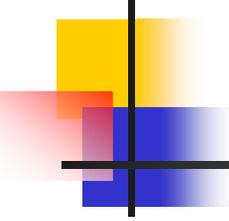


Anregungsspektrum des Nukleons

Seminarvortrag zum Studentexperiment an ELSA

14.11.2007

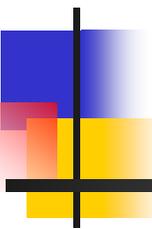
Dominic Krönung

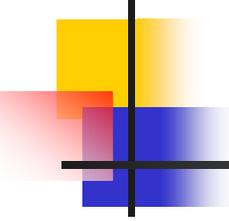


Übersicht

- Erste Hinweise auf innere Struktur des Nukleons
- Resonanzen in $\pi^+ p \rightarrow \pi^+ p$
- Quarkmodelle zur Beschreibung des Anregungsspektrums
- Resonanzen in Photoproduktion

Erste Hinweise auf innere Struktur des Nukleons



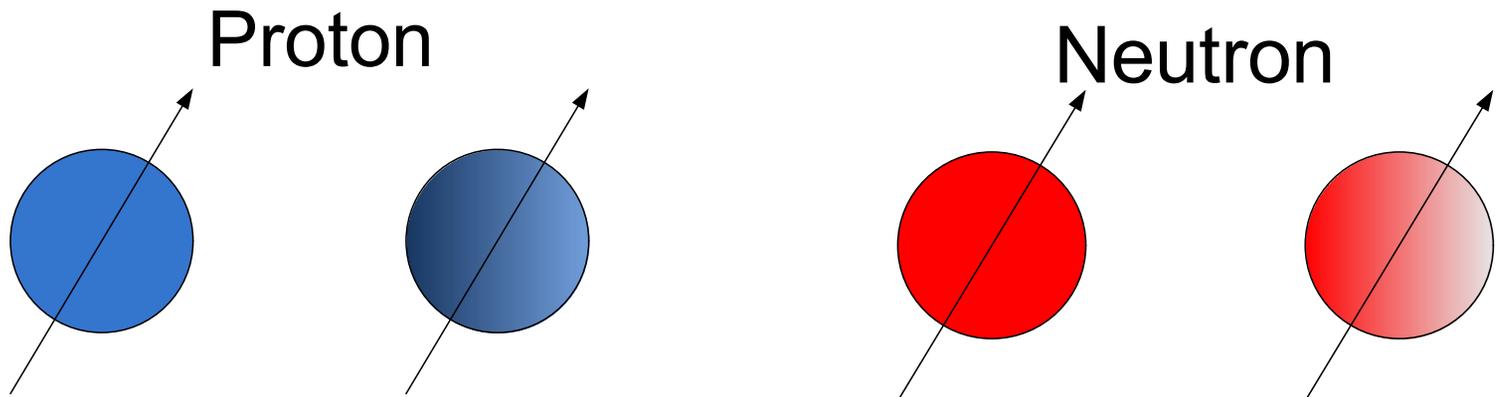


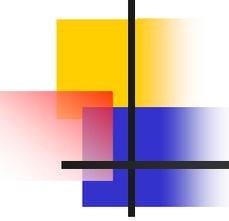
Das Nukleon

- Kein punktförmiges Teilchen
- Nukleon besitzt Substruktur und eine Ausdehnung
- Experimentelle Hinweise auf Substruktur durch Stern, Hofstadter und Fermi

1933 Otto Stern:

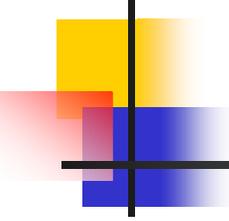
- Versuche zur Untersuchung des magnetischen Moments von Protonen
- Für punktförmiges Teilchen erwartet man $\mu_p = 1\mu_K$ und $\mu_n = 0$





Ergebnisse

- Ergebnis: Proton hat magnetisches Moment von ca. $2,5 \mu_K$
- Weitere Experimente zeigen das magnetische Moment von Protonen ist $2,79 \mu_K$
- Neutron hat ein magnetisches Moment von $-1,91 \mu_K$

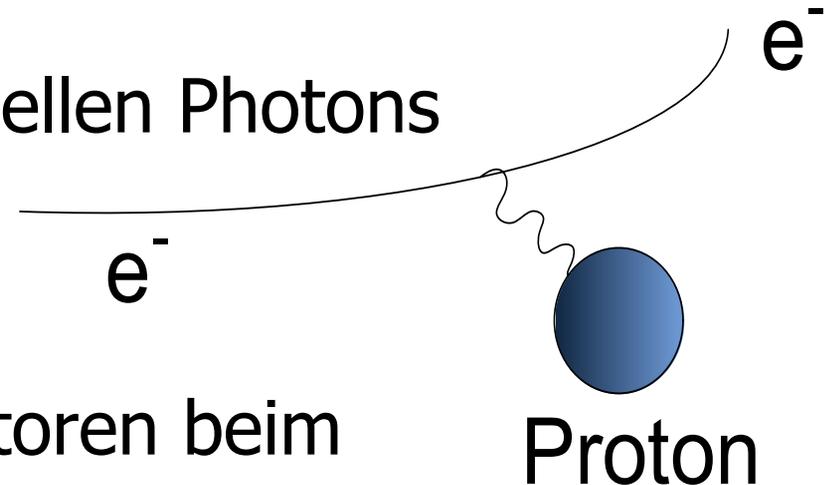


Folgerungen

- Nukleonen haben keine punktförmige Ladungsverteilung
- Ladungsverteilung ist zu untersuchen
- Ausdehnung ist zu bestimmen

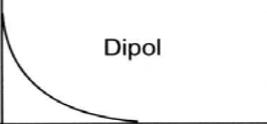
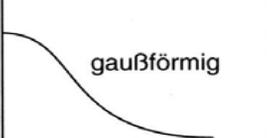
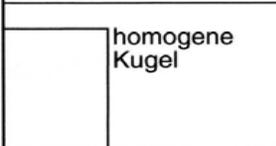
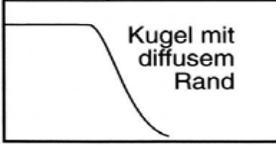
1961: Hofstadter streut Elektronen an Protonen (H-Targets)

- Energie der Elektronen zwischen 400MeV und einigen GeV
- $e^- p \rightarrow e^-' p'$
- Austausch eines virtuellen Photons



