

- Tief-inelastische Streuung:

- Parton Distribution Functions (PDFs)
  - Quarkverteilungen

Quarkverteilungen müssen gemessen werden (nicht vorhersagebar)

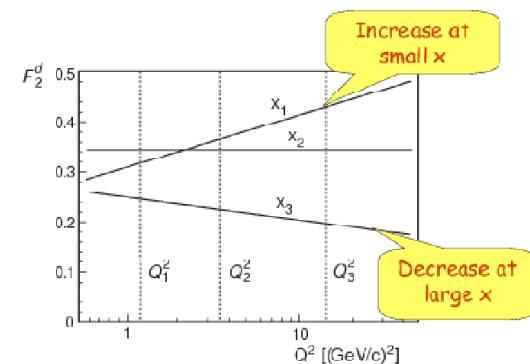
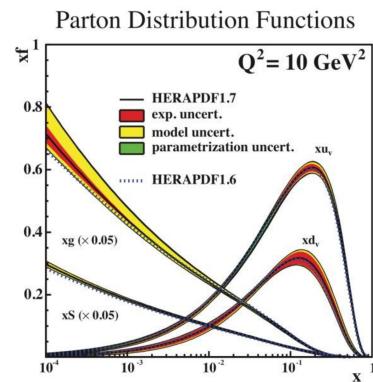
- Skalenbrechung

- ↔ Je größer  $Q^2$  desto besser die Auflösung, desto mehr See-Quarks werden beobachtet ....

$Q^2$ -Abhängigkeit kann berechnet werden, wenn PDF bei einem  $Q^2$  bekannt (vorhersagbar - DGLAP-Gleichungen)

- ↔ Je größer  $Q^2$  desto besser die Auflösung, desto mehr See-Quarks werden beobachtet

- ↔  $F_2(x, Q^2)$  steigt für größere  $Q^2$  bei kleinen  $x$  immer stärker an



- Beobachtung von Hadronen

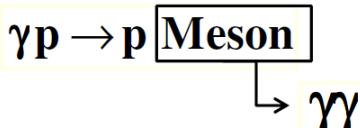
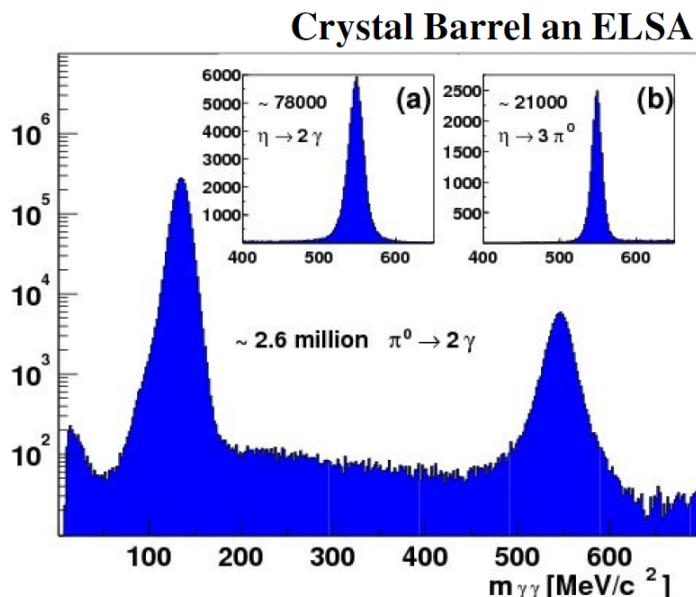
- ↔ Beobachtung eines ganzen Teilchen-Zoo's (viele Mesonen ( $q\bar{q}$ ) und Baryonen ( $qqq$ ))

- ↔ Beobachtung von Teilchen, die über die starke Wechselwirkung erzeugt werden aber mit großer Lebensdauer zerfallen ( $\Lambda(1115) : 2,6 \cdot 10^{-10} s$ )
  - Teilchen mit Strangeness

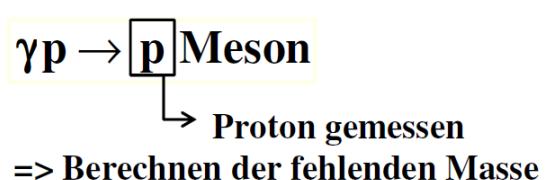
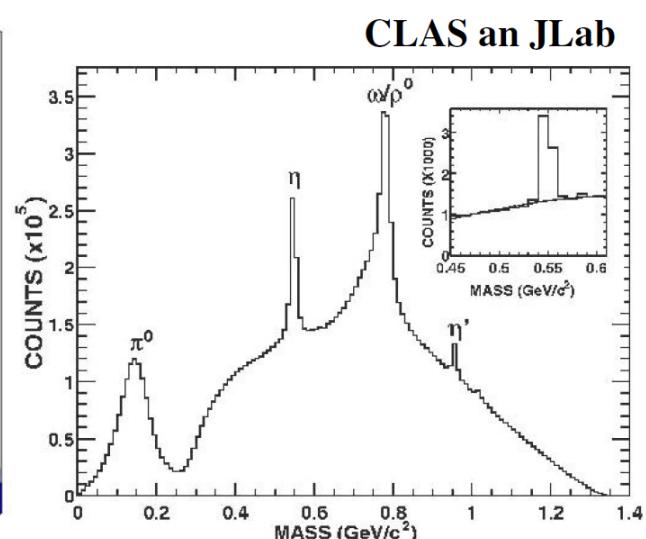
288

