

# Kapitel 7 - Eigenschaften von Hadronen

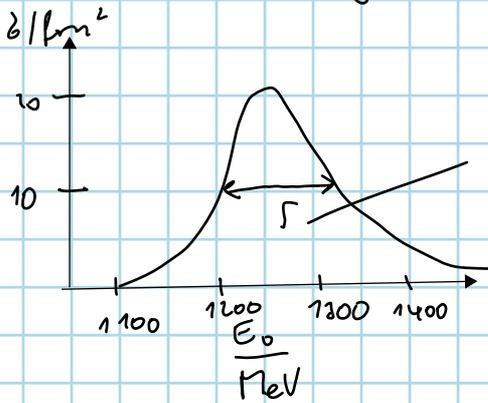
Hadronische Resonanzen; Protonbesch. - koll. mit diesen

Proben: Sekundärprotonen

$$T = 2,6 \cdot 10^{-8} \text{ s}$$

Zeitsdilat.:  $\pi$  mit 1 GeV kann 55 m zurücklegen

$\pi p$  Streuung an Wasserstoff: Resonanzen



Halbwertsbreite

$\pi^+ p$

liegt bei  $E_0^2 = m_0^2 c^4 = (E_p + E_\pi)^2 -$

$$(\vec{p}_p + \vec{p}_\pi)^2 c^2$$

mit Lebensdauer:  $T \Gamma = \hbar$

Breite: 120 MeV d.h. 10% von  $E_0$

$\Delta$  Teilchen nur  $6 \cdot 10^{-24} \text{ s} \sim$  Zeit von Lichtstr.

durch Kernen

Schnelligkeit: D. starke WW entsteht & wieder zerfällt

Delta schnell bei  $\pi^+$  als auch  $\pi^-$  Streuung

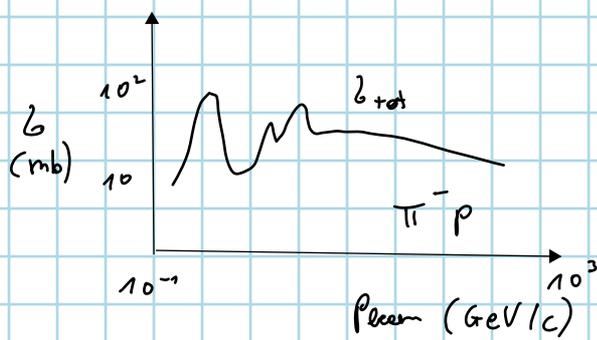
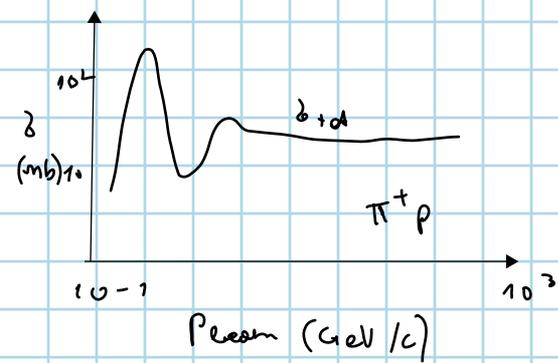
$\Delta^- \Delta^0 \Delta^+ \Delta^{++}$  4 Ladungszust  $\rightarrow T = \frac{3}{2}$  zwerdenbar

$$T_3 = -\frac{3}{2} -\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{3}{2} \checkmark$$

Partialwellenanalyse: Resonanz tritt bei  $I^\pi = \frac{3}{2}^+$  auf  
Drehimpuls Parität

$\Delta$  werden unterschied. erzeugt & haben unt. Zerfallskanäle

$$\Delta^0 \rightarrow \pi^- p, \pi^0 n, \gamma n$$



$$\sigma = \frac{\pi}{k^2} (2I+1) \frac{\Gamma_i \Gamma_f}{(\sqrt{s} - m_0 c^2)^2 + (\frac{\Gamma}{2})^2}$$