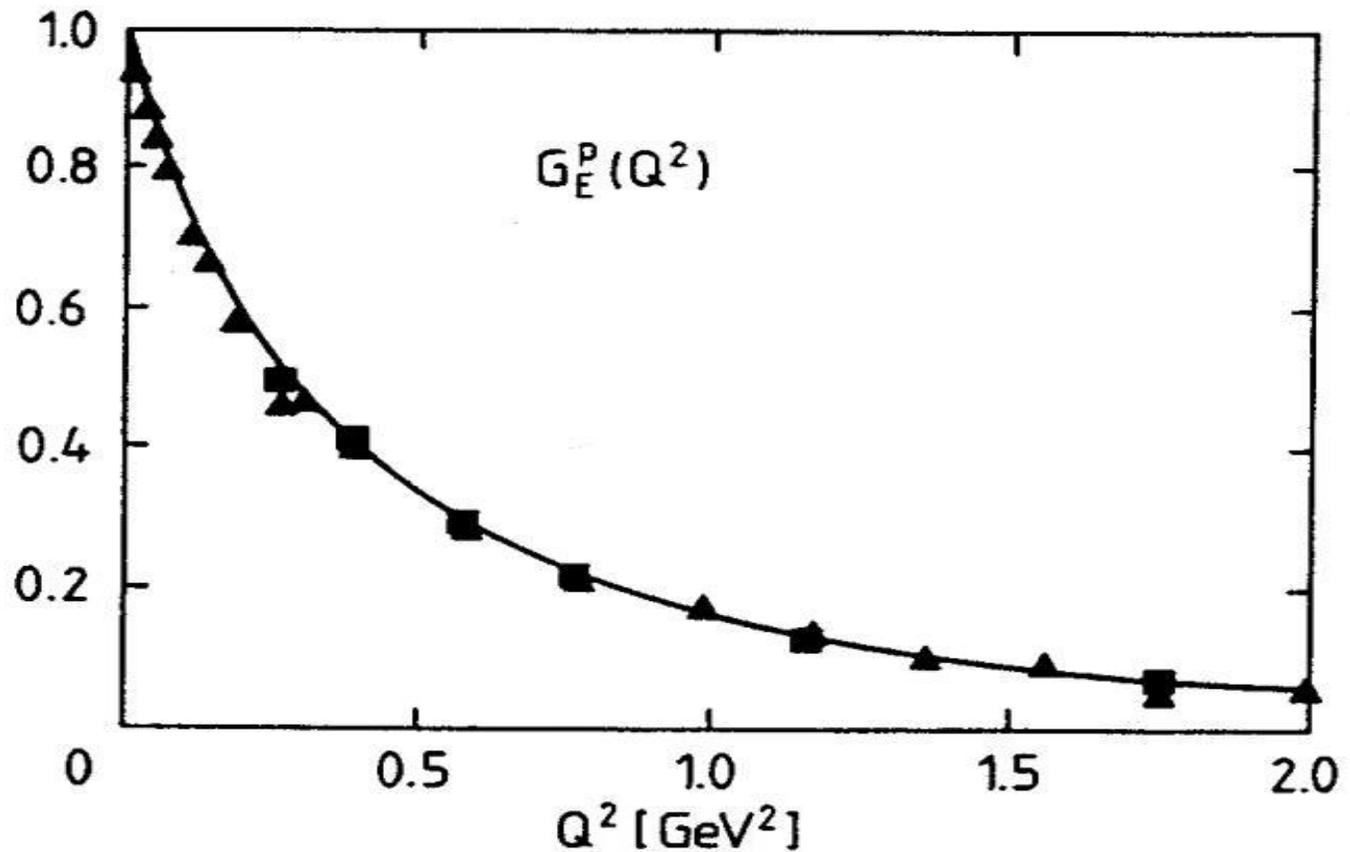
- Versuch soll Formfaktoren beim Wirkungsquerschnitt bestimmen

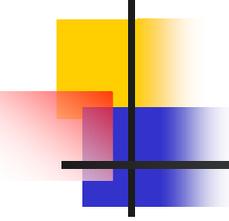
Formfaktoren und Ladungsverteilungen

$\rho(r)$	$ F(q^2) $	Beispiel
punktförmig	konstant	Elektron
 exponentiell	 Dipol	Proton
 gaußförmig	 gaußförmig	${}^6\text{Li}$
 homogene Kugel	 oszillierend	—
 Kugel mit diffusem Rand	 oszillierend	${}^{40}\text{Ca}$

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{\text{exp}} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{\text{Mott}} \cdot |F(q^2)|^2$$

Elektrischer Formfaktor des Protons



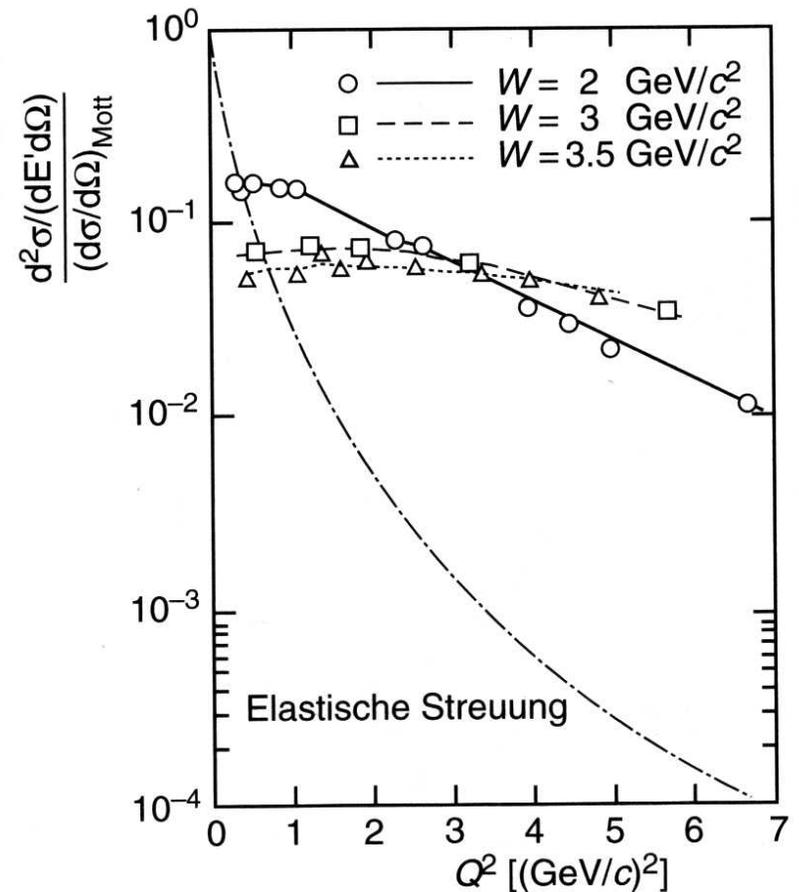


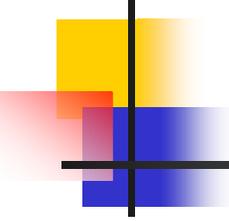
Ergebnis

- Experimentelle Daten geben einen Zugang zur Ladungsverteilung beim Proton (exponentielle Ladungsverteilung)
- Es kann ein mittlerer quadratischer Radius von $0,8\text{fm}^2$ bestimmt werden

Tief inelastische Streuung

- Bestimmung des Formfaktors bei tief inelastischer Streuung
- Erste Hinweise auf punktförmige Konstituenten im Proton

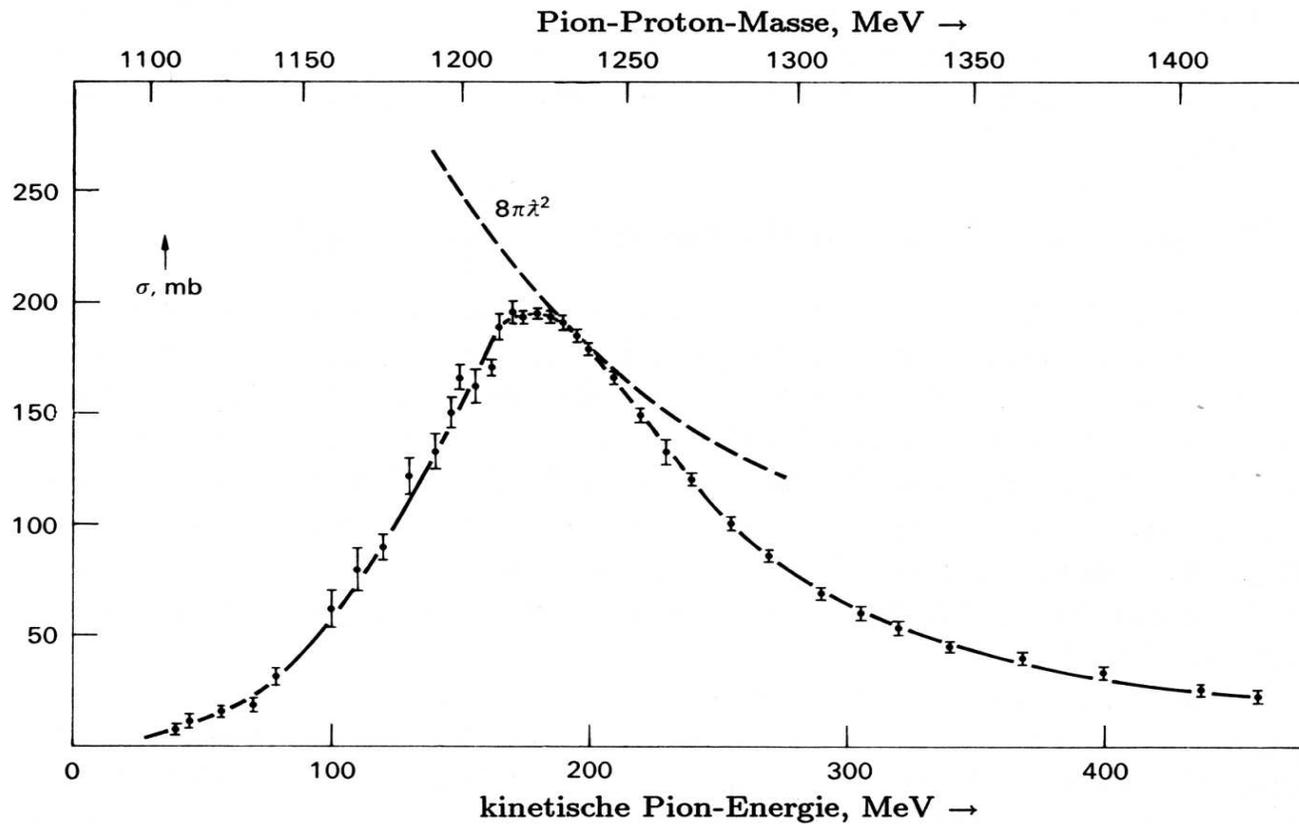


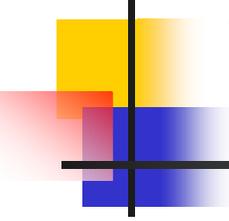


1951: Fermi macht Streuversuche mit π an Proton

- $\pi^+ p \rightarrow \pi^+ p$
- Entdeckung einer Überhöhung im Wirkungsquerschnitt bei Pionen Energie 195MeV
- Entspricht einer invarianten Massen von 1232 MeV

