

Kern- und Teilchenphysik

SS2012

Vorlesung-Website

Johannes Blümer

Vorlesung R. Ulrich

KIT-Centrum Elementarteilchen- und Astroteilchenphysik KCETA



Quarks

Table 14.1: Additive quantum numbers of the quarks.

Property	Quark	d	u	s	c	b	t
Q -electric charge		$-\frac{1}{3}$	$+\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$+\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$+\frac{2}{3}$
I -isospin		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	0	0	0
I_z -isospin z -component		$-\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$	0	0	0	0
S -strangeness		0	0	-1	0	0	0
C -charm		0	0	0	+1	0	0
B -bottomness		0	0	0	0	-1	0
T -topness		0	0	0	0	0	+1

Beispiel PDG-Eintrag π^\pm

π^\pm

$$I^G(J^P) = 1^-(0^-)$$

Mass $m = 139.57018 \pm 0.00035$ MeV (S = 1.2)

Mean life $\tau = (2.6033 \pm 0.0005) \times 10^{-8}$ s (S = 1.2)

$$c\tau = 7.8045$$
 m

$\pi^\pm \rightarrow \ell^\pm \nu \gamma$ form factors [a]

$$F_V = 0.0254 \pm 0.0017$$

$$F_A = 0.0119 \pm 0.0001$$

$$F_V \text{ slope parameter } a = 0.10 \pm 0.06$$

$$R = 0.059^{+0.009}_{-0.008}$$

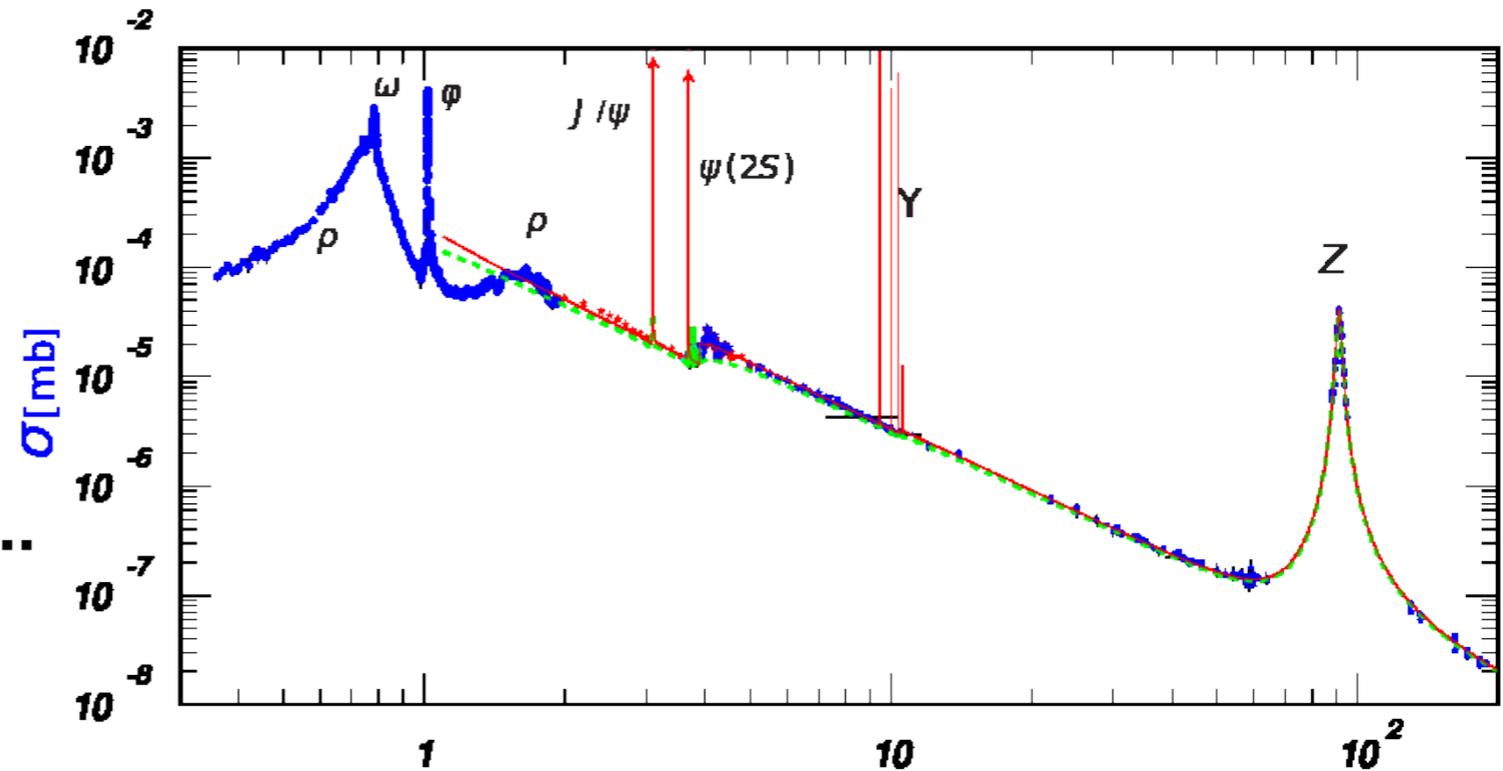
π^- modes are charge conjugates of the modes below.

For decay limits to particles which are not established, see the section on Searches for Axions and Other Very Light Bosons.

π^+ DECAY MODES	Fraction (Γ_i/Γ)	Confidence level	ρ (MeV/c)
$\mu^+ \nu_\mu$	[b] (99.98770 \pm 0.00004) %		30
$\mu^+ \nu_\mu \gamma$	[c] (2.00 \pm 0.25) $\times 10^{-4}$		30
$e^+ \nu_e$	[b] (1.230 \pm 0.004) $\times 10^{-4}$		70
$e^+ \nu_e \gamma$	[c] (7.39 \pm 0.05) $\times 10^{-7}$		70
$e^+ \nu_e \pi^0$	(1.036 \pm 0.006) $\times 10^{-8}$		4
$e^+ \nu_e e^+ e^-$	(3.2 \pm 0.5) $\times 10^{-9}$		70
$e^+ \nu_e \nu \bar{\nu}$	< 5 $\times 10^{-6}$	90%	70

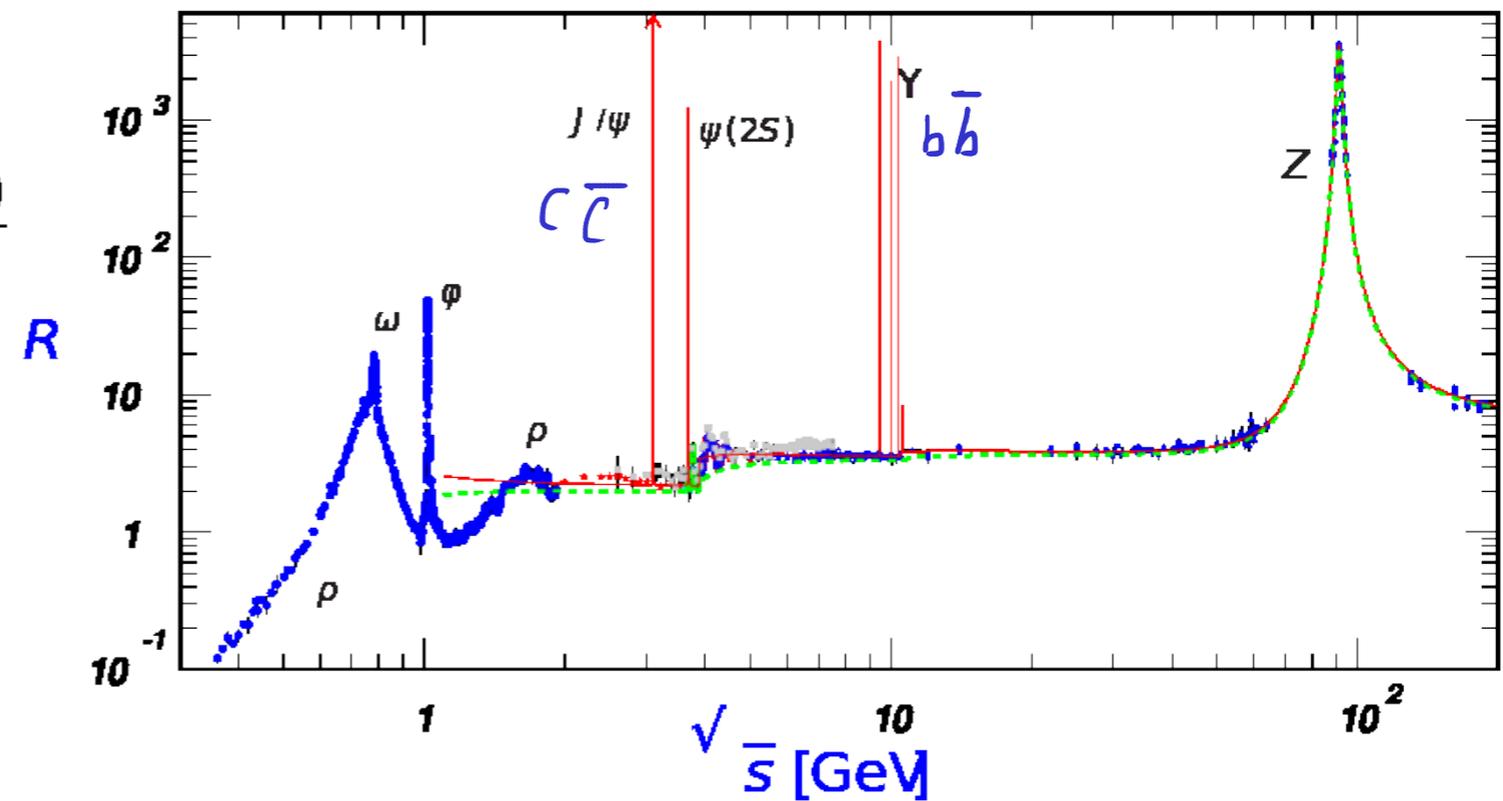
Wirkungsquerschnitt in e+e- Kollisionen

Wirkungsquerschnitt....



