

9. Quarkstruktur der Hadronen

- Proton aufgebaut aus punktförmigen Spin $\frac{1}{2}$ $\frac{1}{2}$ Teilchen: Quarks
- Hadronen sind aus Quarks aufgebaute Teilchen
- Baryonen $(q_1 q_2 q_3)$
 z.B. Proton $|p\rangle = |uud\rangle$, Neutron $|n\rangle = |udd\rangle$
 Antiproton $|\bar{p}\rangle = |\bar{u}\bar{u}\bar{d}\rangle$

Es gilt Baryonenzahlerhaltung

mit Baryon $B = +1$, Antibaryon $B = -1$, $\sum B_i = \text{const}$

\Rightarrow Es kann kein einzelnes Baryon erzeugt/vernichtet
werden

\Rightarrow Proton ist stabil (da leichtester Baryon)

- Mesonen $|q_1 \bar{q}_2\rangle$

z. B. Pionen $|\pi^+\rangle = |u\bar{d}\rangle$, $|\pi^-\rangle = |d\bar{u}\rangle$, $|\pi^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|u\bar{u}\rangle - |d\bar{d}\rangle)$

- „Normale“ Hadronen: Nur Baryonen und Mesonen

Es gibt Kandidaten für „exotische“ Zustände:

$$|q_1 q_2 \bar{q}_3 \bar{q}_4\rangle, |q_1 q_2 q_3 q_4 \bar{q}_5\rangle$$

- Quarks werden in Hadronen durch eine noch stärkere Kraft gebunden:

- freie Quarks bisher nicht experimentell beobachtet

- Vermittler der starken Kraft: Gluon

• Quarks

Familie / Generation

el. Lad. [e]	1.	2.	3.
$+\frac{2}{3}$	Up (u) $I_3 = +\frac{1}{2}$	Charm (c) $C = +1$	Top (t) $T = +1$
$-\frac{1}{3}$	Down (d) $I_3 = -\frac{1}{2}$	Strange (s) $S = -1$	Bottom (b) $B = -1$

Flavor-Quantenzahlen: in starker WW erhalten

starker Iso spin, Strangerness, Charm, Beauty, Truth

Baryonenzahl: $\frac{1}{3}$

Spin: $\frac{1}{2} \hbar \rightarrow$ Fermionen

Zu jedem Quark gibt es ein Antiquark
mit negativen Quantenzahlen

4

- starker Isospin

abgesehen von el. Ladung sind u und d (fast) identisch

→ Beschreibung durch Isospin (I, I_3)

$$|u\rangle = \left| \frac{1}{2}, +\frac{1}{2} \right\rangle, \quad |d\rangle = \left| \frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \right\rangle$$

→ Isospin-Addition ergibt Pionen

$$\begin{array}{c} |u\rangle \\ 2 \end{array} \otimes \begin{array}{c} |\bar{u}\rangle \\ \bar{2} \end{array} \cong \left| \frac{1}{2}, +\frac{1}{2} \right\rangle \otimes \left| \frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \right\rangle = \left| 1, +1 \right\rangle \oplus \left| 1, 0 \right\rangle \oplus \left| 0, 0 \right\rangle$$

Triplet

Singlet

Triplet: $|1, +1\rangle \cong |u\bar{d}\rangle = |\pi^+\rangle, \quad |1, -1\rangle \cong |d\bar{u}\rangle = |\pi^-\rangle, \quad |1, 0\rangle \cong |\pi^0\rangle$