Wirkungsquerschnitt

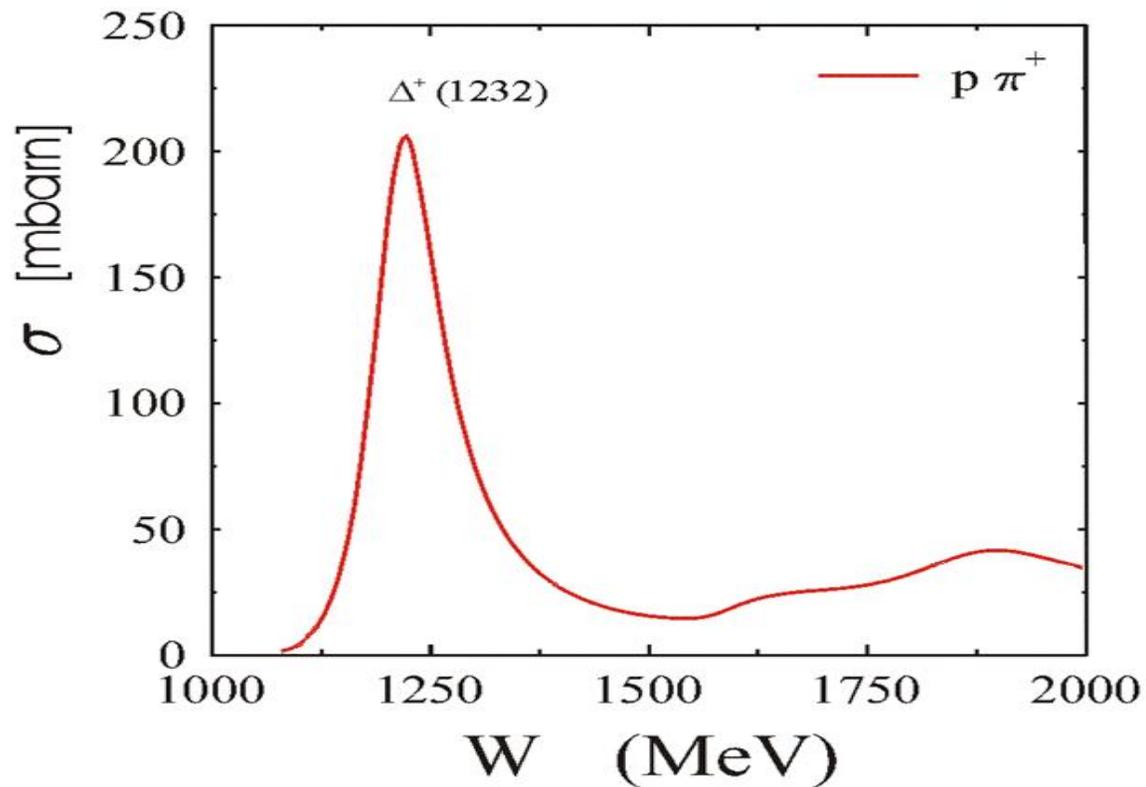




Weitere Versuche zeigen:

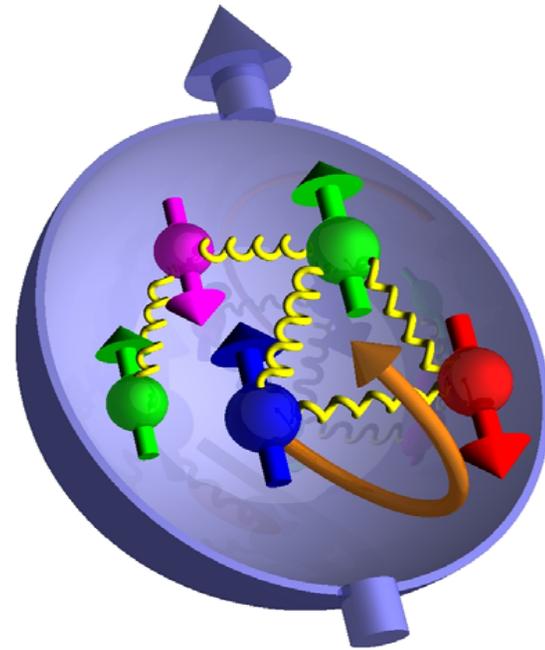
- Resonanz bei 1232MeV (Δ -Resonanz) ist erster Anregungszustand des Nukleons
- Weitere Resonanzen bei höheren Energien
- Resonanzen können nur durch Anregung innerer Freiheitsgrade erklärt werden

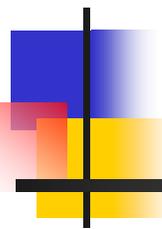
Resonanzen in π^+p -Streuung



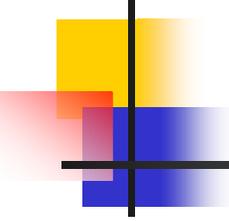
Das Nukleon

- Heutiges Bild vom Nukleon: 3 Quarks, Gluonen, Mesonenwolke



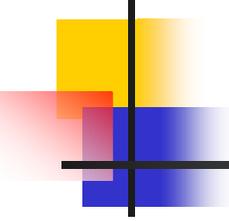


π^+ Proton Streuung



Π^+ Proton Streuung

- Δ -Resonanz wird auch P_{33} genannt
- P: Bahndrehimpuls des auslaufenden Pions
- $3 := 3/2$ Isospin I der Resonanz
- $3 := 3/2$ Gesamtdrehimpuls J der Resonanz



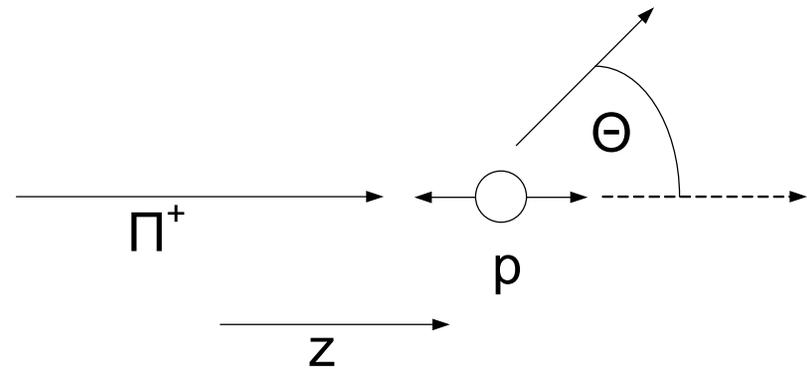
Wie bekommt man diese Quantenzahlen?

