

# Kerne und Teilchen

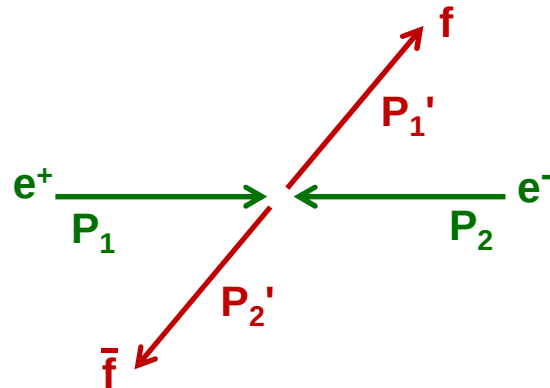
## Moderne Experimentalphysik III Vorlesung 9

MICHAEL FEINDT  
INSTITUT FÜR EXPERIMENTELLE KERNPHYSIK

# $e^+e^-$ – Kollisionen

# Kinematik von $e^+e^-$ – Kollisionen

- Kinematik: ~ frontale Stöße



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

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

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



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

$$s = 4E^2$$

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



**Erzeugung schwerer  
Leptonen, Quarks**

$$\text{CMS} = \text{LAB}$$

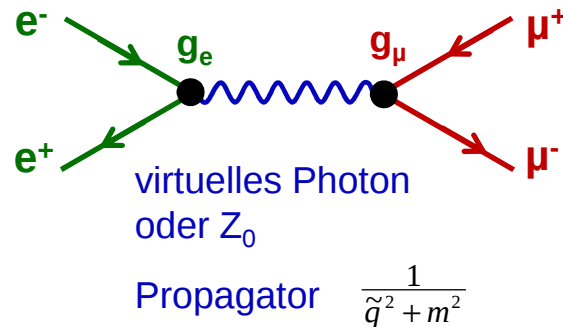
$\Rightarrow$  Detektor für  $4\pi$ -Abdeckung

# 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:    | BaBar (SLAC)       |
| BES     | 1.6+1.6  | Beijing        | (asymmetrisch) | 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



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

$\uparrow$   
 $m = 0$  für  $\gamma$  – 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)  $M_{fi} = \frac{e^2}{q^2} = \frac{4\pi\alpha}{q^2}$

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

$$v_i = v_f = c$$

$$E_0 = 2 p_f c$$

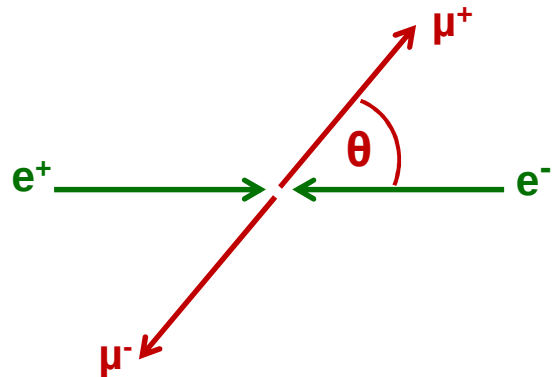
$$\Rightarrow \boxed{\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\alpha^2}{4s}}$$

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

# $e^+e^- \rightarrow \ell^+ \ell^-$ mit Spin

- über Anfangszustände mitteln und über Endzustände summieren

Helizitätserhaltung für masselose Fermionen  $H = \frac{\vec{\sigma} \cdot \vec{p}}{|\vec{p}|^2} = \pm 1$



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

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

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

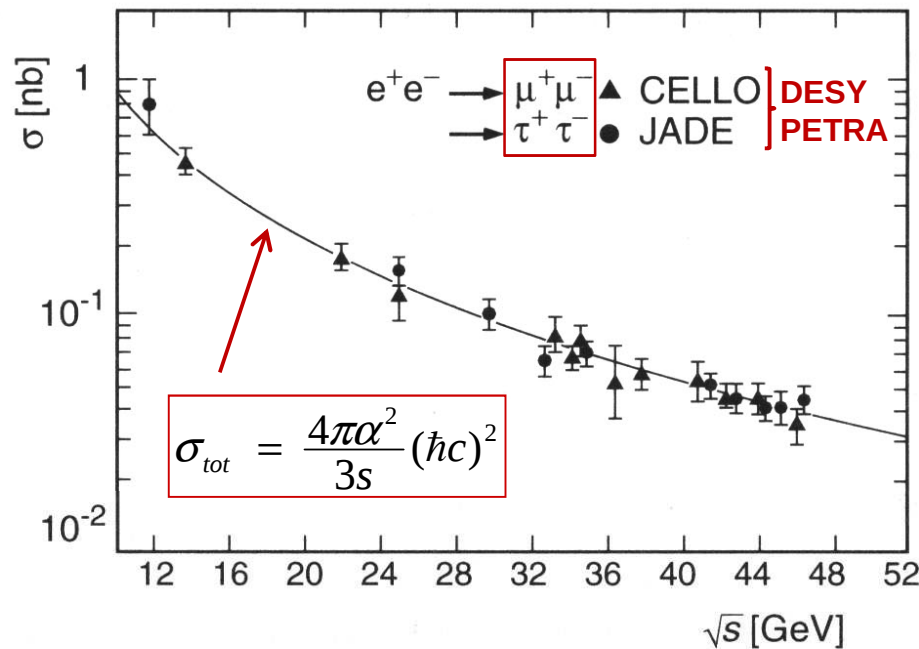
LR→LR und RL→RL berücksichtigen: \*2

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

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  $\mu$  und  $\tau$

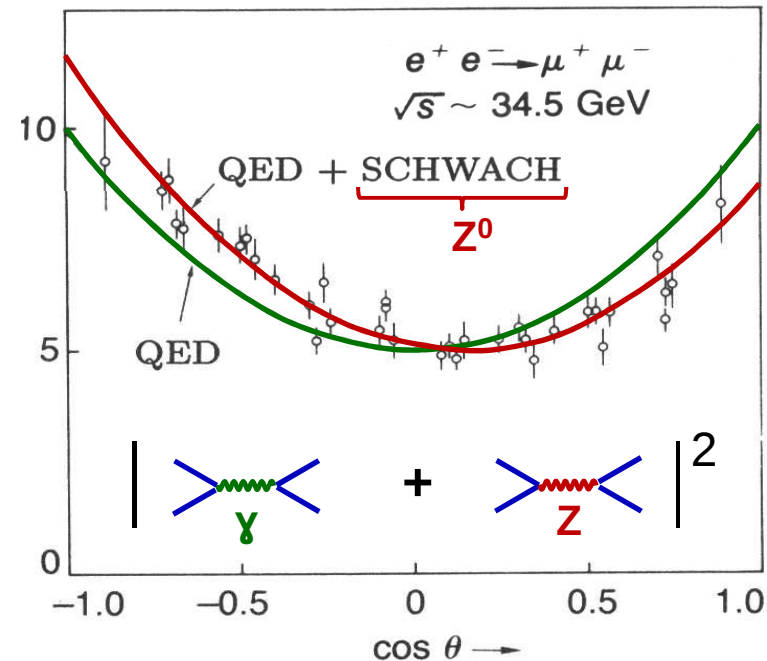
⇒ **punktförmig** ✓

reiner  $\gamma$  – Austausch

Erste Hinweise auf  
"elektroschwache" Interferenz:

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

Vorwärts – Rückwärts – Asymmetrie



**Asymmetrie durch  $\gamma Z$  – Interferenz – Term**  
( $|Z|^2$  vernachlässigbar)

# γZ – Interferenz

- $\sigma_{\text{tot}}$  : QED (Quantenelektrodynamik) gibt sehr gute Beschreibung  
gleiches Verhalten für e,  $\mu$ ,  $\tau$  : "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  $m = 91 \text{ GeV}$ )

$$\left| \text{Diagram 1} + \text{Diagram 2} \right|^2 = \text{Diagram 3} + \text{Diagram 4} + \text{Diagram 5}$$

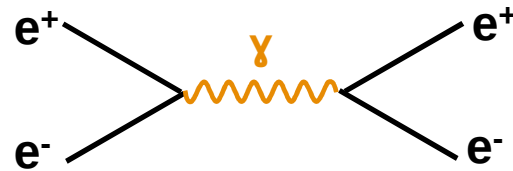
Diagram 1:  $\gamma$   
 Diagram 2:  $Z$   
 Diagram 3: QED – WQ  
 Diagram 4:  $\gamma Z$  – Interferenz  
 Diagram 5:  $Z^0$  – WQ (sehr klein)

# Asymmetrie

(liefert aber keinen Beitrag zum integrierten Wirkungsquerschnitt)

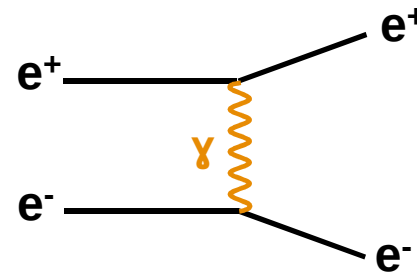
# Bhabha – Streuung : $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$

- 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!

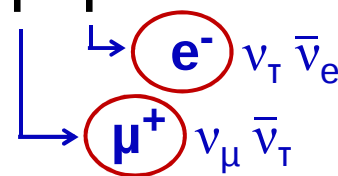
$\Rightarrow$  Amplituden addieren

$\Rightarrow$  dann quadrieren

# Entdeckung des $\tau$ – Leptons

- Martin Perl, 1974

SPEAR @ SLAC :

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


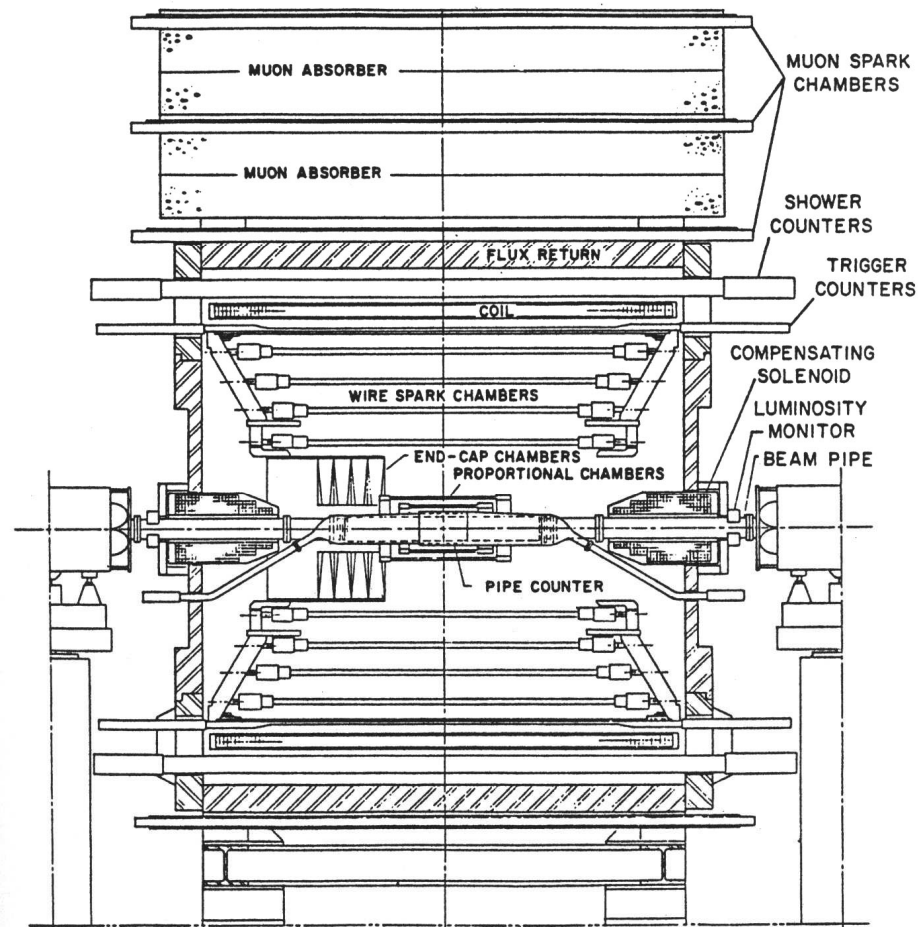
The diagram illustrates the decay of a  $\tau$  lepton pair. A  $\tau^-$  lepton decays into an electron ( $e^-$ ) and a  $\tau^-$  neutrino ( $\bar{\nu}_\tau$ ). A  $\tau^+$  lepton decays into a positron ( $e^+$ ) and a  $\tau^+$  neutrino ( $\nu_\tau$ ). The electron and positron are circled in red in the original image.

