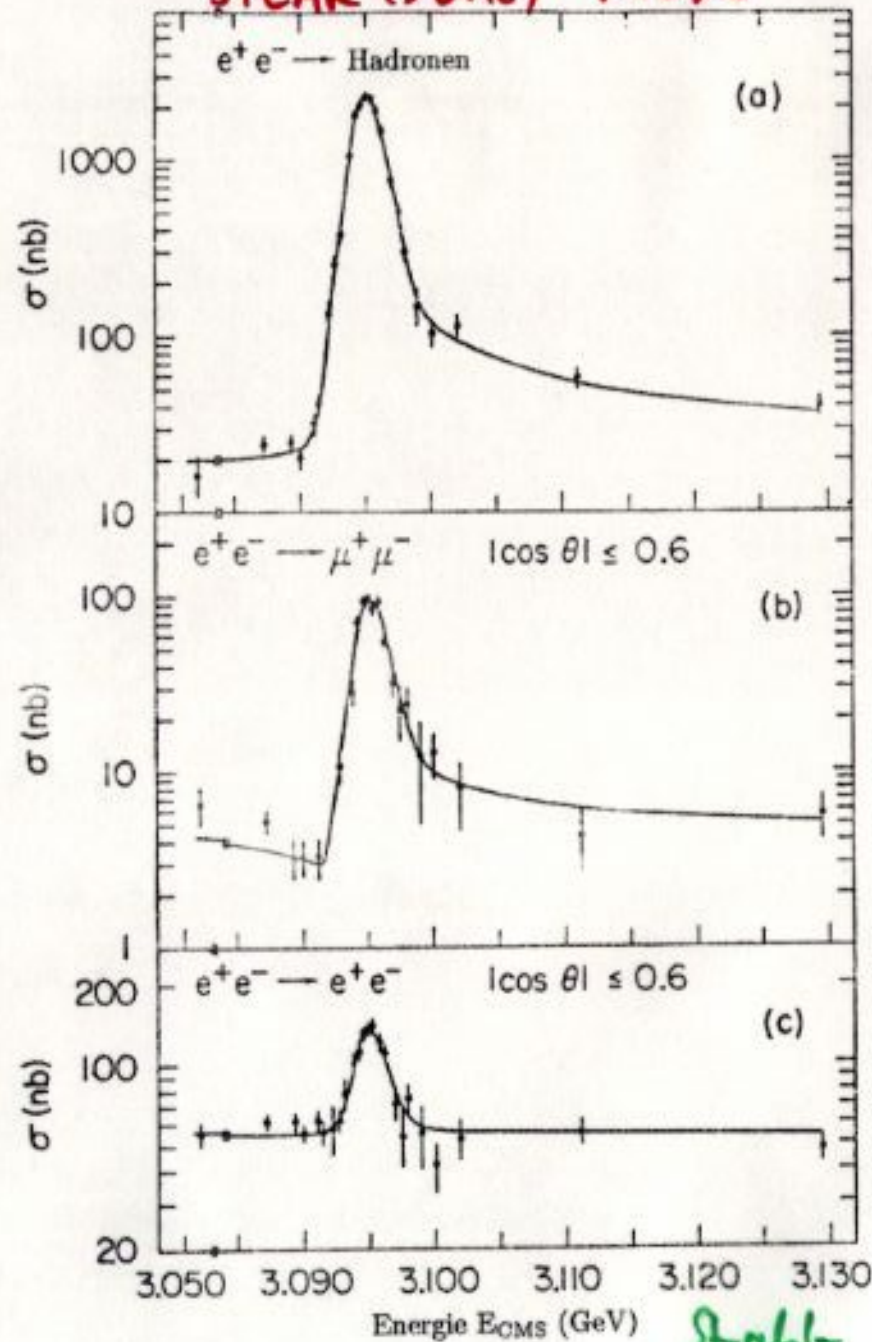
Relativistischer
Breit - Wigner

$$\sigma \propto \frac{\Gamma^2}{(s - M_R)^2 + M_R^2 \Gamma^2}$$



- Zerfälle
- ρ : $I=1$ $J^{PC} = 1^{--}$ $\rightarrow$ Quark-Spins parallel $\uparrow\uparrow$ $\rho \rightarrow \pi\pi$
- ω : $I=0$ $J^{PC} = 1^{--}$ $\omega \rightarrow 3\pi$
- ϕ : $I=0$ $J^{PC} = 1^{--}$ $s\bar{s}$ -Zustand $\phi \rightarrow K\bar{K}$
- ρ : Radialanregung vom ρ $\rho - \rho'$