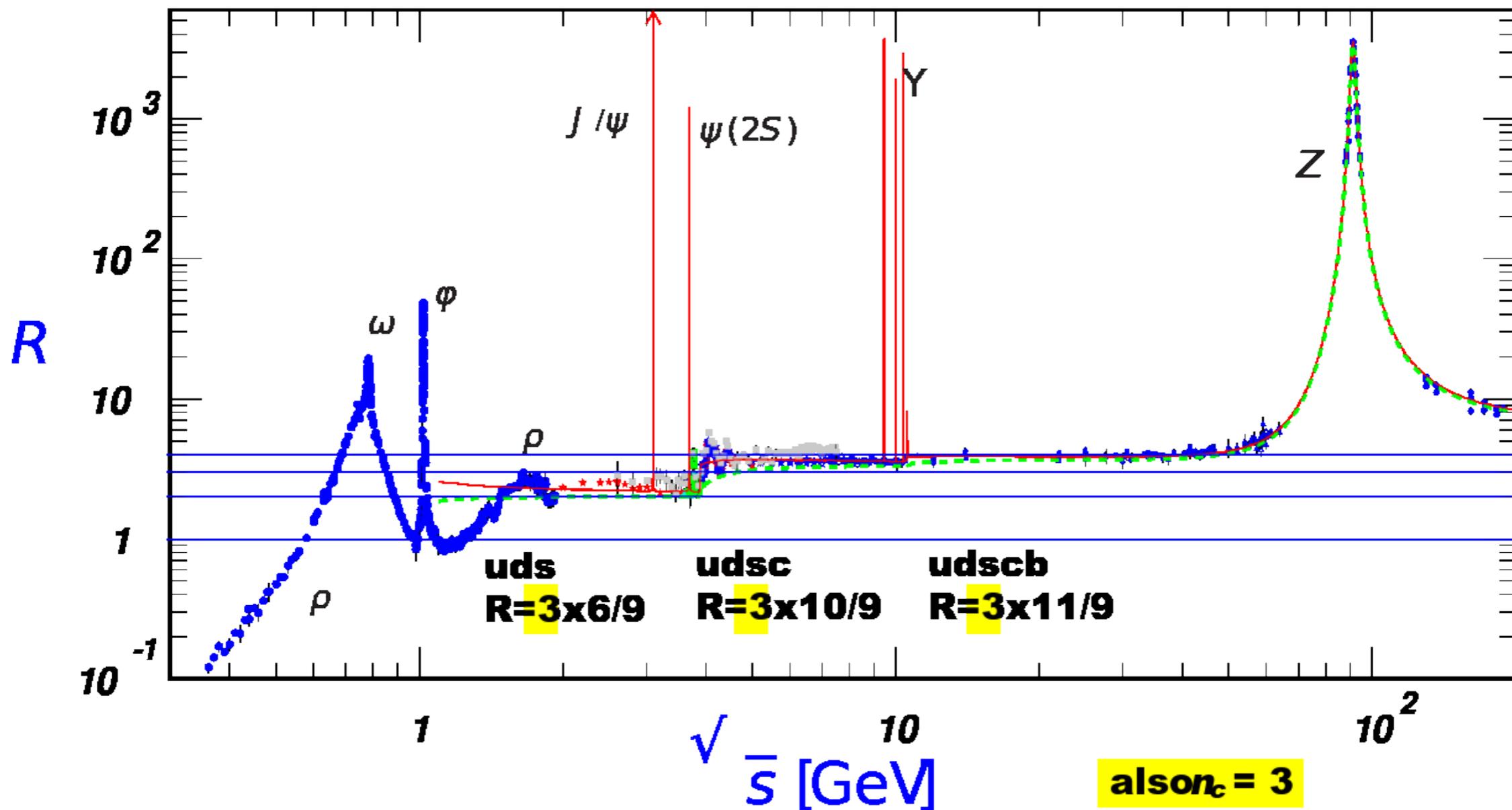
auf Referenzprozess
normiert...

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



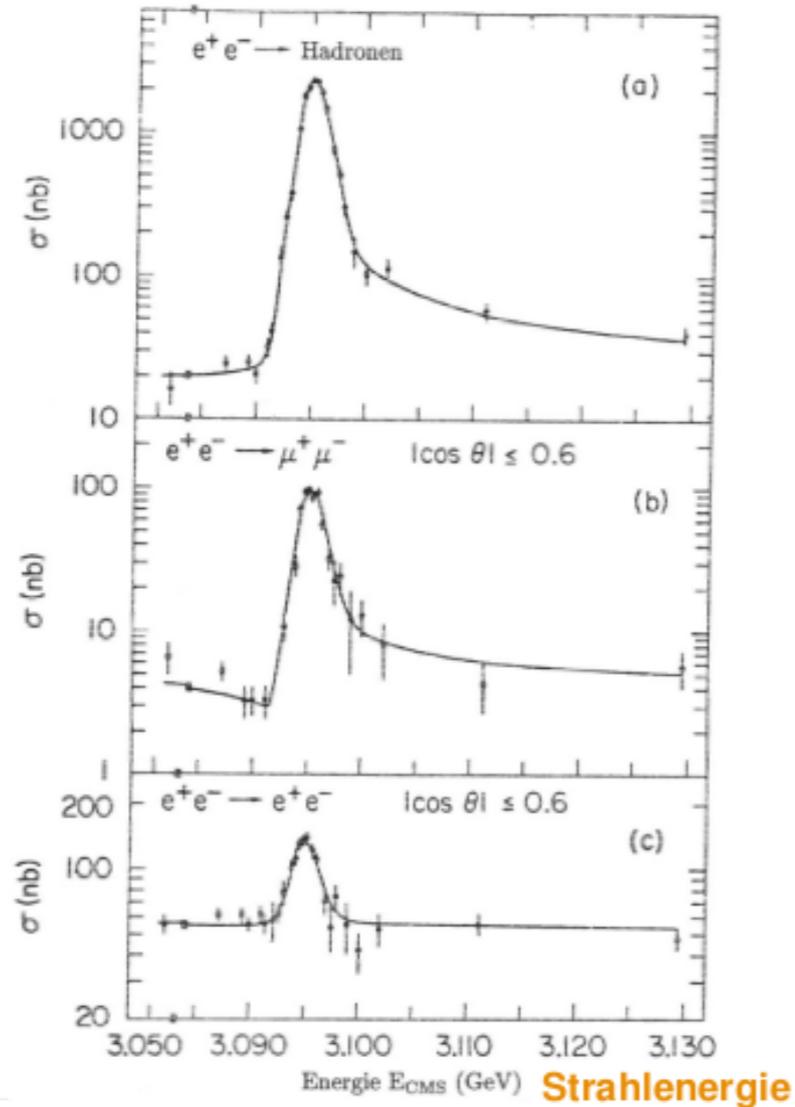
Quarkfarben

$$R = \frac{\sigma(e^+ e^- \rightarrow \text{Hadronen})}{\sigma(e^+ e^- \rightarrow \theta^+ \theta^-)} = \frac{\sum_f \sigma(e^+ e^- \rightarrow q_f \bar{q}_f)}{\sigma(e^+ e^- \rightarrow \theta^+ \theta^-)} = n_c \sum_f z_f^2$$