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

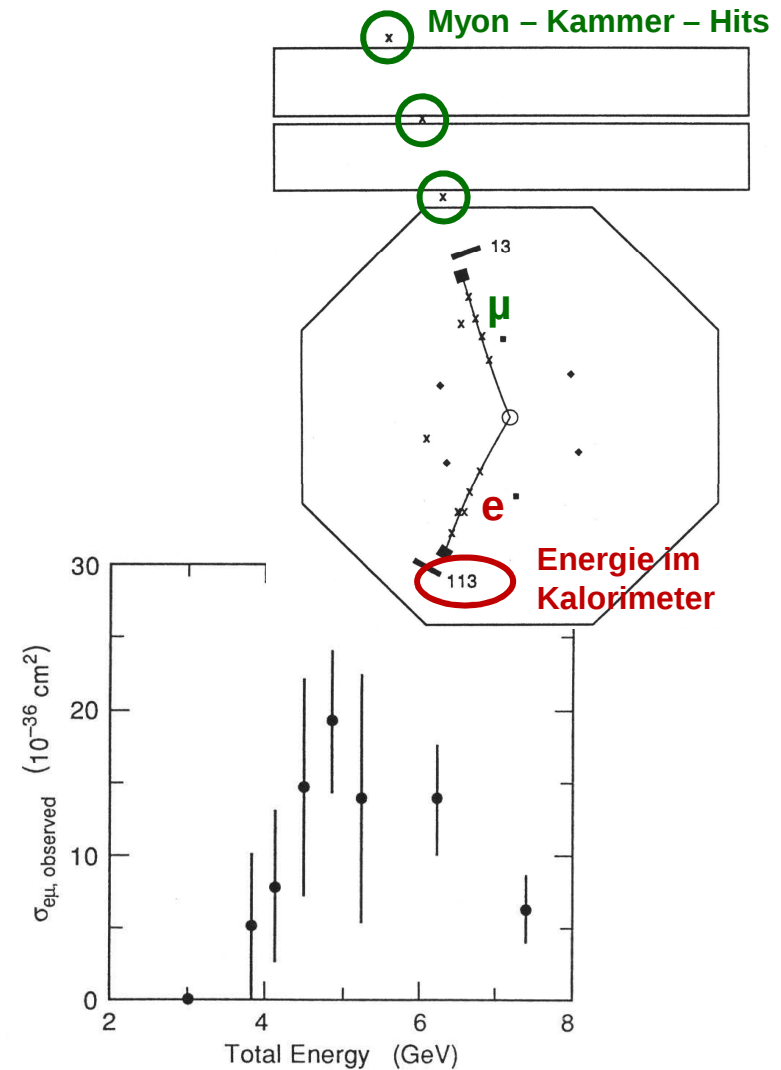
$$m_\tau = 1.78 \text{ GeV} \quad \tau(\tau) = 3 \cdot 10^{-13} \text{ s}$$

