

Kerne und Teilchen

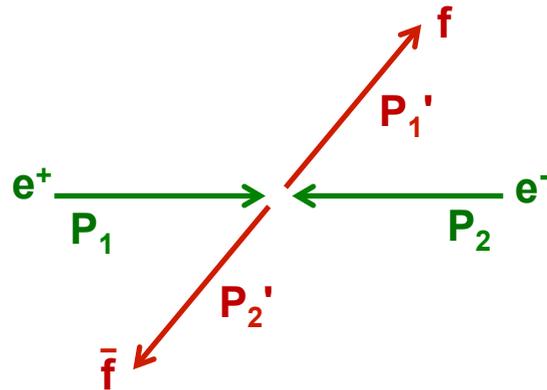
Moderne Experimentalphysik III Vorlesung 9

MICHAEL FEINDT
INSTITUT FÜR EXPERIMENTELLE KERNPHYSIK

e^+e^- – Kollisionen

Kinematik von e^+e^- – Kollisionen

- Kinematik: ~ frontale Stöße



$e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$ Fermion–Antifermion

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

$f = \ell : e, \mu, \tau$
 ν_e, ν_μ, ν_τ

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

$$s = 4E^2$$

für $E_1 = E_2 = E \gg m \rightarrow$ symmetrisch, frontal
hochenergetisch



**Erzeugung schwerer
Leptonen, Quarks**

CMS = LAB

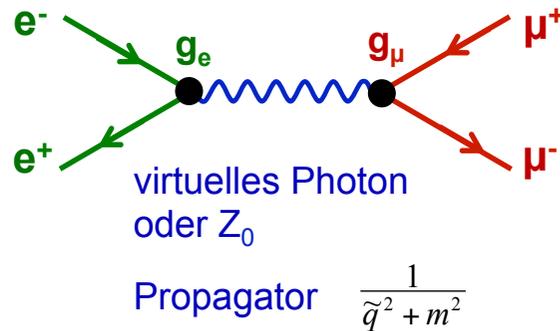
\Rightarrow Detektor für 4π -Abdeckung

Detektoren

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	500-1000	??		
DAΦNE	0.5+0.5	Frascati	B-Fabriken: (asymmetrisch)	BaBar (SLAC) Belle (KEK, Japan)
BES	1.6+1.6	Beijing		

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



Matrixelement $M_{fi} \propto \frac{g_e g_\mu}{\tilde{q}^2 + m^2}$
 (Feynman Regeln)

$m = 0$ für γ -Austausch
 $m = m_Z = 91.2 \text{ GeV}$ für Z -Austausch

- Goldene Regel $\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{4\pi^2 \hbar^4} |M_{fi}|^2 \frac{p_f^2}{v_i v_f}$

- ohne Spin (Photonaustausch) $M_{fi} = \frac{e^2}{q^2} = \frac{4\pi\alpha}{q^2}$

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

$$v_i = v_f = c$$

$$E_0 = 2 p_f c$$

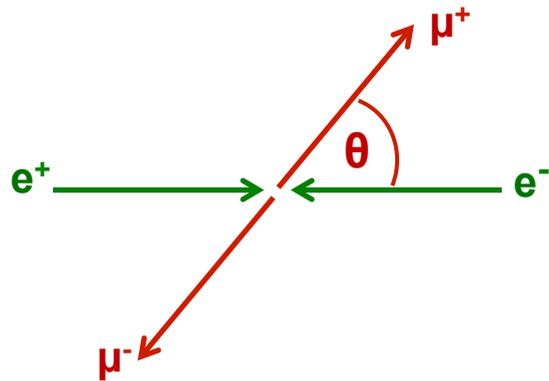
$$\Rightarrow \boxed{\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\alpha^2}{4s}}$$

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: $P(\theta) = \frac{1}{2}(1 + \cos^2\theta)$

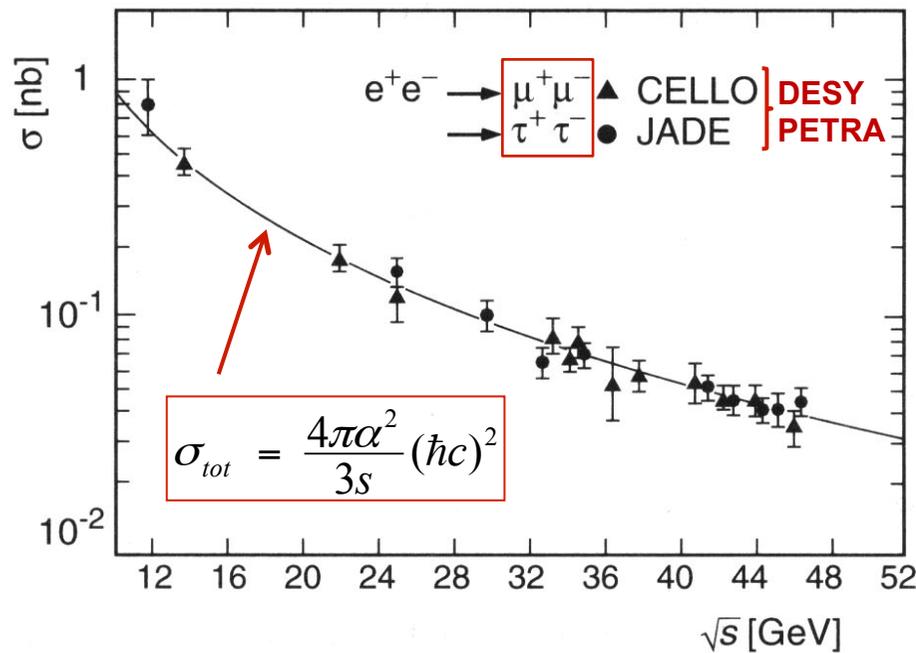
LR→LR und RL→RL berücksichtigen: *2

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

über Winkel integrieren:

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

WQ und Interferenzen



Lepton – Universalität:

$\sigma(\sqrt{s})$ gleich groß für μ und τ

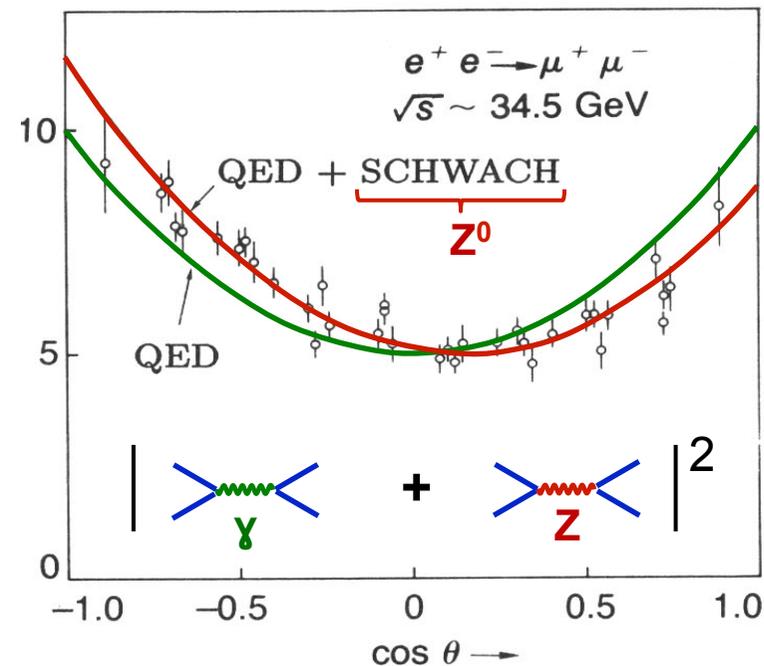
⇒ **punktförmig** ✓

reiner γ – Austausch

Erste Hinweise auf "elektroschwache" Interferenz:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto \underbrace{1 + \cos^2 \theta}_{\text{für } \gamma \text{ – Austausch}} + A_{FB} \cdot \cos \theta$$

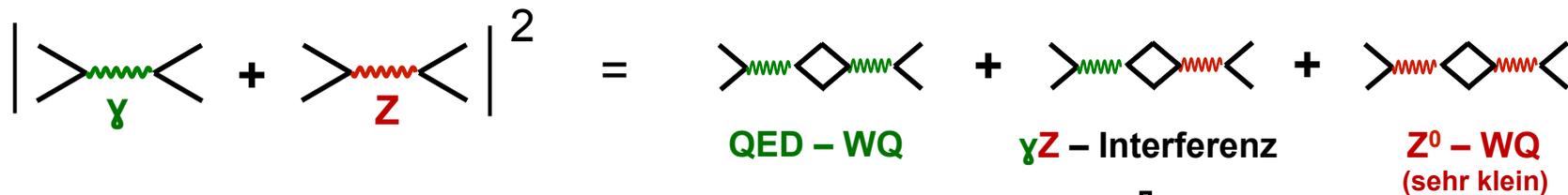
Vorwärts – Rückwärts – Asymmetrie



Asymmetrie durch γZ – Interferenz – Term
 ($|Z|^2$ vernachlässigbar)

γZ – Interferenz

- 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 $m = 91$ GeV)

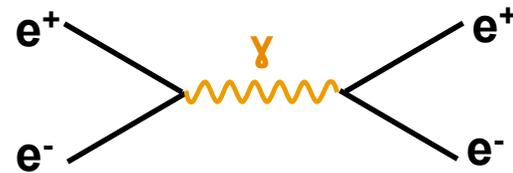
$$\left| \begin{array}{c} \diagup \\ \diagdown \end{array} \begin{array}{c} \color{green}{\gamma} \\ \color{red}{Z} \end{array} \begin{array}{c} \diagdown \\ \diagup \end{array} \right|^2 = \begin{array}{c} \color{green}{\text{QED - WQ}} \\ \color{red}{\gamma Z - \text{Interferenz}} \\ \color{red}{Z^0 - \text{WQ}} \\ \text{(sehr klein)} \end{array}$$


\Downarrow
Asymmetrie

(liefert aber keinen Beitrag zum integrierten Wirkungsquerschnitt)

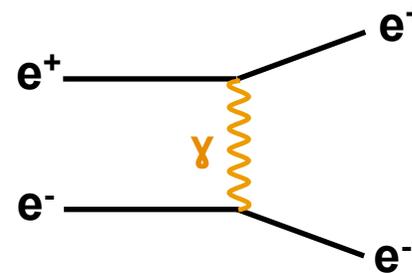
Bhabha – Streuung : $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$

- 2 Komponenten:



s – Kanal

$$WQ \propto 1/s$$



t – Kanal

starker Peak bei $\theta=0$: $Q^2 \rightarrow 0$
 \Rightarrow Propagator hat Pol,
 nicht von s abhängig!

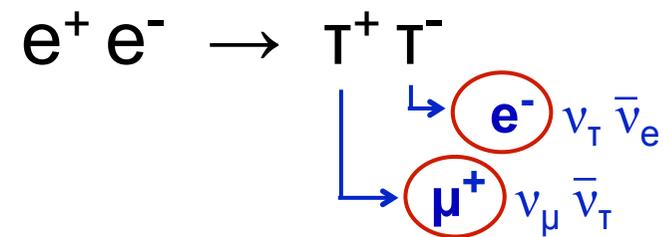
\Rightarrow Amplituden addieren

\Rightarrow dann quadrieren

Entdeckung des τ – Leptons

- Martin Perl, 1974

SPEAR @ SLAC :

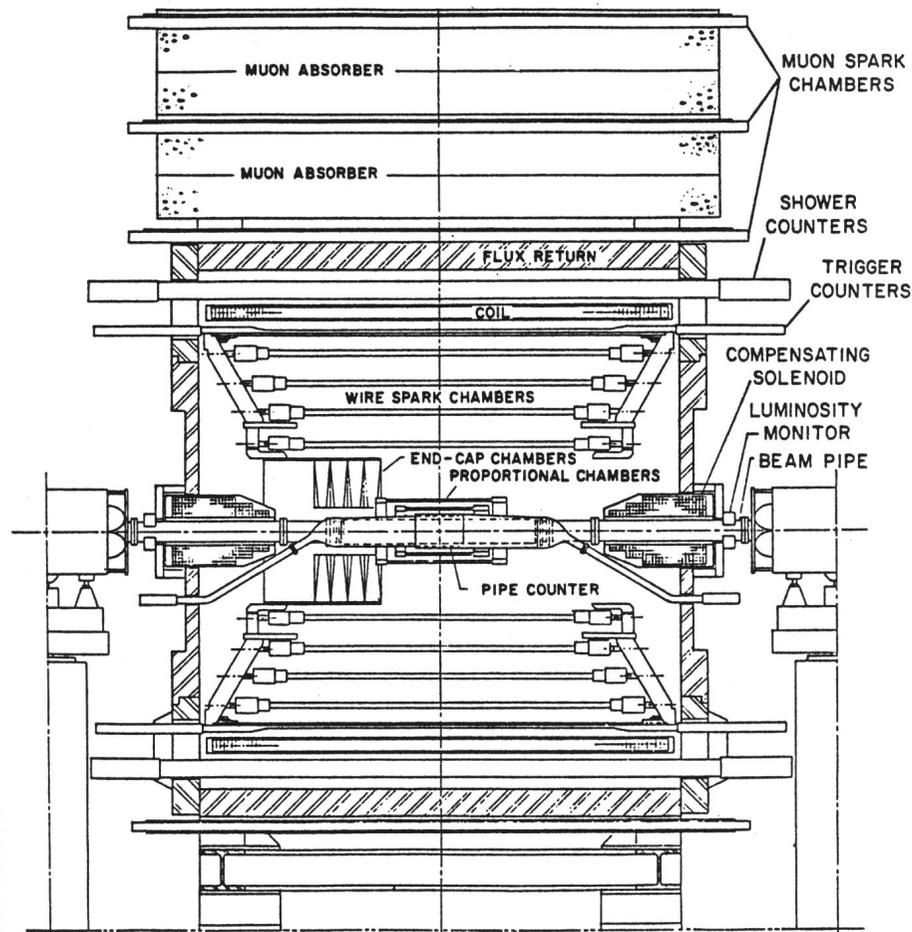


⇒ Ereignisse mit einem Elektron und einem Myon (+ fehlende Energie)