## Mesonen - Photoproduktion

### $\gamma p \rightarrow p + \text{Meson}$

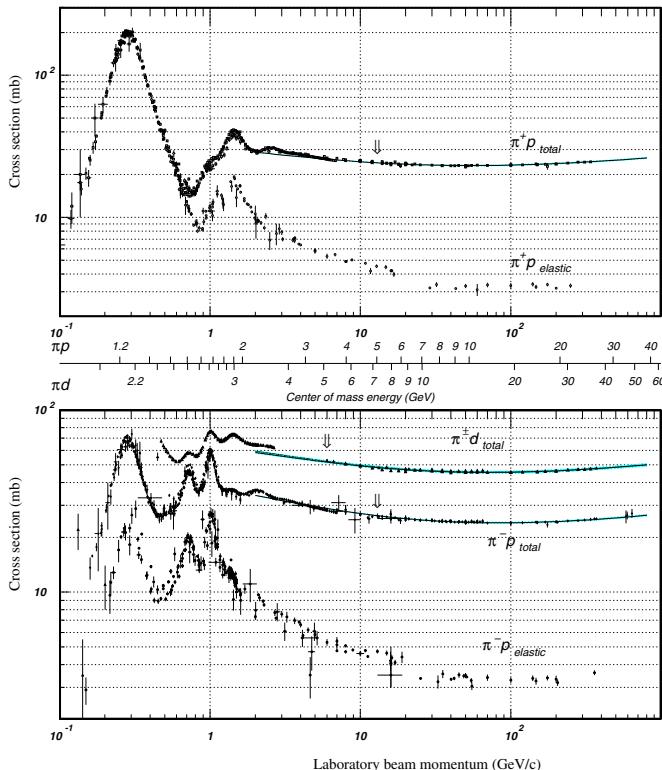


Photonen gemessen  
=> Berechnen der invarianten Masse



289

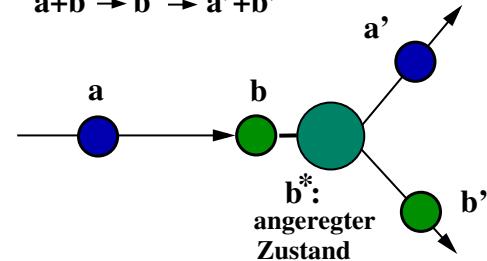
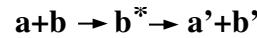
## Pion-Nukleon-Streuung:



Klare Beobachtung von Resonanzstrukturen

auch elastische Streuung

( $\pi N \rightarrow \pi N$ ):



Beobachtung:

$\Delta^- (1232)$ ,  $\Delta^0 (1232)$ ,  $\Delta^+ (1232)$ ,  
 $\Delta^{++} (1232)$

$\Rightarrow \Delta$ -Resonanz hat Isospin 3/2

(analog zu Proton / Neutron:  $\Leftrightarrow$  Isospin 1/2)

Nutzen der Isospinsymmetrie zur Vorhersage der relativen Wirkungsquerschnitte = Beweis  $\leftrightarrow$  Übungen

290

## Mesonen und Baryonen – Multipletts

Es wurden experimentell eine Vielzahl von Mesonen und Baryonen beobachtet

$\Rightarrow$  Teilchen – Zoo !

Nicht alle Teilchen können fundamental sein !

$\Leftrightarrow$  Gell-Mann (1964) :

Es existiert eine Symmetriegruppe mittels derer man die Quantenzahlen der Baryonen und Mesonen erklären kann: SU(3) .... Gruppentheorie .... Master-VL + Hadronenphysik

Erweiterung der Isospin-Gruppe: SU(2)

$\Leftrightarrow$  Einführen einer weiteren in der starken Wechselwirkung erhaltenen Quantenzahl : Strangeness !

Gell-Mann Nishijima-Formel:

$Q = I_3 + Y/2$ ,  $Y = B + S$ ,  $Q$ : Ladung,  $Y$ : Hyperladung,  $B$ : Baryonenzahl,  
 $S$ : Strangeness

$B(\text{Proton}) = 1$ ,  $B(\text{Antiproton}) = -1$

(Gleichzeitig zwei diagonale Operatoren:  $I_3, Y$ )

291

# Mesonen und Baryonen – Multipletts

**Gell-Mann (1964) :** Es existiert eine Symmetriegruppe mittels derer man die Quantenzahlen der Baryonen und Mesonen erklären kann:  $SU(3)$

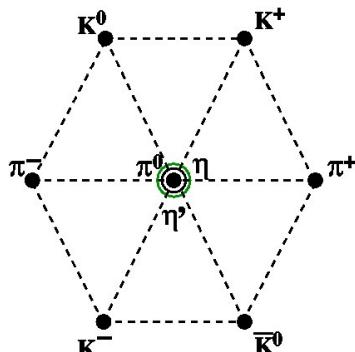
.... Gruppentheorie .... Master-VL  
Hadronenphysik