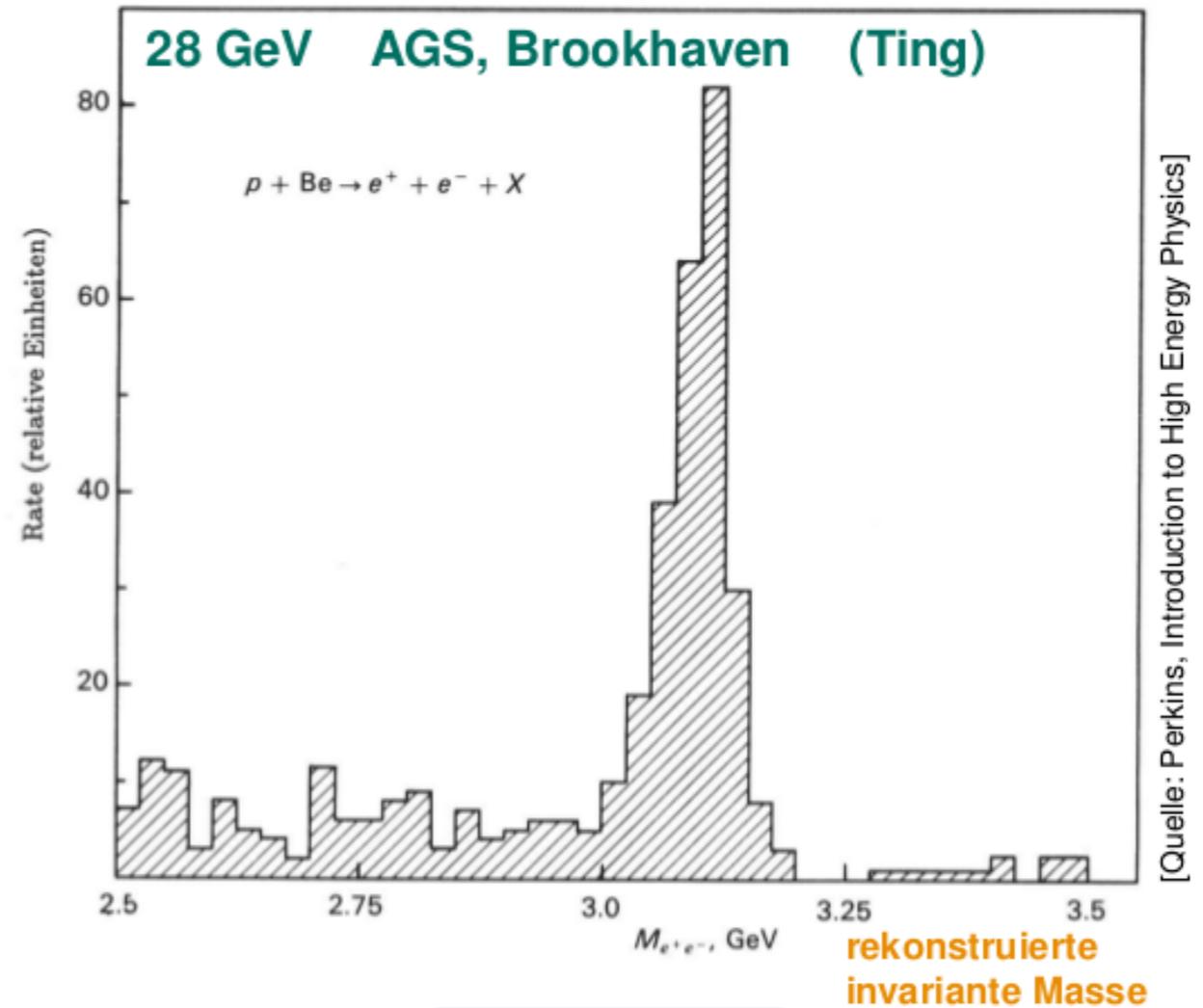
Entdeckung des J/ψ 1974

SPEAR, SLAC (Richter)



Formation

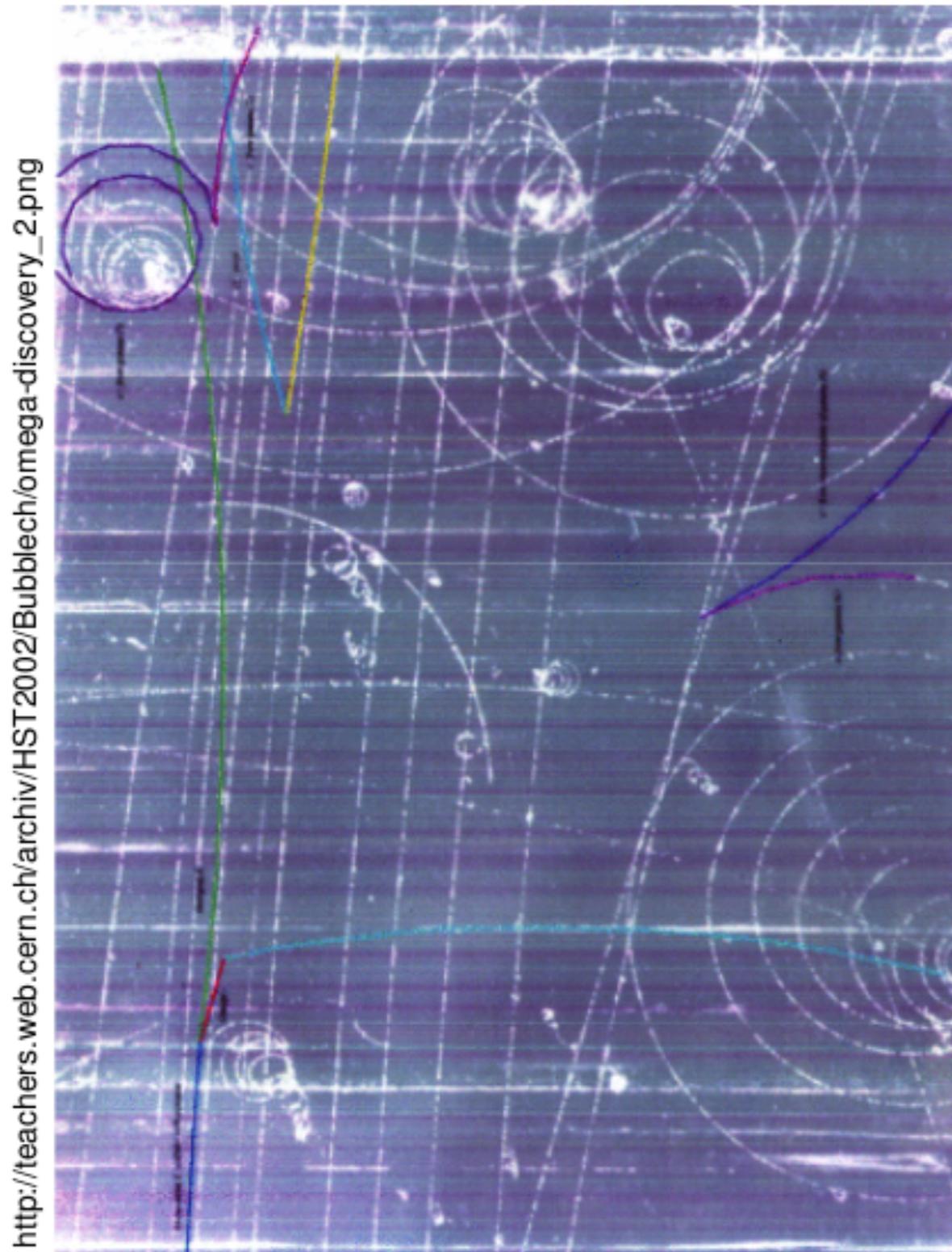
"November – Revolution"



Produktion

[Quelle: Perkins, Introduction to High Energy Physics]

Entdeckung des s-Quarks

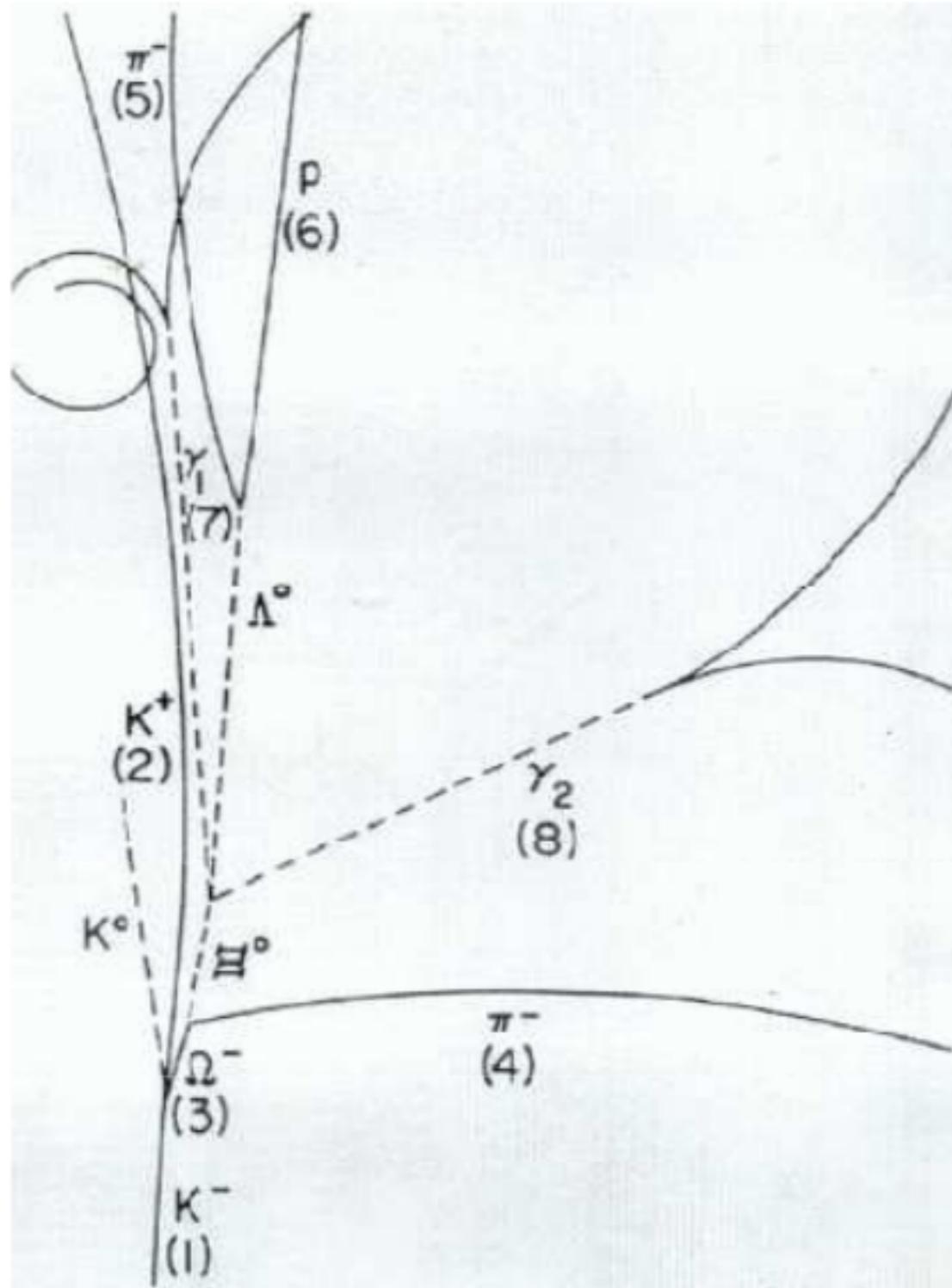


1964:

Bestätigung der **Vorhersage**
des $SU(3)$ – Quark – Modells
von **Gell-Mann und Neeman**

Das Ω^- Baryon (sss)

<http://hepweb.r1.ac.uk/ppUKpics/images/POW/1998/980210211b.jpg>



Strangeness

Zerfallskaskade

3s



2s



1s



0s



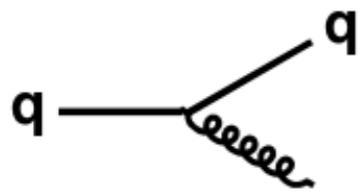
Erzeugung:

starke WW

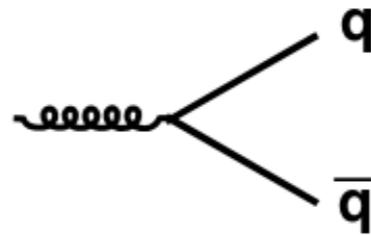
Zerfallskaskade:

schwache WW,
ein s-Quark nach dem
anderen umwandeln

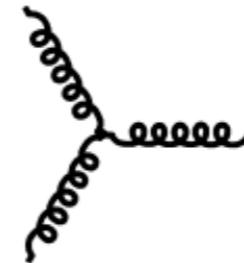
Quark-Gluon-WW



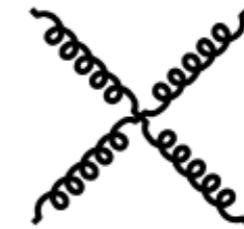
Gluon-Abstrahlung vom Quark
 $q \rightarrow qg$



Gluon-Aufspaltung
 $g \rightarrow q\bar{q}$

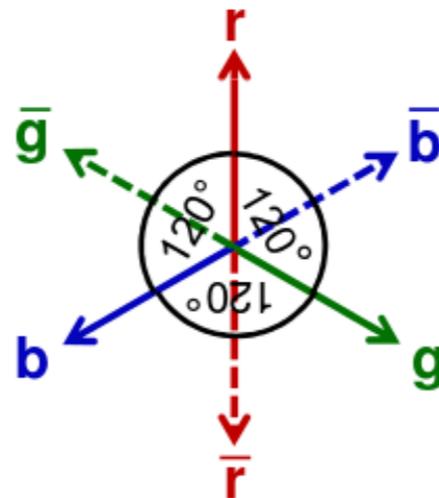


3-Gluon-Vertex
 $g \rightarrow gg$



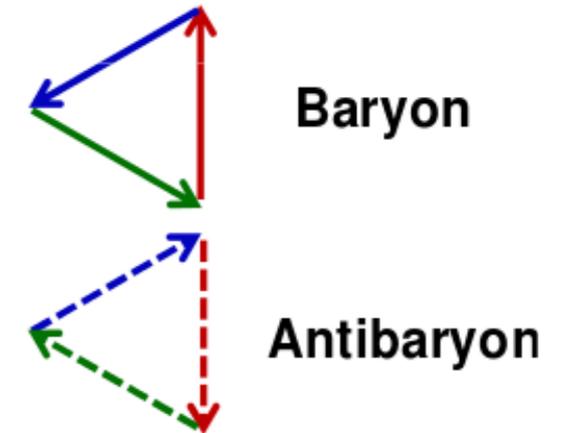
4-Gluon-Vertex
 $gg \rightarrow gg$

Darstellung in 2D (120°-Winkel):



farbloses Objekt:

$$\text{Meson: } |\pi^+\rangle = \begin{cases} u_r \bar{d}_{\bar{r}} \\ u_g \bar{d}_{\bar{g}} \\ u_b \bar{d}_{\bar{b}} \end{cases}$$



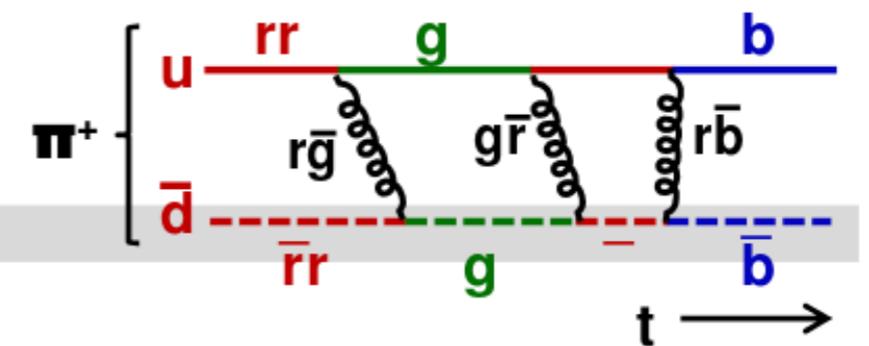
Verboten, da nicht farbneutral: $qqqqq$

Aber:

$gg, q\bar{q}, qq\bar{q}, qq\bar{q}\bar{q}$ können farbneutral sein.

Hybrid 4-Quark Pentaquark

← exotisch, einige Kandidaten, aber noch umstritten



Farbige Quarks, QCD

Mit 3 farbigen Quarks kann eine antisymmetrische Wellenfunktion konstruiert werden:

r **g** **b**

Quarks tragen Farbe (Triplett ③)

Antiquarks tragen Antifarbe (Anti-Triplett $\bar{3}$)

Alle beobachteten Hadronen sind farblos (Farb-Singletts)

Mesonen: ③ × $\bar{3}$ → ① + ⑧

Baryonen: ③ × ③ × ③ → ① + ⑧ + ⑧ + ⑩

SU(3) - Gruppentheorie

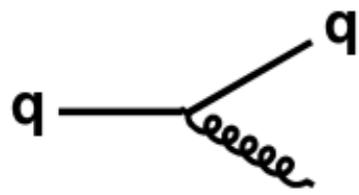
8 Gluonen tragen Farbe und Antifarbe (Colour – Oktett ⑧)

z.B. **r \bar{g}** , **r \bar{b}** , **g \bar{b}** , **g \bar{r}** , **b \bar{r}** , **b \bar{g}** , $\frac{\mathbf{r\bar{r}} - \mathbf{g\bar{g}}}{\sqrt{2}}$, $\frac{\mathbf{r\bar{r}} + \mathbf{g\bar{g}} - 2\mathbf{b\bar{b}}}{\sqrt{6}}$

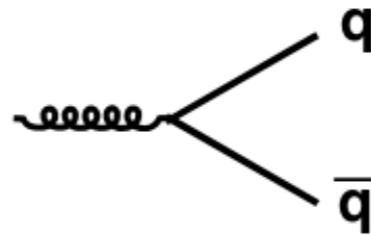
Können untereinander koppeln, weil sie selbst geladen sind.

Sonst analog zum Photon: masselos, $J^P = 1^-$ (Vektorboson)

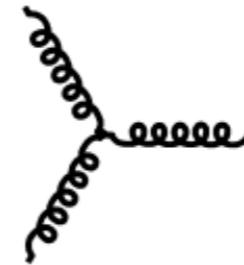
Quark-Gluon-WW



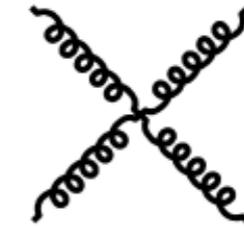
Gluon-Abstrahlung vom Quark
 $q \rightarrow qg$



