

Kerne und Teilchen

Moderne Experimentalphysik III
Vorlesung 14

MICHAEL FEINDT
INSTITUT FÜR EXPERIMENTELLE KERNPHYSIK

Mesonen aus leichten Quarks

Mesonen aus leichten Quarks

- Konstituentenmassen von b und c klar getrennt
- leichte Mesonen aus **u d s**: nur kleine Unterschiede → Mischungen
keine nichtrelativistische Behandlung möglich
- Trotzdem sind die Spektren sehr ähnlich zu $c\bar{c}$, $b\bar{b}$

Konstituenten – Quark – Modell:

Konstituenten – Quark – Masse = **intrinsische Quark – Masse** + **dynamische Masse von Gluonen und See-Quarks**
 („Current mass“)

wahrscheinlich aus
Higgs-Mechanismus

u,d : ca. 5 MeV

⋮

t : ca. 175 000 MeV

ca 300 MeV

u d s : **current mass** << **dynamische Masse**
c b t : **current mass** >> **dynamische Masse**

Spin, Parität und Ladungskonjugation

$$\vec{S} = \vec{s}_q + \vec{s}_{\bar{q}}$$

Gesamtspin ; \oplus Bahndrehimpuls $\vec{L} \Rightarrow$ Gesamtdrehimpuls

$$\vec{J} = \vec{L} \oplus \vec{S}$$

Gesamtdrehimpuls des gebundenen $q\bar{q}$ – Zustands
 \equiv „Spin des Mesons“

Parität:

$$P = (-1)^{L+1}$$

wg. P (Fermion) = - P (Antifermion)
 und P (Ortswellenfunktion) = $(-1)^L$

Ladungskonjugation:

$$C = (-1)^{L+S}$$

Beweis: mit $\hat{C} (q(\vec{r}_1, \vec{s}_1) \bar{q}(-\vec{r}_1, \vec{s}_2)) = C \cdot (\bar{q}(\vec{r}_1, \vec{s}_1) q(-\vec{r}_1, \vec{s}_2))$

1. \vec{r}_1 und $-\vec{r}_1$ vertauschen:

$$(-1)^{L+1}$$

2. Spins \vec{s}_1 und \vec{s}_2 vertauschen:

$$(-1)^{S+1}$$

antisymmetrisch für S gerade $\uparrow\downarrow - \downarrow\uparrow$
 symmetrisch für S ungerade $\uparrow\uparrow, \uparrow\downarrow + \downarrow\uparrow, \downarrow\downarrow$

$$\Rightarrow C = (-1)^{L+1} (-1)^{S+1} = (-1)^{L+S+2} = (-1)^{L+S}$$

Flavour – SU(3)

■ Pseudoskalare Mesonen ($L=0, S=0, \uparrow\downarrow, J^{PC}=0^{-+}$)

→ Grundzustand, leichteste Mesonen

- mit 3 Quarks u, d, s erhält man 9 pseudoskalare Mesonen

- u, d: **Isospin – Symmetrie SU(2)**

[starker Isospin, erhalten in starker WW, nicht in e.m.]

- s: etwas schwerer: $m_{\text{konst}} \approx 450 \text{ MeV}$

ist wg. s nur näherungsweise **Flavour – SU(3) – Symmetrie**

- Quantenzahl Strangeness (ladungsartig, additiv) erhalten in starker und e.m. WW (aber nicht schwach)

