

Kerne und Teilchen

Moderne Experimentalphysik III
Vorlesung 15

MICHAEL FEINDT
INSTITUT FÜR EXPERIMENTELLE KERNPHYSIK

Baryonen

Baryonen

- leichte Baryonen sind aus u, d, s aufgebaut:

$$3 \otimes 3 \otimes 3 = 27 = 10 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 1$$

- Nukleonen: N, Δ aus u, d – Quarks (wie p, n)
- Hyperonen: Λ , Σ , Ξ , Ω mindestens 1 s – Quark

Name	N	Δ	Λ	Σ	Ξ	Ω
Isospin I	1/2	3/2	0	1	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.: $\Lambda_c = c d u$ $\Xi_b = b s d$

$\uparrow$
Index c
 $\uparrow$
Index b

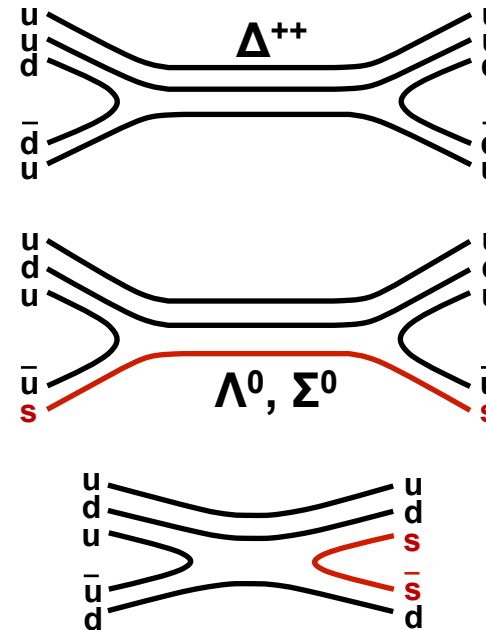
Baryon – Erzeugung: Formationsexperimente



$\Delta^{++}, \Lambda^0, \Sigma^0$: Resonanzen



assoziierte Produktion



Formation: $a b \rightarrow R \rightarrow c d$

exklusiv $\Rightarrow$ m aus Strahleigenschaften bestimmbar

Produktion: $a b \rightarrow R X \rightarrow cd X$

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

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

Baryonen - Multipletts

Grundzustände: $L = 0$ **keine Radialanregung**

hier nur für $q = u, d, s$:

$$\psi_{total} = \xi_{Ort} \cdot \zeta_{Flavour} \cdot \chi_{Spin} \cdot \phi_{Farbe}$$

Baryonen = Fermionen $\Leftrightarrow \Psi_{total}$ ist antisymmetrisch unter Austausch von Quarks

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

Dekuplett: $J^P = 3/2^+$

$L=0$

uuu

$\Rightarrow$ Farbwellenfunktion

χ_{Spin}	symmetrisch
ξ_{Ort}	symmetrisch
$\zeta_{Flavour}$	symmetrisch
Φ_{Farbe}	total antisymmetrisch

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

Baryon - Dekuplett

10 verschiedene 3-Quark-Zustände mit $J^P=3/2^+$ und **total antisymm. Wellenfkt:**

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

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

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

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

Wellenfunktion ist in Wirklichkeit **symmetrisiert:**

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

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

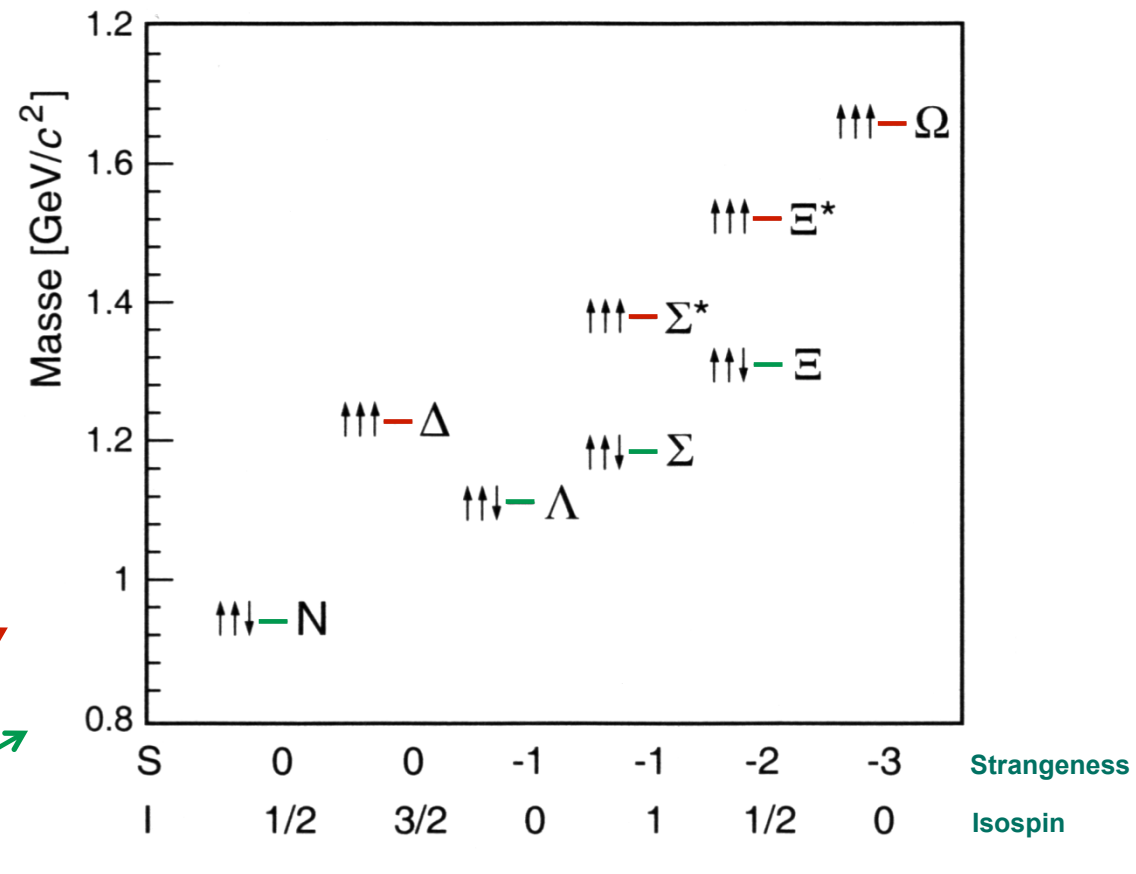
Baryon – Massen

Masse:

$J=3/2$ größer als $J=1/2$

Jedes s-Quark trägt zu höherer Masse bei

Spin 3/2 →
Spin 1/2 →



Quelle: Povh, Teilchen und Kerne

Baryon – Massen

Massen:

- Masse wächst mit Strangeness an (größere s-Quark – Masse)
- Massen der $3/2^+$ – Baryonen ca 300 MeV höher als die der $1/2^+$ (Spin – Spin – Wechselwirkung)

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

Summe der Quark-Massen
 Spin-Spin – Term

Magnetische Momente:

- punktförmige Spin - $1/2$ – Teilchen: $\mu_{Dirac} = \frac{e\hbar}{2M} \approx \text{okay für e.m.}$

- Für strukturloses Proton erwarte: $\mu_N = \frac{e\hbar}{2M_p}$

- Messung: $\mu_p = 2.79 \cdot \mu_N$ Hinweis auf Substruktur

Magnetische Momente im Quarkmodell

mit $L=0$:

$$\begin{aligned}\vec{\mu}_p &= \vec{\mu}_u + \vec{\mu}_u + \vec{\mu}_d \\ \mu_p &= \langle \vec{\mu}_p \rangle = \langle \psi_p | \vec{\mu}_p | \psi_p \rangle\end{aligned}$$

Summe der magn. Momente der Konstituenten – Quarks: $\mu_{u,d} = \frac{z_{u,d} \cdot e \hbar}{2 m_{u,d}}$

ψ ist total antisymmetrische Quark – Wellenfunktion des Protons

Clebbsch – Gordan – Koeffizienten für $1 \oplus \frac{1}{2} \rightarrow \frac{1}{2}$

$$\begin{aligned}\psi_{p\uparrow} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \chi_{uu}(1,1) \chi_d(\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}) - \sqrt{\frac{1}{3}} \chi_{uu}(1,0) \chi_d(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}) \\ p \uparrow &= \quad \quad \quad \textcolor{red}{u\uparrow u\uparrow} \quad \quad \textcolor{red}{d\downarrow} \quad \quad \quad \textcolor{red}{u\uparrow u\downarrow} \quad \quad \textcolor{red}{d\uparrow}\end{aligned}$$

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

analog: $\mu_n = 4/3 \mu_d - 1/3 \mu_u$

mit $\mu_u = -2 \mu_d$ (für $m_u = m_d$) gilt: $\mu_p = 3/2 \mu_u$ $\mu_n = -\mu_u$ $\mu_\Lambda = \mu_s$

Messungen magnetischer Momente

- Hyperonen (z.B. Λ) werden polarisiert erzeugt (Polarisierung senkrecht zur Erzeugungsebene ist die einzige Möglichkeit, ohne P zu verletzen)
- Schwacher Zerfall verletzt Parität, daher Polarisation beim Zerfall meßbar:

$$\Lambda^0 \rightarrow p \pi^-$$

:

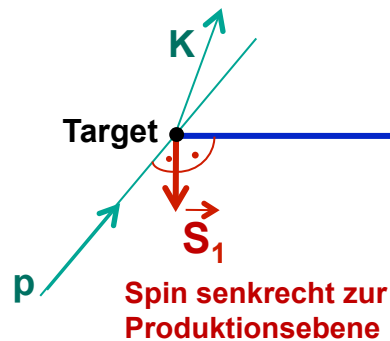
$$W(\theta) \propto 1 + \alpha \cdot \cos \theta$$

$$\alpha = 0.64 \quad (\text{aus Interferenz zwischen } L=0 \text{ und } L=1 - \text{Amplitude})$$

$\Rightarrow$ Protonen werden hauptsächlich in Richtung des Λ – Spins emittiert

$$p p \rightarrow \Lambda K^+ p$$

:



Magnet

Magnet

Präzession des Spins im Magnetfeld mit Larmorfrequenz ω_L

Messung des Drehwinkels φ
 $\Rightarrow \mu$ bestimmbar

$$\omega_L = \frac{\vec{\mu} \vec{B}}{\hbar}$$

Messungen magnetischer Momente -2-

	Exp. μ / μ_N	Quark – Modell μ / μ_N
p	+ 2.792 847 386 $\pm$ 0.000 000 063	$(4 \mu_u - \mu_d) / 3 \Rightarrow \mu_u = 336 \text{ MeV}$
n	- 1.913 042 75 $\pm$ 0.000 000 45	$(4 \mu_d - \mu_u) / 3 \Rightarrow \mu_d = 336 \text{ MeV}$
Λ	- 0.613 $\pm$ 0.004	$\mu_s \Rightarrow \mu_s = 510 \text{ MeV}$
Σ^+	+ 2.458 $\pm$ 0.010	$(4 \mu_u - \mu_s) / 3 = + 2.67$
Ξ^0	- 1.250 $\pm$ 0.014	$(4 \mu_s - \mu_u) / 3 = - 1.43$
Ω^-	- 2,02 $\pm$ 0.05	$3 \mu_s = - 1.84$