dicht an der Charmschwelle , Konfusion

# Entdeckung des $\tau$ – Leptons



**SLAC – LBL – Detektor  
(Mark I)**



# Entdeckung des $\tau$ – Leptons

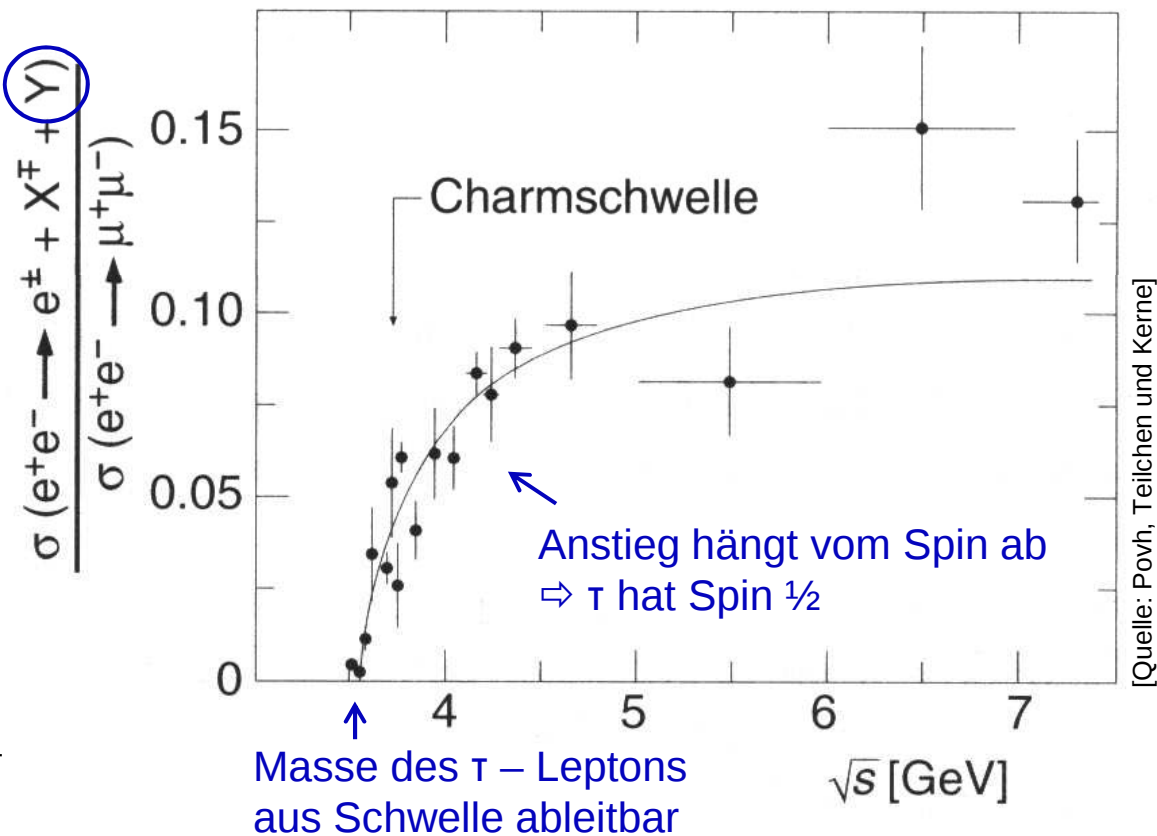
$$e^+e^- \rightarrow e^+ + X^- + Y$$

aus  $\tau^+$  – Zerfall

aus  $\tau^-$  – Zerfall

unbeobachtete  
Teilchen  $(Y)$

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

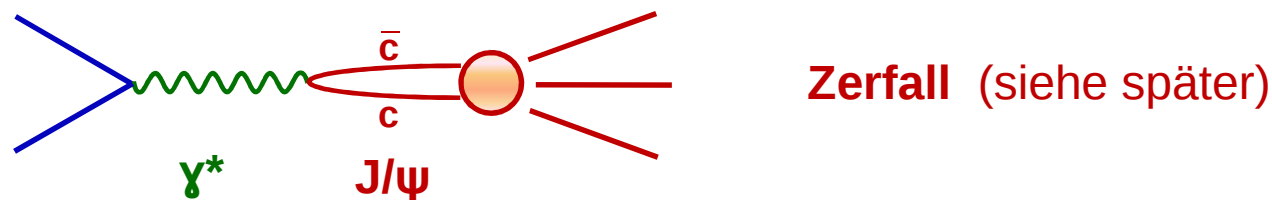


# Resonanzen in $e^+e^-$ – Kollisionen

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

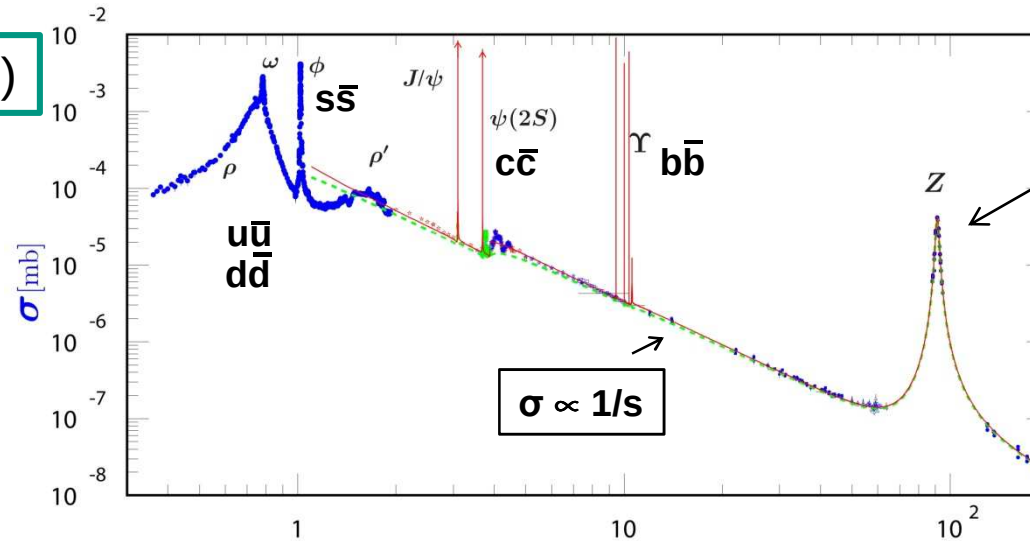


Resonanz kann durch Breit – Wigner – Kurve beschrieben werden

# $\sigma$ und R in $e^+e^-$ – Kollisionen

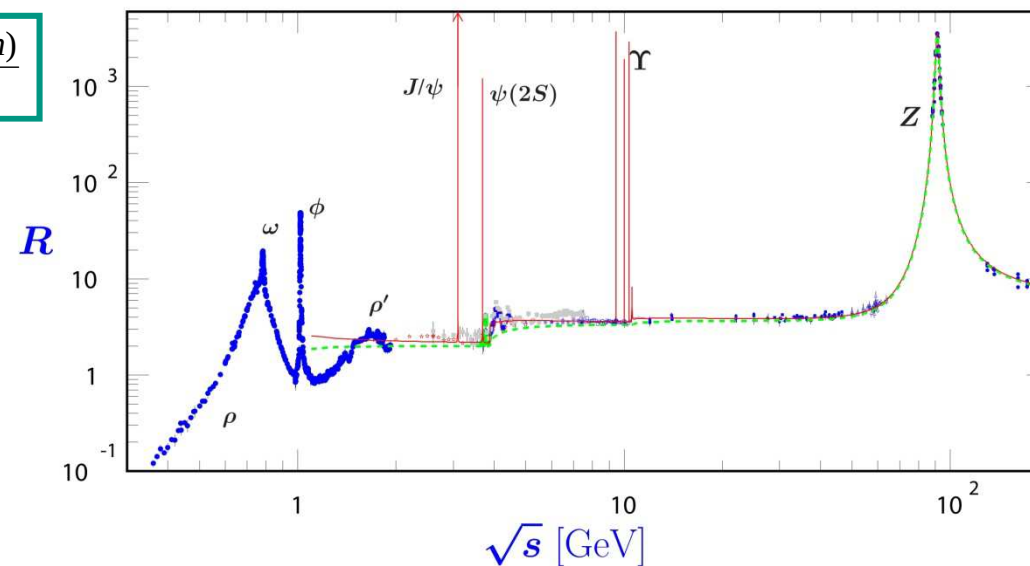
$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{Hadronen})$$

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

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

Resonanzenergie

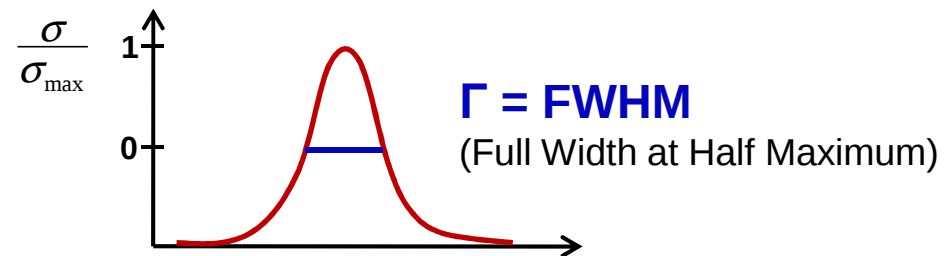
- Fourier – Transformation:  $g(\omega) = \int_0^\infty \psi(t) e^{i\omega t} dt$