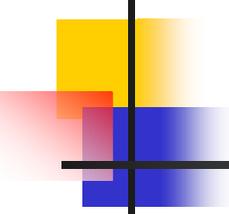
- Isospin: Proton hat Isospin $I_z + 1/2$ und π^+ hat Isospin $I_z + 1$
- π^+ wechselwirkt mit Proton stark
- Isospin ist bei starker Wechselwirkung Erhaltungsgröße
- $I_z = 3/2$

Bestimmung von J

Theoretische Überlegung:

- π^+ hat einen Bahndrehimpuls $l_\pi = 1$
- Wähle Quantisierungsachse entlang der Bahn des einfallenden Pions

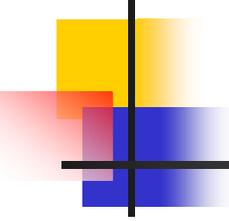




Drehimpulswellenfunktionen

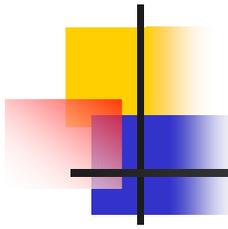
Dann sind die
Drehimpulswellenfunktionen der
Teilchen:

- π^+ : $\Phi(j;m) = \Phi(l;m) = \Phi(1;0)$
- p : $\alpha(j;m) = \alpha(1/2; \pm 1/2)$
- Als Produkt erhält man für den
Zwischenzustand: $\Psi(3/2; 1/2)$



Zwischenzustand

- Zerfällt der Zwischenzustand kann Proton sein Spin umdrehen oder nicht
- Clebsch-Gordon-Koeffizienten geben die Wahrscheinlichkeit für diese Prozesse
- Drehimpulserhaltung muss beachtet werden



Zerfall des Zwischenzustands

$$\Psi\left(\frac{3}{2}; \frac{1}{2}\right) = \sqrt{\frac{1}{3}}\Phi'(1;1)\alpha'\left(\frac{1}{2}; -\frac{1}{2}\right) + \sqrt{\frac{2}{3}}\Phi'(1;0)\alpha'\left(\frac{1}{2}; \frac{1}{2}\right)$$

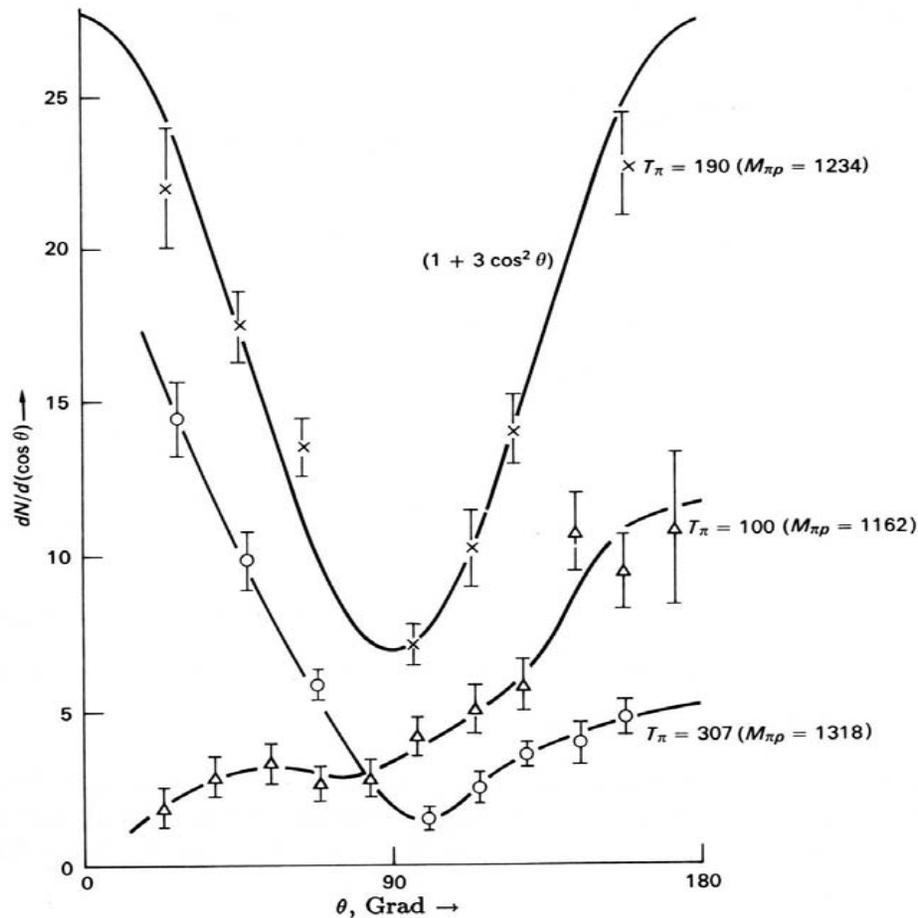
$\Phi'(1;1)$ und $\Phi'(1;0)$ sind Kugelflächenfunktionen

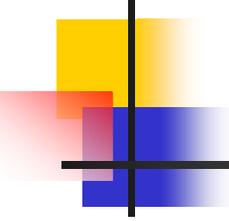
$$\Phi'(1;1) = \sqrt{\frac{3}{4\pi}} \sin \Theta \frac{e^{i\varphi}}{\sqrt{2}}$$

$$\Phi'(1;0) = \sqrt{\frac{3}{4\pi}} \cos \Theta$$

$$I(\Theta) = \Psi^* \Psi \propto 1 + 3 \cos^2 \Theta$$

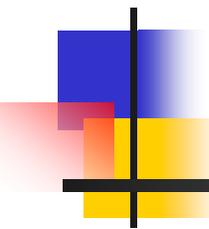
Winkelverteilung der auslaufenden Pionen



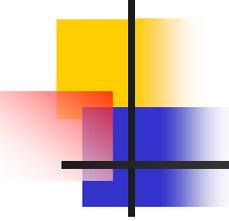


P_{33} -Resonanz

- Δ -Resonanz ist eine P_{33} -Resonanz
- P ist Drehimpuls des auslaufenden Pions
- $3 := 3/2$ Isospin des Zwischenzustands
- $3 := 3/2$ Gesamtdrehimpuls des Zwischenzustands

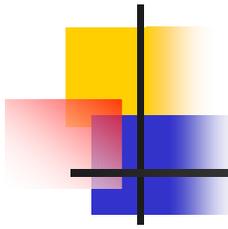


Quarkmodelle des Baryons



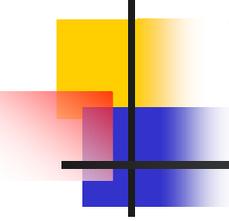
Das Baryon

- Baryon besteht aus 3 Quarks
- Betrachte zur Vereinfachung nur 3 Flavours (u,d,s)
- Quark hat Spin $1/2$



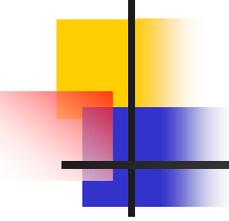
Wellenfunktion des Baryons

- Im gebundenen Zustand koppeln Wellenfunktionen der Quarks zu einer Wellenfunktion
- $|qqq\rangle_A = |\text{color}\rangle_A |\text{space;spin;flavour}\rangle_S$
- Gesamtwellenfunktion muss antisymmetrisch sein, da Baryonen Fermionen sind



Wie koppeln Wellenfunktionen

- Beispiel: 2 Spin 1/2 Teilchen koppeln
- Schreibweise: $2 \otimes 2 = 3_S \oplus 1_A$



Symmetrische Wellenfunktion

- 3_S : 2 Spin 1/2 Teilchen koppeln zu den Wellenfunktionen

$$\left| \frac{1}{2}; \frac{1}{2} \right\rangle$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \left(\left| \frac{1}{2}; -\frac{1}{2} \right\rangle + \left| -\frac{1}{2}; \frac{1}{2} \right\rangle \right)$$

$$\left| -\frac{1}{2}; -\frac{1}{2} \right\rangle$$

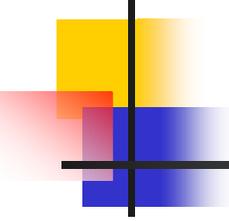
- 3 symmetrische Wellenfunktionen

Antisymmetrische Wellenfunktion

- 1_A : 2 Spin 1/2 Teilchen koppeln zu der Wellenfunktion

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \left(\left| \frac{1}{2}; -\frac{1}{2} \right\rangle - \left| -\frac{1}{2}; \frac{1}{2} \right\rangle \right)$$