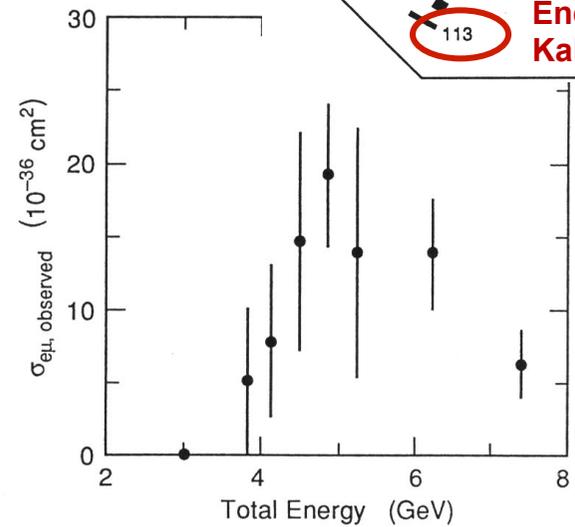
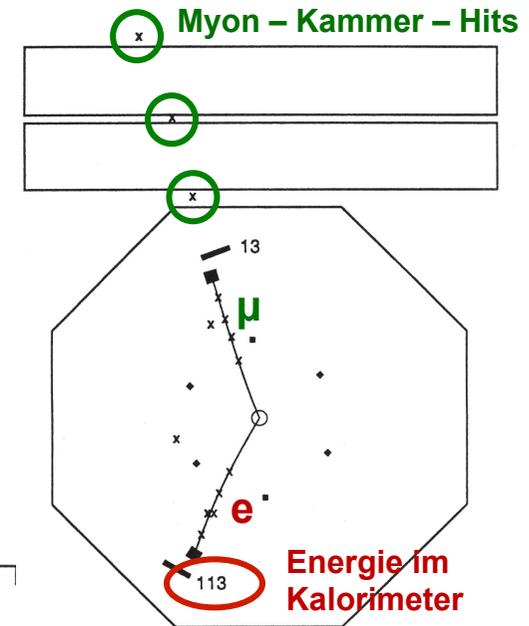
$$m_\tau = 1.78 \text{ GeV} \quad \tau(\tau) = 3 \cdot 10^{-13} \text{ s}$$

dicht an der Charmschwelle , Konfusion

Entdeckung des τ – Leptons



SLAC – LBL – Detektor (Mark I)



Entdeckung des τ – Leptons

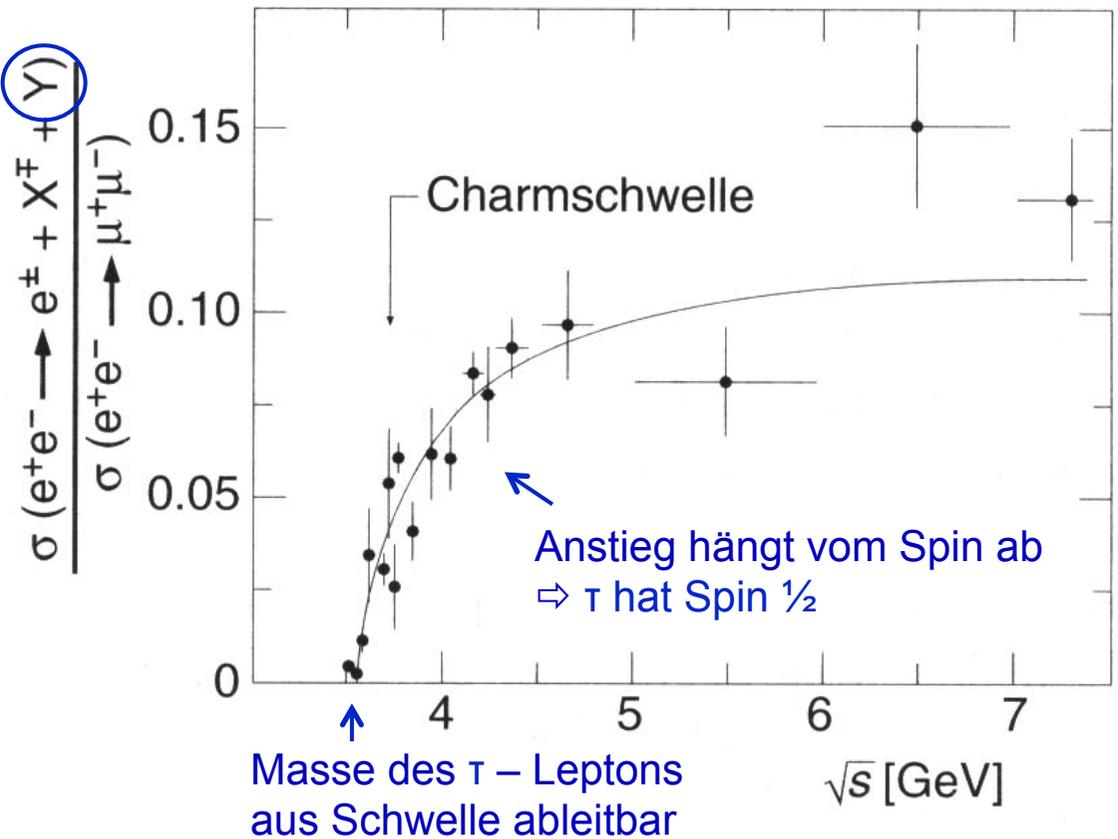


aus τ^+ – Zerfall

aus τ^- – Zerfall

unbeobachtete Teilchen (Y)