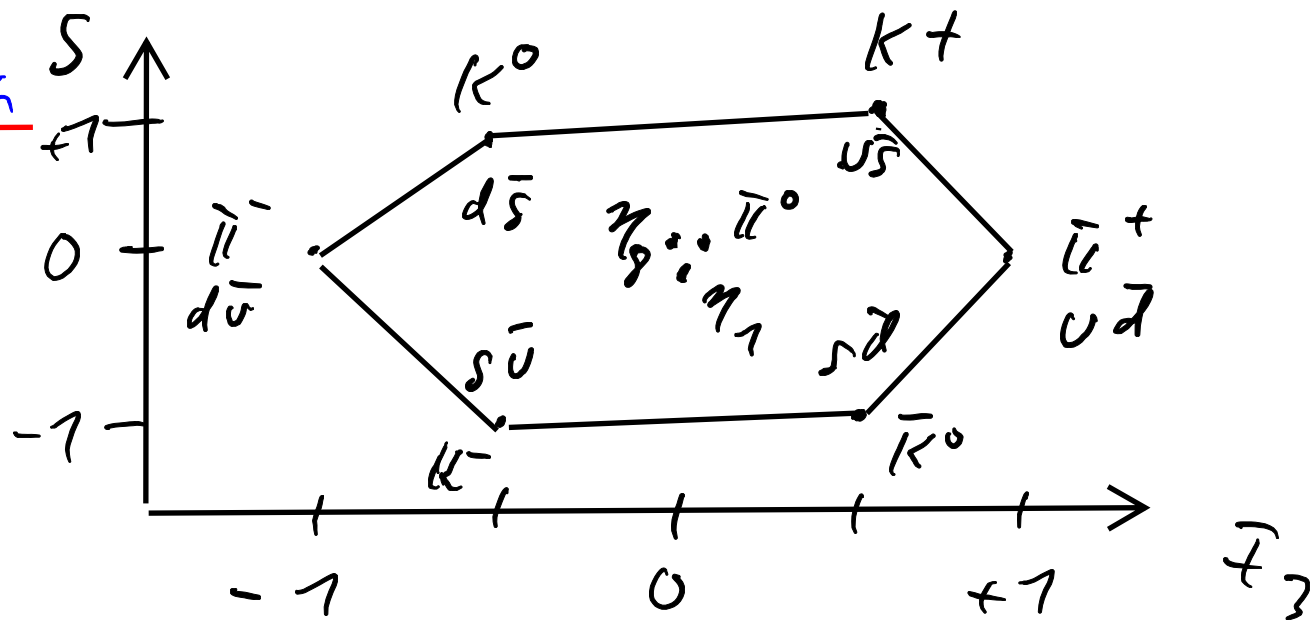
- Gell-Mann-Nishijima-Relation

$$Q = I_3 + \frac{Y}{2}$$

Starke Hyperladung: $Y = \text{Baryonenzahl} + S + C + B + T$

Multipletts von Hadronen aus leichten u, d, s -Quarks

Mesonen



$$3 \otimes \bar{3} = 8 \oplus 1$$

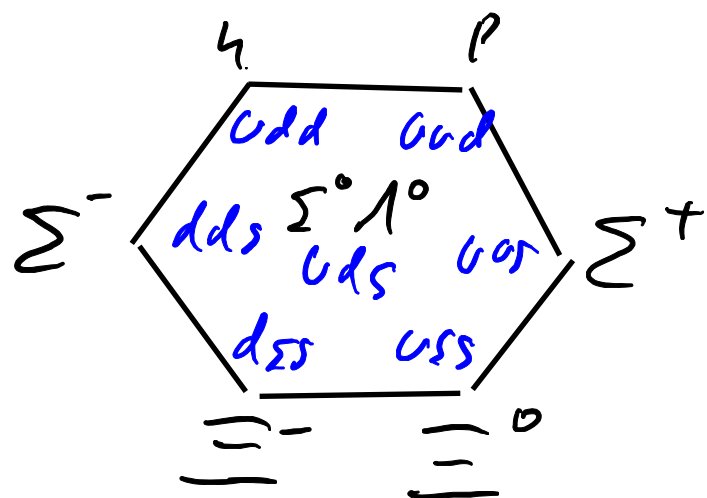
$$\text{Spic } 0$$

Baryonen

$$3 \otimes 3 \otimes 3 = 10 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 1$$