- 1 antisymmetrische Wellenfunktion



Kopplung der Quarks

$|\text{flavour}\rangle$

$$3 \otimes 3 \otimes 3 = 10_S \oplus 8_M \oplus 8_M \oplus 1_A$$

$|\text{spin}\rangle$

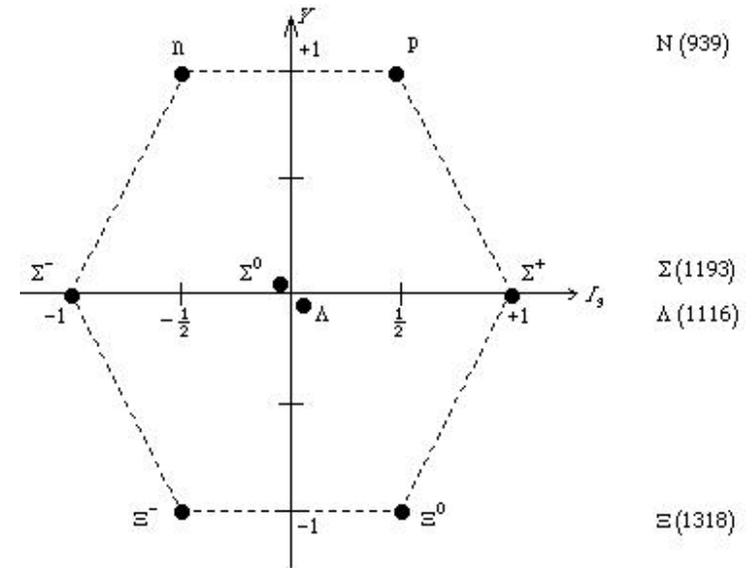
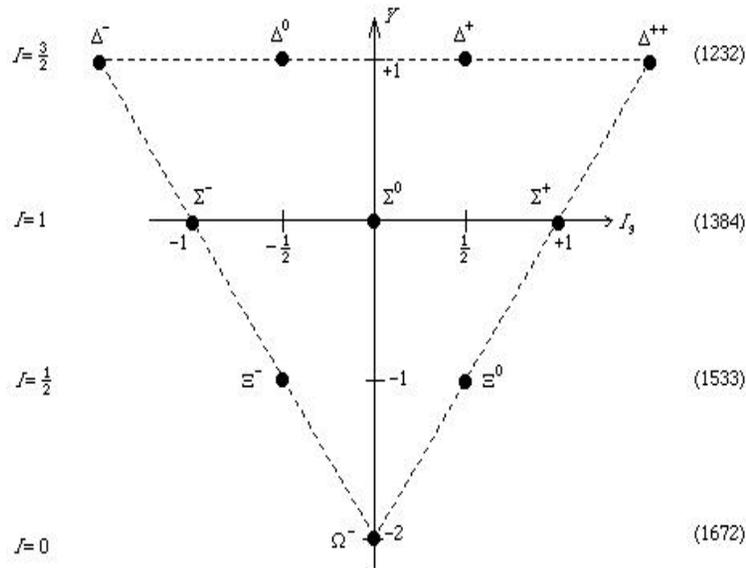
$$2 \otimes 2 \otimes 2 = 4_S \oplus 2_M \oplus 2_M$$

$|\text{spin; flavour}\rangle$

$$6 \otimes 6 \otimes 6 = 56_S \oplus 70_M \oplus 70_M \oplus 20_A$$

Das Oktett und Dekuplet

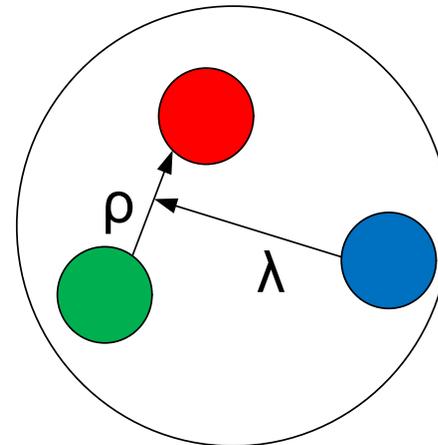
$$56_S = 4 \cdot 10 \oplus 2 \cdot 8$$



Ortswellenfunktion

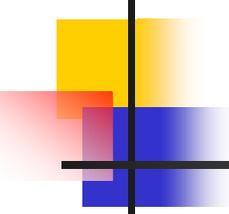
- Symmetrie der Wellenfunktion legt die möglichen Anregungszustände fest
- Mit einem passenden Potential kann das Anregungsspektrum berechnet werden

$|\text{space}\rangle$



Grundzustand
 $L=0$

$$N=N_{\rho}+N_{\lambda}$$
$$L=l_{\rho}+l_{\lambda}$$

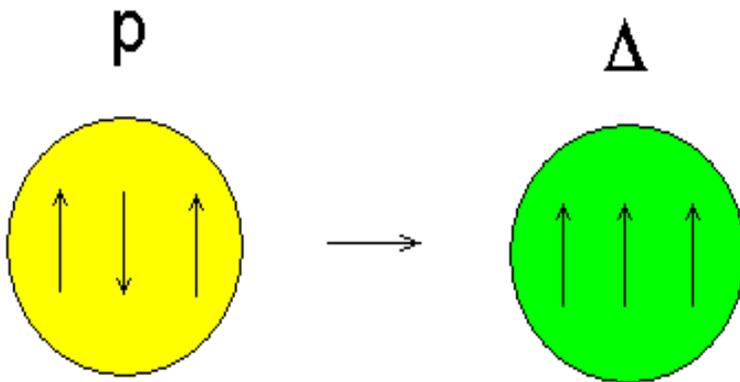


Quarkmodell nach Isgur und Karl

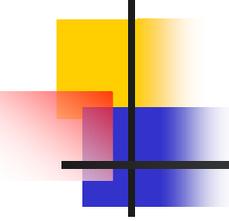
- Nicht relativistisches Modell
- Ein Gluonaustausch
- Starke Spin-Spin-Wechselwirkung

Spin-Spin-Wechselwirkung

- $p(938\text{MeV}) \rightarrow \Delta(1232\text{MeV})$
ist ein Spinflip



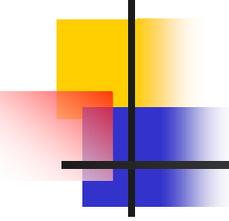
- Spinflip ändert Masse um
ca. 300MeV



Zu lösende Schrödingergleichung

$$\hat{H} \psi = E \psi \text{ mit}$$

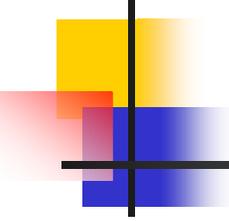
$$\hat{H} = \sum_i m_i + \frac{p_i^2}{2m_i} + \sum_{i < j} V^{ij} + H_{hyp}^{ij}$$



Spin-Spin-Wechselwirkung

$$H_{hyp}^{ij} = \frac{2\alpha_s}{3m_i m_j} \left(\underbrace{\frac{8\pi}{3} \vec{S}_i \cdot \vec{S}_j \delta^3(\vec{r}_i \vec{r}_j)}_1 + \frac{1}{r_{ij}^3} \underbrace{\left(\frac{3(\vec{S}_i \cdot \vec{r}_j)(\vec{S}_j \cdot \vec{r}_i)}{r_{ij}^2} - \vec{S}_i \cdot \vec{S}_j \right)}_2 \right)$$

