

Baryonen

leichte Baryonen aus u, d, s aufgebaut: $3 \otimes 3 \otimes 3 = 27$

$$27 = 10 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 1$$

Nukleonen: N, Δ aus u, d -Quarks (wie p, n)

Hyperonen: $\Lambda, \Sigma, \Xi, \Omega$ mindestens 1 s -Quark

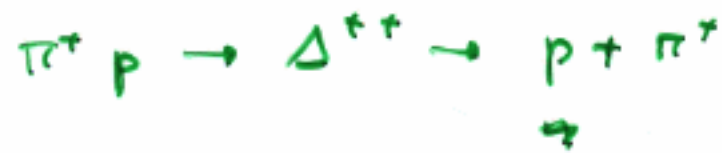
Name	N	Δ	Λ	Σ	Ξ	Ω
Isospin I	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{2}$	0	1	$\frac{1}{2}$	0
Strangeness S	0	0	-1		-2	-3
Zahl s -Quarks		0	1		2	3

Nomenklatur bei schweren Baryonen (ersetze ein s durch c/b)

z.B. $\Lambda_c = \overline{c} d u$
 $\uparrow$
 Index c

$\Xi_b = b s d$
 $\uparrow$
 Index b

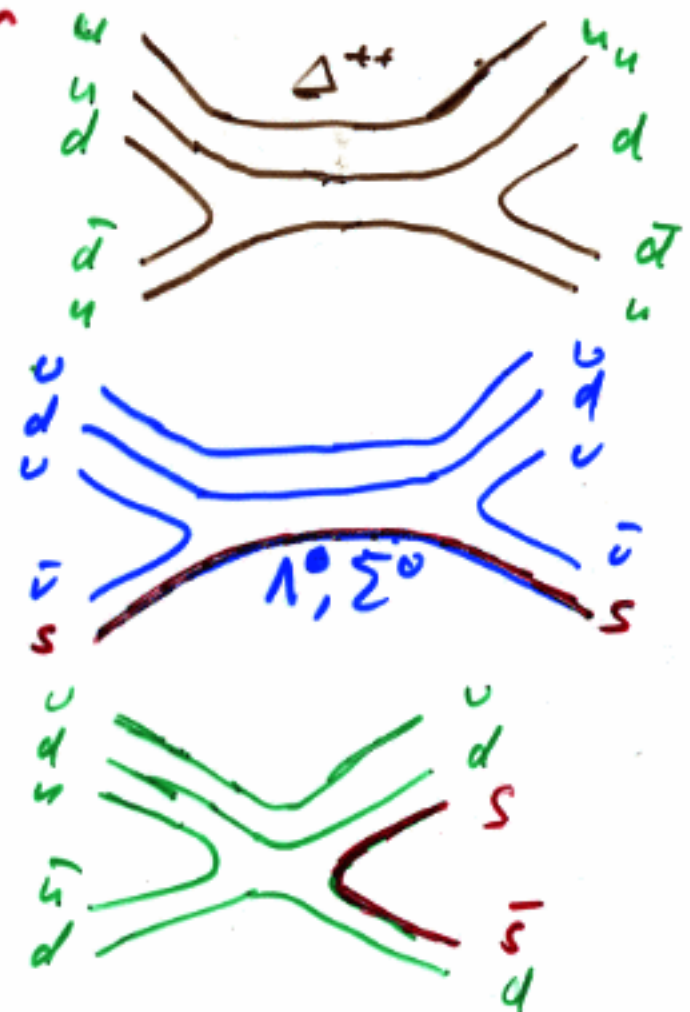
Baryon-Erzeugung:



assoziierte Produktion

Resonanzen

Formation



Formation: $ab \rightarrow (R) \rightarrow cd$

exklusiv $\Rightarrow$ m aus Strahleigenschaften bestimmbar

Produktion: $ab \rightarrow (R) X \rightarrow cd X$

inklusive $\Rightarrow$ m aus invarianter Masse der Zerfallsprodukte c und d bestimmbar

$$m_R^2 = \left(\sum_i E_i \right)^2 - \left(\sum_i \vec{p}_i \right)^2$$

Baryon-Multipletts

Grundzustände: $L=0$ aus $q = u, d, s$, keine Radialanregung

$$\Psi_{\text{total}} = \{\text{ort} \cdot \mathcal{L}_{\text{Flavour}} \cdot \chi_{\text{Spin}} \cdot \phi_{\text{Farbe}}\}$$

Baryonen = Fermionen $\Rightarrow \Psi_{\text{total}}$ antisymmetrisch unter Austausch von Quarks

χ_{Spin} : $\uparrow \uparrow \uparrow \Rightarrow$ Gesamtspin $\frac{1}{2}$ oder $\frac{3}{2}$

Dekuplett: $J^P = \frac{3}{2}^+$ χ_{Spin} symmetrisch

Wegen $L=0$ $\{\text{ort}\}$ symmetrisch

uuu $\mathcal{L}_{\text{Flavour}}$ symmetrisch

$\Rightarrow$ Farbwellenfunktion ϕ_{Farbe} total antisymmetrisch

$$\phi_{\text{Farbe}} = \frac{1}{\sqrt{6}} \sum_{\alpha=r,g,b} \sum_{\beta=r,g,b} \sum_{\gamma=r,g,b} \epsilon_{\alpha\beta\gamma} |q_{\alpha} q_{\beta} q_{\gamma}\rangle$$

$$|\Delta^{++}\rangle = |u\uparrow u\uparrow u\uparrow\rangle \quad |\Delta^+\rangle = |u\uparrow u\uparrow d\uparrow\rangle \quad |\Delta^0\rangle = |u\uparrow d\uparrow d\uparrow\rangle \quad |\Delta^-\rangle = |d\uparrow d\uparrow d\uparrow\rangle$$

$$|\Sigma^{*+}\rangle = |u\uparrow u\uparrow s\uparrow\rangle \quad |\Sigma^{*0}\rangle = |u\uparrow d\uparrow s\uparrow\rangle \quad |\Sigma^{*-}\rangle = |d\uparrow d\uparrow s\uparrow\rangle$$

$$|\Xi^{*0}\rangle = |u\uparrow s\uparrow s\uparrow\rangle \quad |\Xi^{*-}\rangle = |d\uparrow s\uparrow s\uparrow\rangle$$

$$|\Omega^-\rangle = |s\uparrow s\uparrow s\uparrow\rangle$$

Baryon - Dekuplett

in Wirklichkeit symmetrisiert:

$$|\Delta^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}} \{ |u\uparrow u\uparrow d\uparrow\rangle + |u\uparrow d\uparrow u\uparrow\rangle + |d\uparrow u\uparrow u\uparrow\rangle \}$$