Gluon-Aufspaltung
 $g \rightarrow q\bar{q}$

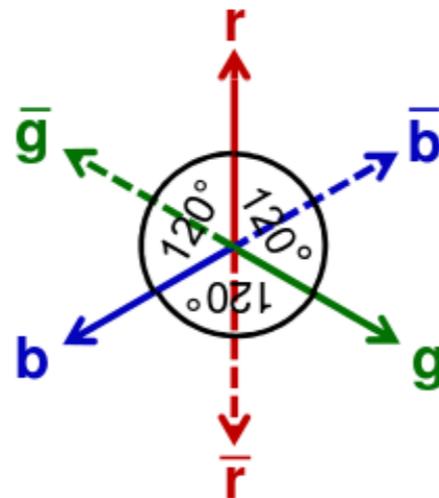


Gluon-Selbstkopplung
 3-Gluon-Vertex
 $g \rightarrow gg$



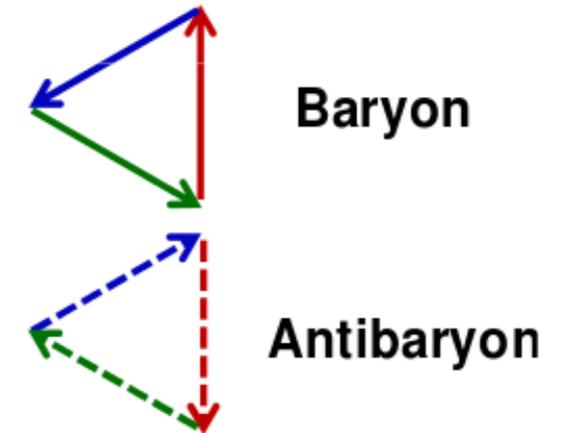
4-Gluon-Vertex
 $gg \rightarrow gg$

Darstellung in 2D (120°-Winkel):



farbloses Objekt:

$$\text{Meson: } |\pi^+\rangle = \begin{cases} u_r \bar{d}_{\bar{r}} \\ u_g \bar{d}_{\bar{g}} \\ u_b \bar{d}_{\bar{b}} \end{cases}$$



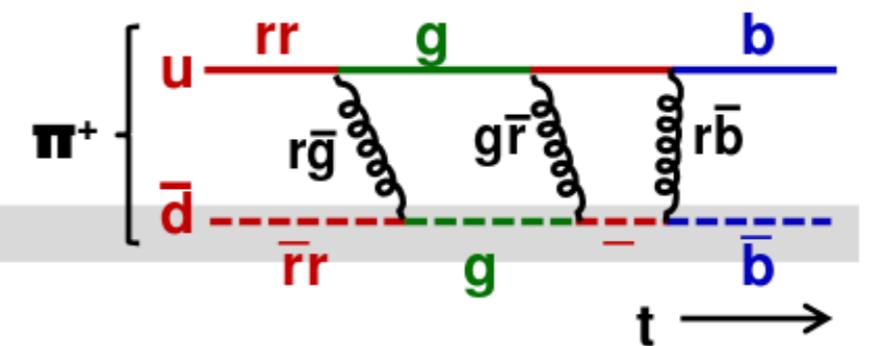
Verboten, da nicht farbneutral: $qqqqq$

Aber:

$gg, q\bar{q}, qq\bar{q}, qq\bar{q}\bar{q}$ können farbneutral sein.

Hybrid, 4-Quark, Pentaquark

← exotisch, einige Kandidaten, aber noch umstritten



Exotische Hadronen

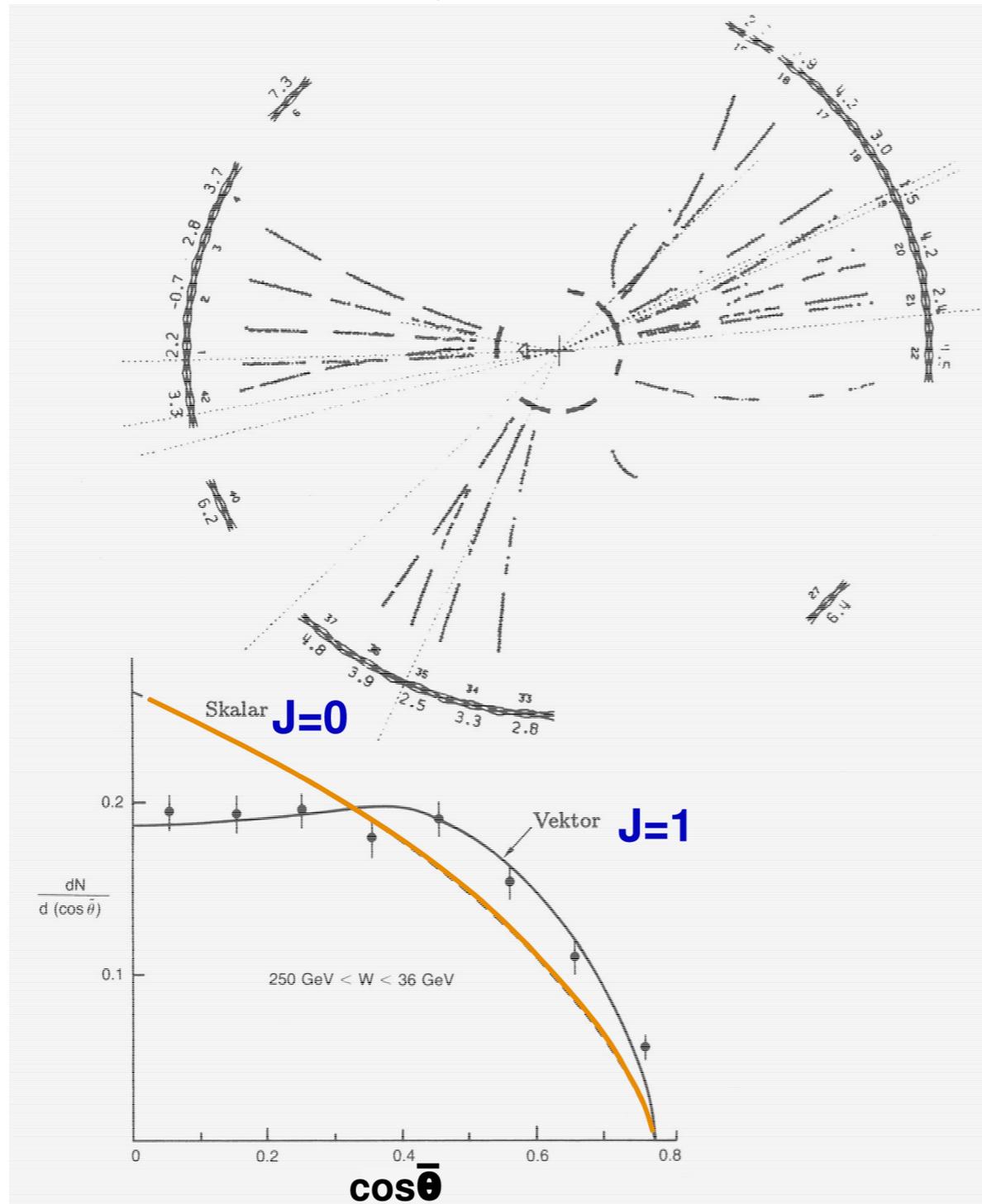
"Exotische Hadronen" sind nicht 100%ig etabliert.

Kandidaten sind:

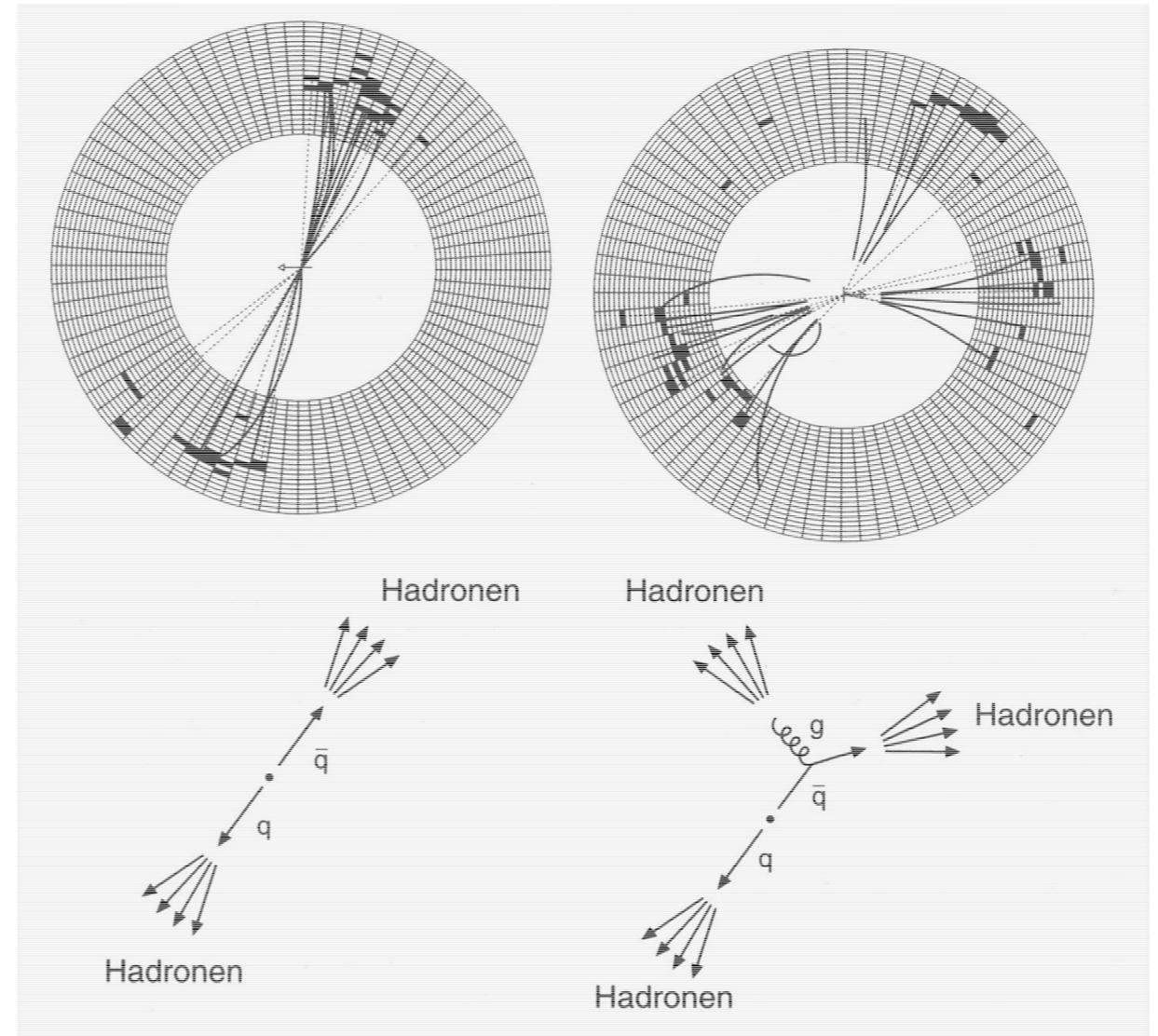
- **Glueball(-komponente in) : $f_0(1530)$**
Existenz experimentell eindeutig gesichert, aber Interpretation nicht (Mischung?)
- **Vier-Quark-Zustände: $f_0(980)$, $a_0(980)$**
 $s\bar{s}q\bar{q}$ -Zustände, oder r -Moleküle, oder doch $s\bar{s}$ -Mesonen mit starker Kopplung an $K\bar{K}$ -Zerfallskanal?
- **X (3870)**
Belle, CPF (EKP) : $D^* \bar{D}$ -Molekül?
- **Pentaquarks:**
Von einigen Experimenten "gesehen", von vielen aber auch nicht