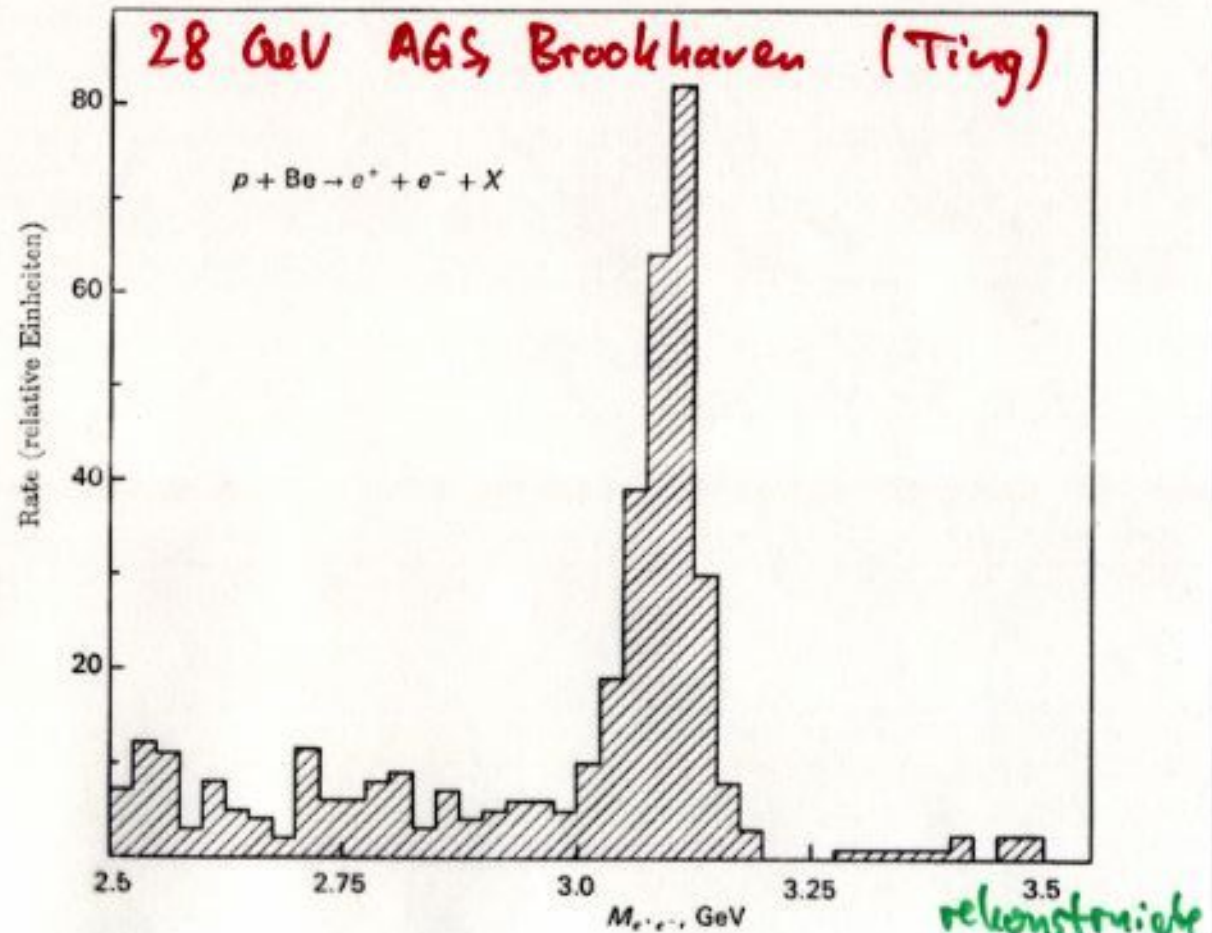
SPEAR (SLAC) Richter



Formation

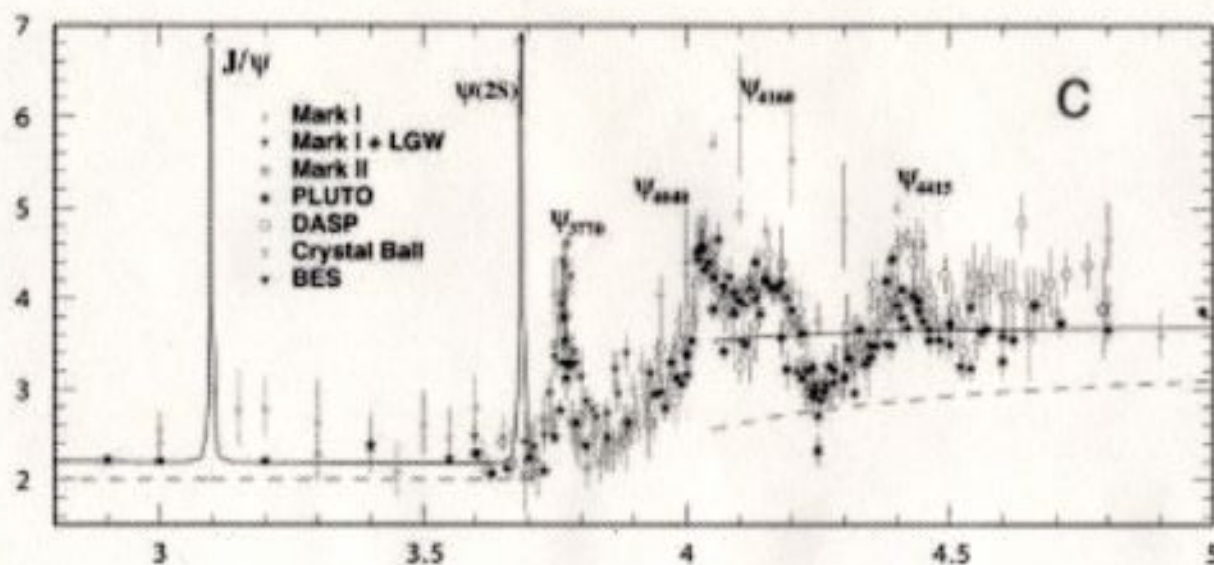
Strahl-
energie

Entdeckung des J/ψ , November 1974
November-Revolution



Produktion

rekonstruierte