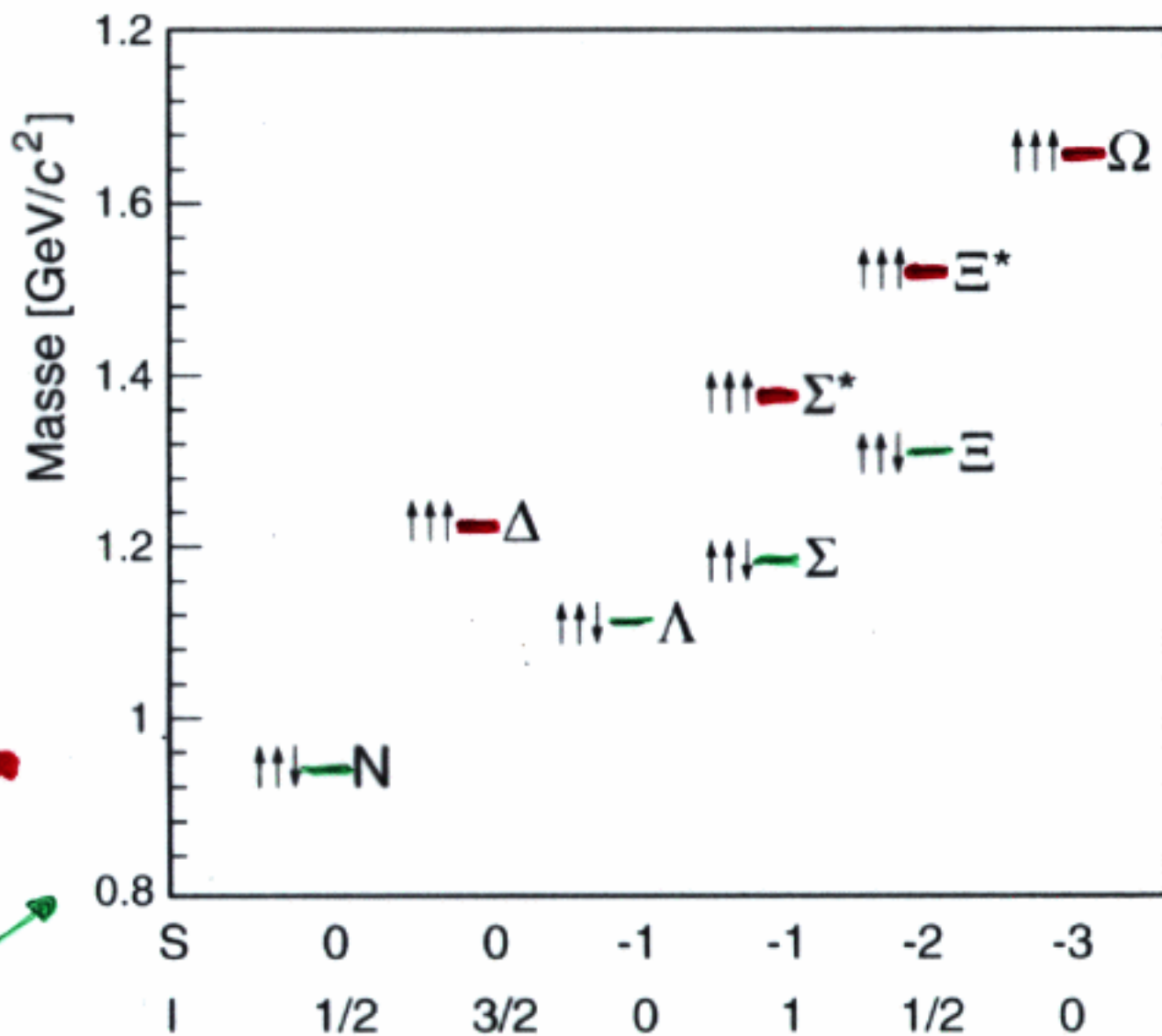
$$SU(6)\text{-Symmetrie} = SU(3)_{\text{Flavor}} \otimes SU(2)_{\text{Spin}}$$

Masse :

$J = 3/2$ größer als $J = 1/2$

Jedes s-Quark trägt zu höherer Masse bei

Spin $3/2$
Spin $1/2$



Strangeness
Isospin

Massen der Baryonen

Massen wächst mit Strangeness an (größere s-Quark-Masse)

Massen der $\frac{3}{2}^+$ -Baryonen ca 300 MeV höher als die der $\frac{1}{2}^+$
(Spin-Spin-Wechselwirkung)

$$M = \sum_i m_i + \Delta M_{SS}$$

Summe der Quark-Massen Spin-Spin-Term

Magnetische Momente

punktförmige Spin $\frac{1}{2}$ -Teilchen: $\mu_{Dirac} = \frac{e\hbar}{2M}$

$\approx$ okay für e, μ .

Für strukturloses Proton erwartet

$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2M_p}$$

Messung: $\mu_p = 2.79 \cdot \mu_N$

Hinweis auf Substruktur

Magnetische Momente im Quarkmodell

mit $L=0$:

$$\vec{\mu}_p = \vec{\mu}_u + \vec{\mu}_u + \vec{\mu}_d$$

Summe der magn.
Momente der
Konstituenten-Quarks:

$$\mu_p = \langle \vec{\mu}_p \rangle = \langle \psi_p | \vec{\mu}_p | \psi_p \rangle$$

$$\mu_{u,d} = \frac{Z_{u,d} \cdot e \hbar}{2 m_{u,d}}$$

ψ_p ist total antisymmetrische Quark-Wellenfunktion des Protons

$$\psi_{p\uparrow} = \sqrt{\frac{2}{3}} \chi_{uu}(1,1) \chi_d(\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}) - \sqrt{\frac{1}{3}} \chi_{uu}(1,0) \chi_d(\frac{1}{2}, \frac{1}{2})$$

$$p\uparrow = \begin{matrix} \uparrow & u\uparrow & u\uparrow & d\downarrow & & u\uparrow & u\downarrow & d\uparrow \\ & & & & \uparrow & & & \\ & & & & \text{Clebsch-Gordan-Koeffizienten} & & & \end{matrix} \quad \text{für} \quad 1 \oplus \frac{1}{2} \rightarrow \frac{1}{2}$$

$$\Rightarrow \mu_p = \frac{2}{3} \cdot (\mu_u + \mu_u - \mu_d) + \frac{1}{3} \mu_d$$

(analog:
 $\mu_n = \frac{4}{3} \mu_d - \frac{1}{3} \mu_u$)

Mit $\mu_u = -2 \mu_d$ (für $m_u = m_d$) gilt:

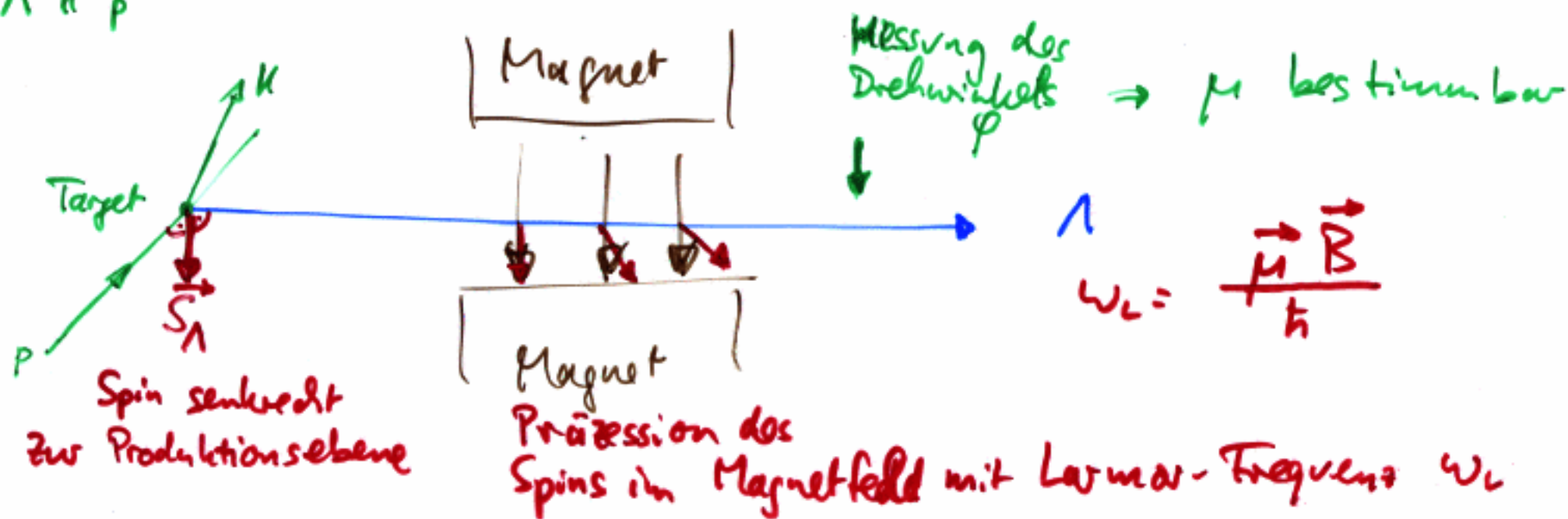
$$\mu_p = \frac{3}{2} \mu_u$$

$$\mu_n = -\mu_u$$

$$\mu_\Lambda = \mu_s$$

Messungen magnetischer Momente

- Hyperonen (z.B. Λ) werden polarisiert erzeugt (Polarisierung senkrecht zur Erzeugungsebene ist einzige Möglichkeit, ohne P zu verletzen)
- Schwacher Zerfall verletzt Parität, daher Polarisation beim Zerfall meßbar: $\Lambda^0 \rightarrow p \pi^-$: $W(\theta) \propto 1 + \alpha \cos \theta$
 $\alpha = 0.64$ (aus Interferenz zwischen $L=0$ und $L=1$ -Amplitude,
 $\Rightarrow$ Protonen werden hauptsächlich in Richtung des Λ -Spins emittiert)



	Exp μ / μ_N	Quark-Modell μ / μ_N	
P	$+2.792847386 \pm 0.000000063$	$(4\mu_u - \mu_d) / 3$	$\Rightarrow m_u = 336 \text{ MeV}$
n	$-1.91304275 \pm 0.00000045$	$(4\mu_d - \mu_u) / 3$	$\Rightarrow m_d = 336 \text{ MeV}$
Λ	-0.613 ± 0.004	μ_s	$\Rightarrow m_s = 510 \text{ MeV}$
Σ^+	$+2.458 \pm 0.010$	$(4\mu_u - \mu_s) / 3 = +2.62$	
Ξ^0	-1.250 ± 0.014	$(4\mu_s - \mu_u) / 3 = -1.43$	
Ξ^-	-2.02 ± 0.05	$3\mu_s = -1.84$	

$\Rightarrow$ Gute Übereinstimmung mit
Quark-Modell mit Konstituenten-Massen

$\Rightarrow$ gute Übereinstimmung mit Spektroskopie-Daten

Konstituenten-Quark = Current-Quark + Gluon + See-Quark-Wolke
(5^{th} MeV) (330 MeV) 15-

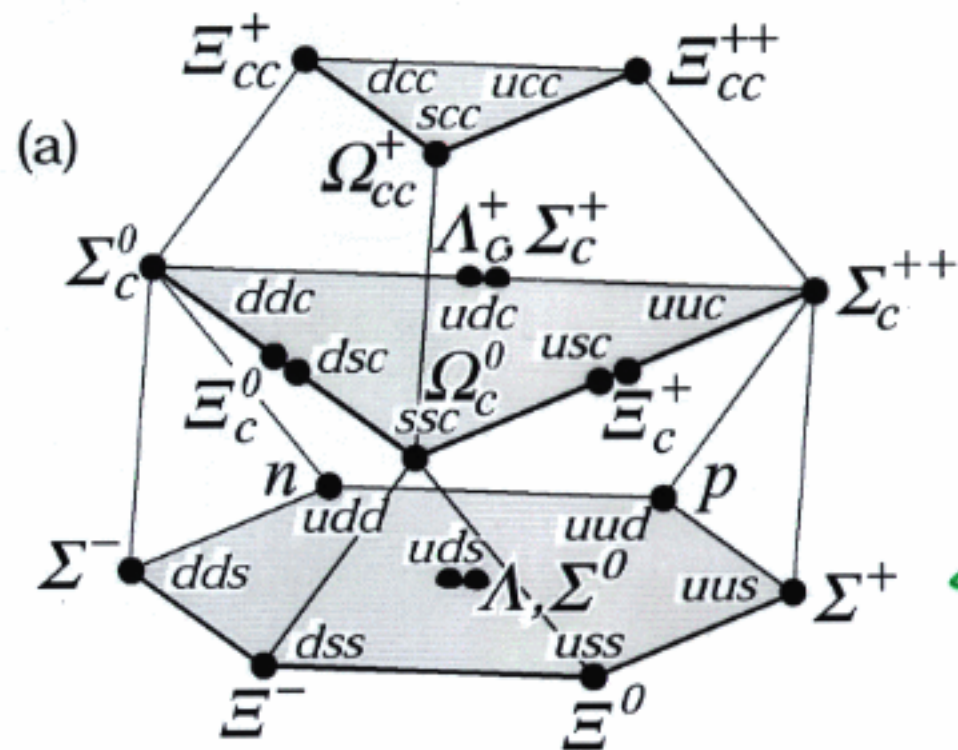
Schwere Baryonen

2c

AC

DL

(a)