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



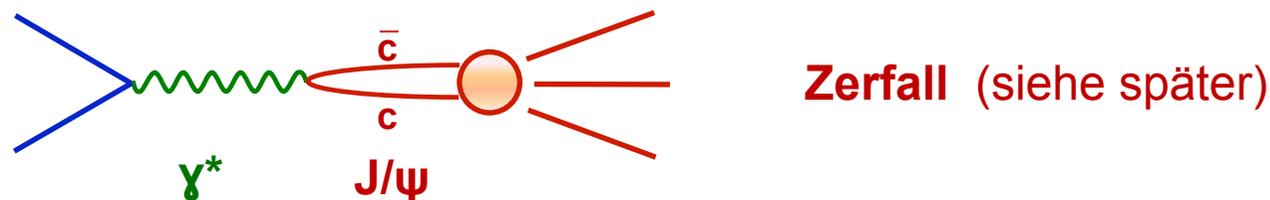
$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$

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 ($J^{PC} = 1^{--}$)

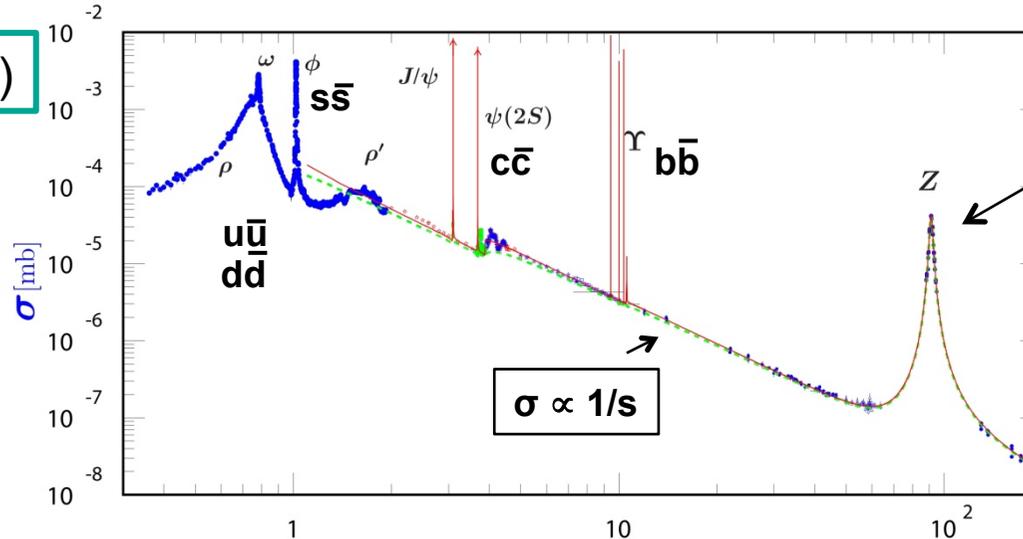


Resonanz kann durch Breit – Wigner – Kurve beschrieben werden

σ und R in e^+e^- – Kollisionen

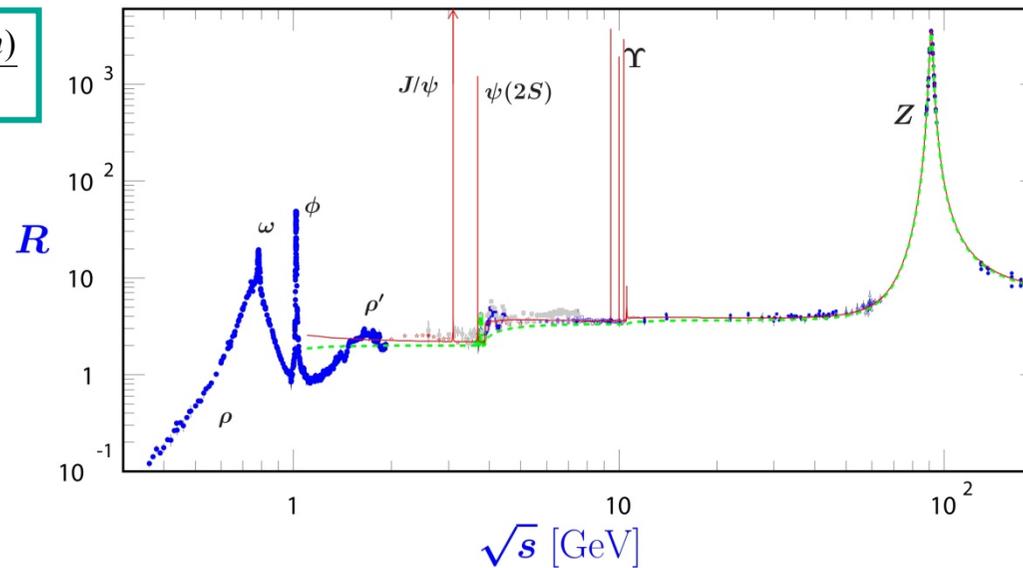
$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{Hadronen})$$

logarithmisch!



Z^0 – Boson:
Träger der
schwachen WW

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



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

[Quelle: Particle Data Booklet]

Breit – Wigner – Resonanzkurve

- exponentieller Zerfall instabiler Teilchen:

$$N(t) = N_0 e^{-\frac{\Gamma t}{\hbar}} \quad \Gamma = \sum_i \Gamma_i \quad \text{für verschiedene Zerfallskanäle } i$$

- Wellenfunktion instabiler Teilchen

$$\psi(t) = \psi(0) \cdot e^{-i\omega_R t} e^{-t/2\tau} = \psi(0) \cdot e^{-t(iE_R + \Gamma/2)} \quad \text{mit } \tau = \frac{\hbar}{\Gamma}, \quad \omega_R = \frac{E_R}{\hbar}$$

Resonanzenergie

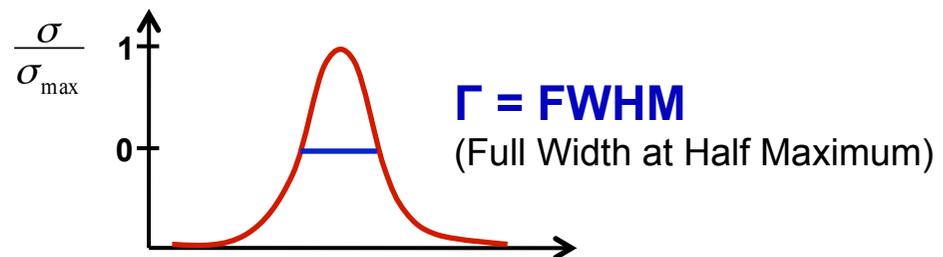
- Fourier – Transformation: $g(\omega) = \int_0^\infty \psi(t) e^{i\omega t} dt$

$$\chi(E) = \psi(0) \cdot \int e^{-t(\Gamma/2 + i(E_R - E))} dt = \frac{\text{konst.}}{(E - E_R) - i\frac{\Gamma}{2}}$$