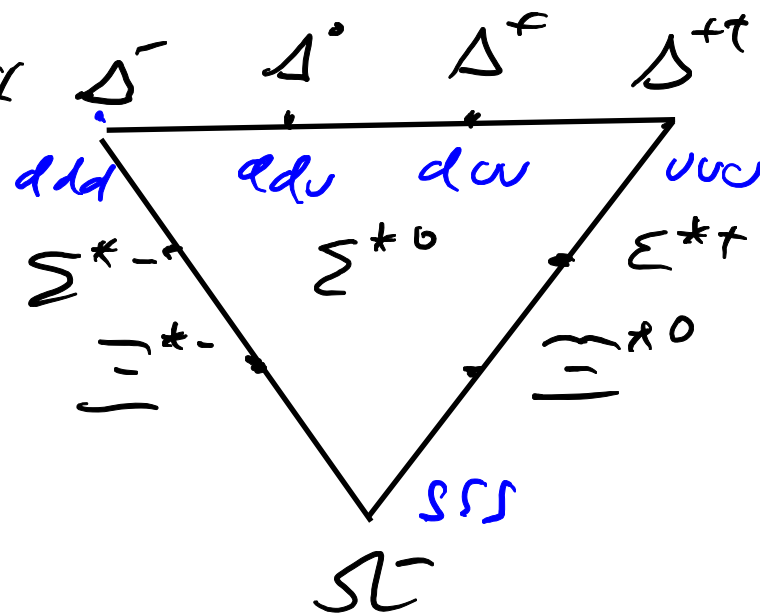
Oklett

$$\text{Spic } \frac{3}{2}$$



Dekuplett

$$\text{Spic } \frac{3}{2}$$