$\Rightarrow$ gute Übereinstimmung mit Quark – Modell mit Konstituenten – Massen

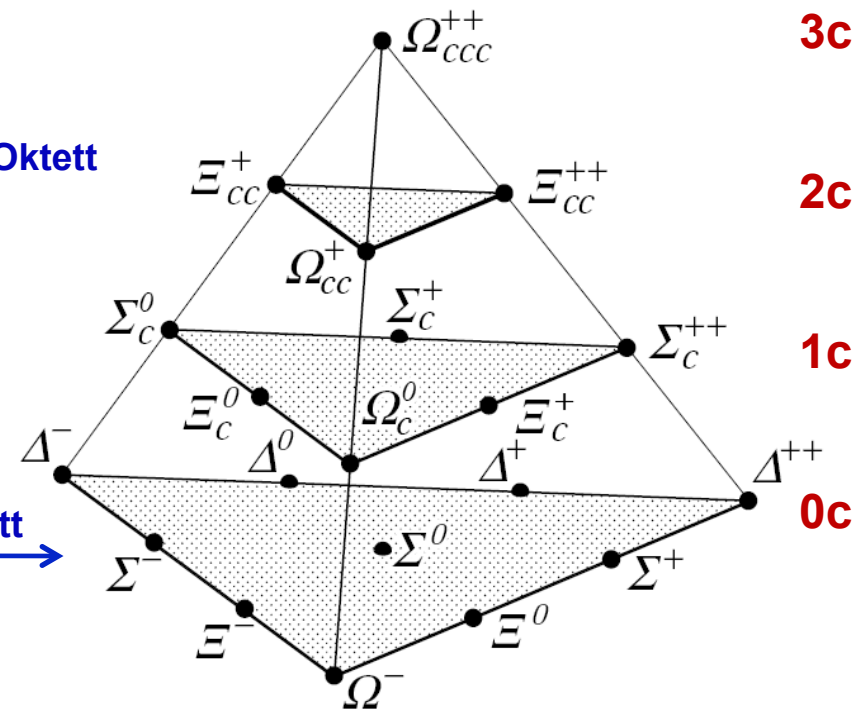
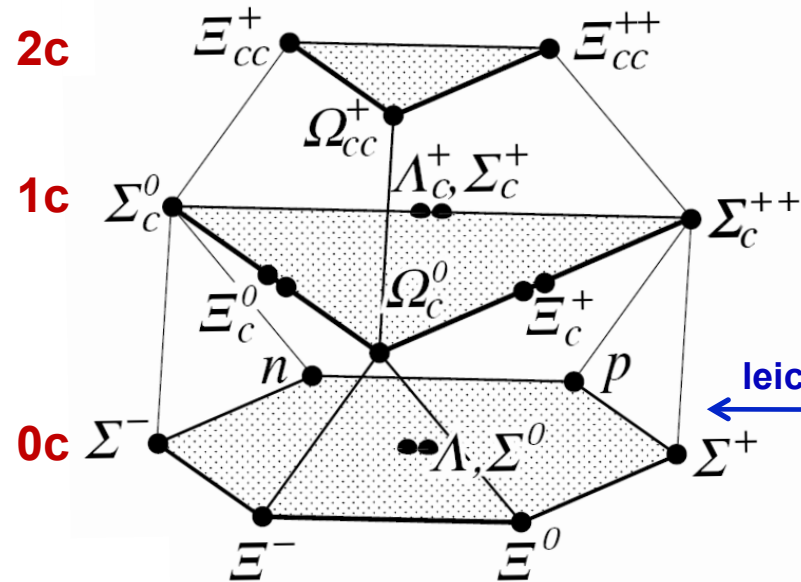
$\Rightarrow$ gute Übereinstimmung mit Spektroskopie – Daten

$$\text{Konstituenten-Quark} = \text{Current-Quark} + \underbrace{\text{Gluon} + \text{See-Quark-Wolke}}_{330 \text{ MeV}}$$

$\downarrow$
5 MeV

Schwere Baryonen

Flavour SU(4) : u, d, s, c – Quarks



... analog für b – Baryonen ...

Weitere Hadronen ?!

- Mesonen $q \bar{q}$
- Baryonen $q q q$
- Antibaryonen $\bar{q} \bar{q} \bar{q}$

QCD: jeder farblose Zustand kann existieren (SU(3) – Gruppentheorie)

$$\textcircled{3} \times \textcircled{3} = \textcircled{1}_{\text{Mesonen}} + \textcircled{8}$$

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

⇒ auch

- **"Glueballs"** : $g g$ $\textcircled{8} \times \textcircled{8} = \textcircled{1} + \dots$
- **"Hybride"** : $q \bar{q} q$ $\textcircled{3} \times \bar{\textcircled{3}} \times \textcircled{8} = \textcircled{1} + \dots$
- **"Tetraquarks"** : $q \bar{q} q \bar{q}$ $\textcircled{3} \times \bar{\textcircled{3}} \times \textcircled{3} \times \bar{\textcircled{3}} = \textcircled{1} + \dots$
- **"Pentaquarks"** : $q q q q \bar{q}$ $\textcircled{3} \times \textcircled{3} \times \textcircled{3} \times \textcircled{3} \times \bar{\textcircled{3}} = \textcircled{1} + \dots$

"Exotische Hadronen"

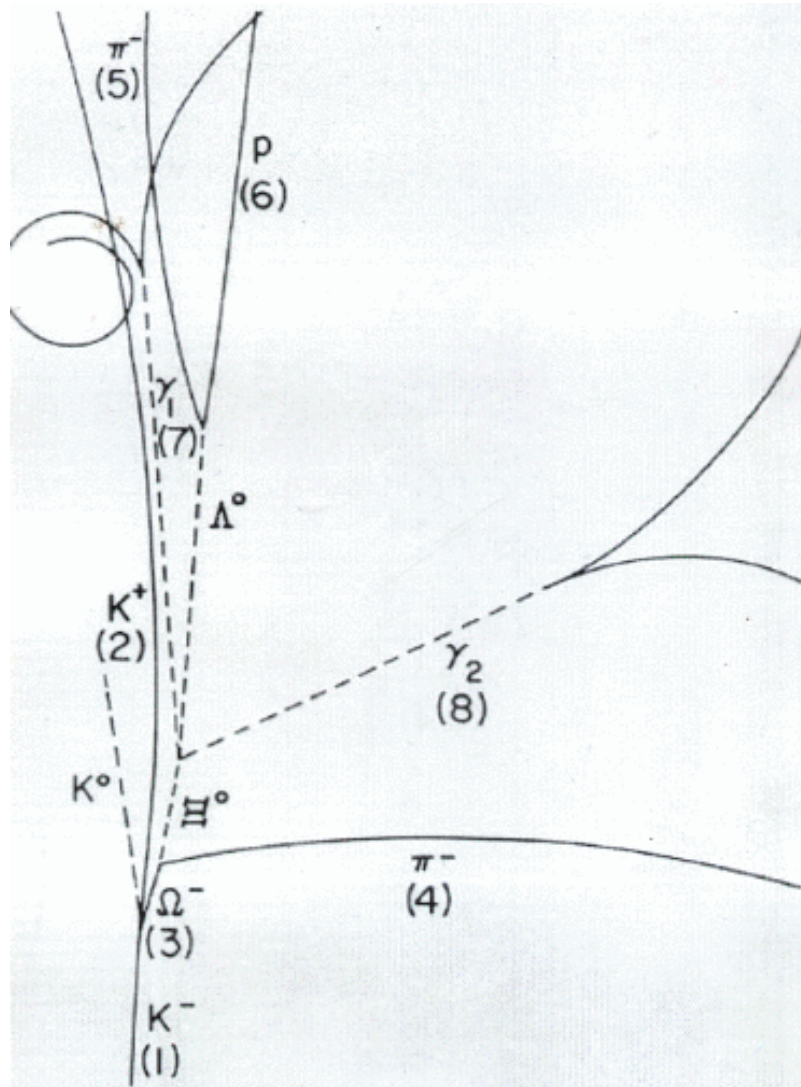
"Exotische Hadronen" sind nicht 100%ig etabliert.