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

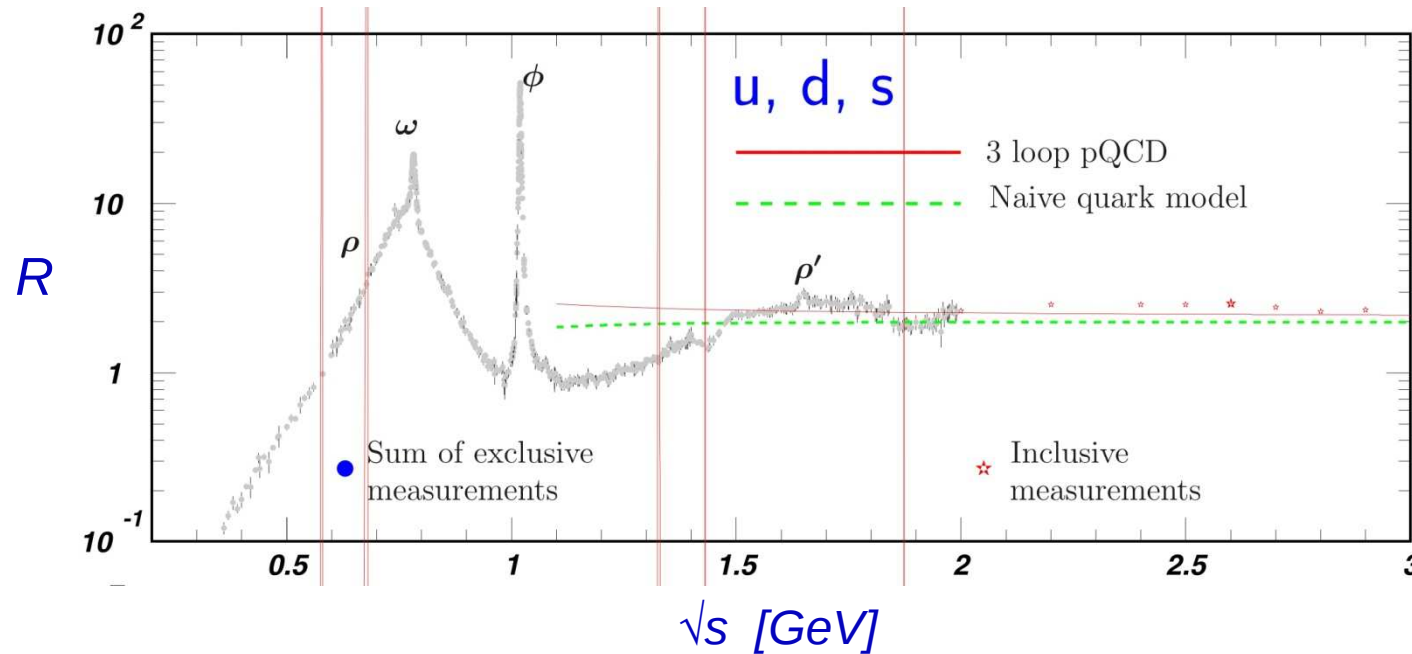
$$\sigma(E) \propto \chi^* \chi \quad \Rightarrow \quad \sigma(E) = \sigma_{\max} \cdot \frac{\Gamma^2/4}{(E - E_R)^2 + \Gamma^2/4}$$

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

**Relativistische  
Breit – Wigner – Formel**



# leichte Vektor-Mesonen



|          |                           |                   |                                         |
|----------|---------------------------|-------------------|-----------------------------------------|
| $\rho$   | $I = 1$                   | $J^{PC} = 1^{--}$ | Quark-Spins parallel $\uparrow\uparrow$ |
| $\omega$ | $I = 0$                   | $J^{PC} = 1^{--}$ |                                         |
| $\phi$   | $I = 0$                   | $J^{PC} = 1^{--}$ | $s\bar{s}$ – Zustand                    |
| $\rho'$  | Radialanregung vom $\rho$ |                   |                                         |

## Zerfälle

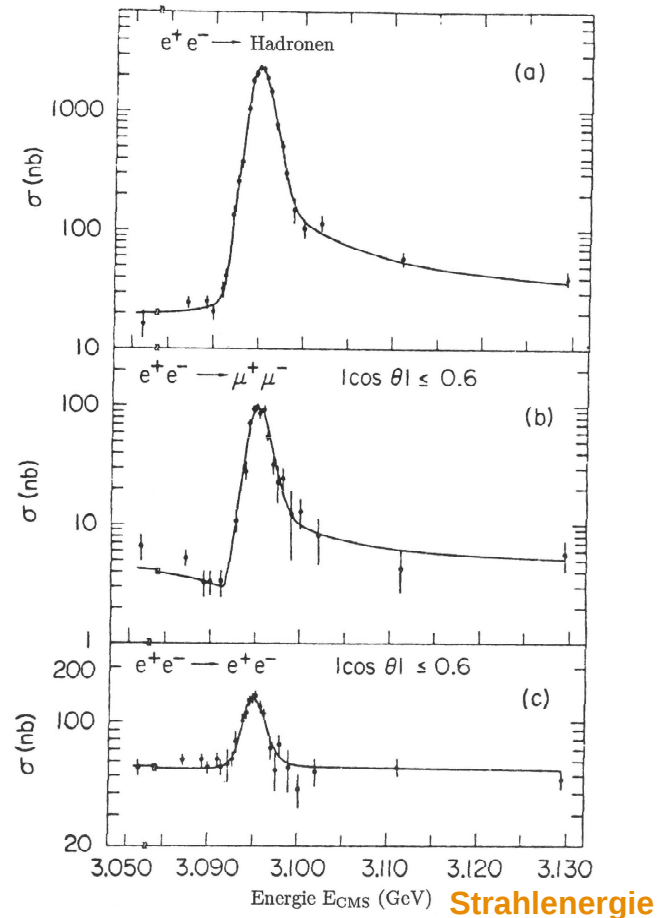
|          |                         |
|----------|-------------------------|
| $\rho$   | $\rightarrow \pi \pi$   |
| $\omega$ | $\rightarrow 3 \pi$     |
| $\phi$   | $\rightarrow K \bar{K}$ |

[Quelle: Particle Data Booklet]