Gell-Mann's statischer Quarkmodell sagt Ω^- voraus *

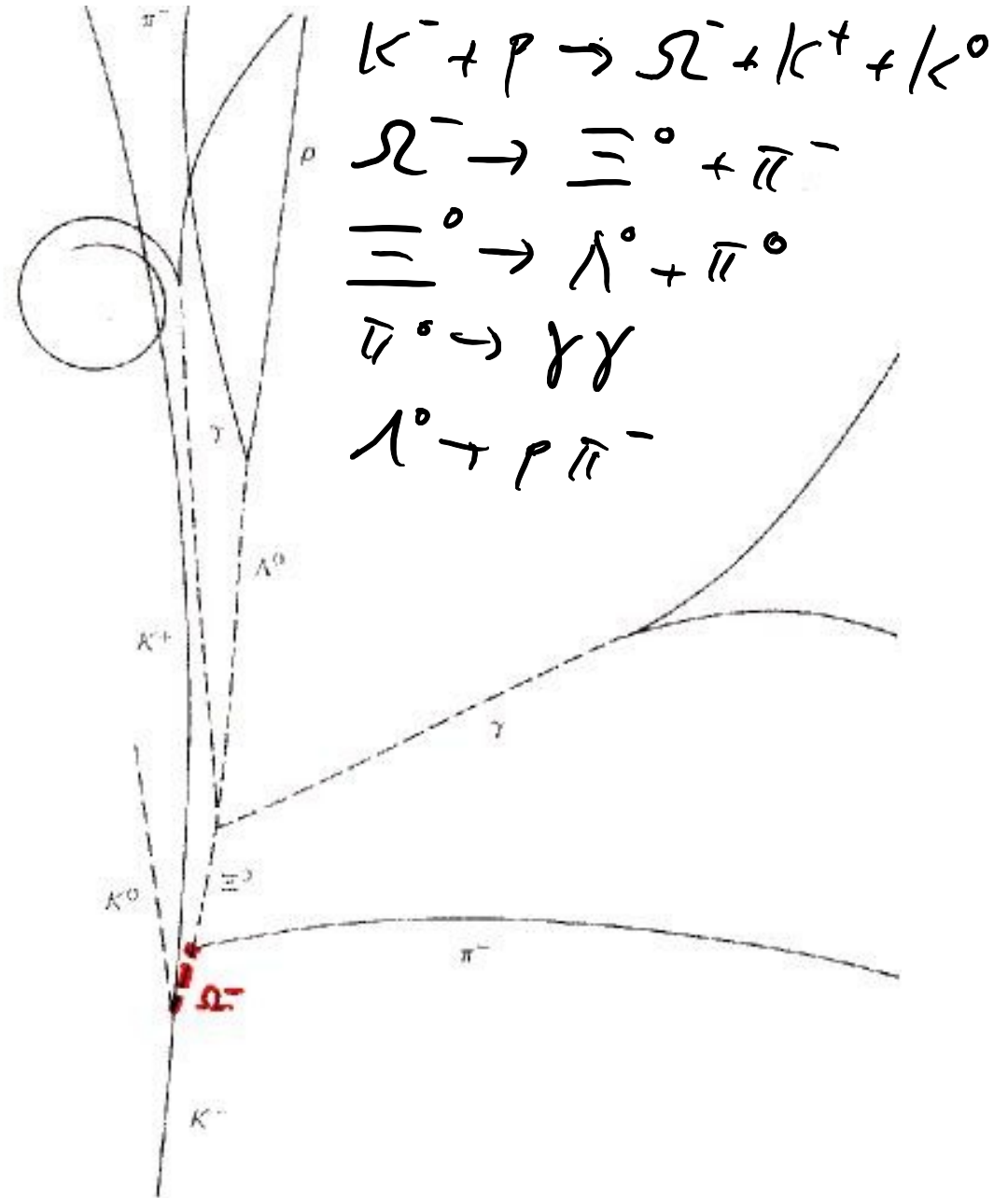
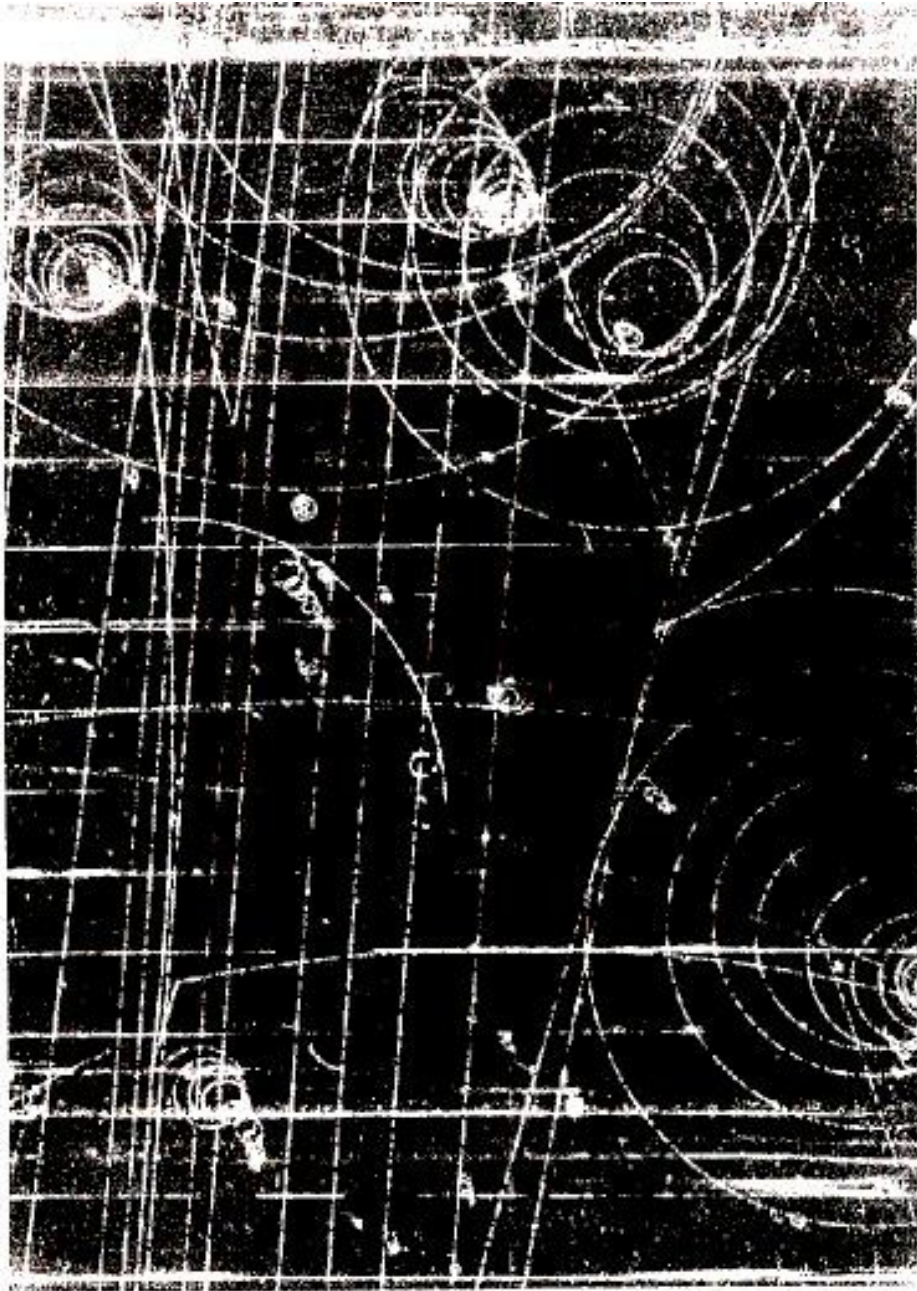