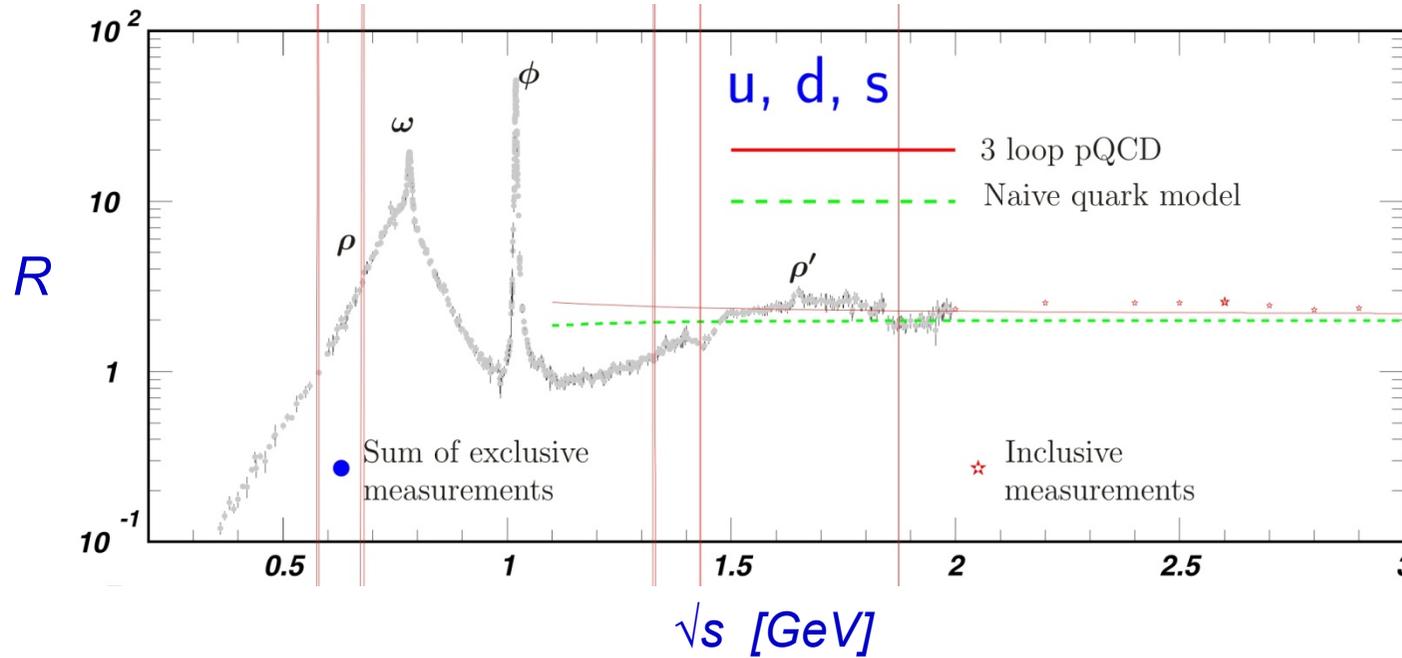
$$\sigma(E) \propto \chi^* \chi \quad \Leftrightarrow \quad \sigma(E) = \sigma_{\max} \cdot \frac{\Gamma^2/4}{(E - E_R)^2 + \Gamma^2/4}$$

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

**Relativistische
Breit – Wigner – Formel**



leichte Vektor-Mesonen



- ρ : $I = 1$ $J^{PC} = 1^{--}$ Quark-Spins parallel $\uparrow\uparrow$
- ω : $I = 0$ $J^{PC} = 1^{--}$
- ϕ : $I = 0$ $J^{PC} = 1^{--}$ $s\bar{s}$ – Zustand
- ρ' : Radialanregung vom ρ

Zerfälle

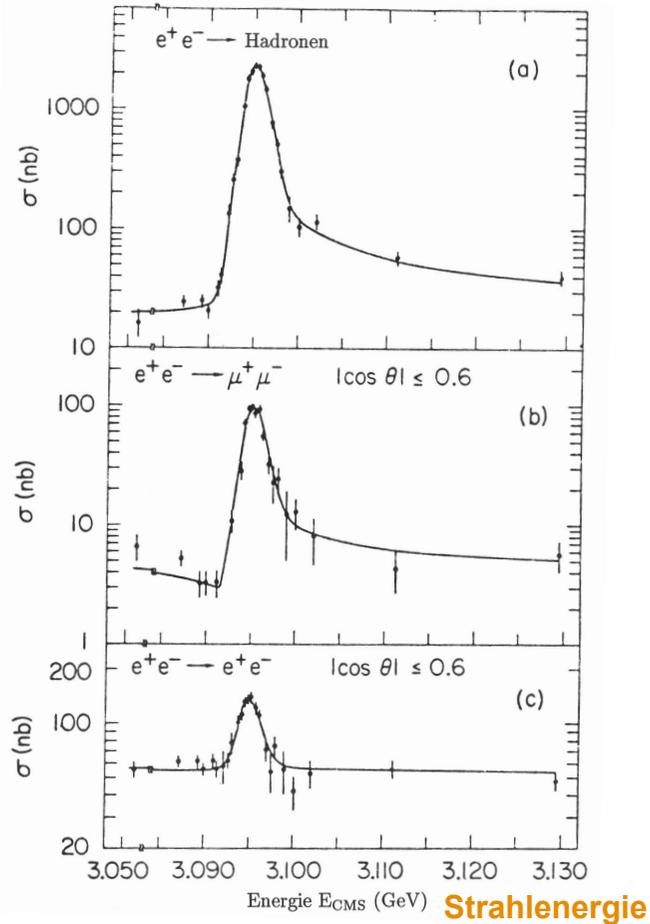
- $\rho \rightarrow \pi \pi$
- $\omega \rightarrow 3 \pi$
- $\phi \rightarrow K \bar{K}$

[Quelle: Particle Data Booklet]