analog fir
b-Bayonet

leichtes
Daktyloft

Flavour $SU(4)$

u, d, s, c - Quarks

leichtes Objekt

3c

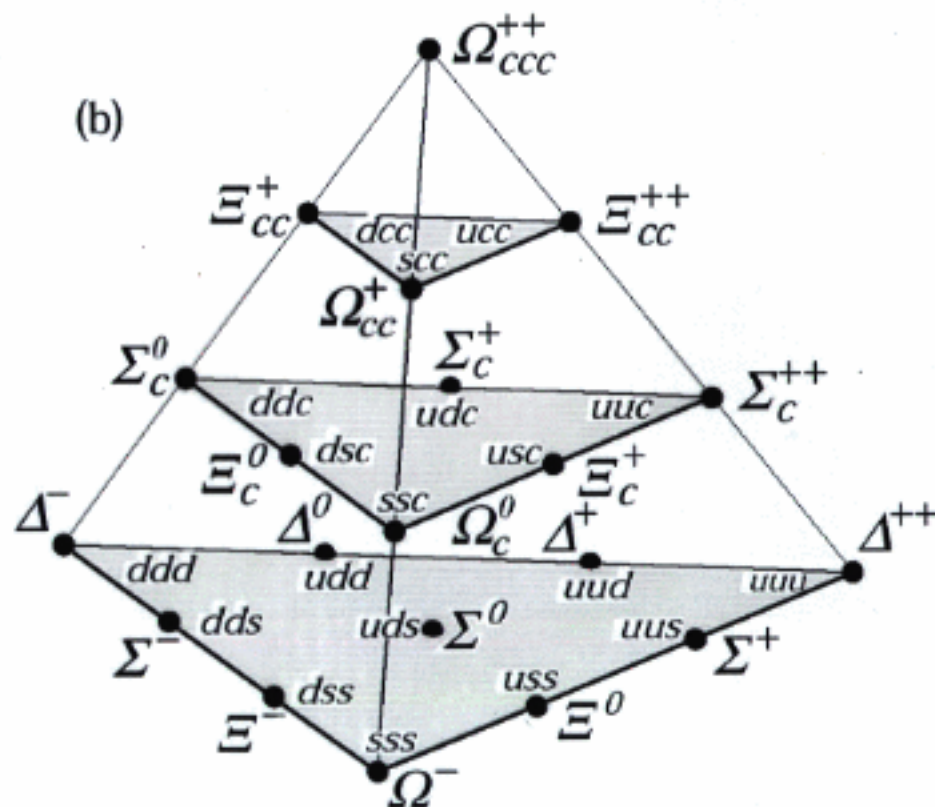
2 c

Ac

02

15-10

(b)



Weitere Hadronen ?!

Mesonen : $q\bar{q}$

Baryonen : qqq

Antibaryonen : $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$

QCD: Jeder farblose Zustand kann existieren
(SU(3)-Gruppentheorie)

$$\textcircled{3} \times \textcircled{\bar{3}} = \textcircled{1} + \textcircled{8}$$

↑
Mesonen

$$\textcircled{3} \times \textcircled{3} \times \textcircled{3} = \textcircled{1} + \textcircled{8} + \textcircled{8} + \textcircled{10}$$

↑
Baryonen

Auch „Glueballs“ : gg

„Hybride“ : $q\bar{q}g$

„Tetraquarks“ : $q\bar{q}q\bar{q}$

„Pentaquarks“ : $qqq q\bar{q}$

$$\textcircled{8} \times \textcircled{8} = \textcircled{1} + \dots$$

$$\textcircled{3} \times \textcircled{\bar{3}} \times \textcircled{8} = \textcircled{1} + \dots$$

$$\textcircled{3} \times \textcircled{\bar{3}} \times \textcircled{3} \times \textcircled{\bar{3}} = \textcircled{1} + \dots$$

$$\textcircled{3} \times \textcircled{3} \times \textcircled{3} \times \textcircled{3} \times \textcircled{\bar{3}} = \textcircled{1} + \dots$$

„Exotische Hadronen“ nicht 100% -ig etabliert

Kandidaten:

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 $K\bar{K}$ -Moleküle, oder doch nur
 $s\bar{s}$ -Mesonen mit starker Kopplung am $K\bar{K}$ -Zerfallskanal?

$X(3870)$

Belle, CDF (EKP); $D^*\bar{D}$ -Molekül?

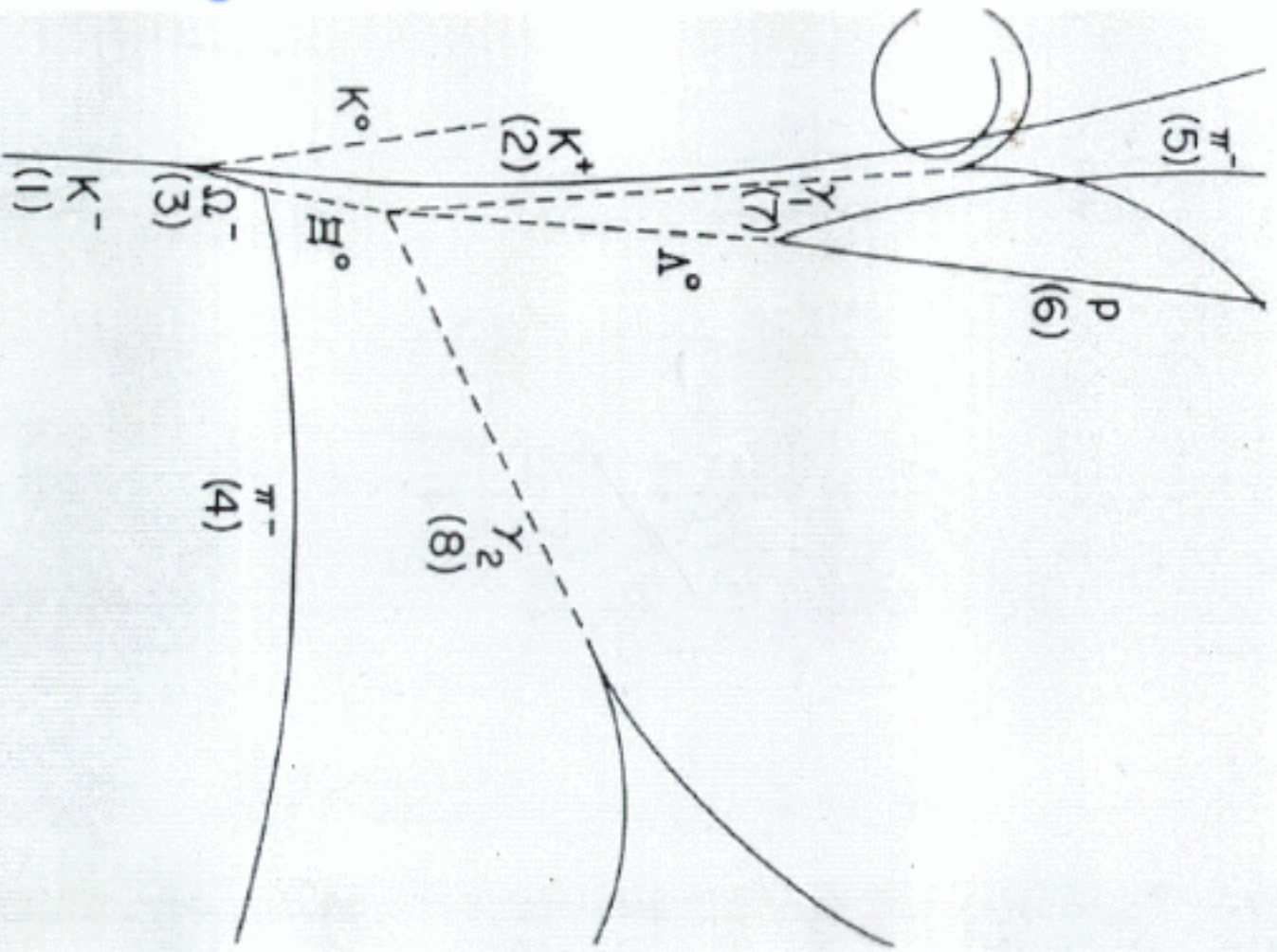
Pentaquarks:

von > 9 Experimenten „gesehen“, von vielen nicht

PDG 2004: *** - Status

aber ich glaube das nicht. Siehe auch Kommentar
in PDG 2004.

JLAB 2005: Exp. wiederholt mit viel höherer Statistik: kein Signal!



↑ Strangeness

3s

$K^- \rightarrow p \rightarrow \Omega^-$
 $\bar{u}s \rightarrow v\bar{d} \rightarrow s\bar{s}s$

$K^+ \rightarrow u\bar{s}$
 $K^0 \rightarrow d\bar{s}$

2s

$\tau = 0.8 \cdot 10^{-10} s$

Λ_b

Ξ^0

$u\bar{s}s \rightarrow \bar{u}d$

1s

$\tau = 2.9 \cdot 10^{-10} s$

Λ_b

$\Lambda \rightarrow \pi^0$

$u\bar{d}s \rightarrow u\bar{u}, d\bar{d}$

0s

$\tau = 2.6 \cdot 10^{-10} s$

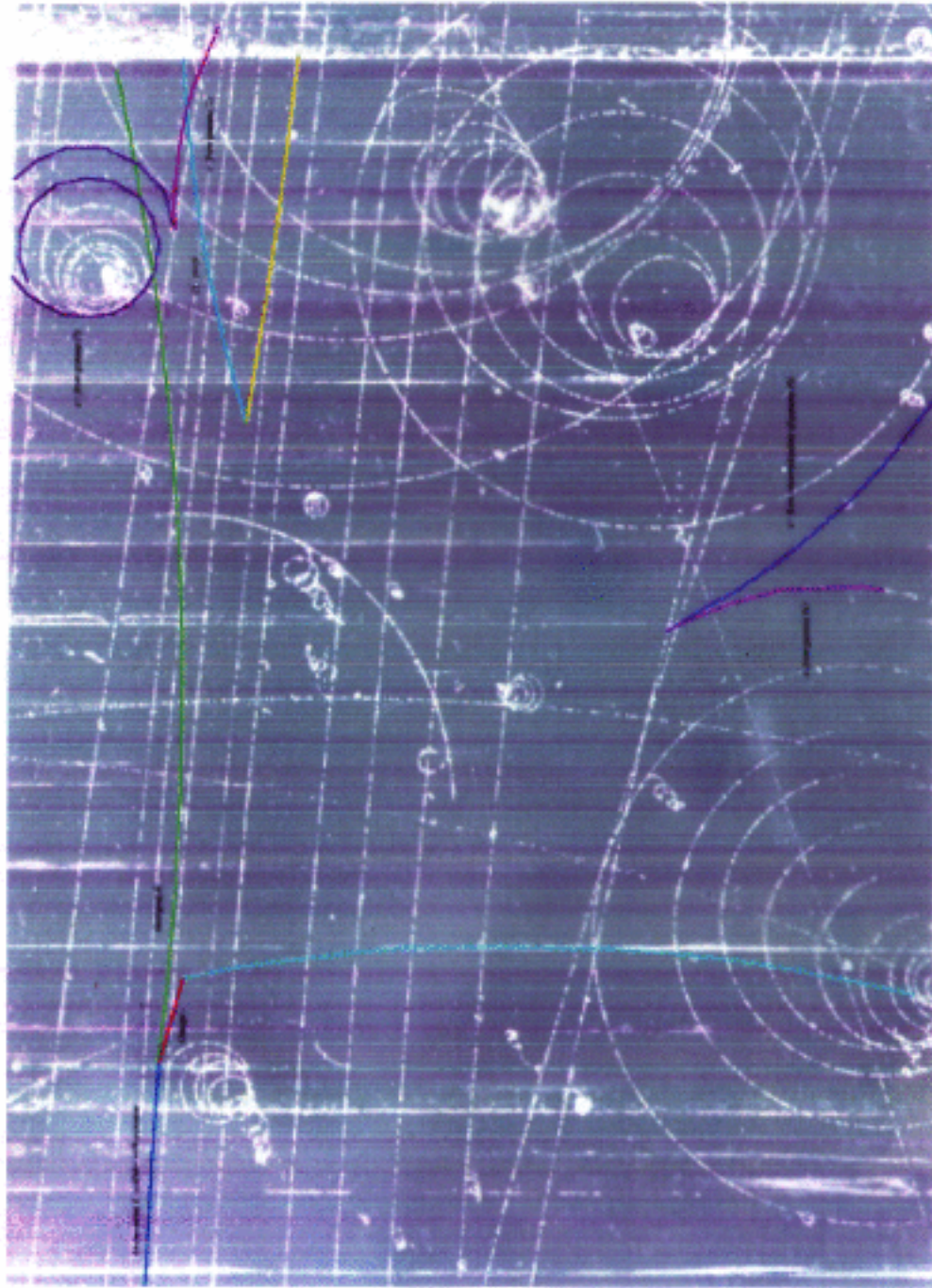
Λ_b

$p \rightarrow \pi^-$

$u\bar{u}d \rightarrow \bar{u}d$

Erzeugung:
 starke $u\bar{u}$

Zerfallsprodukte:
 schwache W :
 ein S -Quark
 zur Zeit verloren.
 del



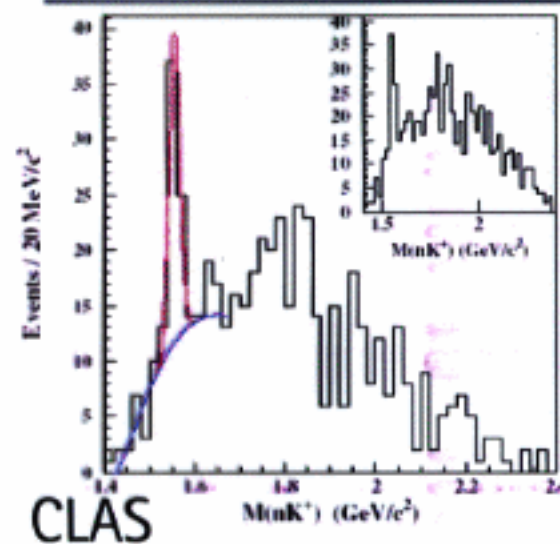
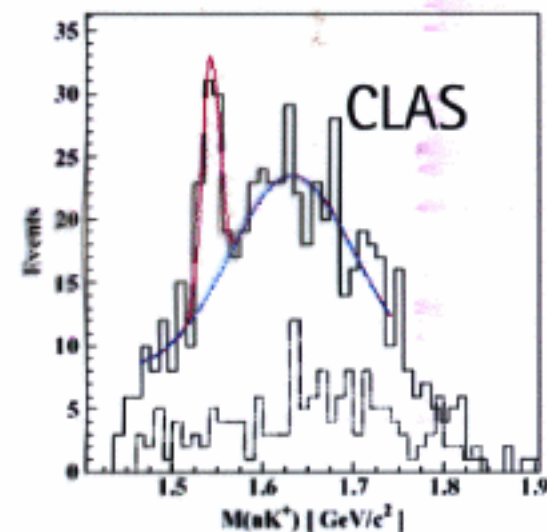
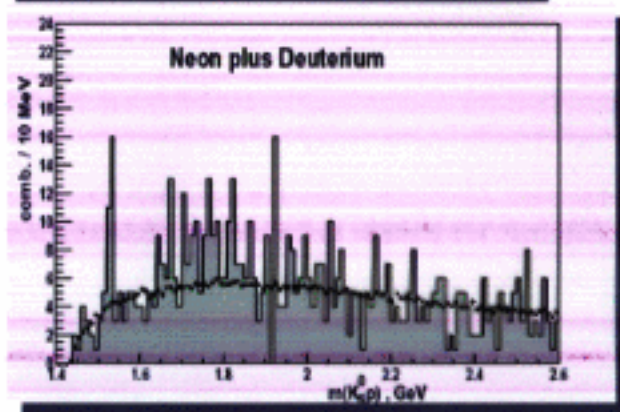
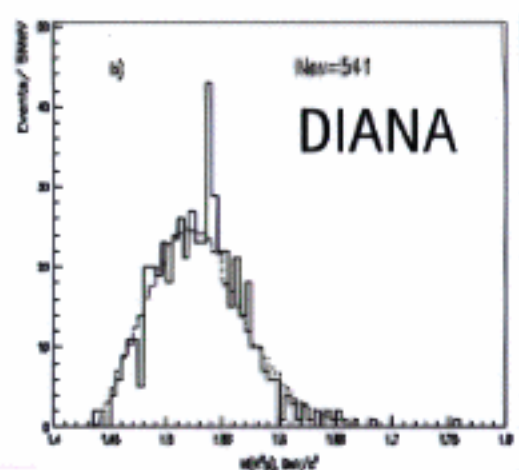
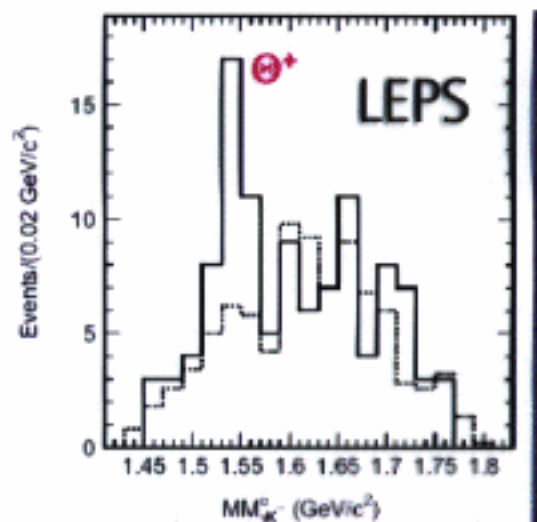
Entdeckung des
 Ω^- - Baryons