Figure 1.10 The discovery of the Ω^- . The actual bubble chamber photograph is shown on the left; a line diagram of the relevant tracks on the right. (Photo courtesy Brookhaven

7

- $|\Omega\rangle = |sss\rangle$ ist völlig symmetrischer Wellenfkt. identischer Teilchen \rightarrow Pauli-Verbot! *

\rightarrow Postulat der "Farbladung" der Quarks

z.B. $|\Omega\rangle = |s_r s_g s_b\rangle \rightarrow$ Gesamtwellenfkt. durch Farbladung antisymmetrisch

- Farbladung nur innerhalb der Hadronen

Hadronen sind farbneutral

Baryonen: $r + g + b$ (weiß)

Mesonen: $r + \bar{r}, g + \bar{g}, b + \bar{b}$ (schwarz)

Experimentelle Evidenz für Farbladung

$$R := \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = N \sum_{\text{Farben } q} Q_q^2 = 3,67 \text{ für } N_{\text{Farben}} = 3$$

\downarrow Quarkladung
 (u, d, s, c)

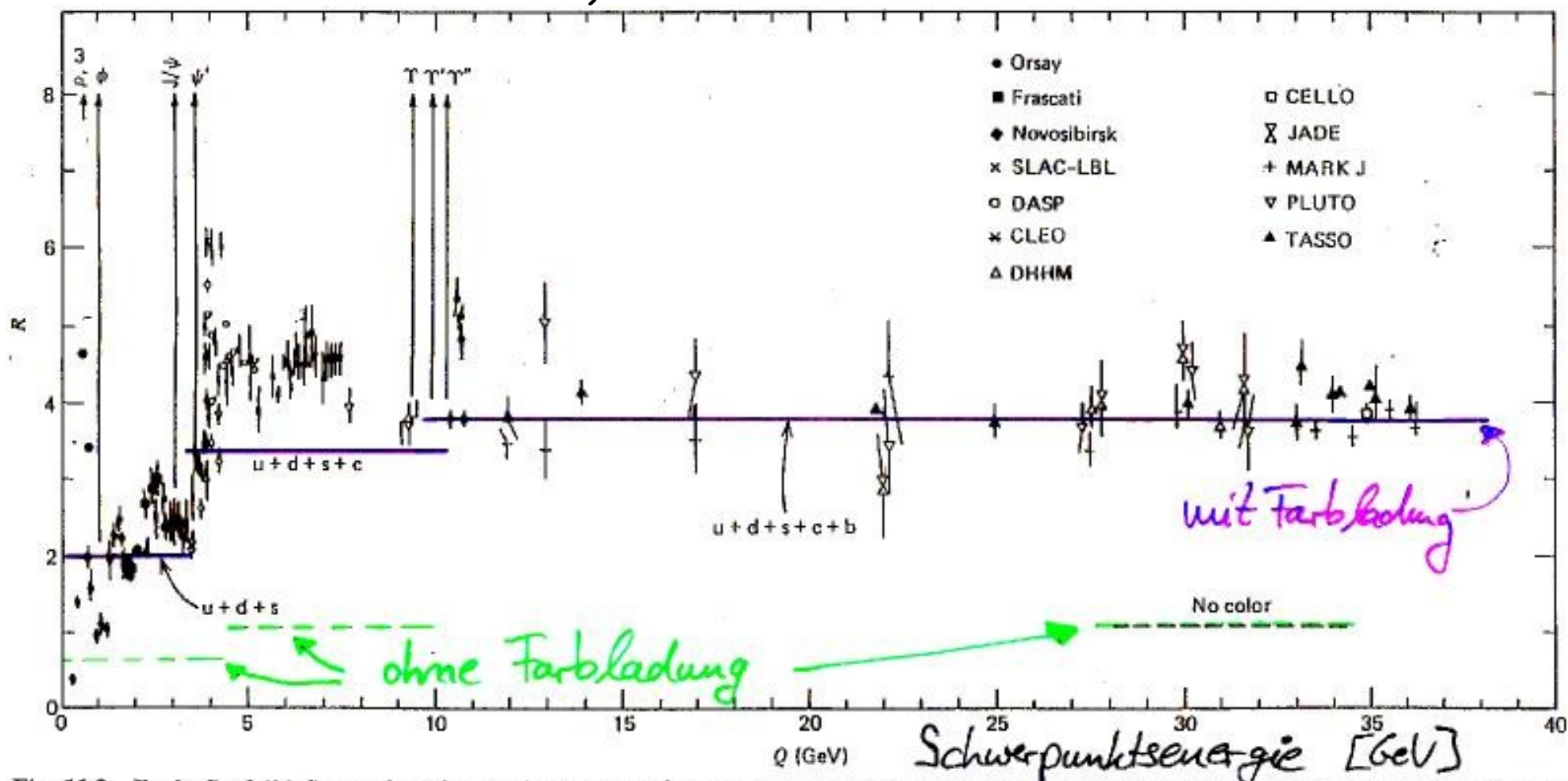


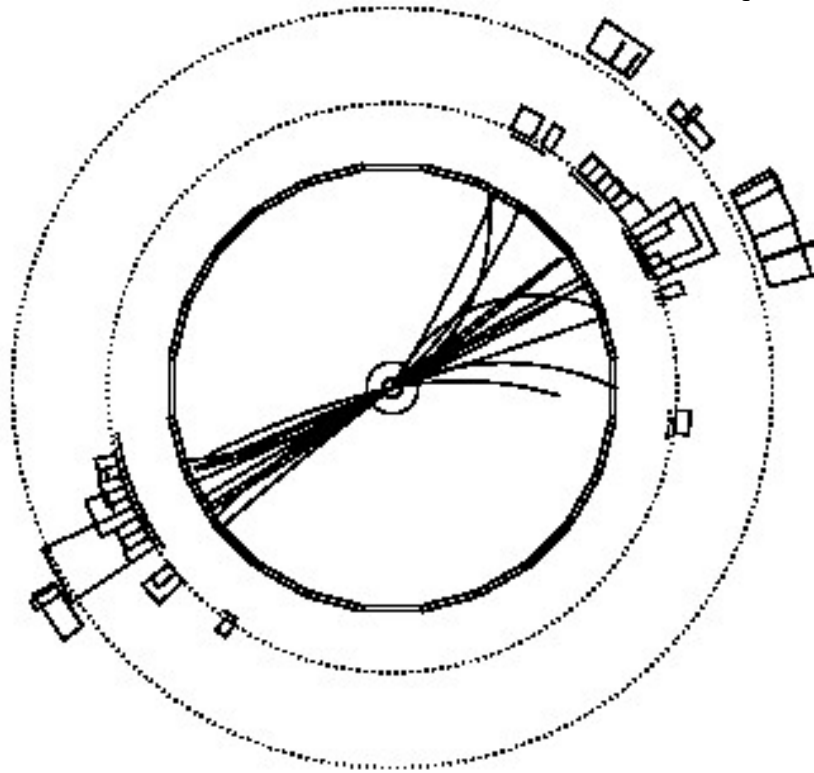
Fig. 11.3 Ratio R of (11.6) as a function of the total e^+e^- center-of-mass energy. (The