⇒ Man kann alle bekannten Hadronen in Multipletts einsortieren

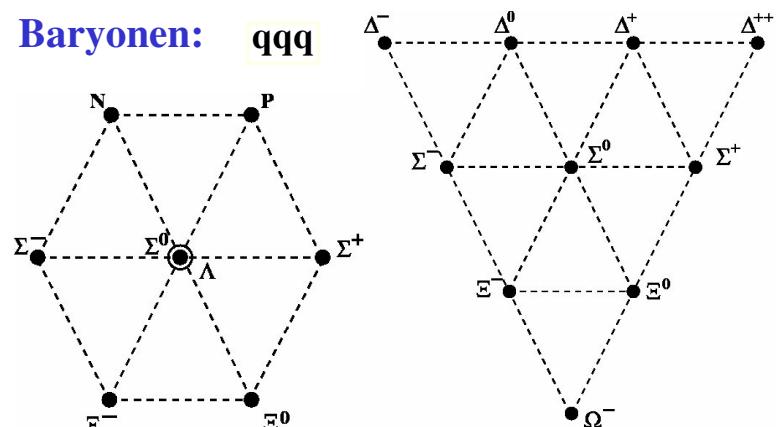
Fundamentale Darstellung der  $SU(3)$  : 3 Basis-Zustände  $u, d, s$   
=> Hypothetische Teilchen : QUARKS

z.B.:

Mesonen:  $q\bar{q}$



Baryonen:  $qqq$



Existenz einer Vielzahl weiterer Mesonen und Baryonen

292

Bemerkung zu:

Spezielle unitäre Gruppen:  $SU(2), SU(3)$

$SU(2)$ : Spin, Isospin

↔ fundamentale Darstellung Spin / Isospin:  $|1/2, +1/2\rangle, |1/2, -1/2\rangle$

↔ höherdimensionale Darstellungen lassen sich daraus aufbauen:

Spin / Isospin:  $1, 3/2, 2, 5/2 \dots$

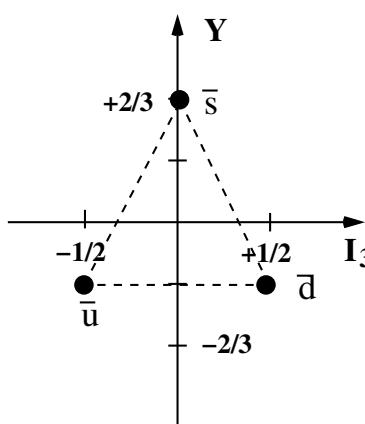
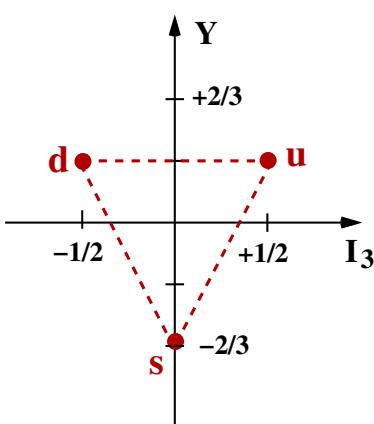
Isospin-Doublett:  $p: |1/2, +1/2\rangle$        $n: |1/2, -1/2\rangle$

Isospin-Doublett:  $u\text{-Quark}: |1/2, +1/2\rangle$        $d\text{-Quark}: |1/2, -1/2\rangle$

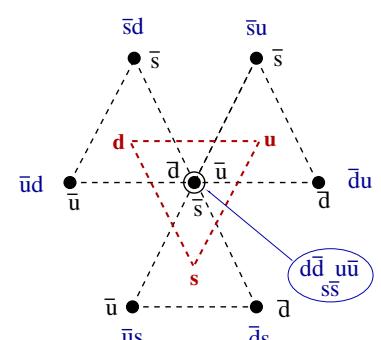
**Gell-Mann: Strangeness ist in der starken Wechselwirkung erhalten:**

$S(s) = -1, S(\bar{s}) = +1$        $Y = B + S$       ( $B(q) = 1/3, B(\bar{q}) = -1/3$  (Baryonenzahl))

⇒  $SU(3)_{\text{flavour}}$ :  $u, d, s = \text{fundamentale Darstellung}$



⇒ z.B. Mesonen:



293

# SU(3) $\leftrightarrow$ Eigenschaften der Quarks

---

$$I_3 = 1/2 \cdot \lambda_3, \quad Y = 1/\sqrt{3} \cdot \lambda_8 \quad (\lambda_i : \text{Gell-Mann Matrizen})$$

$$I_3 \Phi = 1/2 \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ d \\ s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} +1/2 \cdot u \\ -1/2 \cdot d \\ 0 \cdot s \end{pmatrix}$$

$$Y \Phi = 1/3 \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ d \\ s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} +1/3 \cdot u \\ +1/3 \cdot d \\ -2/3 \cdot s \end{pmatrix}$$

mit  $Q = I_3 + Y/2$ ,  $Y = B + S$

$\Rightarrow$

Quark	B	Q	J	S	I	$I_z$
u	$\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
d	$\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	0	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$
s	$\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	-1	0	0

294

## Mesonen und Baryonen – Multipletts

---

**Gell-Mann (1964) :** Es existiert eine Symmetriegruppe mittels derer man die Quantenzahlen der Baryonen und Mesonen erklären kann: SU(3)

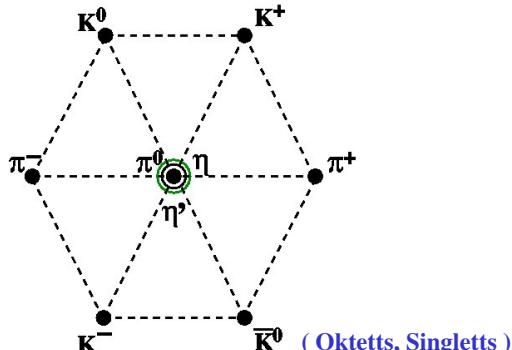
.... Gruppentheorie .... Master-VL  
Hadronenphysik