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

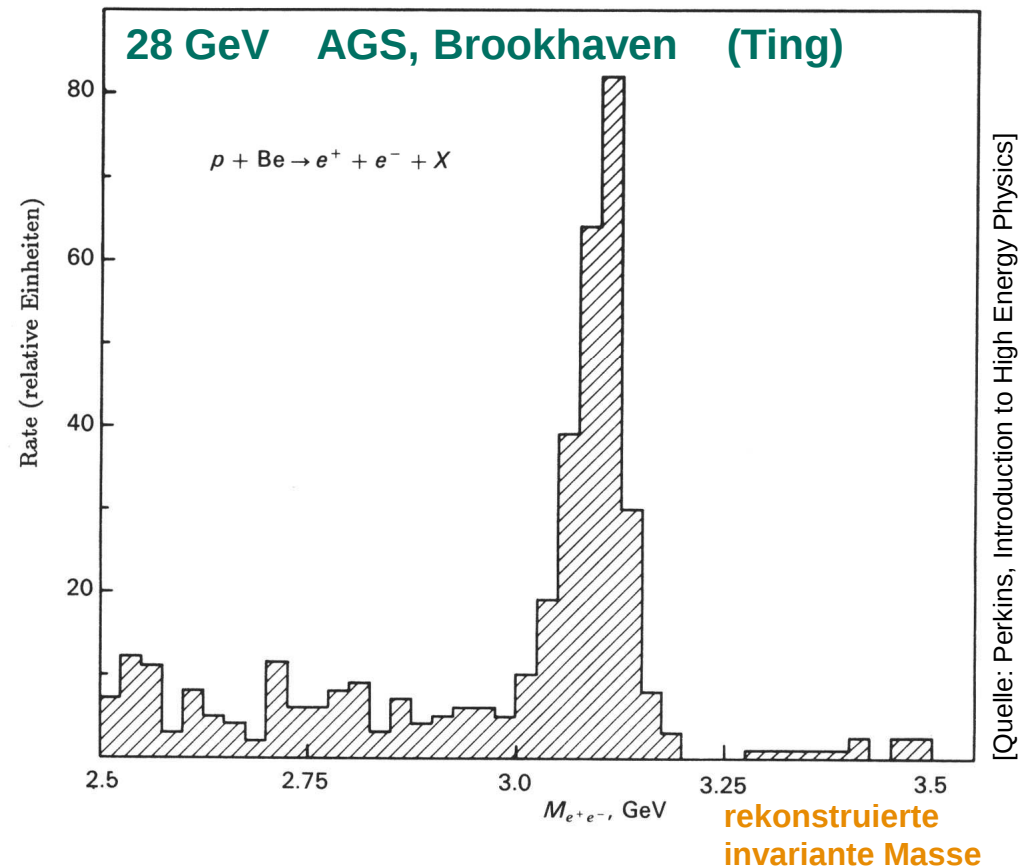
## "November – Revolution"

SPEAR, SLAC (Richter)



**Formation**

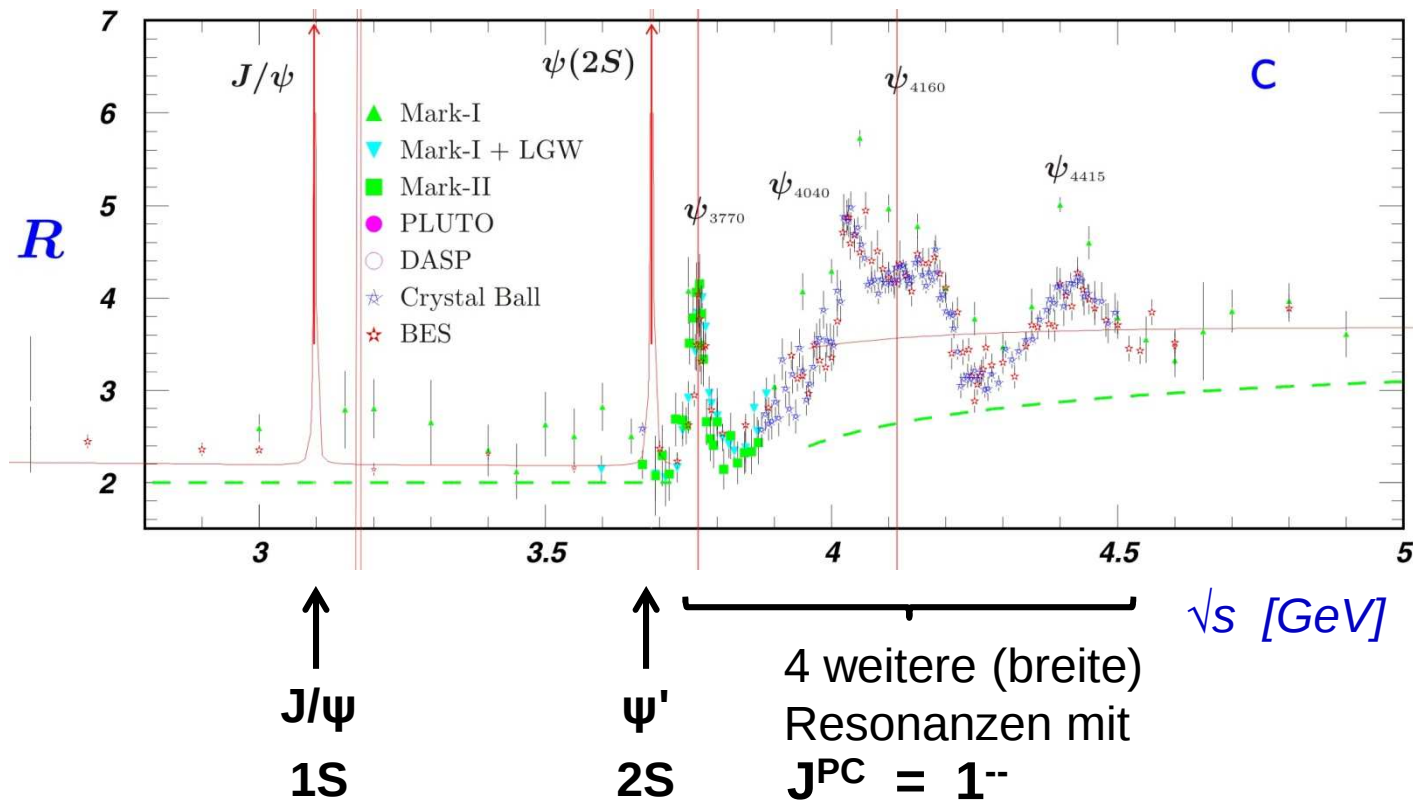
28 GeV AGS, Brookhaven (Ting)



**Produktion**

[Quelle: Perkins, Introduction to High Energy Physics]

# $\psi$ – Resonanzen ( $c\bar{c}$ )



[Quelle: Particle Data Booklet]