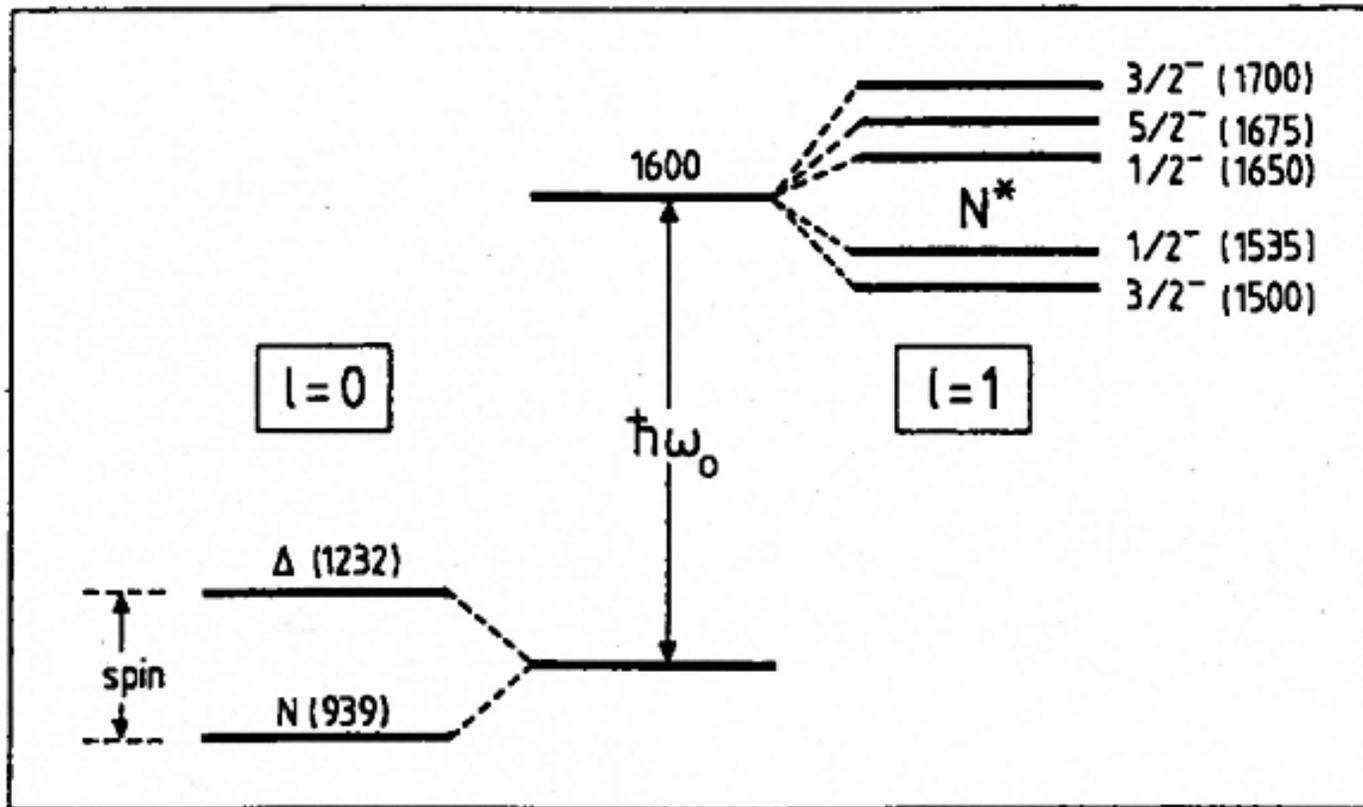
- 1 Spin Spin Wechselwirkung
- 2 Tensorkraft



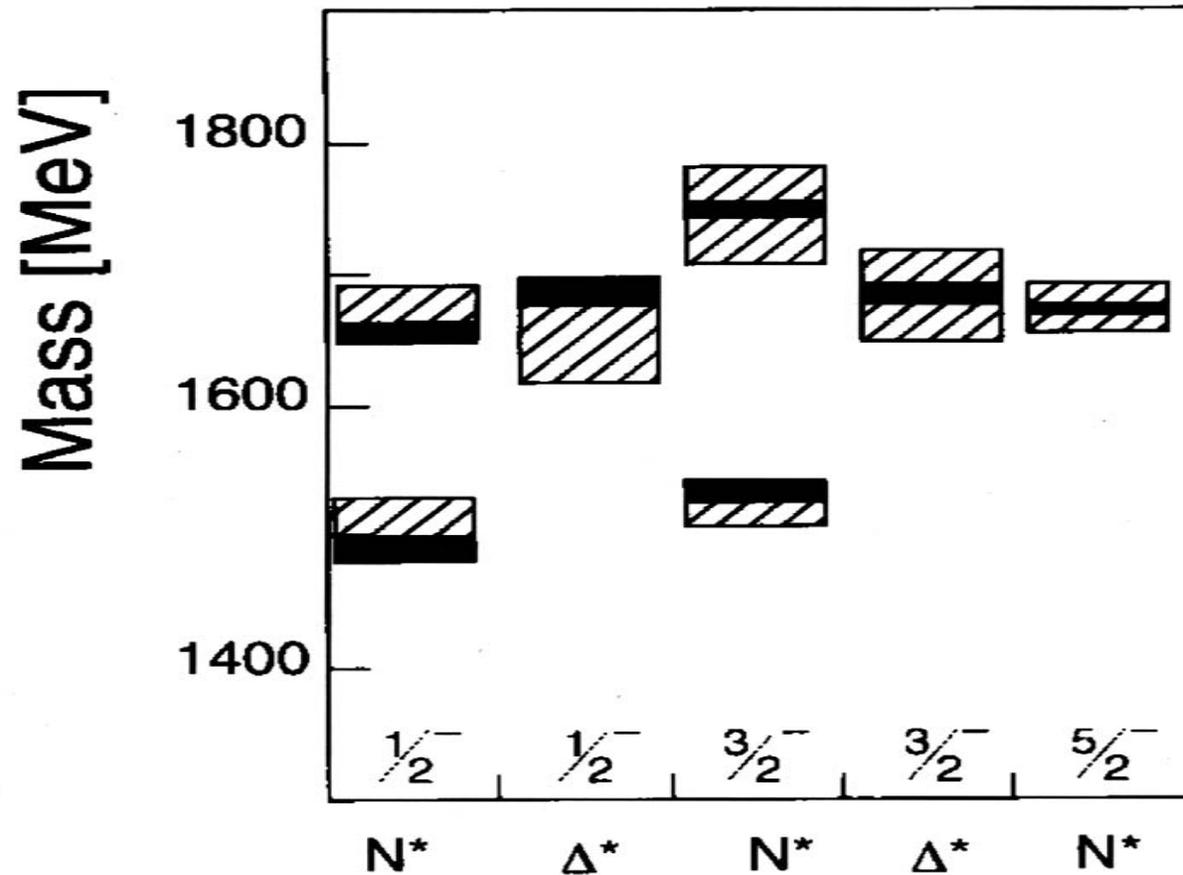
Confinement

- V_{ij} : Potential ist linear bei großen Abständen und verhält sich wie Coulomb-Potential bei kleinen Abständen
- Sorgt für das confinement
- Wird in der Praxis durch harmonischen Oszillator + Störung genähert