Gluejets

JADE bei Petra, $\sqrt{s} = 31 \text{ GeV}$



2- und 3-Jet-Ereignisse



$\bar{\theta}$: Winkel zwischen höchstenergetischem Jet und Fluglinie der anderen beiden in deren CMS:

Glueonen haben Spin 1

Entdeckung von W und Z

- $e^+e^- \rightarrow Z_0$ möglich für $\sqrt{s} = 2E \geq M_Z$ seit 1989 (LEP, SLC)

 $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ möglich für $\sqrt{s} \geq M_W$ seit 1996 (LEP II)
 } „saubere“ Bedingungen

- Entdeckung gelang 1983 ff. **Carlo Rubbia, Simon v. d. Meer**

 (CERN, UA1) am Hadron-Collider Sp \bar{p} S: **(Nobelpreis 1984)**

$$u\bar{u} \rightarrow Z^0 \quad d\bar{d} \rightarrow Z^0 \quad d\bar{u} \rightarrow W^- \quad u\bar{d} \rightarrow W^+$$

Wenn aus p + p : $\sqrt{s} = \sqrt{\langle x_v \rangle \cdot \langle x_s \rangle \cdot s_{beam}} = 82 GeV \Rightarrow \sqrt{s_{beam}} \approx 600 GeV$

Wenn aus p + \bar{p} : $\sqrt{s} = \sqrt{\langle x_v \rangle^2 \cdot s_{beam}} = 82 GeV \Rightarrow \sqrt{s_{beam}} \approx 320 GeV$

- Signatur: $Z^0 \rightarrow e^+e^-, \mu^+\mu^-$ hochenergetische Leptonpaare

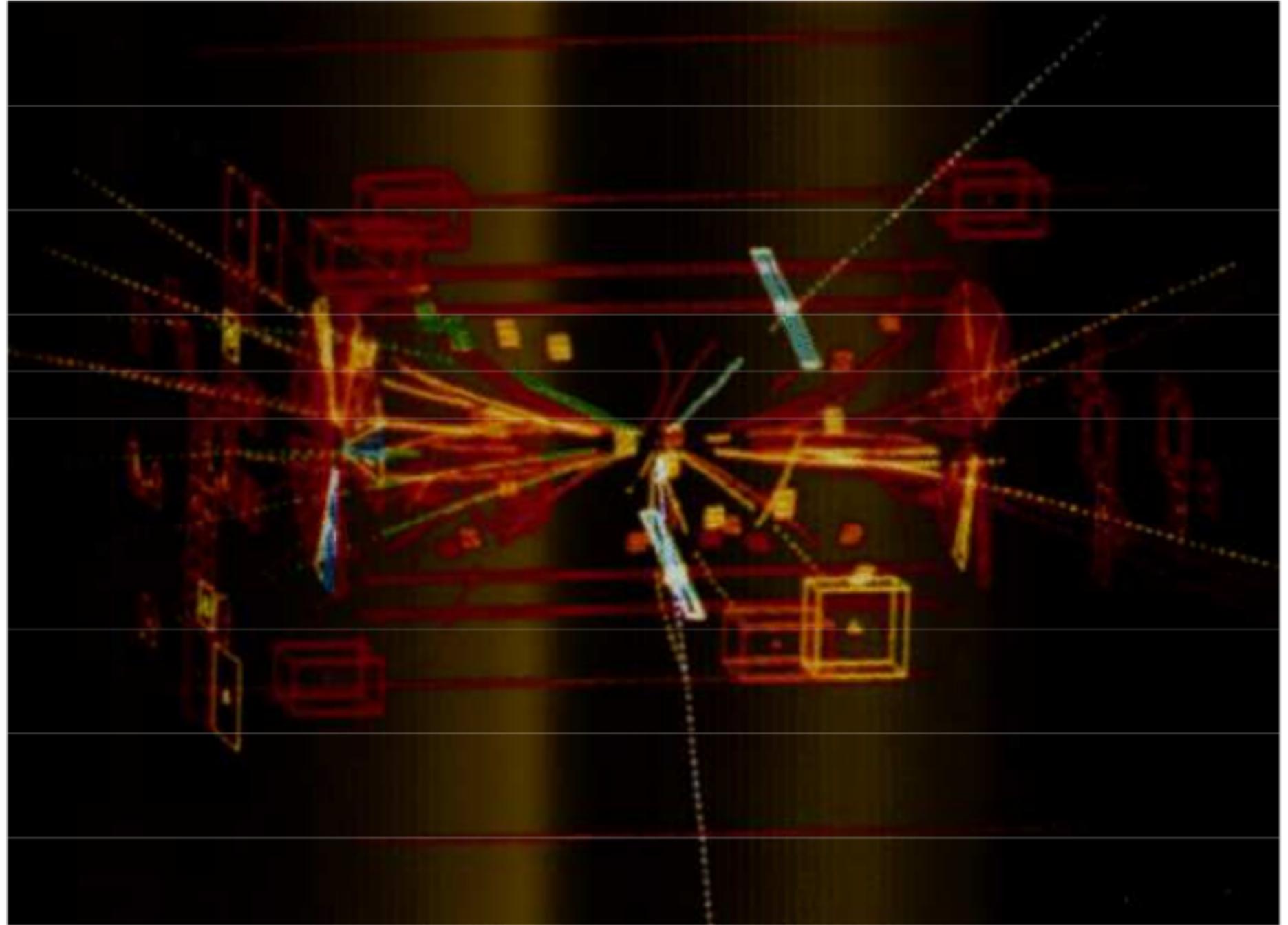
$$W^+ \rightarrow e^+\nu_e, \mu^+\nu_\mu$$

↑ ↑
 nur 1 hochenergetische Leptonspur
 + fehlender Transversalimpuls (vom Neutrino)