S (s-Quark) = -1

S (\bar{s} -Antiquark) = +1

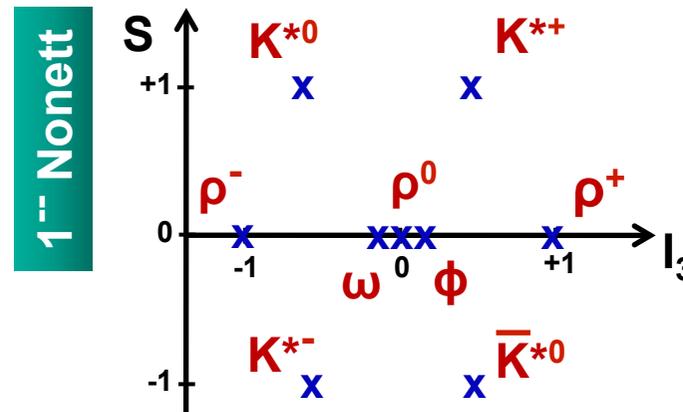
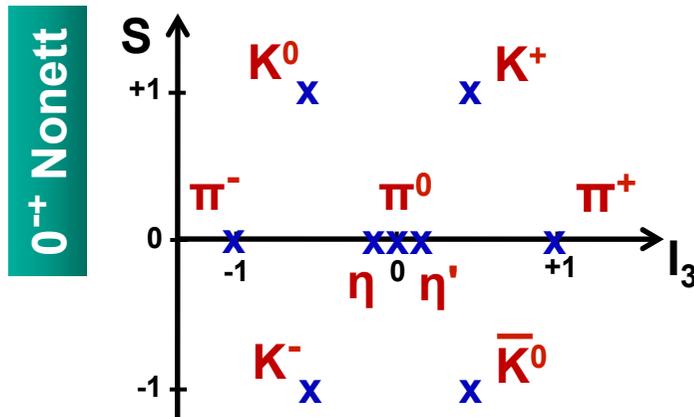
■ Vektormesonen ($L=0, S=1, \uparrow\uparrow, J^{PC}=1^{--}$)

→ wg. Spin – Spin – WW höhere Massen als 0^{-+} – Mesonen

Flavour – SU(3)

$$3q \otimes 3\bar{q} \Rightarrow 9 \text{ Mesonen} = \text{Nonett}$$

Die 9 Mesonen spalten auf in **1 Singulett** und **8 Oktett – Mesonen**



Isospin-Triplett:

π^-, π^0, π^+ :

$$\bar{u}d, \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d}), u\bar{d}$$

2 Isospin-Dupletts:

K^0, K^+ :

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

K^-, \bar{K}^0 :

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

Isospin-Singletts: SU(3)-8:

η :

$$\frac{1}{\sqrt{6}}(u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s})$$

SU(3)-1:

η' :

$$\frac{1}{\sqrt{3}}(u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s})$$

Die Isospin – Singletts mischen wegen gebrochener SU(3) – Symmetrie (Strange–Quark–Mesonen)

Oktett-Singlett – Mischung

- Die 3 Zustände mit $S=0$, $I_3=0$ können im Prinzip **mischen**:

$$m(\pi^\pm) \approx m(\pi^0)$$

$$m(\eta') > m(\eta) > m(\pi^0)$$

Isospin – Symmetrie: gut

SU(3) – Symmetrie: nur näherungsweise

- Oktett-Singlett – Mischung:

$$|\eta'\rangle = \cos\theta|\eta_1\rangle - \sin\theta|\eta_8\rangle$$

$$|\eta\rangle = \sin\theta|\eta_1\rangle + \cos\theta|\eta_8\rangle$$

- Vektormesonen + L=1 – Mesonen: fast „ideale“ Mischung

d.h. ein $I=0$ – Zustand ist $\approx \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} + d\bar{d}) : \omega$

der andere $I=0$ – Zustand ist $s\bar{s} : \phi$

Massen der Mesonen

- Spin – Spin – WW:

$$\Delta M_{SS} = \begin{cases} -3 \cdot \frac{8\hbar^3}{9c^3} \frac{\pi\alpha_s}{m_q m_{\bar{q}}} |\psi(0)|^2 \\ +1 \cdot \frac{8\hbar^3}{9c^3} \frac{\pi\alpha_s}{m_q m_{\bar{q}}} |\psi(0)|^2 \end{cases}$$

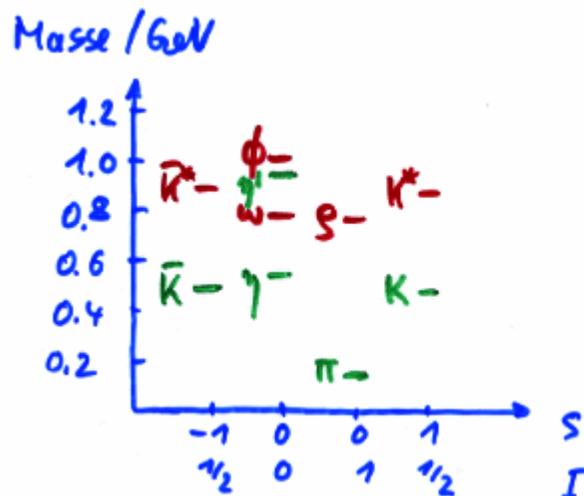
0^{-+}

1^{-}

- Massenformel

$$M_{q\bar{q}} = m_q + m_{\bar{q}} + \Delta M_{SS}$$

beschreibt alle 0^{-+} und 1^{-} – Mesonen auf 1% Genauigkeit



Parameter:

$$m_{u,d} \approx 310 \text{ MeV}$$

$$m_s \approx 483 \text{ MeV}$$

Mesonen mit $L=1$

$$\boxed{\mathbf{S} = 0} : \uparrow\downarrow \Rightarrow$$

Spin - Singlett

$$\vec{J} = \vec{L} \oplus \vec{S} = \vec{L} \oplus 0 = \vec{L} = 1$$

$$P = (-1)^{L+1} = +1$$

$$C = (-1)^{L+S} = -1$$

$$\boxed{J^{PC} = 1^{+-}}$$

$$\boxed{2S+1L_J = {}^1P_1}$$

$$\boxed{\mathbf{S} = 1} : \uparrow\uparrow \Rightarrow$$

Spin - Triplett

$$\vec{J} = \vec{L} \oplus \vec{S} = 1 \oplus 1 = \begin{cases} 0 & \uparrow\downarrow \\ 1 & \uparrow\rightarrow \\ 2 & \uparrow\uparrow \end{cases}$$

$$P = (-1)^{L+1} = +1$$

$$C = (-1)^{L+S} = +1$$

$$\boxed{J^{PC} = \begin{cases} 0^{++} & {}^3P_0 \\ 1^{++} & {}^3P_1 \\ 2^{++} & {}^3P_2 \end{cases}}$$

<u>L = 0:</u>	0 ⁺⁺	Pseudoskalare Mesonen
	1 ⁻⁻	Vektor – Mesonen
<u>L = 1:</u>	0 ⁺⁺	Skalare Mesonen
	1 ⁺⁺	} Axialvektor – Mesonen
	1 ⁺⁻	
	2 ⁺⁺	Tensor - Mesonen

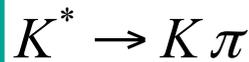
Zerfallskanäle

- Zerfälle müssen kinematisch möglich sein
- dominant: **starke Zerfälle**
 - restriktivste Erhaltungssätze
- dann: **elektromagn. Zerfälle**
 - Isospin, SU(3) – Verletzung
- erst dann: **schwache Zerfälle**
 - viele Symmetrien verletzt,
 - Übergänge zw. Quark – Flavours

Zerfälle der Vektormesonen: starke WW

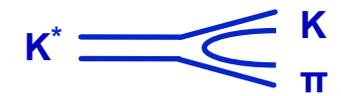


$$\tau = 4.3 \cdot 10^{-24} \text{ s}$$

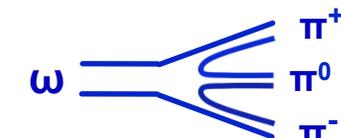


$$\tau = 1.3 \cdot 10^{-23} \text{ s}$$

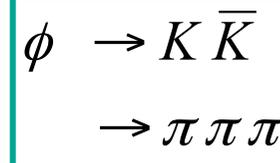
(Phasenraum kleiner)



$$\tau = 7.8 \cdot 10^{-23} \text{ s}$$

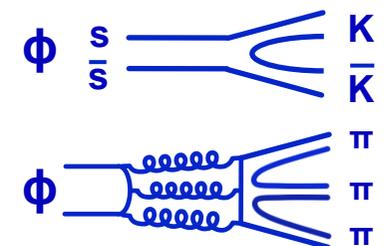


$\omega \rightarrow \pi \pi$ wg. G-Parität verboten: $G = C \cdot (-1)^I = (-1)^{\# \text{ Pionen}}$



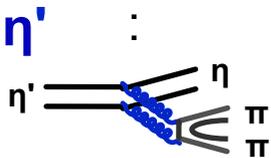
83% (Phasenraum klein)