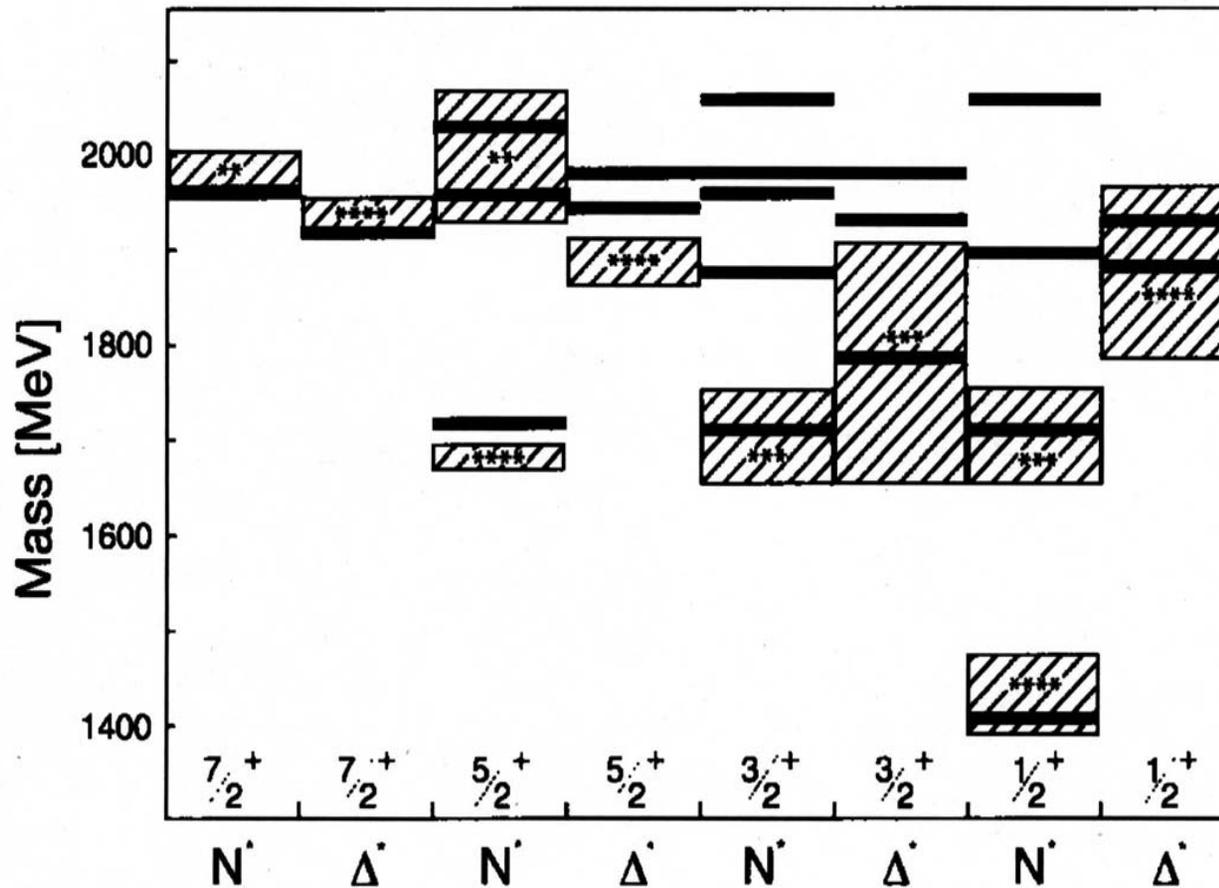
Beobachtetes Spektrum



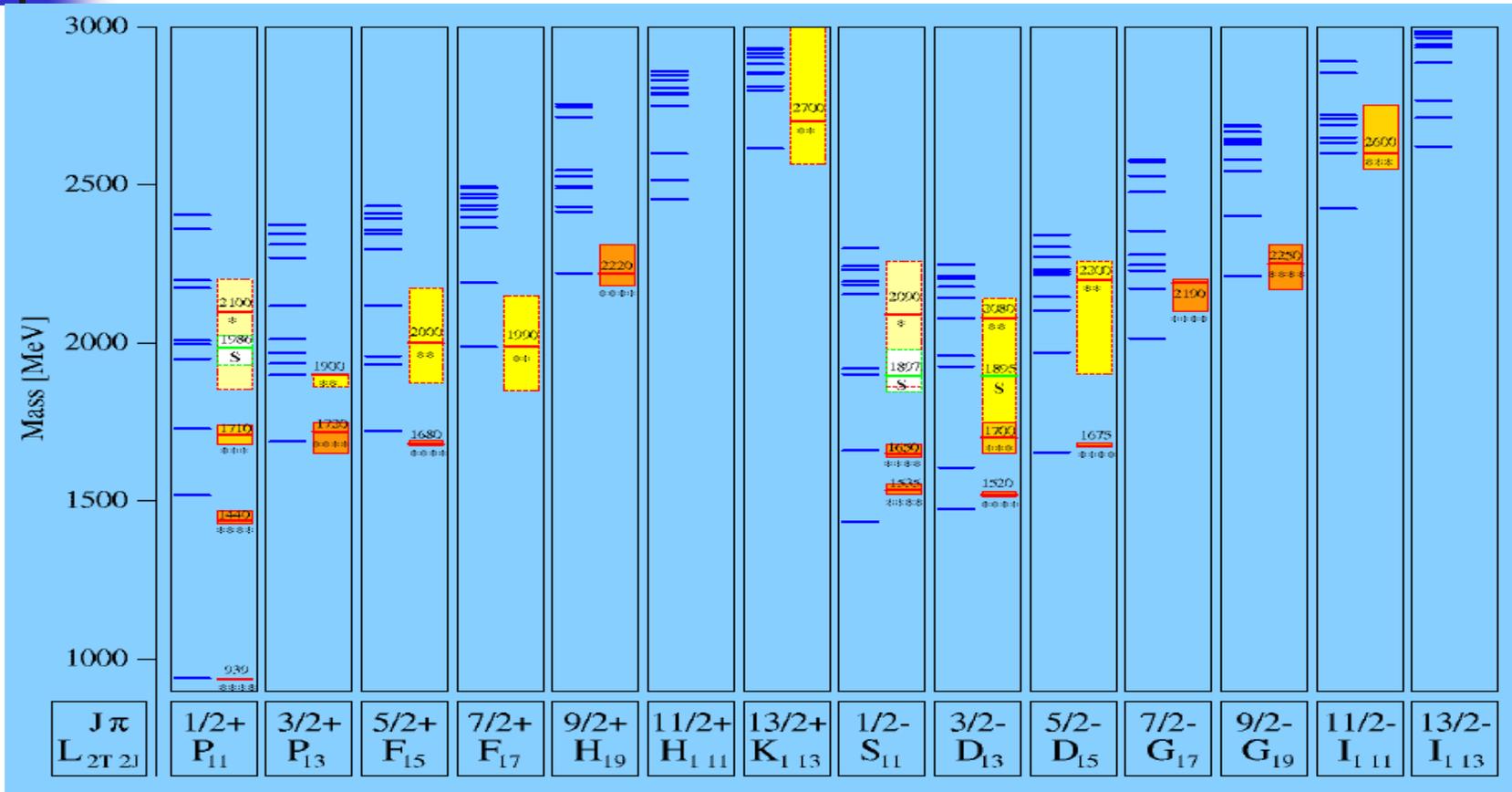
Modell und Beobachtung für ersten Anregungszustand



Modell und Beobachtung für den 2. Anregungszustand

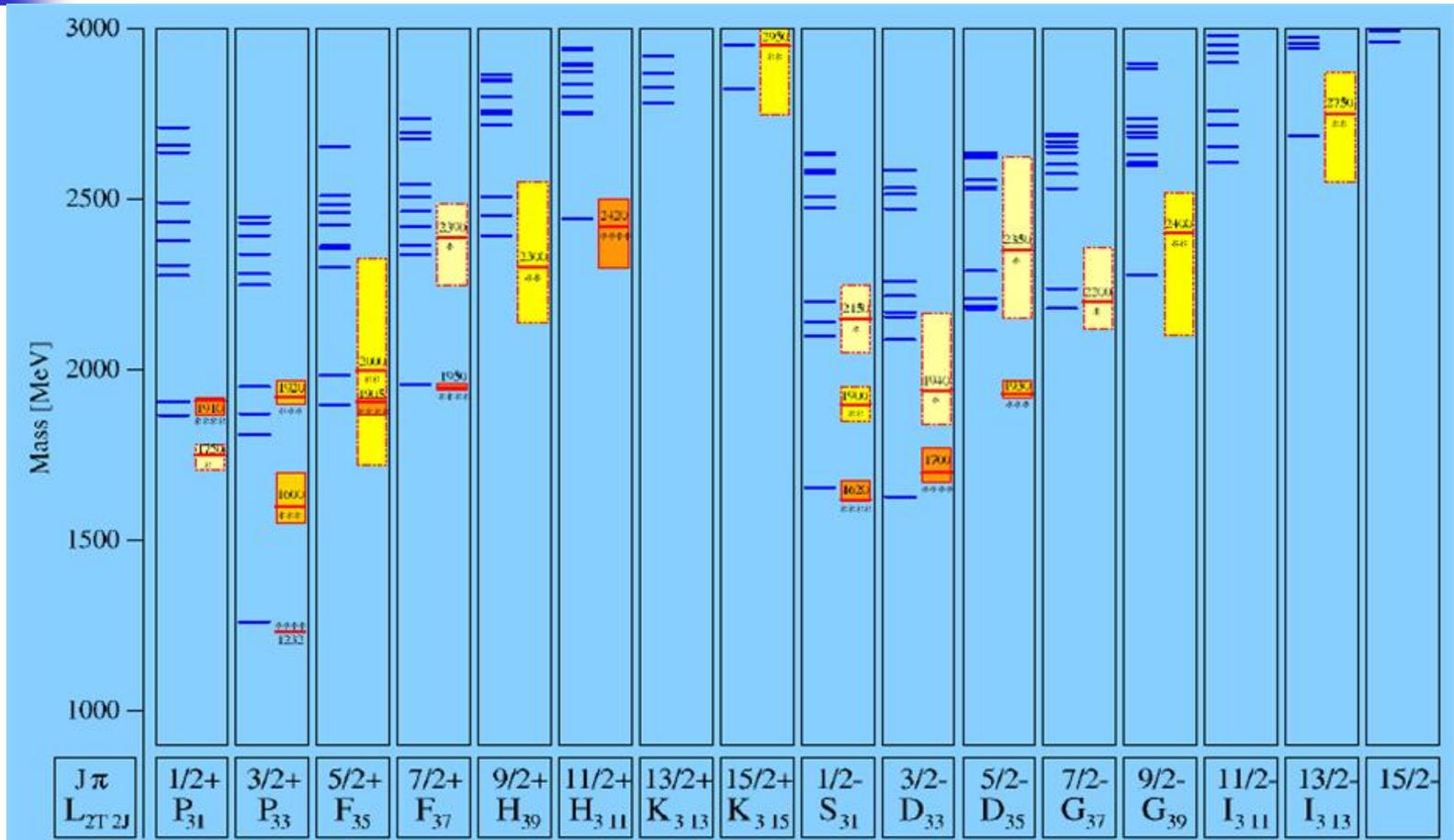


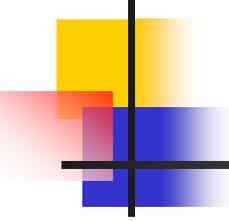
N-Resonanzen



- Modell von Metsch, Petry, u.a.