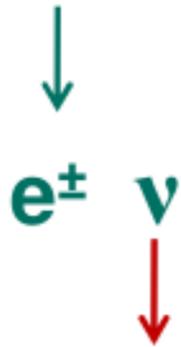
UA1- Experiment: Entdeckung des Z

$$Z^0 \rightarrow e^+ e^-$$

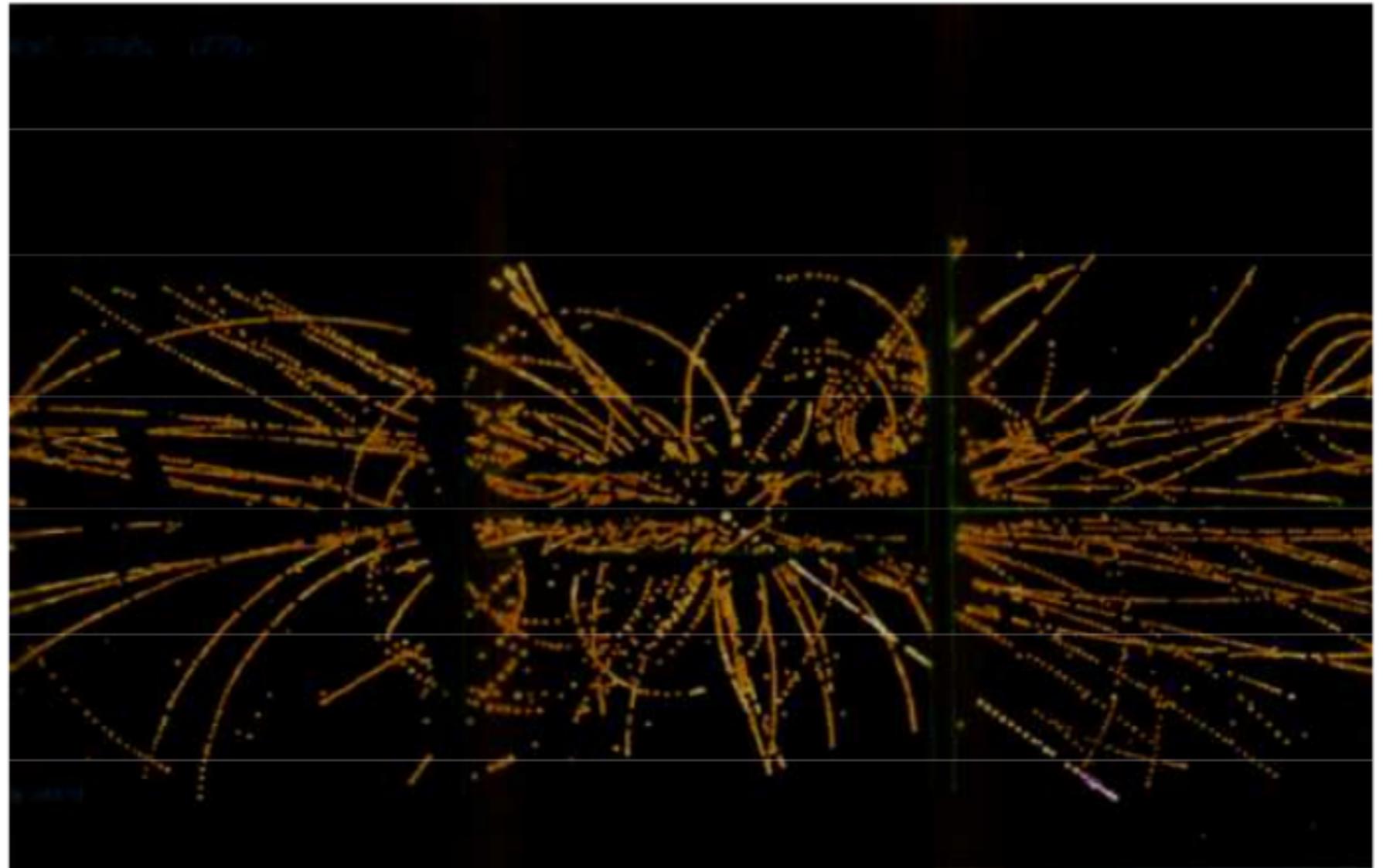
UA1



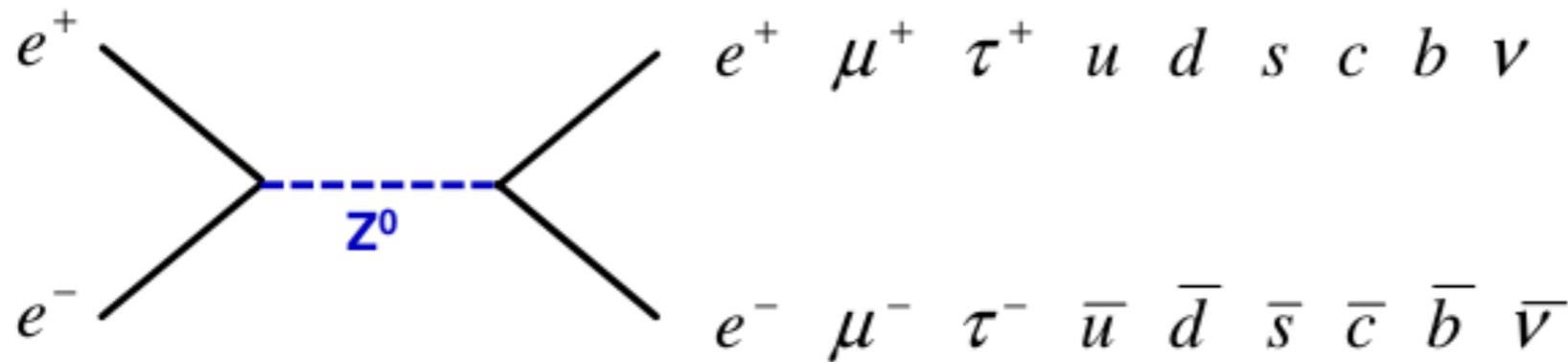
UA1- Experiment: Entdeckung des W



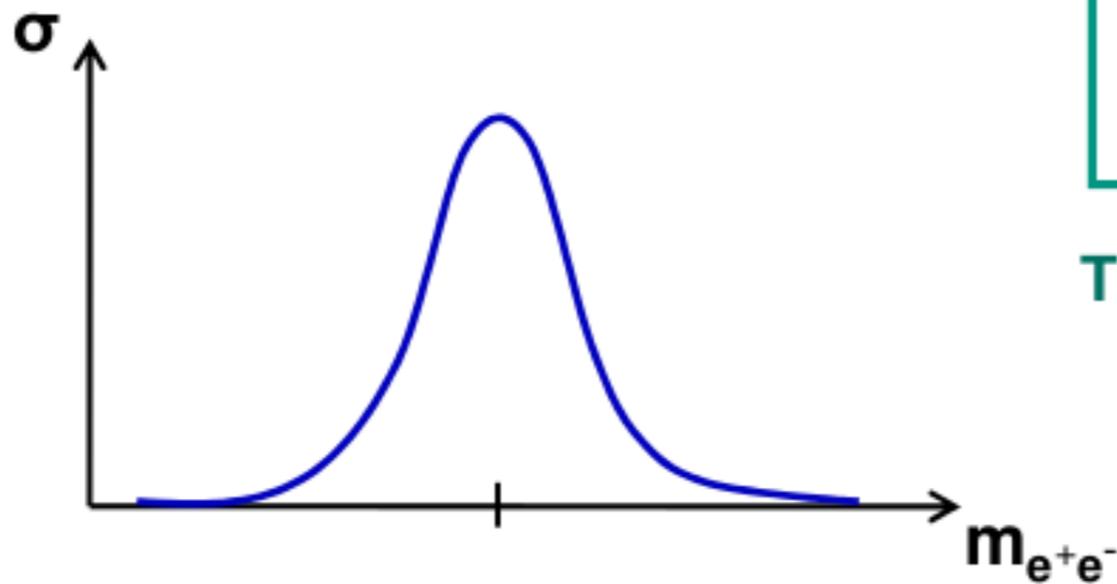
fehlende Energie
fehlender Impuls



Z Peak bei LEP



Wie kann man $Z^0 \rightarrow \nu \bar{\nu}$ messen ?



$$\Gamma_{ee} + \Gamma_{\mu\mu} + \Gamma_{\tau\tau} + \Gamma_{qq} \quad \text{vergl. mit} \quad \Gamma_{tot}$$

$$\Gamma_{\nu\nu} = \Gamma_{tot} - \Gamma_{sichtbar}$$

Theorie für # ν - Familien =

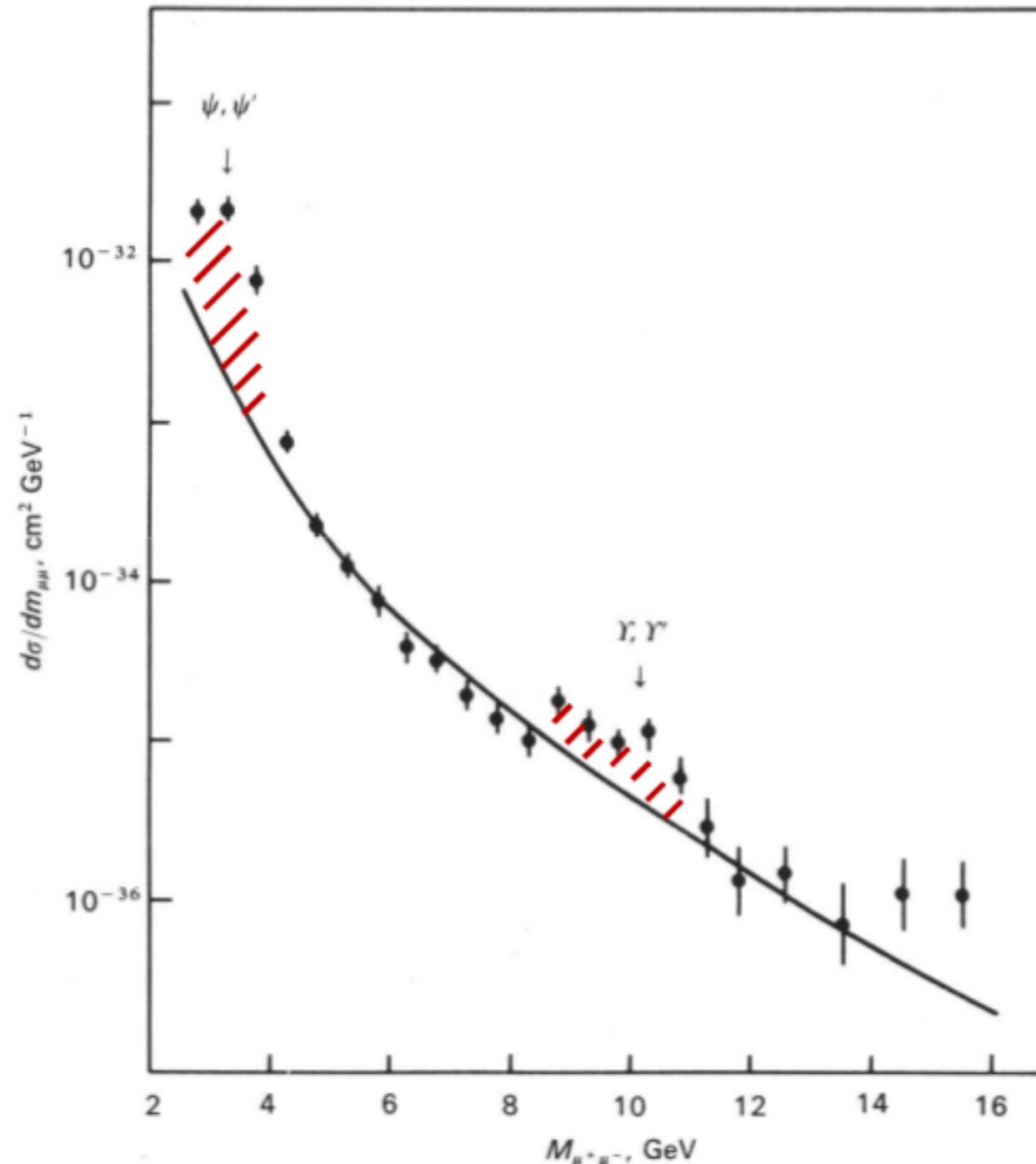
1
 2
 ⇒ 3
 4
 5

Entdeckung der Y Resonanzen

Erster Beweis für
Y – Resonanz
FNAL 1977
(Ledermann)