$\Rightarrow$  Man kann alle bekannten Hadronen in Multipletts einsortieren

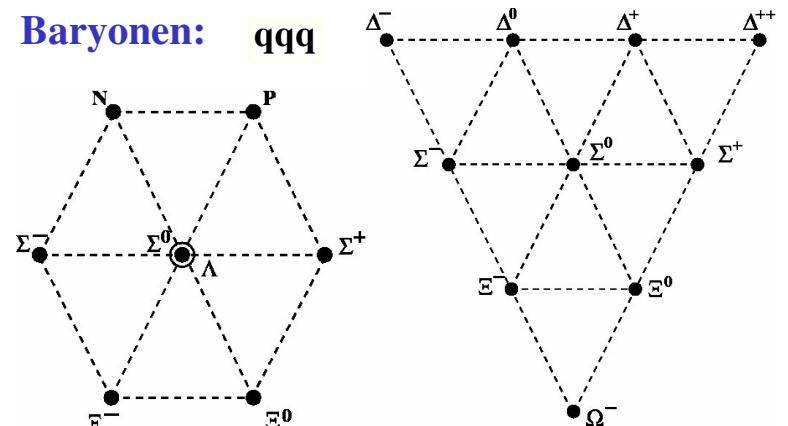
**Fundamentale Darstellung der SU(3) :** 3 Basis-Zustände u, d, s  
**=> Hypothetische Teilchen : QUARKS**

z.B.:

**Mesonen:**  $q\bar{q}$



**Baryonen:**  $qqq$



Existenz einer Vielzahl weiterer Mesonen und Baryonen

( Dekupletts, Oktetts, Singletts )

295

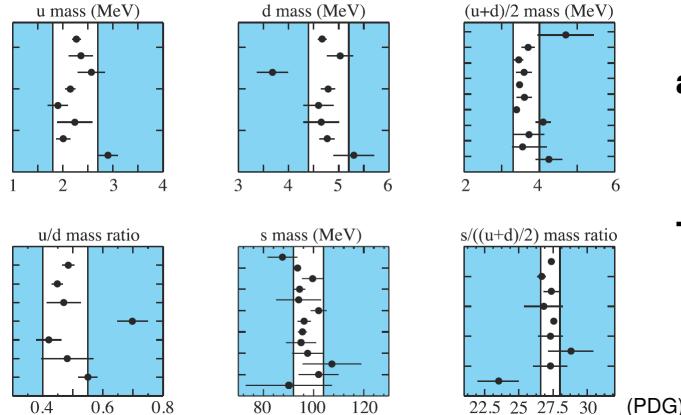
# Konstituenten-Quarkmodell – Quarkmassen

**Confinement:** Quarks werden nicht als freie Teilchen beobachtet

⇒ Ihre Masse kann daher nicht direkt gemessen werden!!!

↔ Verhältnisse der leichten Quarkmassen aus chiraler Störungstheorie unter Nutzung der leichten Mesonenmassen.

↔ Lattice QCD -Rechnungen: Quarkmassen  $1/2(m_u + m_d)$  (Isospinlimit),  $m_s$



aber:

$$2m_u + m_d \ll 938 \text{ MeV}/c^2 \\ (m_{\text{Nukleon}})!!$$

- Im Rahmen des simplen Quarkmodells nimmt man an, dass es im Nukleon **3 Konstituentenquarks** gibt, deren Masse jeweils ca. 1/3 der Nukleonenmasse beträgt.

- Im Rahmen der QCD kann man die Konstituentenquarks als Stromquarks mit einer Wolke aus Gluonen und See-Quarks betrachten, die den Konstituentenquarks ihre große Masse von  $\approx 300 \text{ MeV}/c^2$  gibt.

## Spektroskopische Eigenschaften der Hadronen

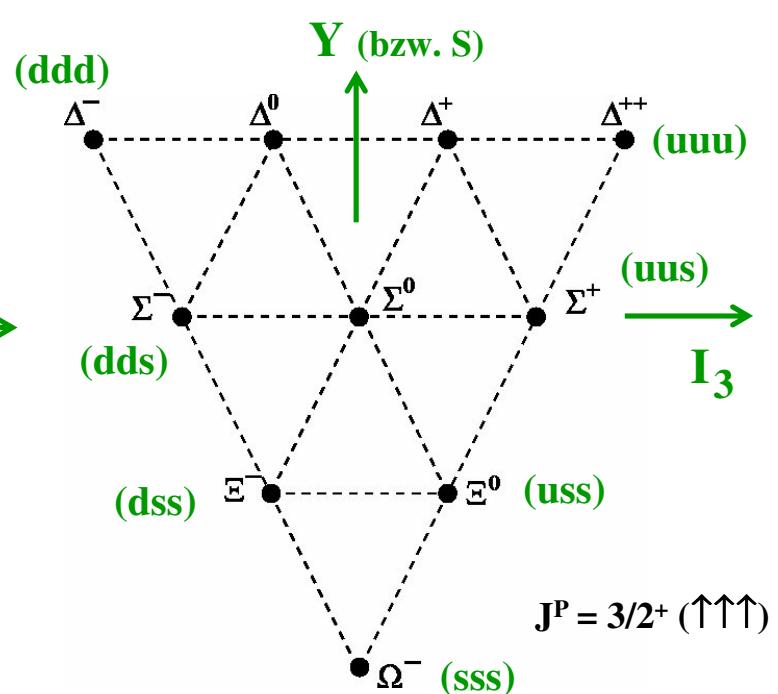
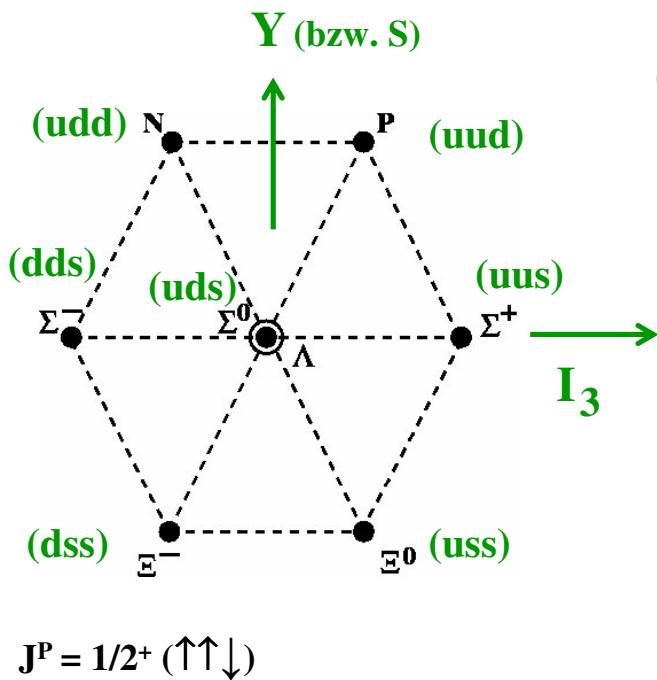
↔ effektive Valenzquarks = Konstituentenquarks