SSS

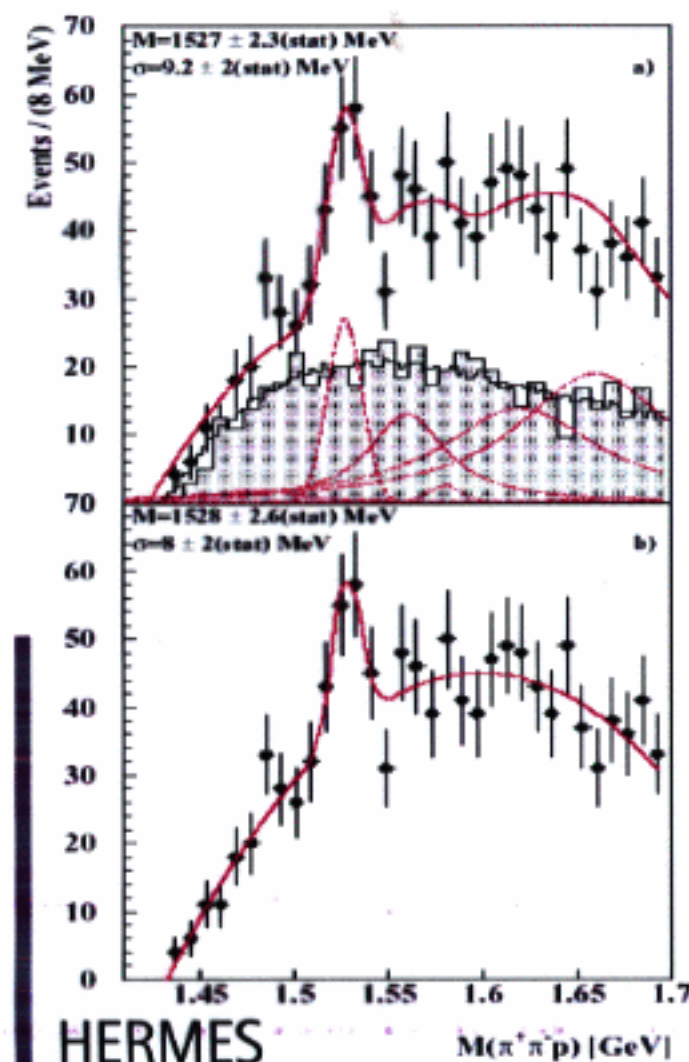
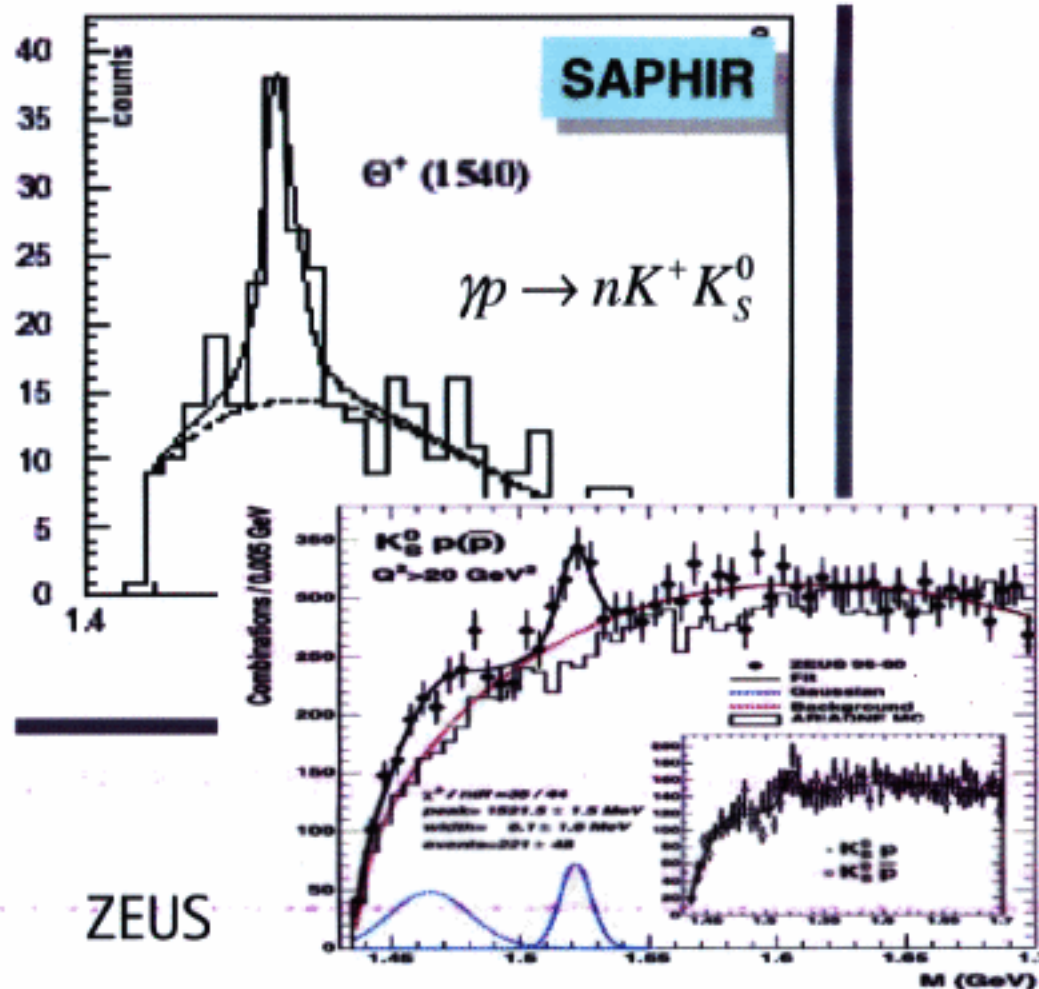
1964

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

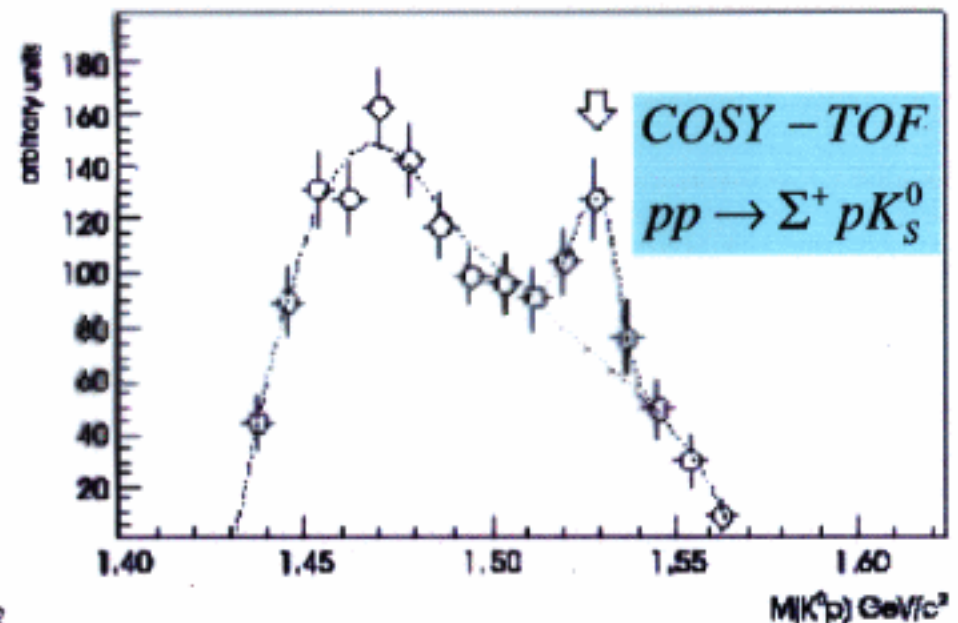
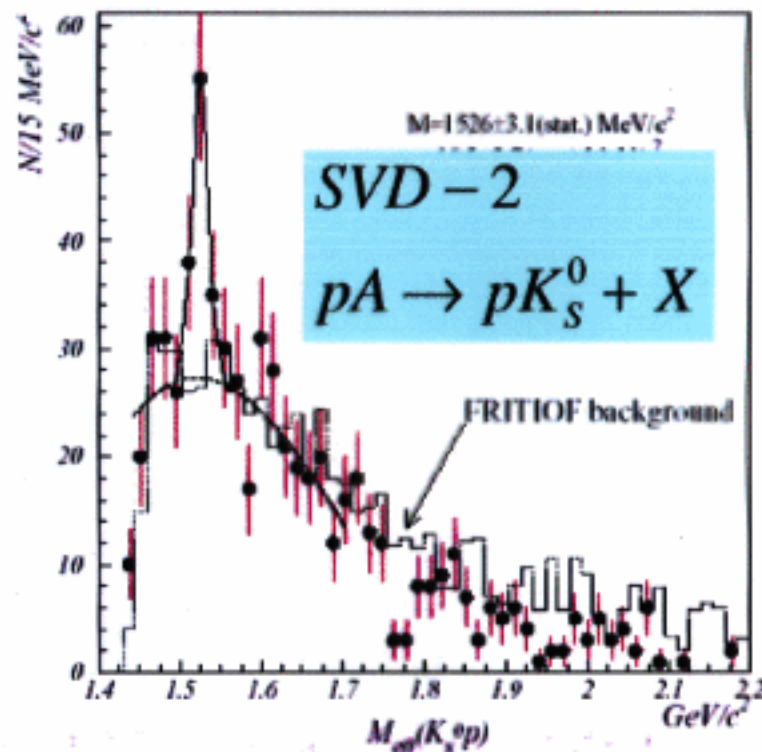
Existieren Pentaquarks?