13% Zweig-unterdrückt
(via 3 Gluonen, siehe J/ψ-Zerfall)



Zerfall der pseudoskalaren Mesonen

π^\pm	:	leichtestes Hadron, geladen 0 nur schwache WW möglich		
		$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$	$\tau = 2.6 \cdot 10^{-8} s$	als Spur rekonstruierbar
π^0	:	neutral, elektromagnetischer Zerfall in 2 Photonen möglich		
		$\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$	$\tau = 8.4 \cdot 10^{-17} s$	
K^\pm	:	leichtestes Meson mit Strangeness, schwacher Zerfall		
		nötig für $s \rightarrow u$ -Übergang		
		$\tau = 1.2 \cdot 10^{-8} s$	$K^+ \rightarrow \begin{cases} \mu^+ \nu_\mu & 64\% \\ \pi^+ \pi^0 & 21\% \\ 3\pi & 7\% \end{cases}$	als Spur rekonstruierbar
η	:	$\tau = 5.5 \cdot 10^{-19} s$	$\eta \rightarrow 2\gamma$ 39% $\eta \rightarrow 3\pi$ 55%	elektromagnetisch elektromagnetisch
η'	:	$\tau = 3.3 \cdot 10^{-21} s$	$\eta' \rightarrow \eta \pi \pi$ 65% $\eta' \rightarrow \rho \gamma$ 30%	stark, Zweig-unterdrückt elektromagnetisch



Neutrale Kaonen

- Neutrale Kaonen können in 2π ($P=+1$) und 3π ($P=-1$) zerfallen (Paritätsverletzung)

⇒ das erlaubt eine Mischung von K^0 und \bar{K}^0 :

$$K^0 \leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} 2\pi \\ 3\pi \end{array} \right\} \leftrightarrow \bar{K}^0 \quad \Delta S = 2$$

- Auf dem Quark – Level: Box – Diagramme



- K^0, \bar{K}^0 haben definierte Strangeness 5 Eigenzustände der starken WW
- Durch die schwache WW (2. Ordnung) können K^0 und \bar{K}^0 jedoch mischen

CP – Erhaltung in der schwachen WW

- in der schwachen WW sind C und P maximal verletzt, aber $C, P \approx$ erhalten

Zerfallskanäle:

2π und 3π sind Eigenzustände von CP:

$$\begin{aligned}
 CP|\pi^0\pi^0\rangle &= (+1)\cdot|\pi^0\pi^0\rangle \\
 CP|\pi^+\pi^-\rangle &= (+1)\cdot|\pi^-\pi^+\rangle \\
 \text{(mit } L=0\text{:)} &= (+1)\cdot|\pi^+\pi^-\rangle
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 CP|\pi^0\pi^0\pi^0\rangle &= (-1)\cdot|\pi^0\pi^0\pi^0\rangle \\
 CP|\pi^+\pi^-\pi^0\rangle &= (-1)\cdot|\pi^-\pi^+\pi^0\rangle \\
 &= (-1)\cdot|\pi^+\pi^-\pi^0\rangle
 \end{aligned}$$

K^0 und \bar{K}^0 sind keine Zustände mit definierter CP – Parität:

$$CP|K^0\rangle = (-1)\cdot|\bar{K}^0\rangle$$

$$CP|\bar{K}^0\rangle = (-1)\cdot|K^0\rangle$$

Wenn CP erhalten ist und ein Kaon in 2π (bzw. 3π) zerfällt, muss auch das Kaon eine definierte CP – Parität von +1 oder -1 haben

$$\begin{aligned}
 |K_1^0\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle\right) \\
 |K_2^0\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle\right)
 \end{aligned}$$

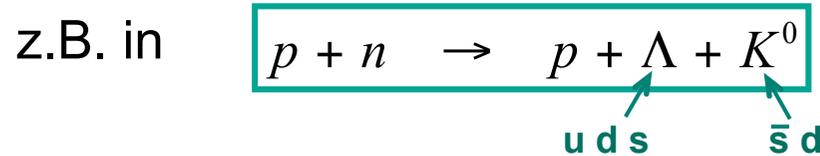
mit $CP|K_1^0\rangle = (+1)\cdot|K_1^0\rangle$

mit $CP|K_2^0\rangle = (-1)\cdot|K_2^0\rangle$

$|K_1^0\rangle$ zerfällt in 2 Pionen ($\tau = 8.9 \cdot 10^{-11}\text{s}$)