$E_0 \approx$  ges. E in SPS

$$\Gamma_i + \Gamma_f = \Gamma$$

1. |

partielle Breiten Eingangs / Ausgangskanal

s: Mandelstam Variable s: rel. Invariante

$$s = (p_1 + p_2)^2 c^2$$

$p_1$  &  $p_2$  Vierimpuls d. einlauf Teilch.

$$p^\mu = m_0 \gamma \left( \frac{c}{v} \right)$$

$$= m_0 u^\mu$$

$\rightarrow$

$$p^\mu p_\mu = m_0^2 c^2$$

$$u^\mu u_\mu = c^2$$

$$s = m_1^2 c^4 + m_2^2 c^4 + 2E_1 E_2 - 2\vec{p}_1 \vec{p}_2 c^2$$

$\Delta$  kann als angeregter Misch. Zust interpretiert werden

angeregte Mesonenzustände auch gefunden  $S^-, S^0, S^+$

haben Ruhe E v 770 MeV,  $t = 4 \cdot 10^{-24} s$

zerfallen in  $2\pi$   $I^\pi = 1^-$

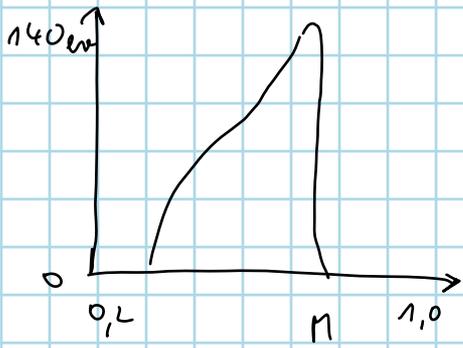


Erzeugung andere Bildung.

Direkte Nachweis aufgrund  $\ll t$  nicht möglich

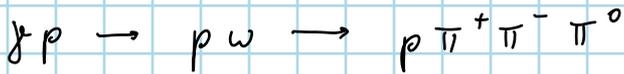
Diagramme Events über  $M(\pi^+\pi^-)$

Immer  $M(\pi^+\pi^-)$  gleich /  $E_T$  immer andere Bereiche



Form d. Kurve immer ähnlich, nur weniger Events mit höheren  $E_T$

// Verteilung d. Gesamtenergie der Zerfallsprod. in SPS hat Max bei 770 MeV



$w$  Meson  $8 \cdot 10^{-23} s$  783 MeV

Mes. Resonanzen zerfallen immer in Meson & Photon

Muhl. Reson. zerfallen in Nucleon

Verhalten d. Baryonenzahl  $B$  berücksichtigen  $B=0, B=1$

Baryonen:  $3 q$

st. WW

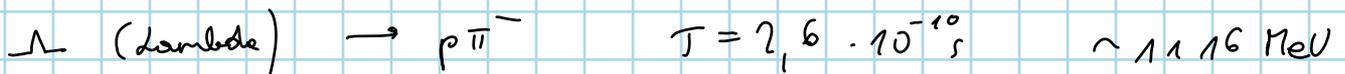
Mesonen:  $q \bar{q}$

instabil, starke WW

Mesonen / Nucleonen

Hadronen Fermionen Mesonen

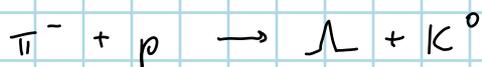
Kosmische Strahlung in Nebelkammer - V förmige Spuren