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 $K\bar{K}$ – Moleküle, oder doch nur $s\bar{s}$ – Mesonen mit starker Kopplung an $K\bar{K}$ – Zerfallskanal?
- **X (3870)**
Belle, CPF (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!**

Ω^- – Baryon

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



Strangeness

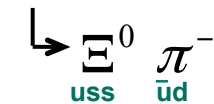
Zerfallskaskade

3s



2s

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



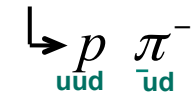
1s

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



0s

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



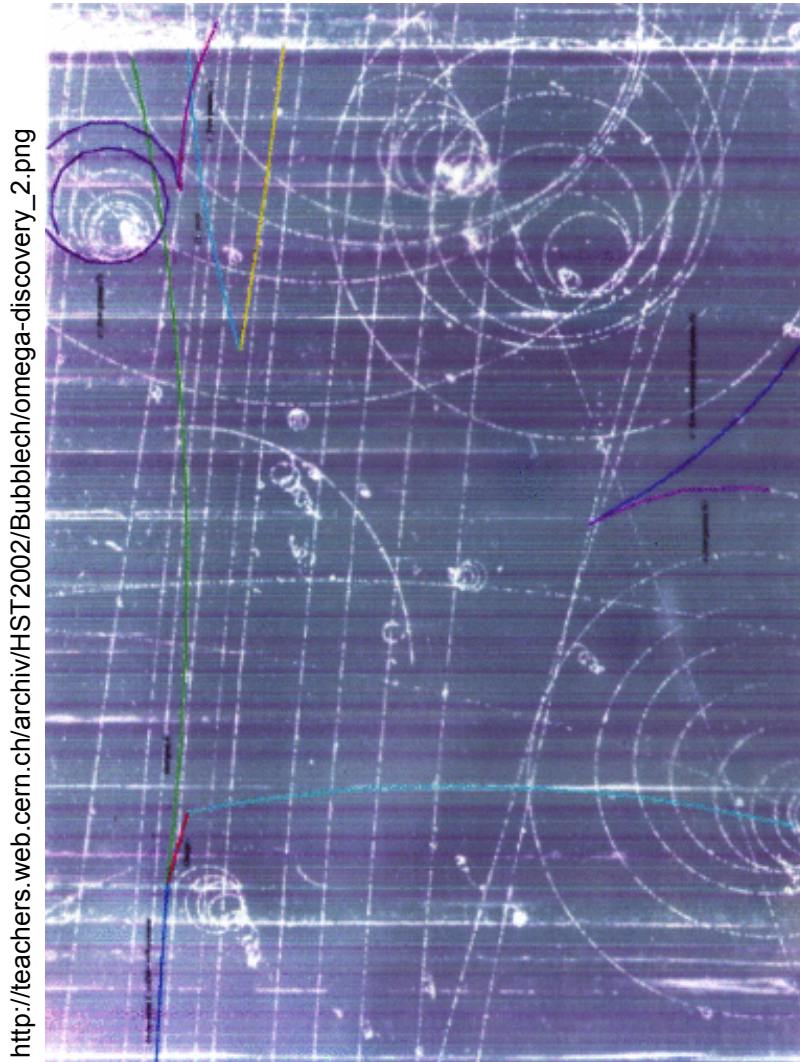
Erzeugung:

starke WW

Zerfallskaskade:

schwache WW,
ein s-Quark nach dem
anderen umwandeln

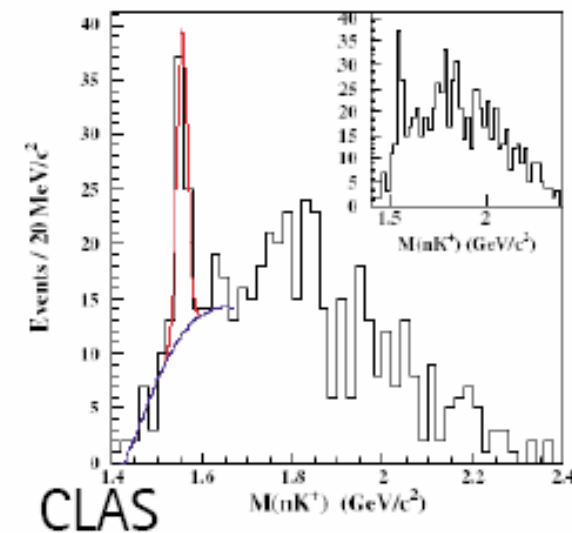
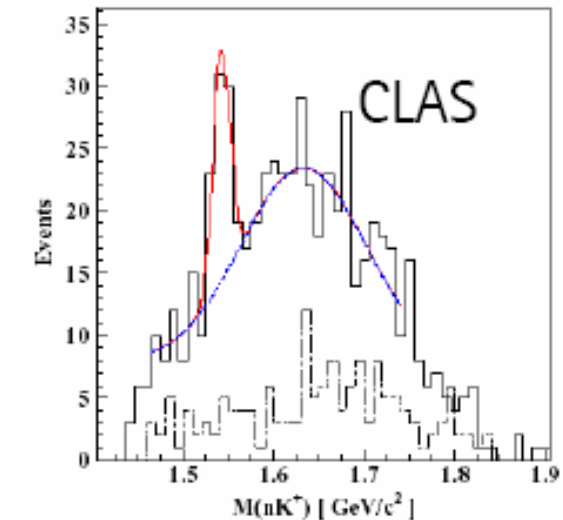
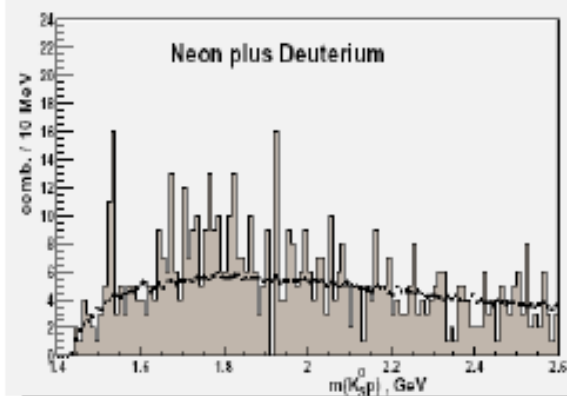
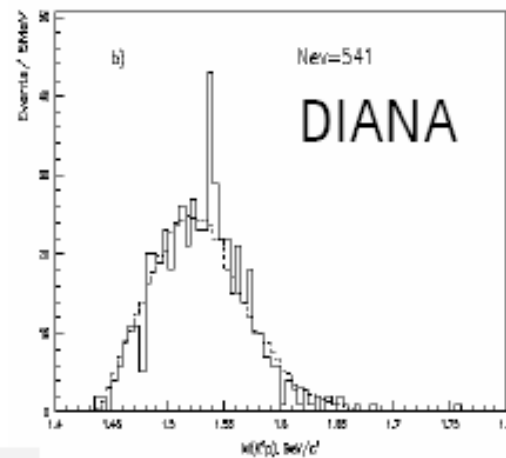
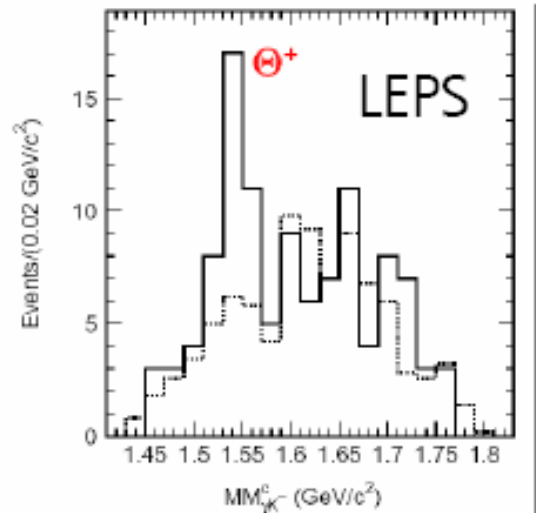
Entdeckung des Ω^- – Baryons (sss)



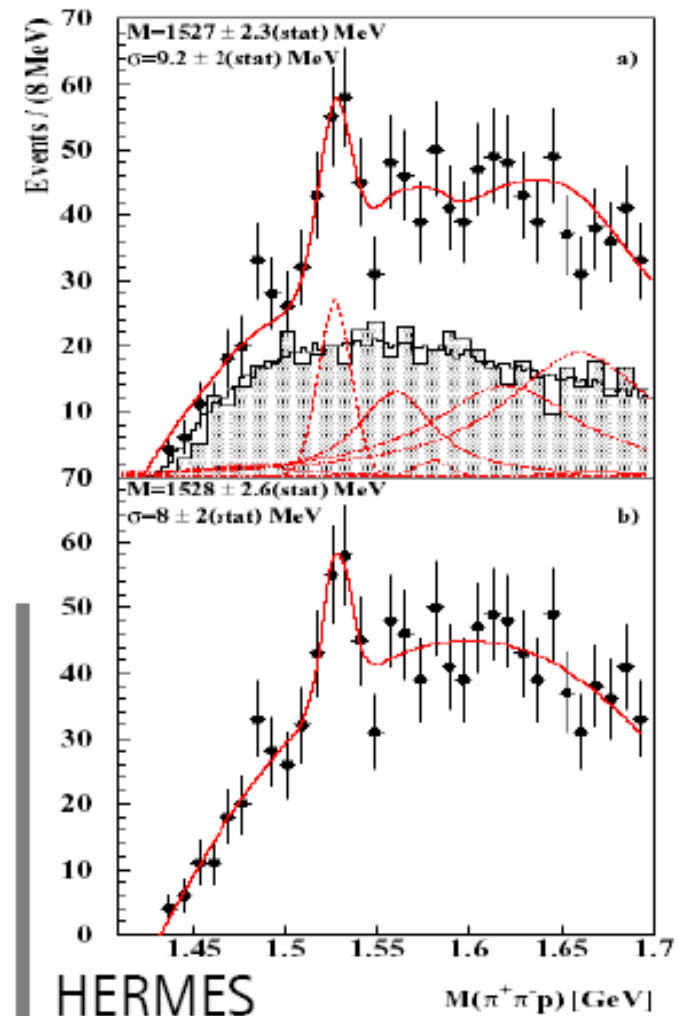
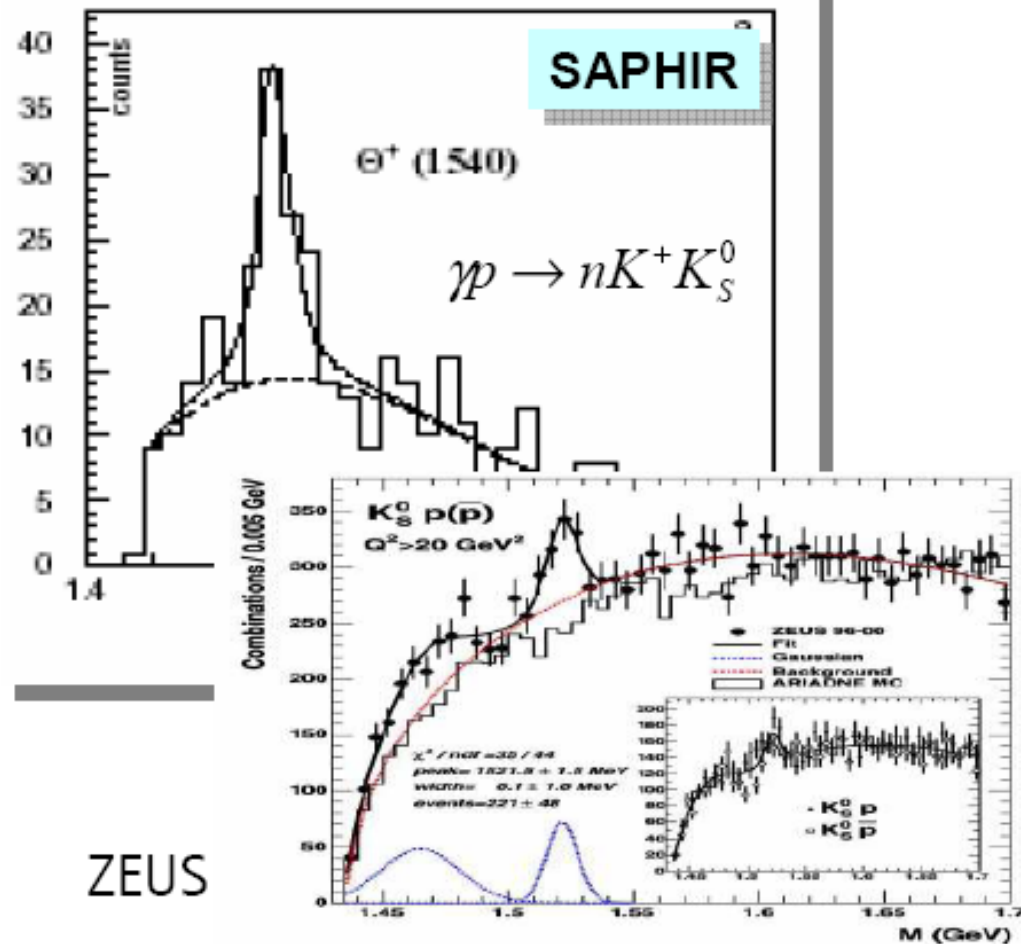
1964:

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

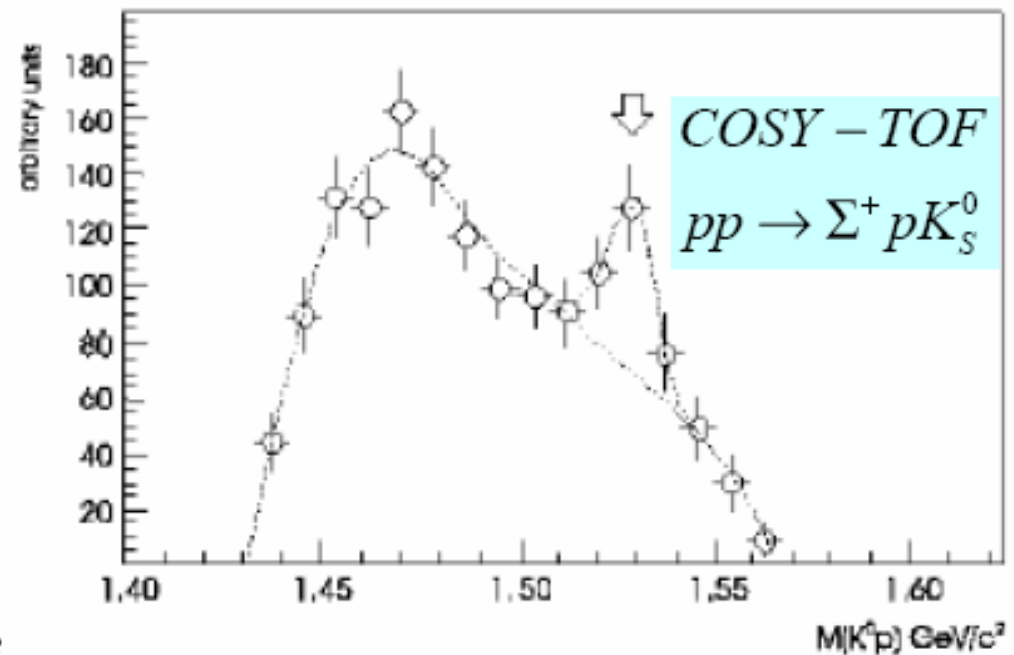
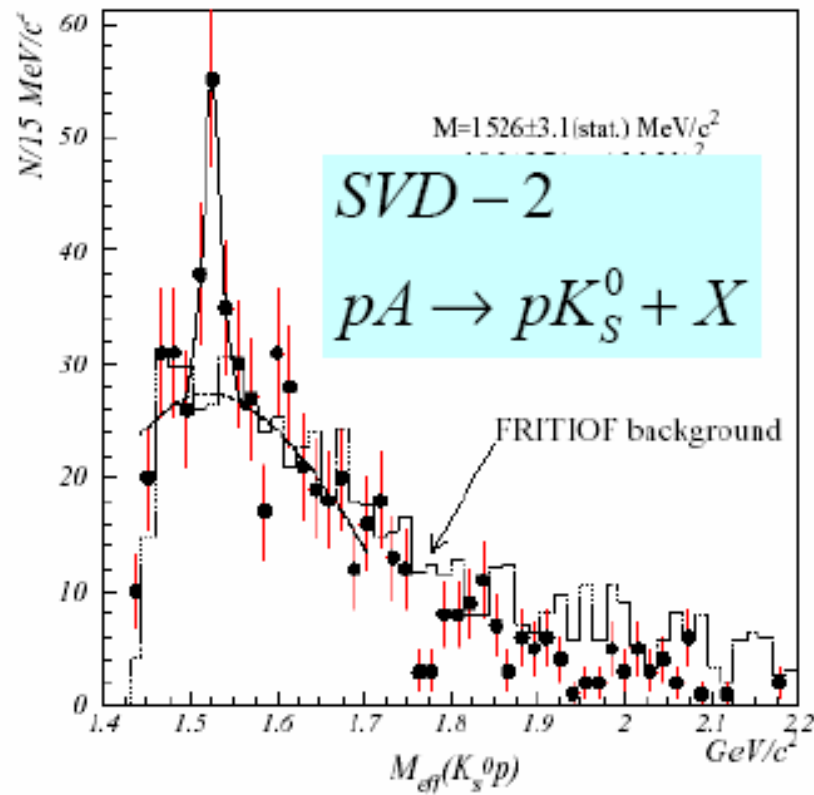
Existieren Pentaquarks?