sharp peaks correspond to the production of narrow 1^- resonances just below or near the flavor thresholds.)

Farbneutralität der Hadronen *

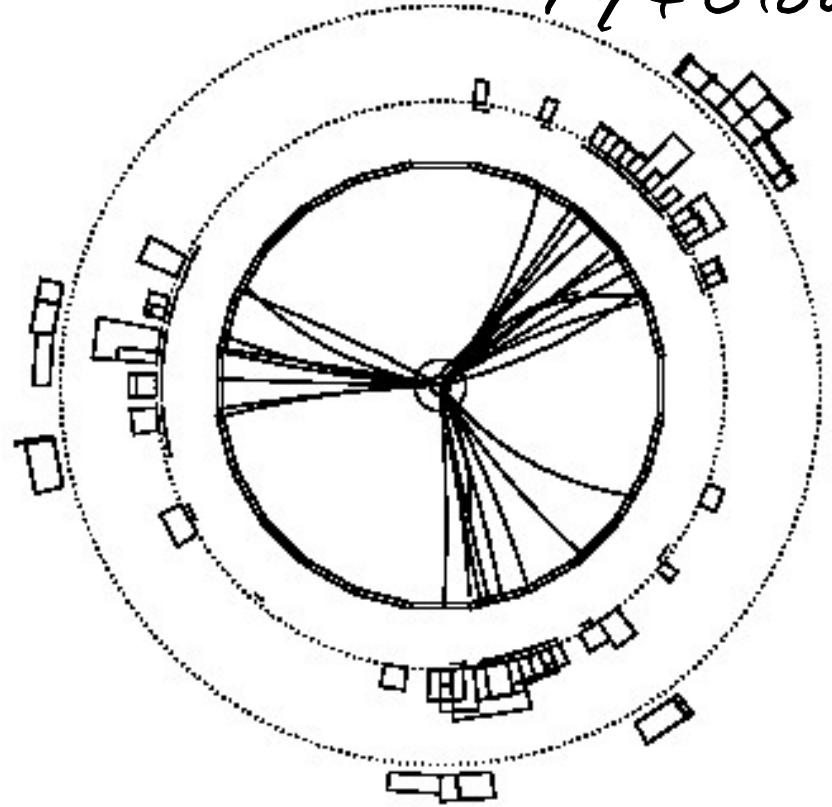
→ keine freien Quarks oder Gluonen (Confinement)

→ Hadronisierung, Strahlen von Hadronen (Jets)

$$e^+e^- \rightarrow q\bar{q} \rightarrow 2 \text{ Jets}$$



$$e^+e^- \rightarrow q\bar{q} + \text{Gluon} \rightarrow 3 \text{ Jets}$$



Asymptotische Freiheit bei hohen Energien /
kleinen Abständen → Quark-Gluon-Plasma