Existieren Pentaquarks?

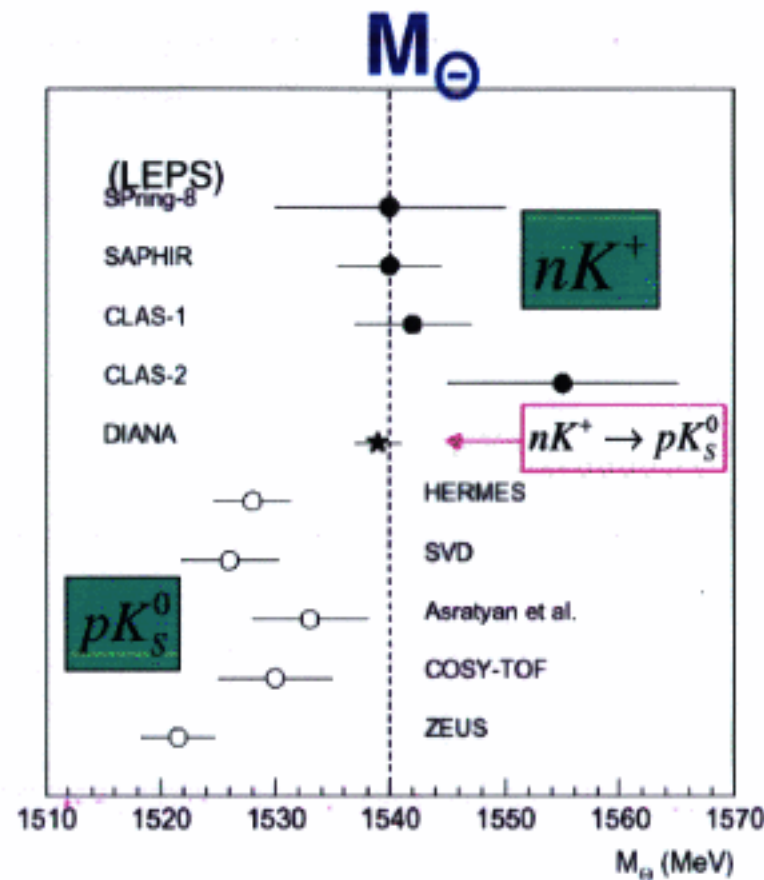


Existieren Pentaquarks?

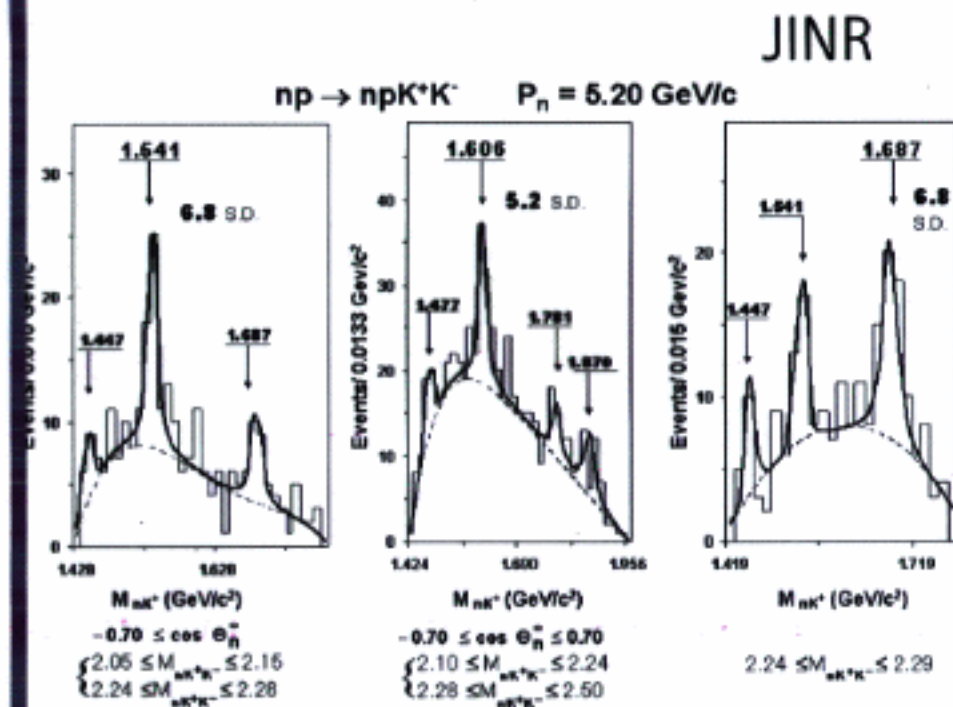


PDG 2004: Status ***

Aber... Welche Masse?



Wie viele Pentaquarks?



Viele negative Suchen...

Trotz intensiver Suche nichts gefunden in großen Experimenten:

ALEPH, DELPHI, L3, OPAL, CDF, BELLE, BABAR, BES,
H1 im ZEUS-Kanal, ZEUS im H1-Kanal

(z.T. aber große Signale für etablierte Zustände)

Achtung Bayes-Theorem: Prior-Wahrscheinlichkeit hat sich geändert!

Früher hätte man sich in exotischen Kanälen sehr
sicher sein müssen, dass es sich nicht um eine
statistische Fluktuation handelt. Für Pentaquarks
gibt es sehr viele neue Kanäle, Massen nicht bekannt:
Kombinatorik!

Meine Meinung: sehr kritisch! $P_{\text{subjektiv}}(\text{Pentaquark existiert}) < 50\%$

$P_{\text{subjektiv}}(\text{alle behaupteten Pentaquarks existieren}) < 1\%$