Entdeckung des J/ψ ($c\bar{c}$), Nov. 1974

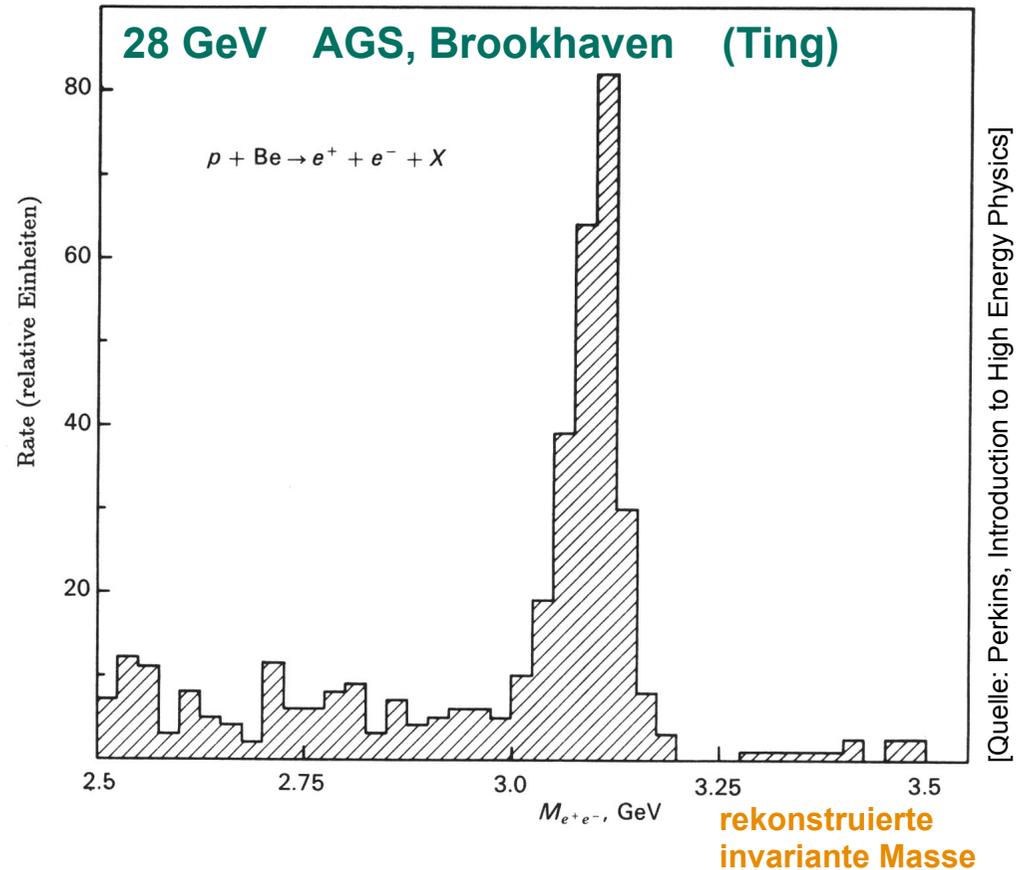
"November – Revolution"

SPEAR, SLAC (Richter)



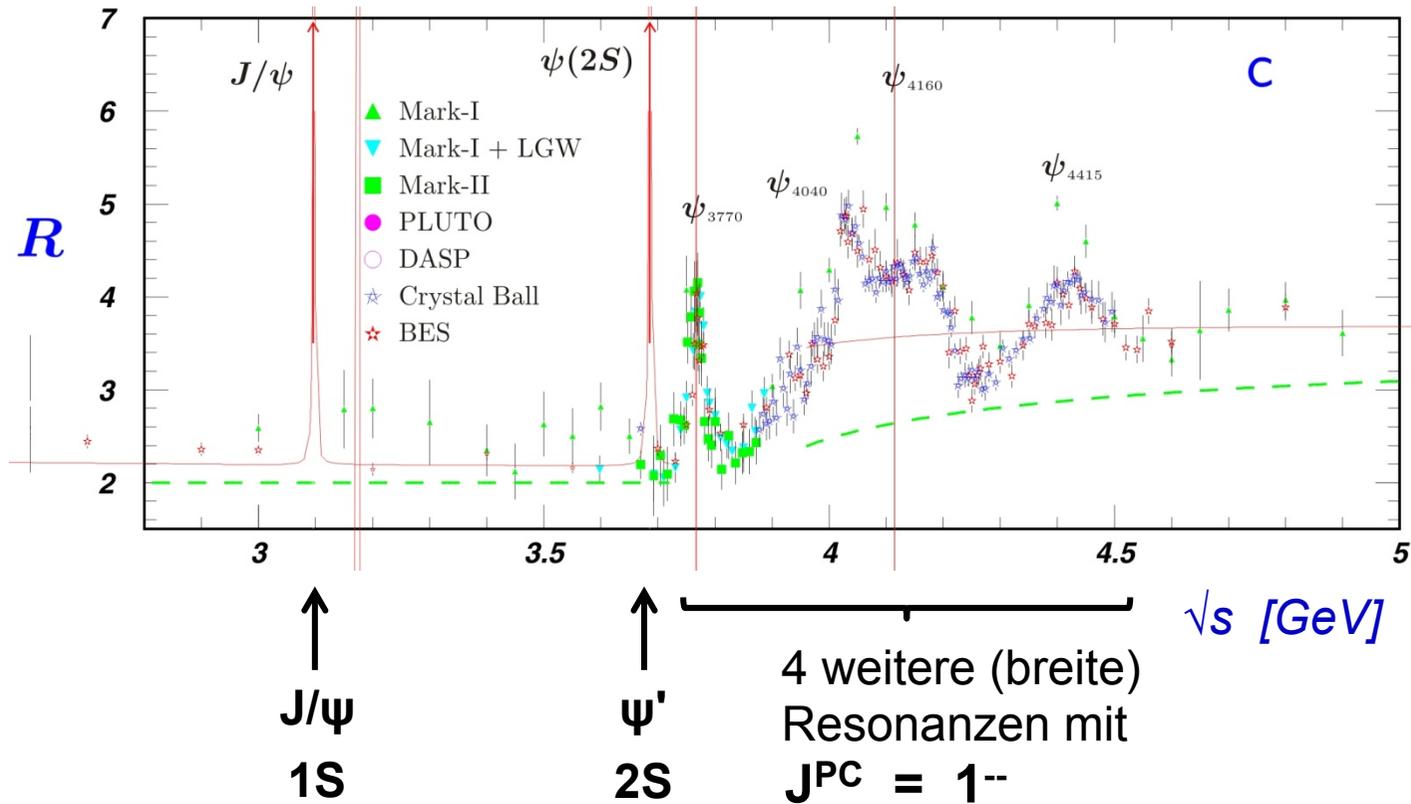
Formation

28 GeV AGS, Brookhaven (Ting)



Produktion

ψ – Resonanzen ($c\bar{c}$)