invariante
Masse
g-13



↑
J/ψ
1S

↑
ψ'
2S

4 weitere
(breite) Resonanzen mit
 $J^{PC} = 1^{--}$

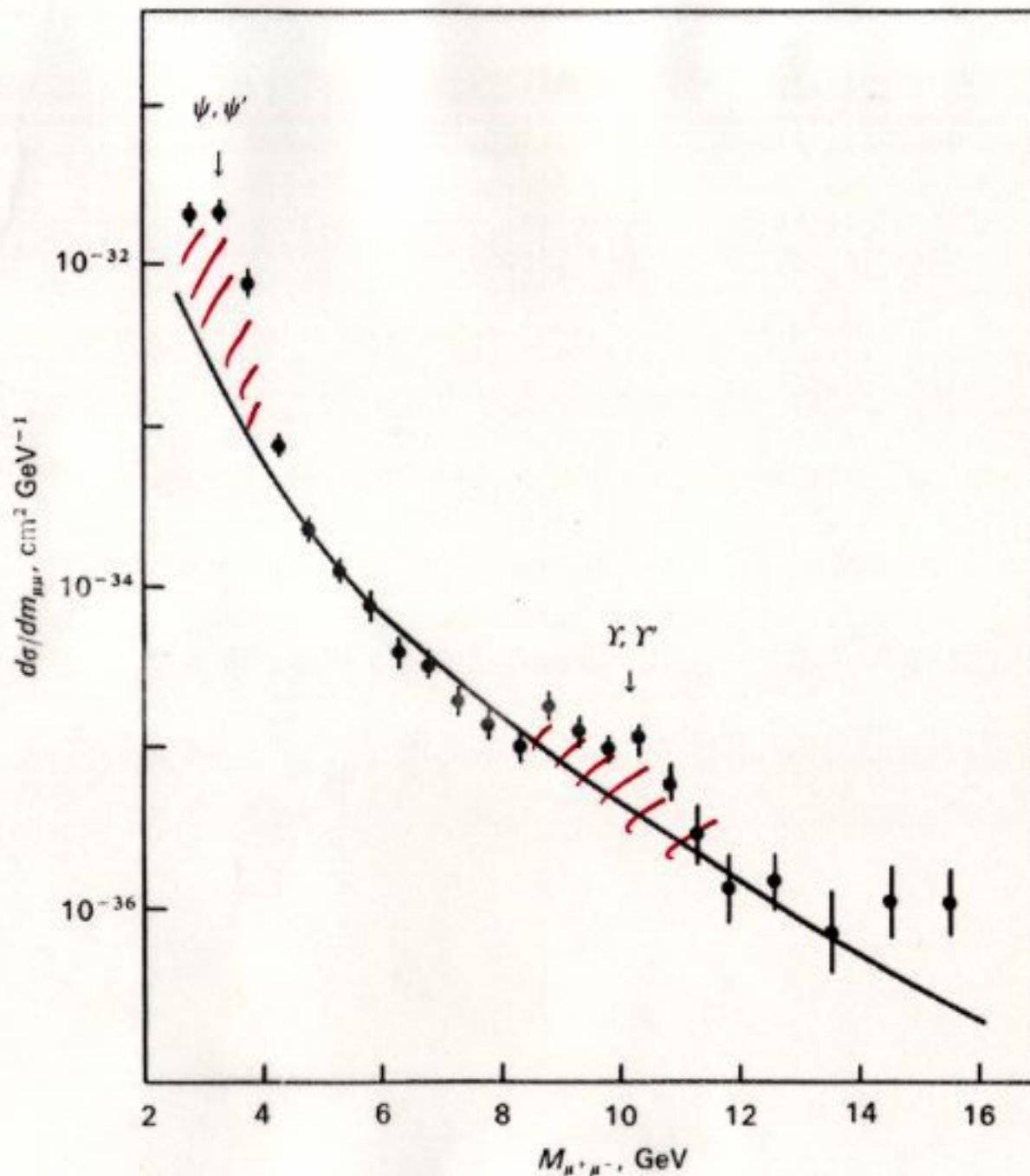
GeV

Erster Beweis
für Υ -Resonanz
FNAL 1977
(Ledermann)

Gesamtbreite
größer als
experimentelle
Auflösung

hier:
Überlagerung
von schmalen
Resonanzen
↳ Spektroskopie

Produktions-
experiment



Schwelle für offene
↓ Beauty - Produktion

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

B-Mesonen:

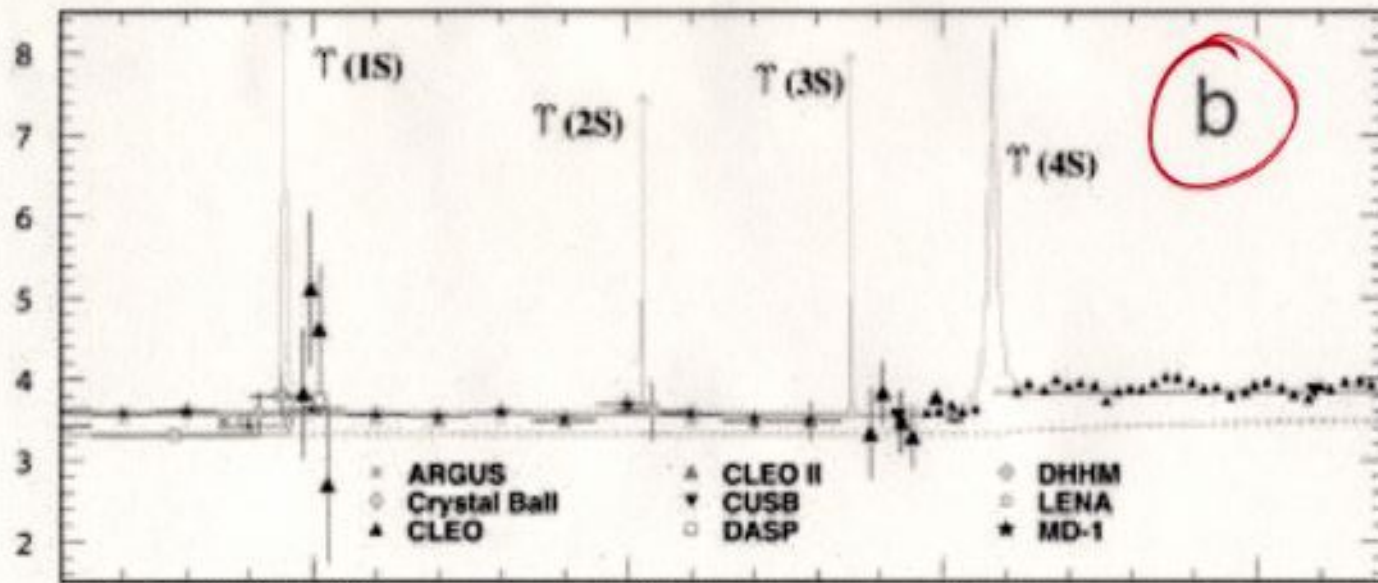
$B^+ \quad \bar{b}u$

$B^0 \quad \bar{b}d$

$\bar{B}$ -Mesonen:

$B^- \quad b\bar{u}$

$\bar{B}^0 \quad b\bar{d}$



↑
 $\Upsilon(1S)$

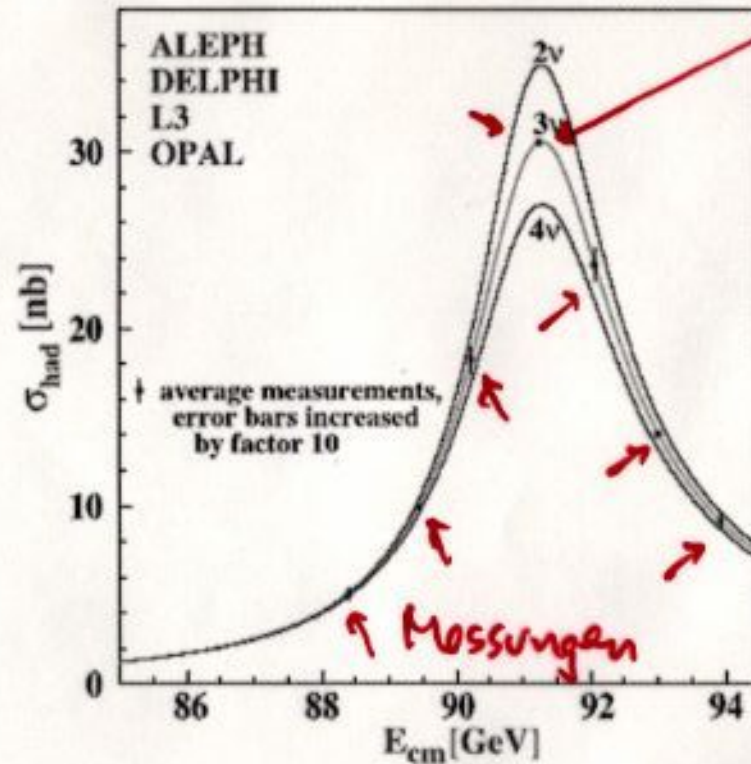
↑
 $\Upsilon(2S)$

↑
 $\Upsilon(3S)$

↑
 $\Upsilon(4S)$

Z^0 - Line Shape

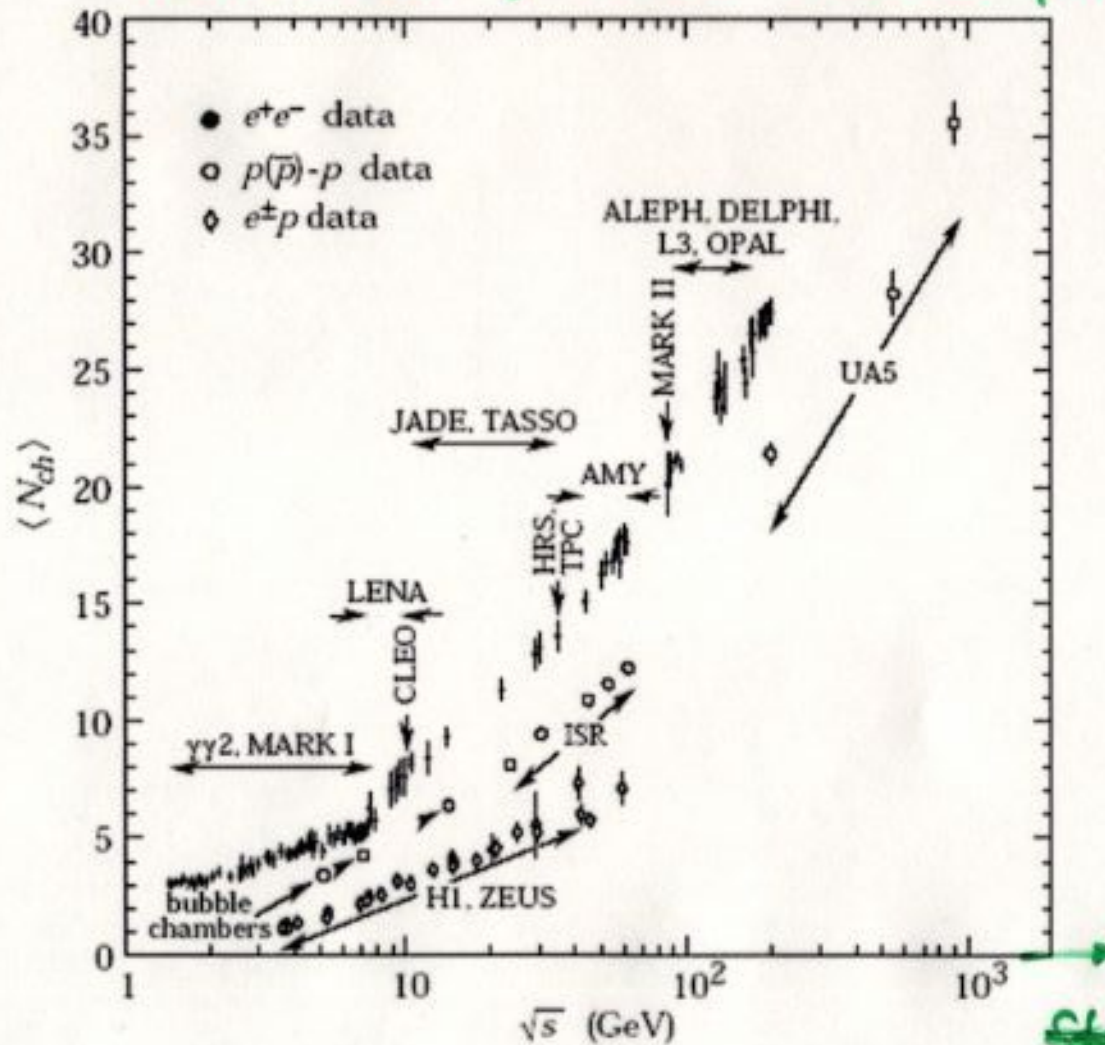
(LEP I & 1989 - 1995)



Fehler extrem
klein

Höhe und Breite
legen die Anzahl
der existierenden
leichten Neutrinos
fest
($N_\nu = 3$)

mittlere geladene Multiplizität
(Anzahl von geladenen Teilchen pro Kollision)



steigt $\approx$
logarithmisch

~~Streuung~~
Schwerpunkts-
energie