Existieren Pentaquarks?

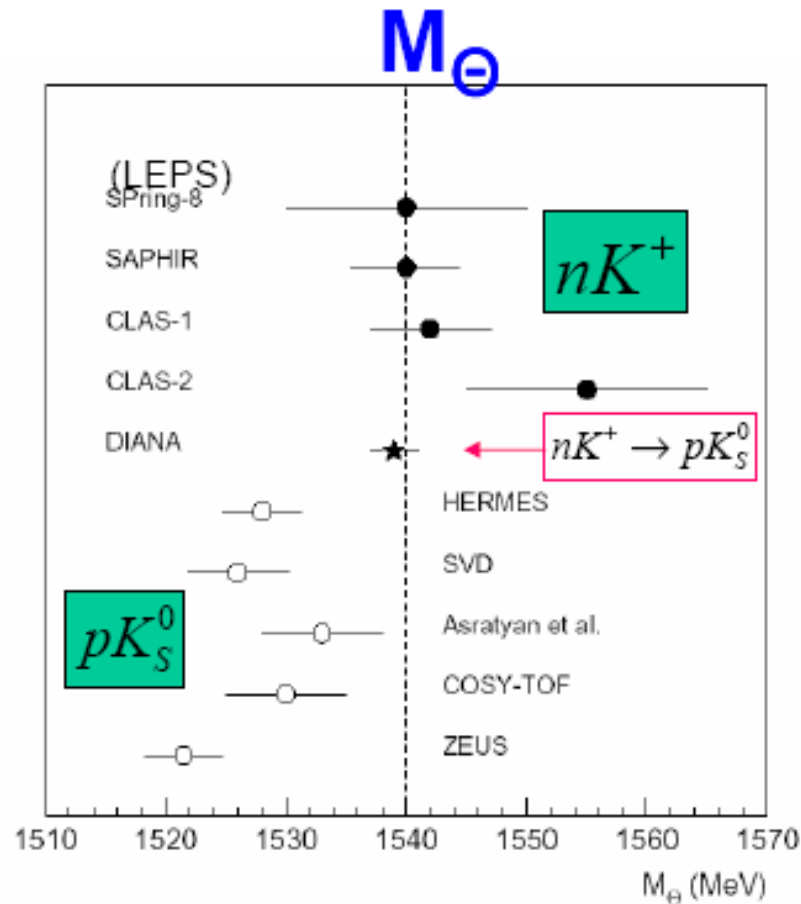


Existieren Pentaquarks?



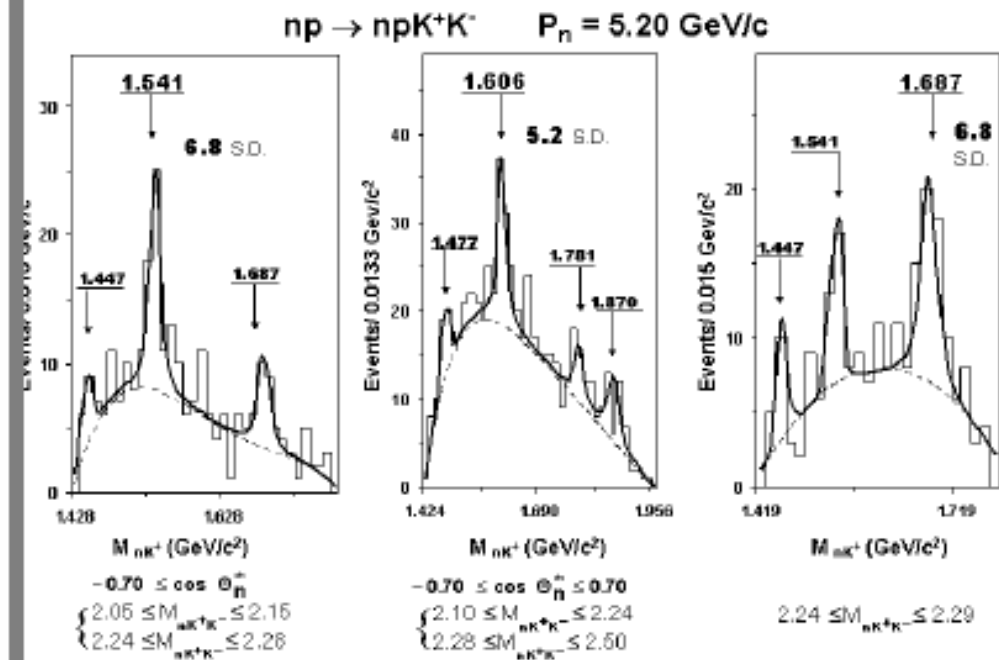
PDG 2004: Status ***

Aber... Welche Masse?



Wie viele
Pentaquarks?

JINR



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!