Δ -Resonanzen

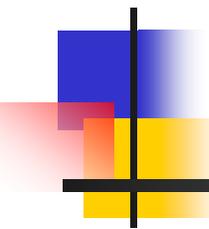




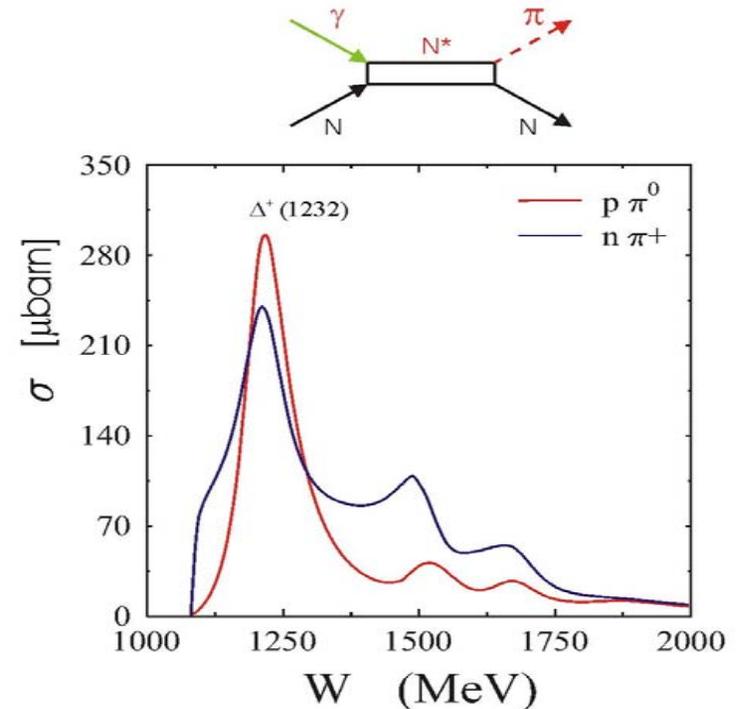
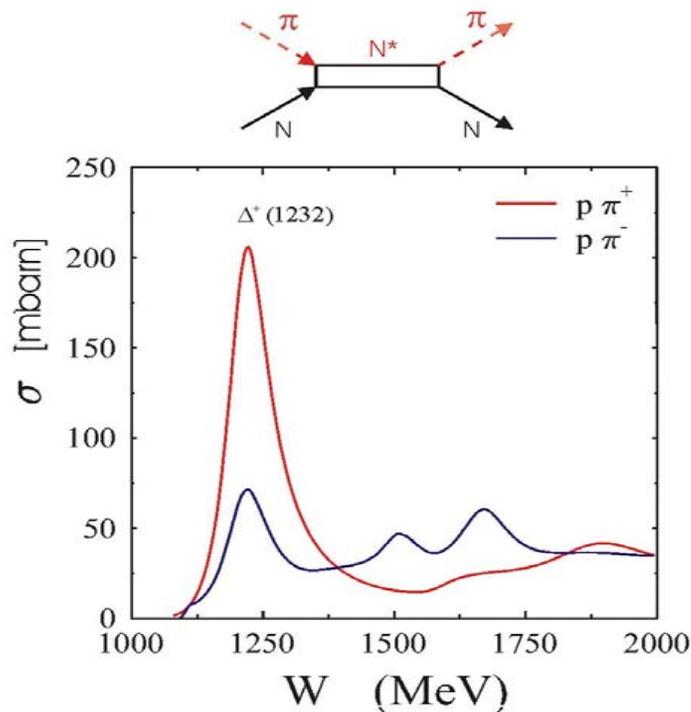
Problem aller Modelle

- Es gibt so genannte „missing resonances“
- Gibt es Quark-Diquark Struktur?
- Gibt es eingefrorene Freiheitsgrade?
- Koppeln diese Resonanzen nicht an πN ?

Resonanzen in Photoproduktion



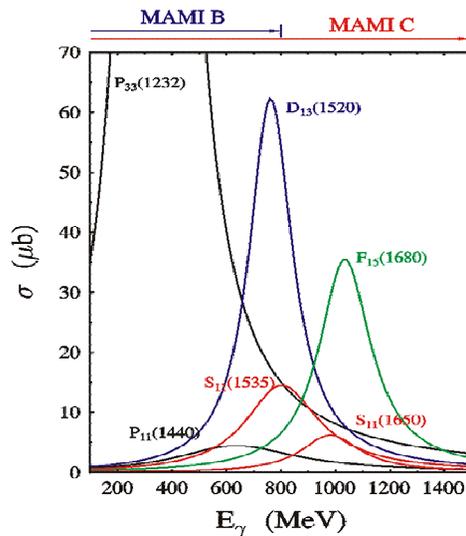
Pion Proton und γ Proton Streuung



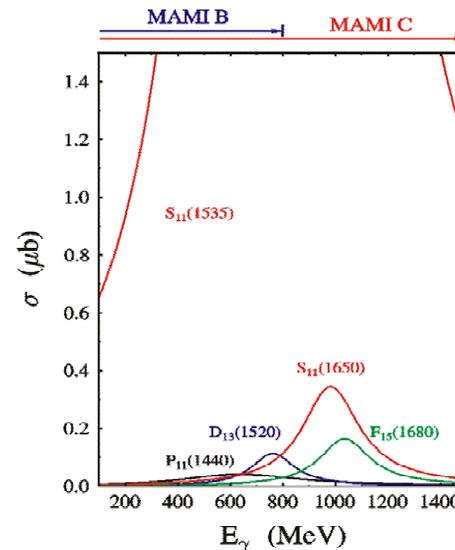
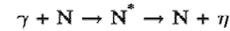
- Mit γN Streuung sieht man die gleichen Resonanzen wie bei der Pion Streuung

Reaktionskanäle bei Photoproduktion

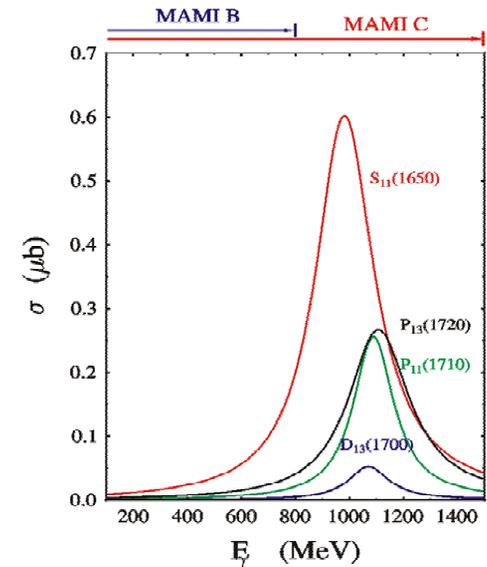
Pion-Production



Eta-Production

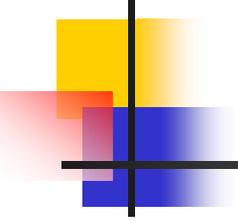


Kaon-Production



Es gibt zusätzliche Kanäle

Durch Polarisationsobservablen können sich überlappende Resonanzen aufgelöst werden



Mehr dazu im nächsten Vortrag

Danke für Ihre Aufmerksamkeit