Erzeugung sehr häufig  $\rightarrow$  starke WW

lang. Zerfall  $\rightarrow$  schwache WW

Ungewöhnliches Verhalten Erzeugung immer in Paaren



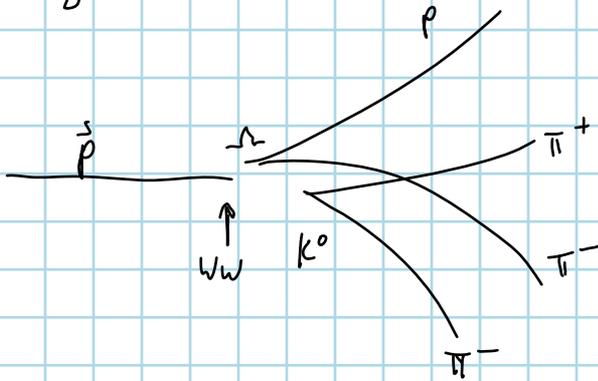
Neue QZ die Seltsamkeit

S in stark & em erhalten, nicht in schwachen

$$\Lambda: S = -1$$

$$K: S = +1$$

Selbst. T können in starken od em Vorgängen nicht einzeln erzeugt werden



### Ordnungsschema d Hadronen

137 Baryonen & 64 Mesonen - 1984

Nicht alle können elementar sein  $\rightarrow$  Baryonen, Leptonenz. & Seltsamkeit eingeführt  
B, L, S

Manche Zerfälle gehen nicht oder nur in schwachen Zerfällen

Ordnungsschema: Pairen haben gl QZ wie Fermion, Antif.)

Bindungsz. in  $l = 0$  (s-Zust)

$\rightarrow$  Paar als Null Null Zust.

Vorschlag

Viele T in unterschiedl. Ladung // Ladungsmultipl. mit Isospin klassifizieren

Nukleonen Dublett,  $\pi$ : Triplett,  $\Delta$  Quadruplett

Systematik mit Hyper spin möglich

Kleiner  $T_3$  nach Ladungsschwerp. bzw. Selbstähnheit zu Isospin  
 zurechnen

Für Mesonen / Baryonen mit pl. Spin & Parität Oktett &  
 Dekuplett

Zusammenhang zw. Gruppentheorie & 2d. Multipl. Oktett

8 & 10 :  $SU(3)$

// minimale Erweiterung d.  $SU(2)$  die 5  
 // einschließt

Isospin :  $SU(2)$

→ Vorschlag zur 3 Spin  $\frac{1}{2}$  T : Quarks

Multipl. nicht E : Ladungsp  $\bar{Q}$  & Hyperladung  
 $Y = 2\bar{Q}$  einführen

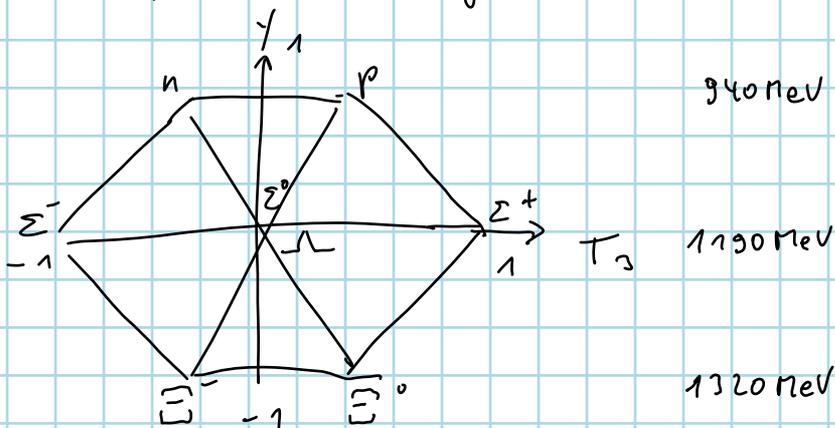
Nukleonen :  $Y = 2 \frac{1+0}{2} = 1$

$\Delta$  :  $Y = 2 \frac{2+1+0+(-1)}{4} = 1$

$\pi$  :  $Y = \emptyset$

$I^{\pi} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\pm}$

Baryonen Oktett mit Nukl.