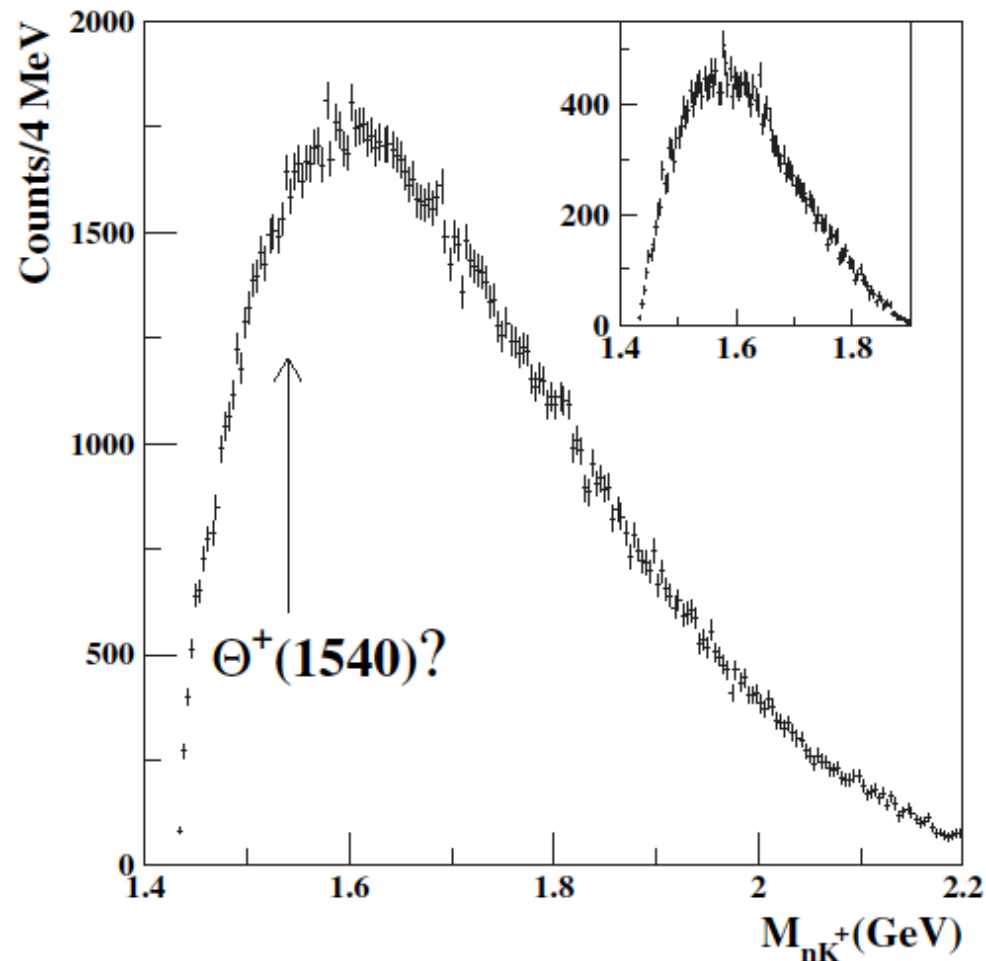
Meine Meinung: sehr kritisch!

$P_{\text{subjektiv}}(\text{Pentaquark existiert}) < 50\%$

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

CLAS 2006: Extra-Hochstatistik Experiment: findet das Theta nicht mehr....

**Pentaquarks
so gut wie tot..**



B-Fabriken Belle, BaBar und CDF II finden aber neue exotische Teilchen X,Y,Z...

Mittlerweile viele ..zig sigma Signifikanz

(wichtige Beiträge aus unserer Gruppe)

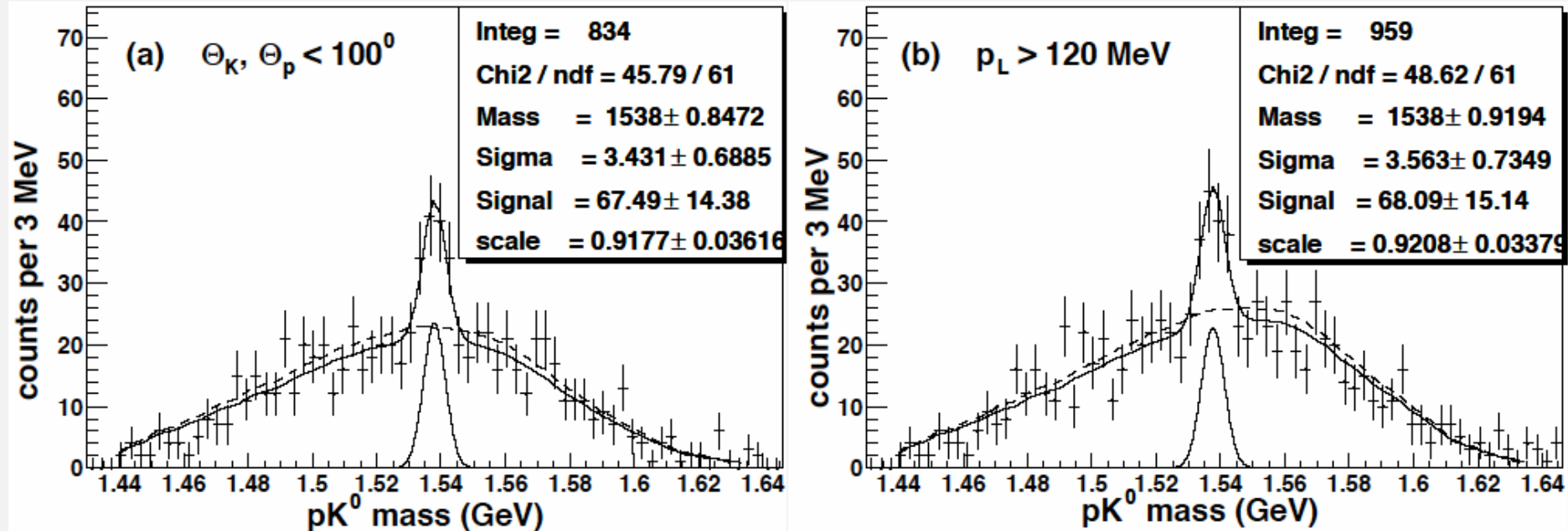
Interpretation: 4-Quark-Zustände:

**c cquer q qquer b bquer q qquer
oder DD-Moleküle BB-Moleküle**

es gibt etwas jenseits von Mesonen und Baryonen

Die Unsicherheit geht weiter...

DIANA 2013 : 5.5 sigma



Existiert das Pentaquark doch?