Gesamtbreite
größer als
experimentelle
Auflösung

hier:
Überlagerung von
schmalen
Resonanzen
→ Spektroskopie

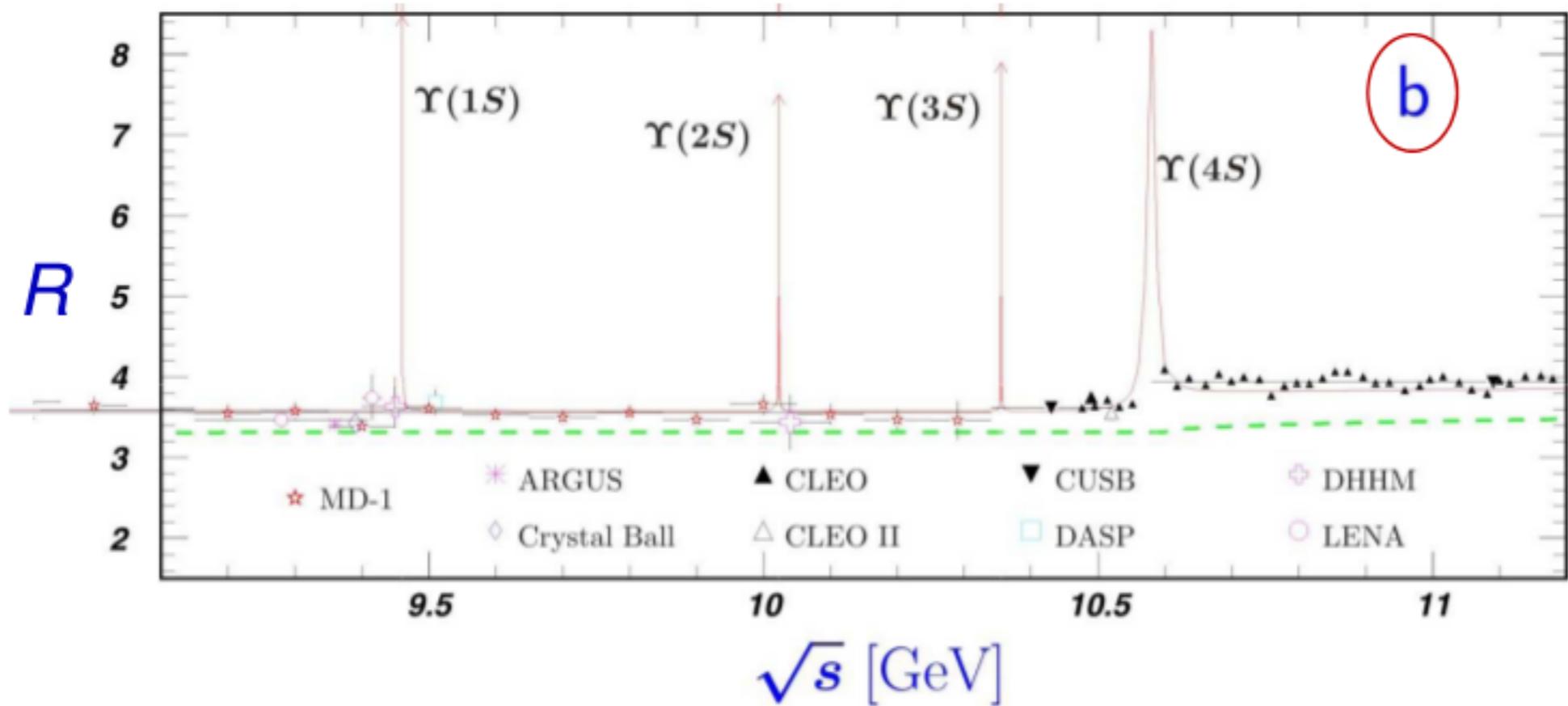


Produktions-
experiment

[Quelle: Perkins, Introduction to High Energy Physics]

Bottonium

Schwelle für offene
Beauty - Produktion



B – Mesonen:



\bar{B} – Mesonen:



↑
Υ (1S)

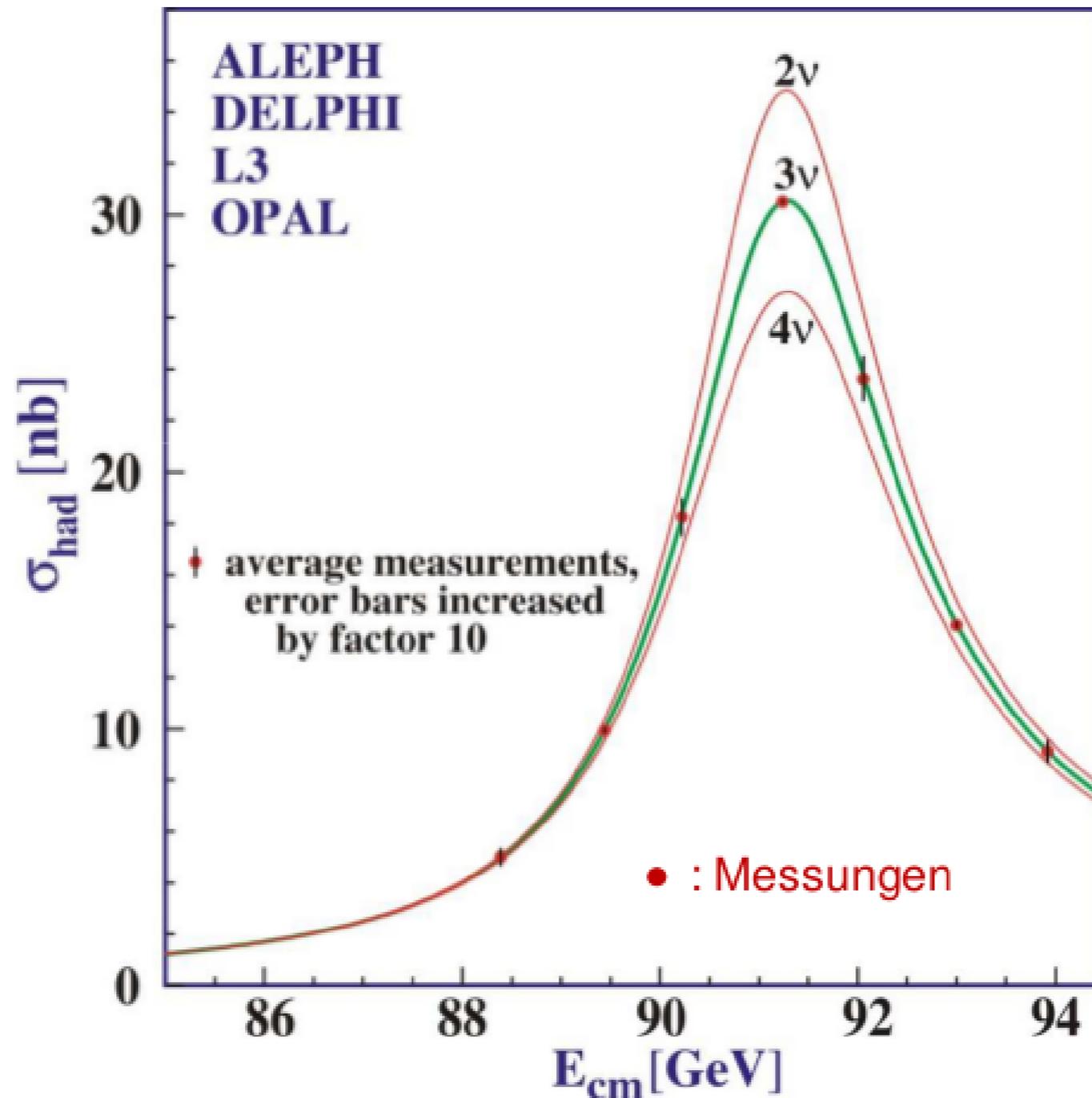
↑
Υ (2S)

↑
Υ (3S)

↑
Υ (4S)

Der Z0 - Peak

- 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)