$\Delta$  Teilchen : in  $\frac{3}{2}^+$  Dekuplett

$\Omega^-$  Masse vorausgesetzt aus  $\Delta, \Sigma^*$  &  $\Xi^*$

Mesonen mit  $\ll E$  sind  $I^{\pi} = 0^-$  Vektoren (pseudoskalar)

$I^T = 1^-$  Nucleon Vektormesonen

$$\begin{matrix} | \\ 3^- \end{matrix}$$

Nucleon Struktur ist Hinweis, dass Hadronen aus Quarks  
Nach  $SU(3)$  würde man Oktett & Singulett erwarten

Quarkstruktur: beides gleichzeitig

### Quarkstruktur d. Hadronen

Valenqu. sind in Werte von Sequ. & Quarks eingebettet

Darstellung d. Bindungsanz. in Erweiterung des Isospins -  $SU(2)$

Fundamentales: Dublett mit  $T = \frac{1}{2}$

Zustände:  $u - T_3 = \frac{1}{2}$   $d - T_3 = -\frac{1}{2}$

Zust aus 2 Quarks:  $uu, dd, ud, du$

Tensord. bilden reduzierbare Darstellungen, können auf irred.  
zerlegt werden

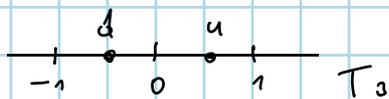
Drehimpuls: Multipl. d. T charakterisiert

$2T + 1$  Zustände d.  $T_3$  unterschieden

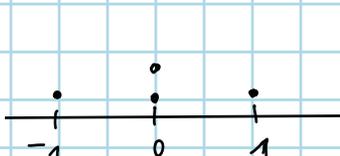
$T_3: -T \dots T$

Zweiquarkz.: Triplet & Singulett

Dreiquark: Quadryplet & 2x Dublett



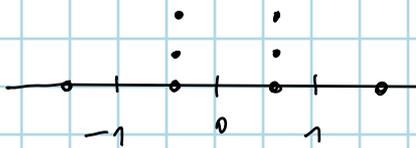
fund. Dublett



<sup>2</sup>  
Simpl.  
Triplet  
 $2 \otimes 2$

TP zwei Dubletts

$$= 3 \oplus 1$$



1 Quartett & 2 2-Dupletts

$$2 \otimes 2 \otimes 2 = 2 \oplus 2 \oplus 4$$

Zerlegung in Multipletts  $\rightarrow$  Identif der Zustände zur selben Energie

Annahme:  $H$  unterscheidet nicht zw.  $u$  &  $d \rightarrow$  Vertauscht mit

Drehgrps. im  $T$ -Raum

$$e^{i \vec{I} \vec{T}} \quad \text{Gruppe } SU(2)$$

$$\hat{T}_i: \text{ hermitisch, gerades } [\hat{T}_i, \hat{T}_j] = i \epsilon_{ijk} \hat{T}_k$$

$H$  vertauscht mit  $e^{i \vec{I} \vec{T}} \Rightarrow$  auch mit inf. Drehung

Genügt, sich mit Algebra d. Generatoren zu befassen

d.h. mit lin. Komb aus Produkten von Generatoren

$su(2)$  Algebra

Multiplett ist Gesamth. d. Zust. die d. Anwendung von Algebraelem auf EZ des  $H$  erreicht werden kann (Auf- / Absteigen)

Alg-Element mit  $H \rightarrow$  alle Zust. selbe  $E$

$SU(3)$  Modell:  $H$  kann zw.  $u, d, s$  nicht untersch.

$$\text{Drehungen hier: } e^{i \alpha_a F_a}$$

$F_a$ : hermit., gerad. Matr.

$3 \times 3$

Generatoren d.  $SU(3)$

$$F_a = \frac{\lambda_a}{2} \quad a = 1, \dots, 8$$

$$\lambda_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \lambda_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i & 0 \\ i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \lambda_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_4 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \lambda_5 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -i \\ 0 & 0 & 0 \\ i & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \lambda_6 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_7 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i \\ 0 & i & 0 \end{pmatrix} \quad \lambda_8 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix}$$

•  $SU(3)$  Mult bilden  $T_3 - Y$  Diagr mit  $120^\circ$  verdr.