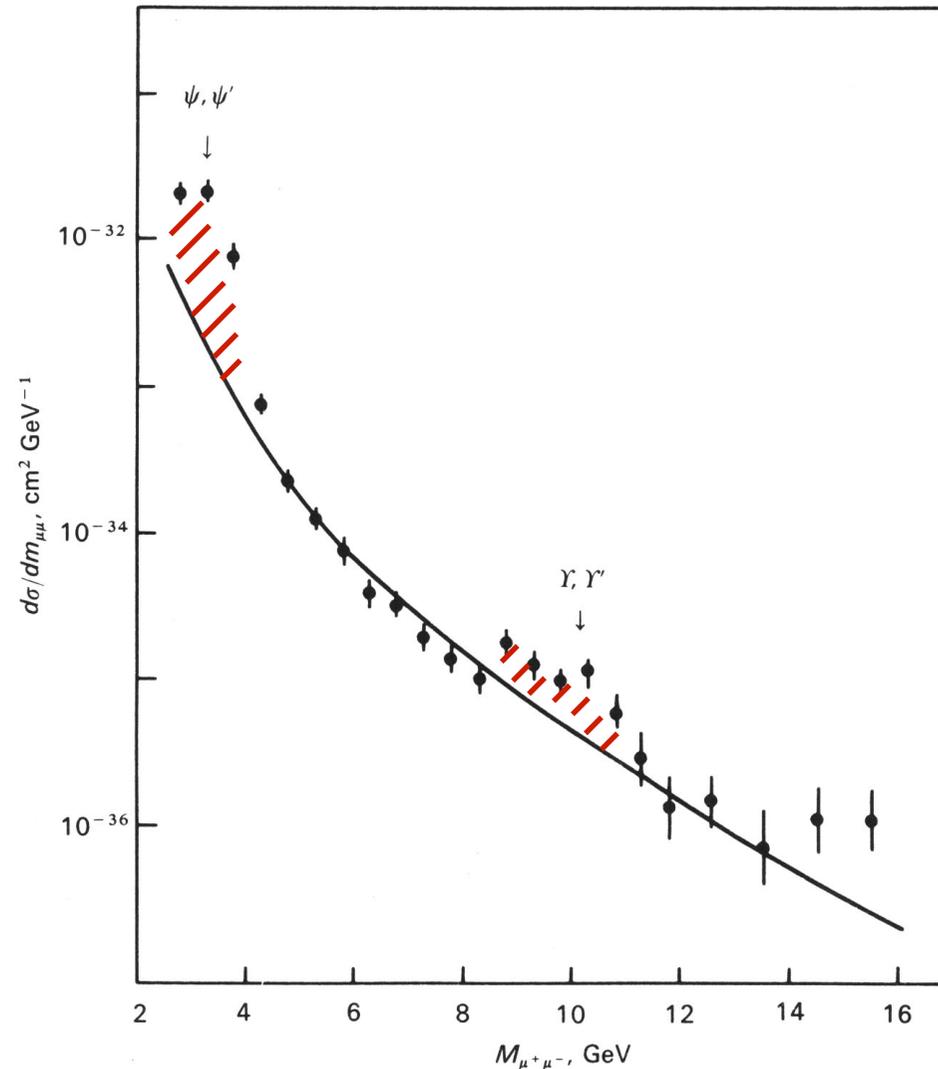
[Quelle: Particle Data Booklet]

Υ – Resonanzen ($b\bar{b}$)

Erster Beweis für
 Υ – Resonanz
 FNAL 1977
 (Ledermann)

Gesamtbreite
 größer als
 experimentelle
 Auflösung

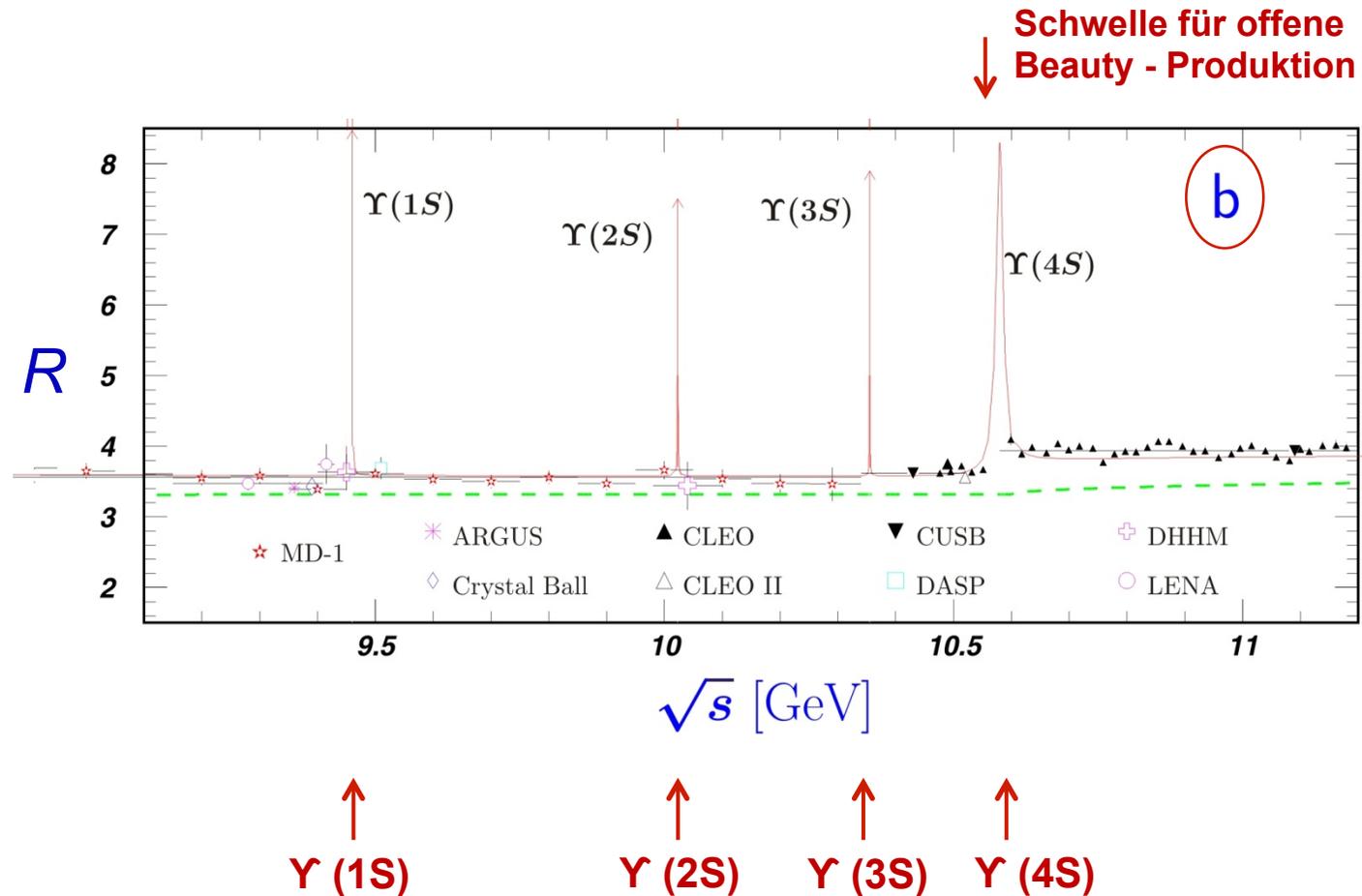
hier:
 Überlagerung von
 schmalen
 Resonanzen
 → Spektroskopie