296

## Das Konstituenten-Quark-Modell

Baryonen (qqq) niedrigster Masse ( $I=0$  zwischen den Quarks):

SU(3) ↔ Gruppentheorie

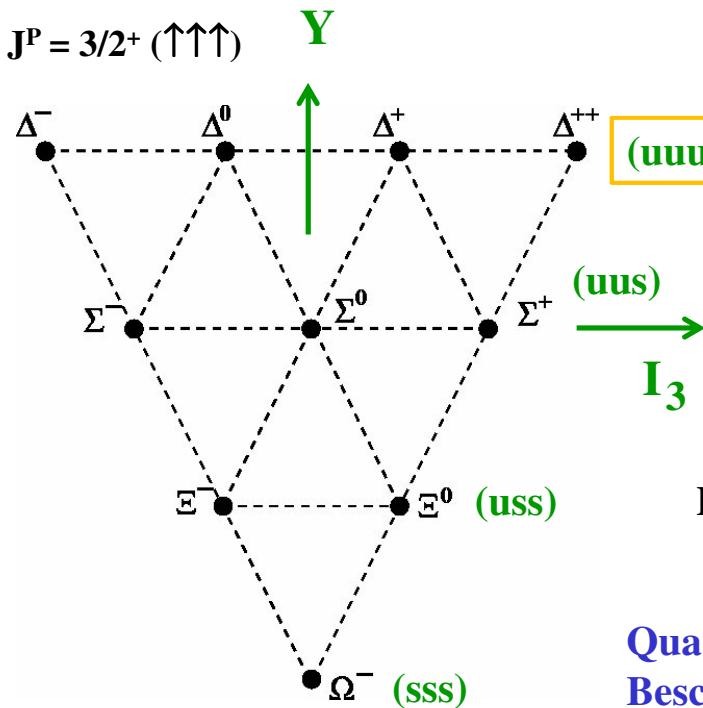


Quarkmodell sehr erfolgreich bei der Beschreibung der entdeckten Mesonen und Baryonen .... aber ....

297

# Das Konstituenten-Quark-Modell

---



um Ladung 2+ zu erhalten  
 → 3u - Quarks  
 um Spin 3/2 zu erhalten  
 → alle Quarkspins parallel

$$\Delta^{++} = |u \uparrow u \uparrow u \uparrow \rangle$$

**Problem : Pauli- Prinzip**

Quarkmodell sehr erfolgreich bei der Beschreibung der entdeckten Mesonen und Baryonen ..... aber .... Pauli-Prinzip verletzt

= Desaster für das Quarkmodell !

298

## Das Konstituenten-Quark-Modell

---

$\Delta^{++}$  : leichtestes Baryon mit  $J = 3/2$  → Vermutung  $l = 0$

**Problem:**

Wellenfunktion  $\Psi = \Psi_{\text{flavour}} \cdot \Psi_{\text{spin}} \cdot \Psi_{\text{ort}}$  alle symmetrisch

$\uparrow$   
 flavour = u,d,s,c,b,t in diesem Fall ( u u u )

als  $J=3/2$ -Fermion muß jedoch die Gesamtwellenfunktion antisymmetrisch sein

Lösung: Einführung der Farbe; drei Werte → rot, blau, grün

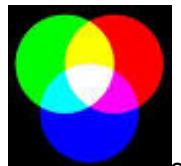
=> damit alle 3 u-Quarks unterscheidbar:

$$\Delta^{++} = |u_g \uparrow u_r \uparrow u_b \uparrow \rangle$$

$$\left. \begin{array}{c} \Psi_{\text{ges}} = \Psi_{\text{flavour}} \cdot \Psi_{\text{spin}} \cdot \Psi_{\text{ort}} \cdot \Psi_{\text{color}} \\ \text{sym.} \quad \text{sym.} \quad \text{sym.} \quad \text{antisym.} \end{array} \right\} \Rightarrow \text{antisymmetrisch !}$$