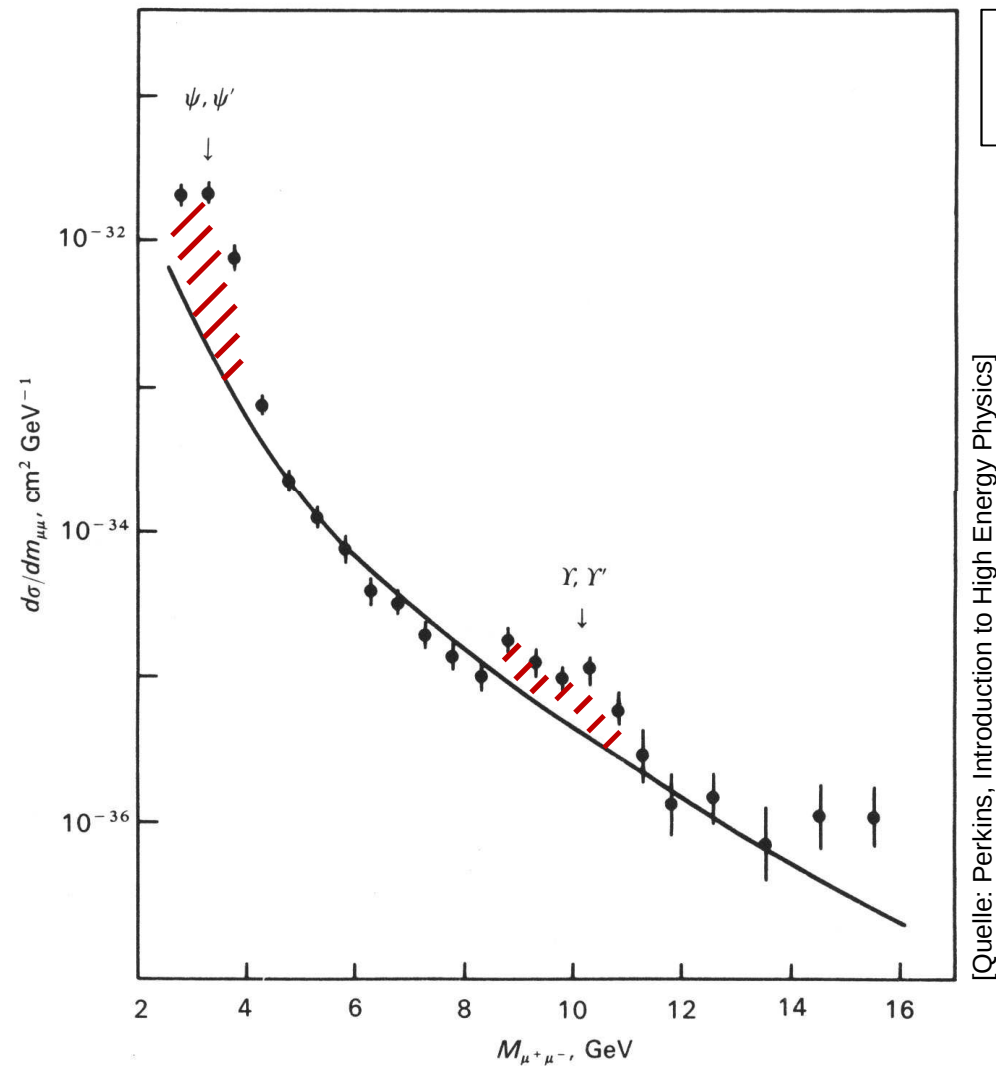
# $\Upsilon$ – Resonanzen ( $b\bar{b}$ )

Erster Beweis für  
 $\Upsilon$  – Resonanz  
FNAL 1977  
(Ledermann)

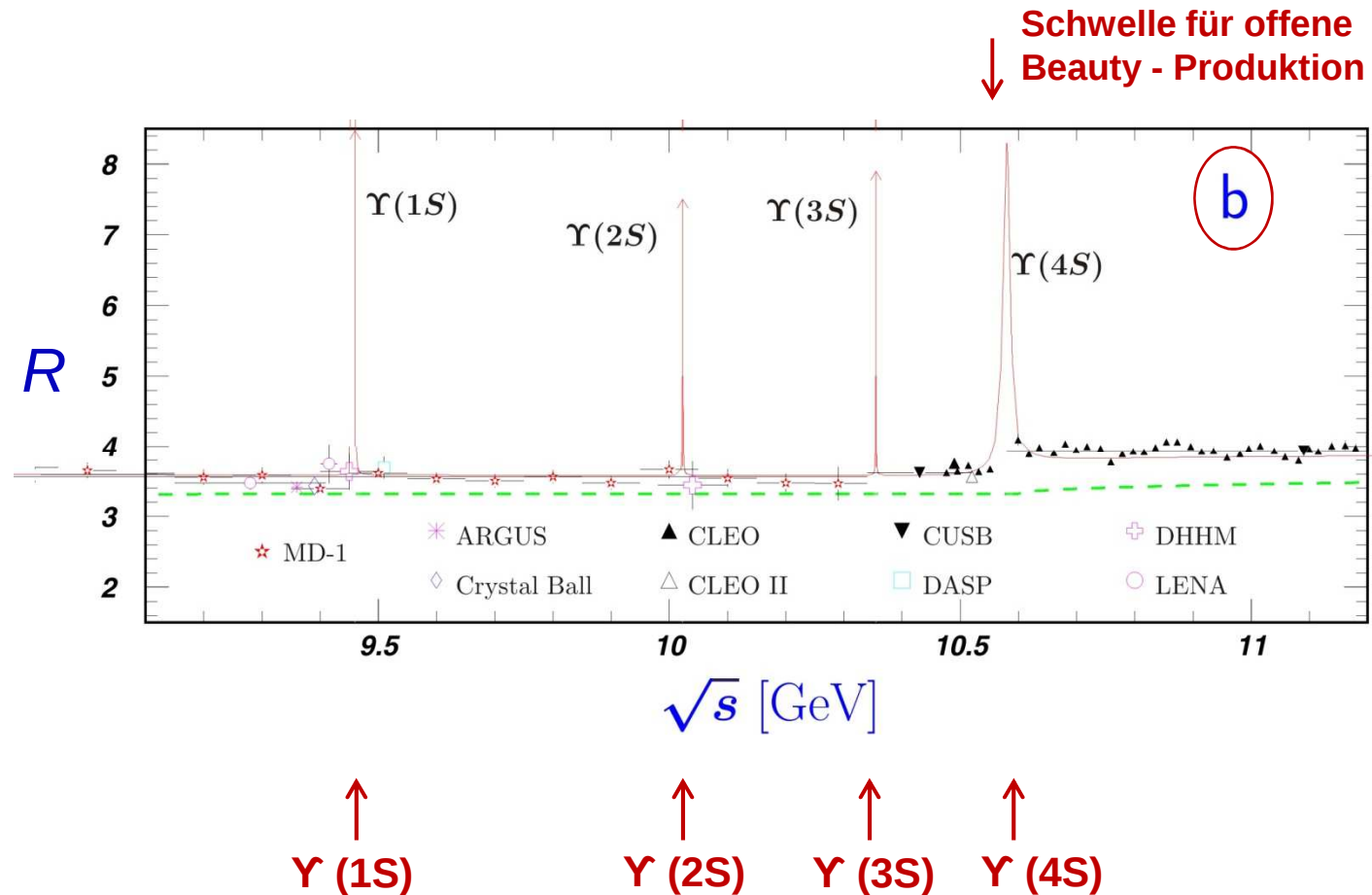
Gesamtbreite  
größer als  
experimentelle  
Auflösung