**Produktions-
 experiment**

[Quelle: Perkins, Introduction to High Energy Physics]

Υ – Resonanzen ($b\bar{b}$)



B – Mesonen:



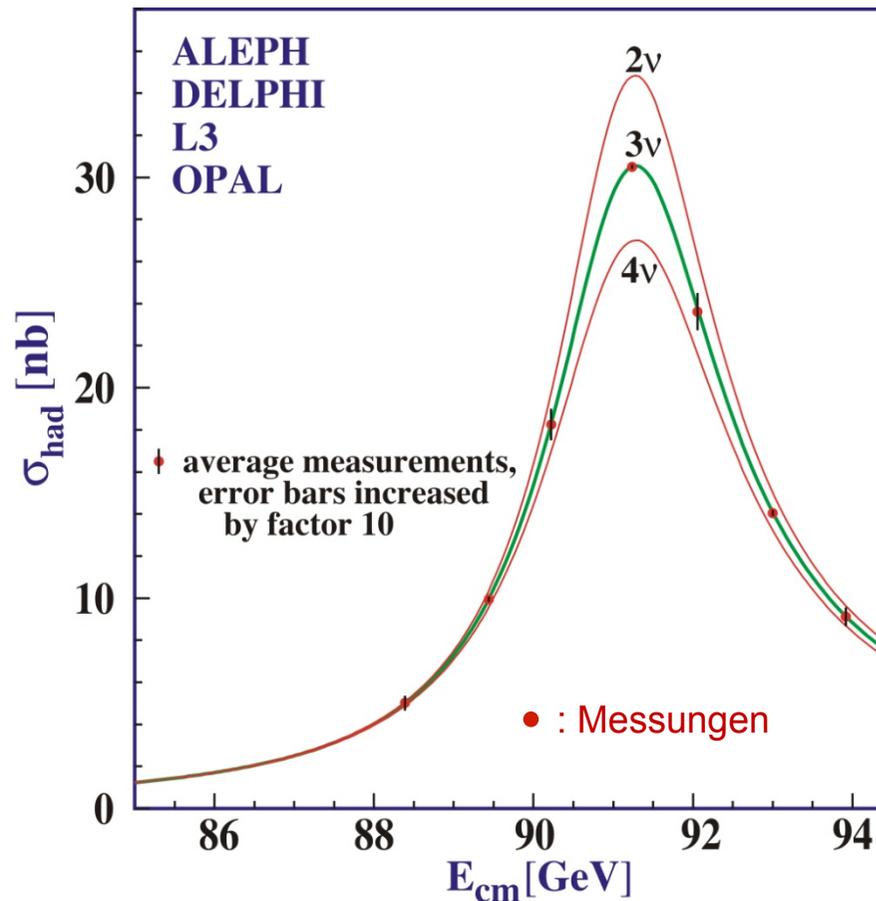
\bar{B} – Mesonen:



[Quelle: Particle Data Booklet]

Z⁰ – Line Shape

- LEP I ≈ 1989 – 1995



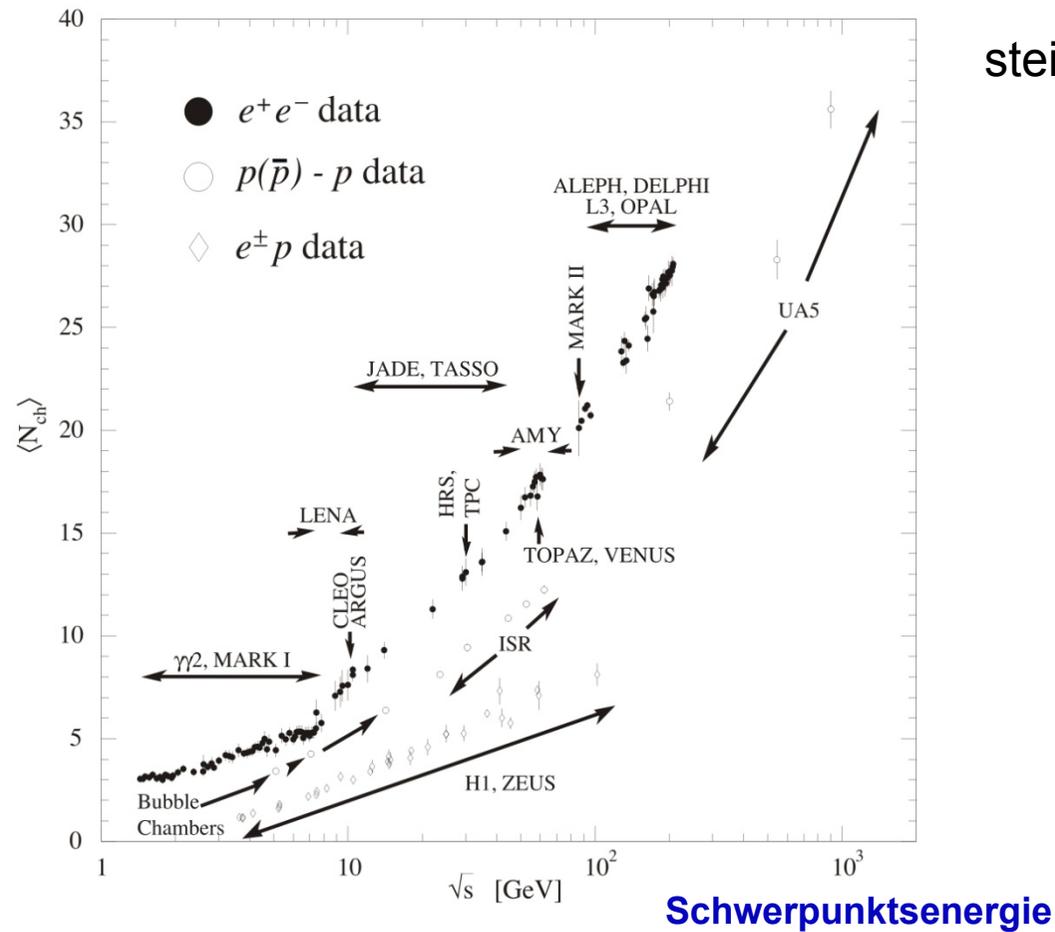
Bei 3v ist der Fehler extrem klein

Höhe und Breite legen die Anzahl der existierenden leichten Neutrinos fest.
(No = 3)

[Quelle: Particle Data Booklet]

mittlere geladene Multiplizität

- Anzahl von geladenen Teilchen pro Kollision



[Quelle: Particle Data Booklet]