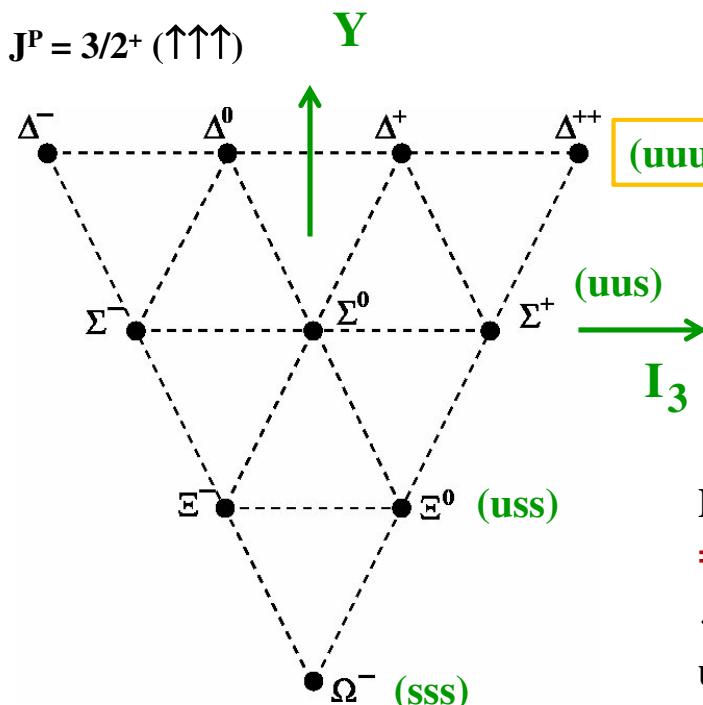
3 Farben benötigt, Summe der Farben weiß

( Antiquarks tragen antirot, antiblau und antigrün )



299

# Das Konstituenten-Quark-Modell



um Ladung 2+ zu erhalten

→ 3u - Quarks

um Spin 3/2 zu erhalten

→ alle Quarkspins parallel

$$\Delta^{++} = |\mathbf{u}_g \uparrow \mathbf{u}_r \uparrow \mathbf{u}_b \uparrow \rangle$$

Problem : Pauli- Prinzip

=> Einführen der Farbladung !

↔ Farbe erforderlich,  
um Pauli-Prinzip zu gewährleisten

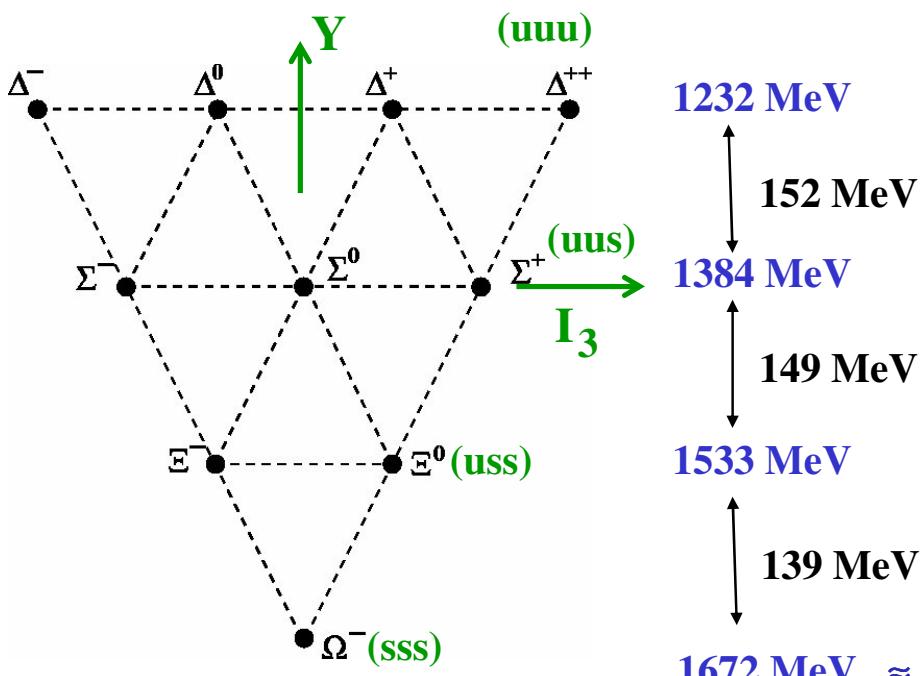
Farbe um das Quarkmodell zu retten

.... erscheint damals Vielen als nicht glaubhaft...

300

## Der Durchbruch für das Quark-Modell: Der Nachweis des $\Omega^-$

$J^P = 3/2^+ (\uparrow\uparrow\uparrow)$



The Nobel Prize in Physics 1969

*„for his contributions and discoveries concerning the classification of elementary particles and their interactions“*