Symm - Achsen  $T_3 = F_3 \quad Y = \frac{2}{\sqrt{3}} F_8 = \frac{1}{\sqrt{3}} \lambda_8$

•  $SU(3)$  sind aus Isosym Mult aufbaubar

• Von  $120^\circ$  verdr. zu T sym Mult liegen V & U

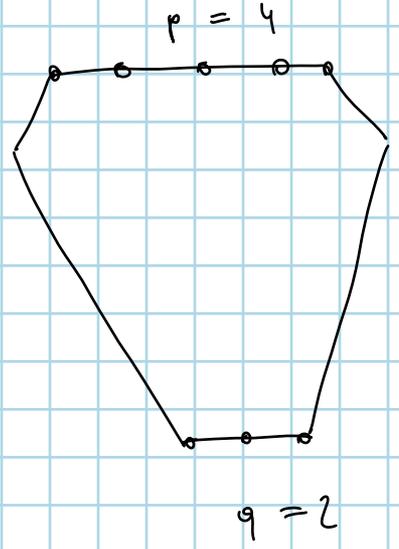
Sind aus verdr. U bzw V Mult aufbaubar

• Sechseck mit 3 zähl. Symm. Achse  $\rightarrow$  durch Seitenl.

$p$  &  $q$  charakterisierbar

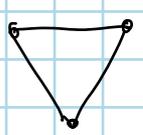
• Sechseckförmig aufgebaut oberste 1 fach nächste 2 fach

dann alle 3 fach (wenn Dreiecksform erreicht!)



// 6 Eck

$(4, 2)$  jedes mit, nur Besz



$(1, 0)$   
Triplet

$(0, 1)$



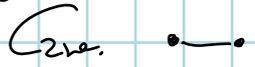
Anti Trij

Oktaett:  $(1, 1)$

Sechsett:  $(2, 0)$  & anti

Deluplett:  $(3, 0)$

alle Seiten immer fl. lang





Vorher  $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ? \\ s \end{pmatrix}$  - asymmetrie in Ladung

→ 2/4 Teilchen als Bindungszust von  $c \bar{c}$  (Charm Quark)  
Gibt noch  $\Upsilon$  Meson:  $b \bar{b}$  Quark (bottom)

→ top Quark fehlt noch

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

Weitere Frage: Symmetrie der baryonischen Zust

$\Delta^{++}$ : Dekuplett - 3 Quarks

|

uuu

→ symm bzgl Quarkart

Spin  $\frac{3}{2}$  → auch Spin WF

symmetrisch  $\uparrow \uparrow \uparrow$

niederenergetischer Zustand → auch Raum WF kann symm sein

→ symmetrische Gesamt WF widerspricht Pauli

→ weitere Eigenschaft d Q - Farbe als neue QZ

r g b als Grundfarben Hamilton d starken WW ist

symm in diesen Farben

antisymm Farbzustand:

$$\mathbb{1} = |rgb + gbr + brg - bgr - rbg - grb\rangle \cdot \frac{1}{\sqrt{6}}$$

wird zu den anderen Anteilen zugefügt - Gesamt erfüllt Pauli

Rotationen im Farbraum sind Gruppe  $SU(3)_{\text{Farbe}}$

Singlett ist in 3 Q Zerlegung

Es stehen nur  $q \bar{q}$  &  $qqq$  auf → nur farblose

$\Upsilon$  → Farbsing dürfen auftreten

Farbe ist ladungsartig elem. Farbl.  $g$  (sowie  $q$ )

Quarks haben  $r, g, b$   $\bar{q}$  haben  $-r, -g, -b$

Farbladungen sind Quellen von Gluonen & Feldern

QCD wurde entwickelt Beschreibung der Dynamik