$|K_2^0\rangle$ zerfällt in 3 Pionen ($\tau = 5.2 \cdot 10^{-8}\text{s}$) (lebt viel länger, weil der Phasenraum viel kleiner ist)

Erzeugung von neutralen K – Mesonen



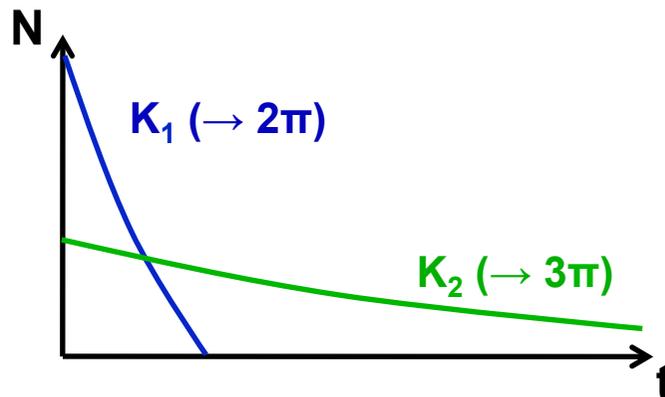
starke WW
definierte Strangeness

- K^0 ist q.m. Superposition von K_1 und K_2 :

$$|K^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|K_1^0\rangle + |K_2^0\rangle \right)$$

sowohl K^0 als auch \bar{K}^0 bestehen je zur Hälfte aus kurzlebigen K_1^0 und langlebigen K_2^0

- K_1 – Komponente zerfällt viel schneller als K_2 (in 2 Pionen)
 \Rightarrow nach einiger Zeit ist nur noch K_2^0 – Komponente übrig



aus K^0 – Strahl (oder \bar{K}^0 – Strahl)
wird ein K_2 – Strahl
(weit weg vom Target)

Regeneration von K_1 in Materie

Ein K_2 – Strahl (eine bestimmte kohärente Überlagerung von K^0 und \bar{K}^0) kann **regeneriert** werden, indem er durch **Materie** geschickt wird:

$$\sigma(K^0 N) \neq \sigma(\bar{K}^0 N) \quad (\text{starke WW})$$

⇒ K^0 und \bar{K}^0 – Komponente werden **unterschiedlich stark absorbiert** (η_1, η_2)

⇒ effektiv unterschiedliche Kombination von $|K^0\rangle$ und $|\bar{K}^0\rangle$

vorher: $|K_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle)$

nachher: $|K_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (\underbrace{\eta_1}_{\text{rot}} |K^0\rangle + \underbrace{\eta_2}_{\text{rot}} |\bar{K}^0\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\underbrace{\frac{\eta_1 + \eta_2}{2}}_{\text{rot}} |K_2\rangle + \underbrace{\frac{\eta_1 - \eta_2}{2}}_{\text{rot}} |K_1\rangle \right)$

Nach Verlassen des Absorbers enthält der Strahl sowohl $|K_2^*\rangle$ als auch $|K_1^*\rangle$

CP – Verletzung in K^0 – System

- Nach vielen K_1 – Lebensdauern sollten alle K^0 in 3π zerfallen.
Christensen et.al. 1964: **In 0.3% der Fälle zerfallen K_2 in 2π !**

→ CP - Verletzung

- **Definition** von K_{Short} und K_{Long} :

- K_S und K_L als Mischungen der CP – Eigenzustände
- K_1 und K_2 mit sehr kleiner Mischung

$$\left. \begin{aligned} K_S &= K_1 + \varepsilon K_2 \\ K_L &= K_2 - \varepsilon K_1 \end{aligned} \right\} \text{indirekte CP - Verletzung}$$

- **Zusätzlich direkte CP – Verletzung in Zerfallsamplituden** (durch Interferenz verschiedener Feynman – Diagramme mit unterschiedlichen Phasen \Leftrightarrow Phase in der CKM–Matrix kann das erklären!)
- **CP – Verletzung auch im B^0 - \bar{B}^0 – System** etabliert: BaBar, Belle – Experimente, 2000