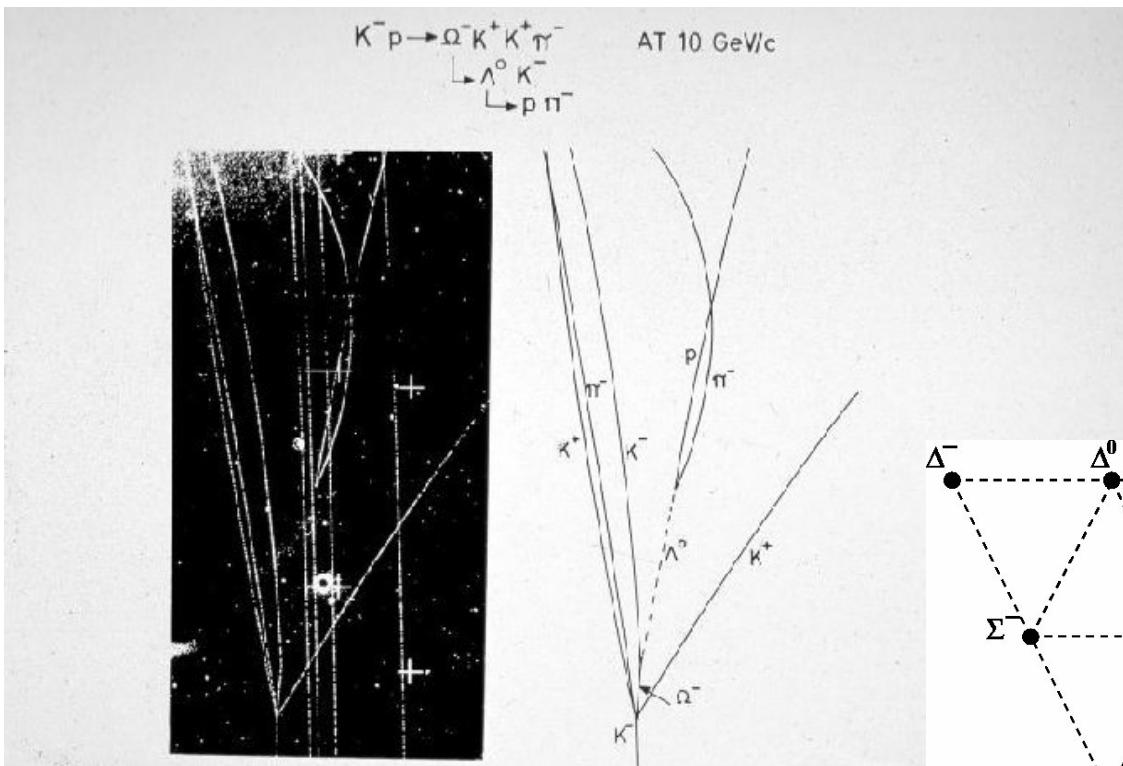
Murray  
Gell-Mann  
Caltech

Massenunterschied durch s-quarks (Masse ≈ 150 MeV)

(spezielle Massenformel verwendet ↔ Übungen)

301

# Beobachtung des $\Omega^-$



**Beobachtet in Blasenkammerexperimenten  
bei ~ der richtigen Masse (1672 MeV)**

**Großer Erfolg des Quarkmodells !!**

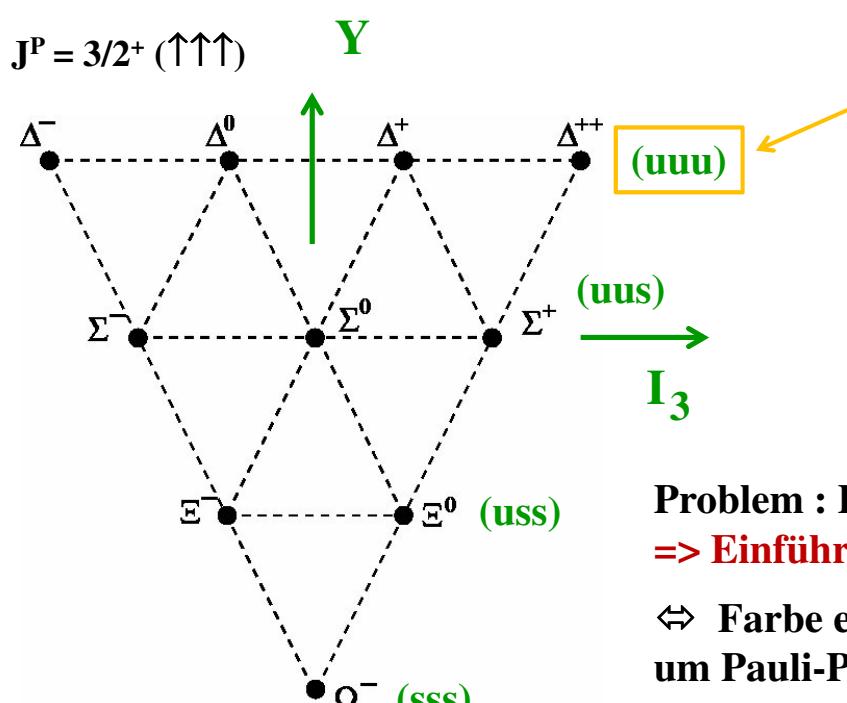
SSS

302

## Das Konstituenten-Quark-Modell

**Quarks tragen Farbe:** Farbladung entspricht elektrischer Ladung im Falle der Quantenelektrodynamik

↔ Woher wissen wir das ?



um Ladung 2+ zu erhalten  
→ 3u - Quarks

um Spin 3/2 zu erhalten  
→ alle Quarkspins parallel

$$\Delta^{++} = | \mathbf{u}_g \uparrow \mathbf{u}_r \uparrow \mathbf{u}_b \uparrow \rangle$$

**Problem : Pauli- Prinzip  
=> Einführen der Farbladung !**

↔ Farbe erforderlich,  
um Pauli-Prinzip zu gewährleisten

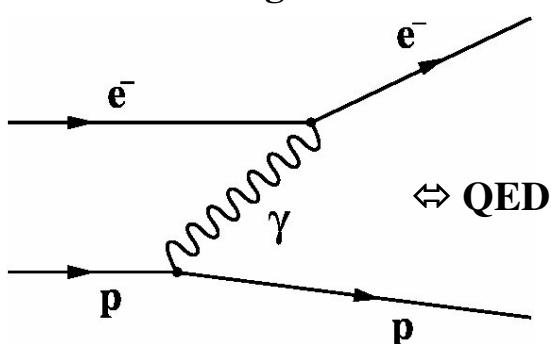
↔ weiterer exp. Beweis ?