hier:  
Überlagerung von  
schmalen  
Resonanzen  
→ Spektroskopie

**Produktions-  
experiment**



# $\Upsilon$ – Resonanzen ( $b\bar{b}$ )



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

**B – Mesonen:**

$$\begin{array}{ll} B^+ & \bar{b} u \\ B^0 & \bar{b} d \end{array}$$

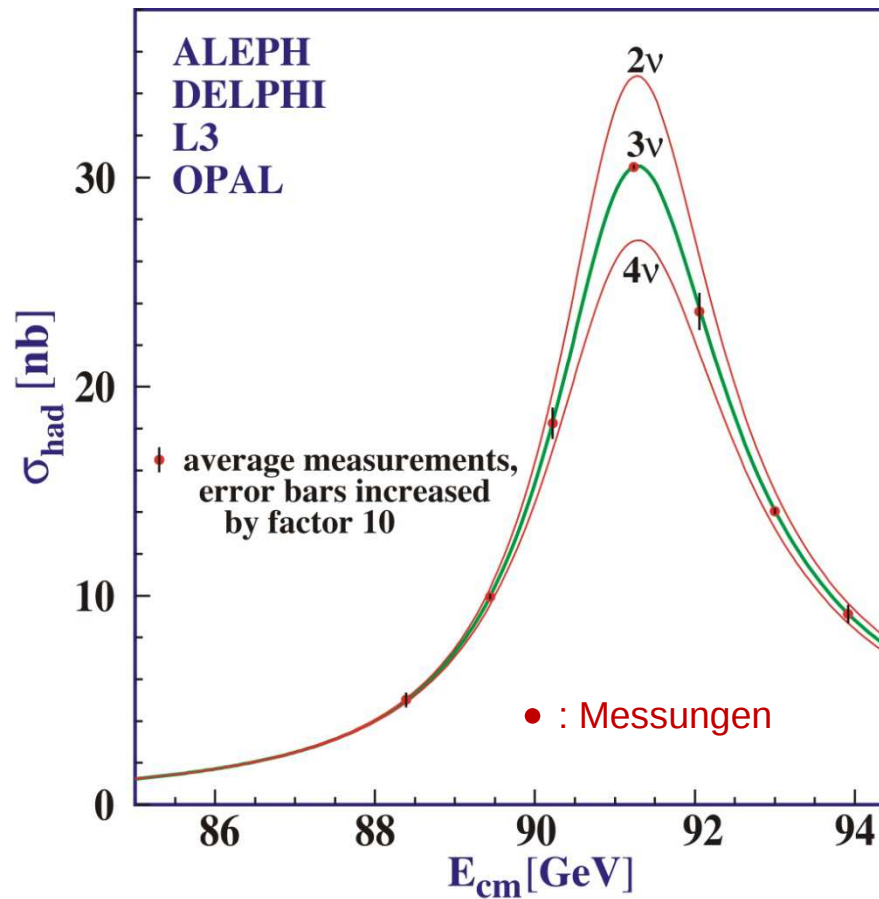
**$\bar{B}$  – Mesonen:**

$$\begin{array}{ll} B^- & b \bar{u} \\ \bar{B}^0 & b \bar{d} \end{array}$$

[Quelle: Particle Data Booklet]

# $Z^0$ – Line Shape

■ LEP I  $\approx$  1989 – 1995



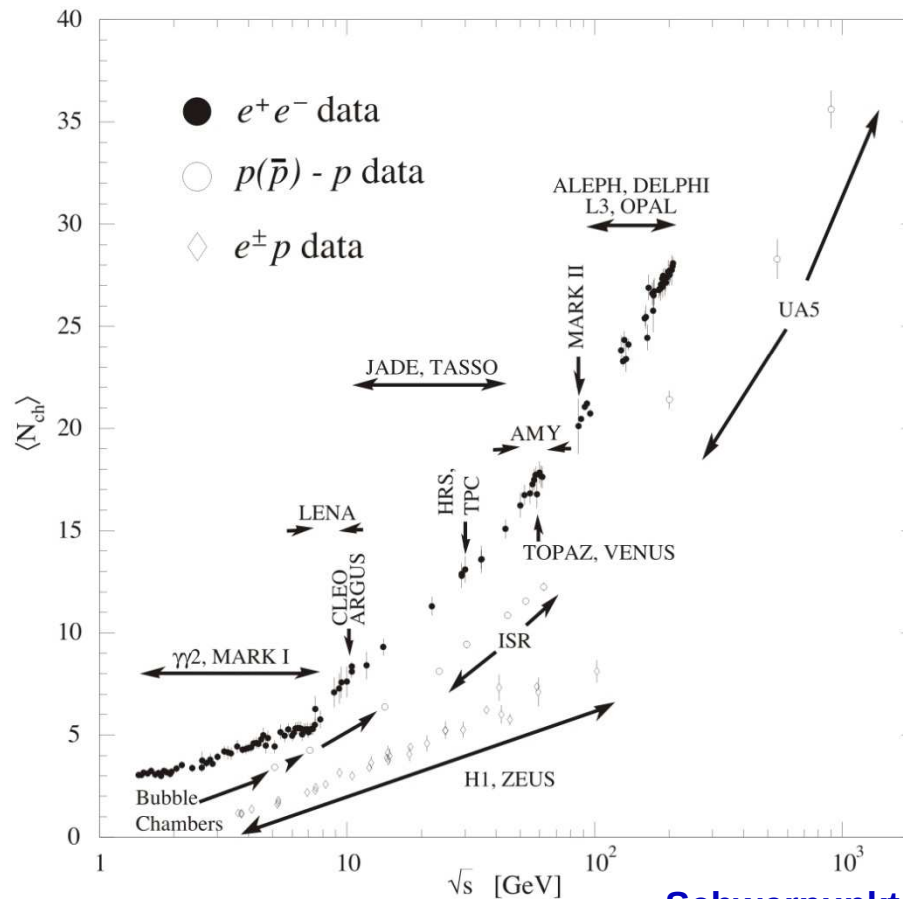
Bei 3v ist der Fehler extrem klein

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



steigt  $\approx$  logarithmisch

Schwerpunktsenergie

[Quelle: Particle Data Booklet]