...etwas später ....

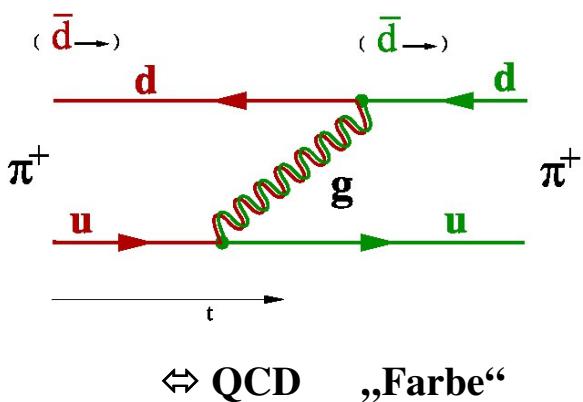
303

# Farbladung

## Elektromagnetische Wechselwirkung



## Starke Wechselwirkung



→ Wechselwirkung der Quarks untereinander mit Farbänderung verbunden.

- Gluonen tragen Farbe und Antifarbe;  $J=1^-$  masselose Feldteilchen
- Gluonen werden zwischen Quarks ausgetauscht → starke WW
- Gluonen koppeln an Farbladung

**Farbladung = Basis der Quantenchromodynamik**

304

## Farbladung - $SU(3)_{\text{color}}$

bei 3 Farben:  $\rightarrow (3 \text{ Farbe}) \cdot (3 \text{ Antifarbe})$  - Kombinationen

**Farb-Oktett:**

$$r\bar{b}, r\bar{g}, b\bar{g}, b\bar{r}, g\bar{r}, g\bar{b}, \frac{1}{\sqrt{2}} (r\bar{r} - b\bar{b}), \frac{1}{\sqrt{6}} (r\bar{r} + b\bar{b} - 2g\bar{g})$$

**Farb-Singulett:**

$$\frac{1}{\sqrt{3}} (r\bar{r} + b\bar{b} + g\bar{g}) \quad \Leftrightarrow \text{trägt nicht zur Wechselwirkung bei, da keine Farbänderung}$$

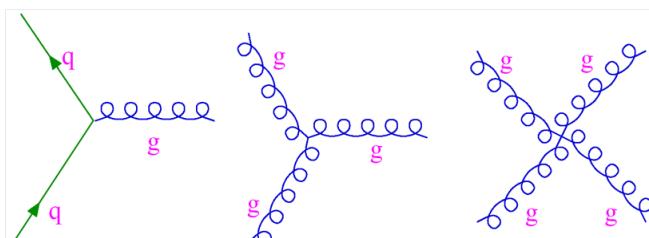
(farbneutrales Gluon  $\leftrightarrow$  würde zu einer langreichweiten Wechselwirkung führen)

⇒ 8 Gluonen

$\Leftrightarrow$  Gluonen tragen selbst Farbladung

≠ QED: Photonen tragen keine elektrische Ladung

⇒ Gluonen können auch untereinander stark wechselwirken

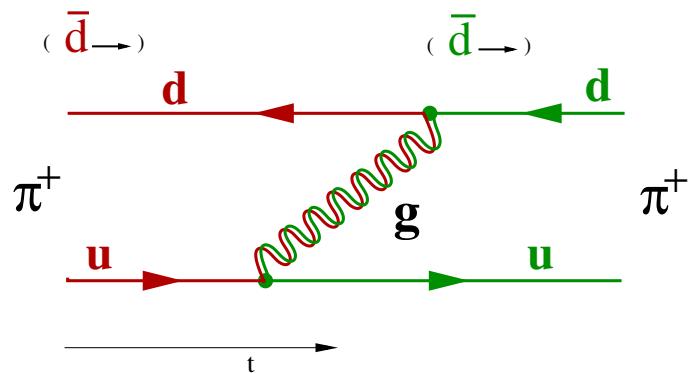


Gluonen:  $m = 0$   
aber Kraft trotzdem kurzreichweitig!

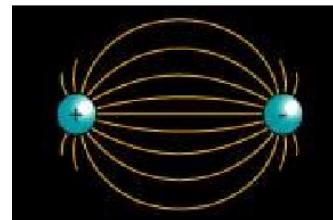
# Die starke Wechselwirkung

↔ Gluonen tragen Farbladung!

Wechselwirkung eines Quarks mit einem Antiquark im Pion:



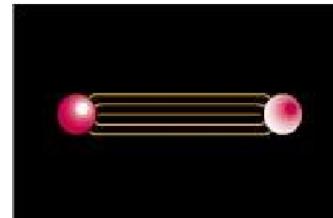
Elektromagn. WW.



Coulomb  
Feldlinien

$$F \sim 1/r^2$$

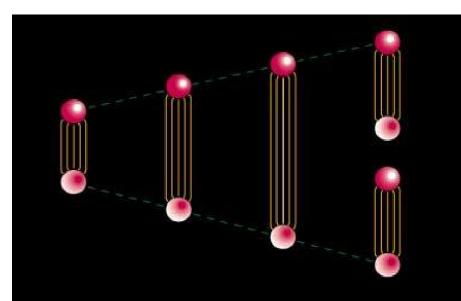
Starke WW.



“Flux tube”

$$F \sim 1/r^2 + k$$

(schwere Quarks)



↔ keine freien Quarks