

Moderne Experimentalphysik III: Teilchenphysik

Sommersemester 2018

Thomas Müller, Roger Wolf

29. Mai 2018 – VL 10

Institut für Experimentelle Teilchenphysik (ETP)



5. Die starke WW

- 5.1 Der Teilchenzoo
- 5.2 Hadronen, Quarks
- 5.3 Das statische Potential der QCD
- 5.4 Die Farbkraft
- 5.5 Laufende Kopplungskonstanten

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name →	u up	c charm	t top	γ photon
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Quarks	d down	s strange	b bottom	g gluon
	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Leptons	e electron	μ muon	τ tau	W[±] weak force

Bosons (Forces)

5.1 Der Teilchenzoo

Leptons:

ν_e μ^- e^-
 ν_μ ν_τ τ^-

Hadrons:

Baryons:

Mesons:

Leptons:

ν_e μ^- e^-
 ν_μ ν_τ τ^-

Hadrons:

Baryons:

π^- D^0 B^- η

η'
 η_c **Mesons:** B^+

π^+ π^0 η_b
 D_s^- D_s^+ K^+

D^- K_S^0 K_L^0 K^- D^+

B_c^+ B_s^0 B^0
 B_c^-

$J^P = 0^-$

Hadrons:

Baryons:

Leptons:

ν_e μ^- e^-
 ν_μ ν_τ τ^-

J/ψ π^- D^0 B^- η
 η' ϕ K^{*-} ρ^0
 η_c **Mesons:** B^+
 ω π^+ ρ^- π^0 ρ^+ η_b
 D_s^- D_s^+ K^{*+} K^+ Υ
 K^{*0} D_s^{*-} K_S^0 K_L^0 K^- D^{*+}
 D^- B_c^{*-} B_c^+ B_c^{*+} D^{*-} D^+
 B_s^0 B^{*+}
 D^{*0} B^{*0} D_s^{*+} B^0
 B_c^- B_s^{*0}

$$J^P = 0^- \quad J^P = 1^-$$

Leptons:

ν_e μ^- e^-
 ν_μ ν_τ τ^-

Hadrons:

Mesons:
 J/ψ π^- D^0 B^- η
 η_c η' ϕ K^{*-} ρ^0
 ω π^+ ρ^- π^0 ρ^+ η_b
 D_s^- D_s^+ K^{*+} K^+ Υ
 K^{*0} D_s^{*-} K_S^0 K_L^0 K^- D^{*+}
 D^- B_c^{*-} B_c^+ B_c^{*+} D^{*-} D^+
 D^{*0} B_c^{*0} D_s^{*+} B^0 B^{*+}
 B_c^- B_c^{*0}

Baryons:

Ω_{bb}^- p n Σ^0 Ξ_c^+
 Λ_b^+ Δ^{++} Σ^+ Ξ^-
 Λ_c^+ $\Xi_{bb}'^-$ $\Xi_{cb}'^+$ Σ^- Ξ^0 Ξ_{cb}^0
 Σ_b^- Δ^+ Δ^- Σ_c^+ Λ^0
 Σ_b^+ Δ^0 Σ_c^{++} Ξ_{cb}^+ Ξ_c^0
 Ξ_b^- Ξ_b^0 Ξ_{cc}^+ Ξ_c^+ Ξ_{cb}^0 Ξ_c^0
 Ω_b^- Ω_c^0 $\Xi_b'^-$ Ξ_{cc}^{++} Ξ_c^+ Ξ_{cb}^0 Ξ_c^0
 Ω_{cb}^0 Ω_{ccb}^0 Σ_c^0
 Ω_{cb}^0 Ω_{cc}^+ Ω_{ccb}^0 Ξ_b^0

$J^P = 0^-$ $J^P = 1^-$ $J^P = 1/2^+$

Leptons:

ν_e μ^- e^-
 ν_τ τ^-

Hadrons:

Baryons:

Ω_{bbb}^{++} Ξ_c^+
 Σ^0 Ξ_c^+ Ω_{ccc}^{++} Ω_{cbb}^{*0} Ω_{bb}^{*-}
 p n Ω_{ccb}^{*+} Σ^+ Ξ^- Ω_{ccc}^{++} Ω_{cbb}^{*0} Ω_{bb}^{*-}
 Δ^{++} Λ_b^+ Δ^{++} Ω_{ccb}^{*+} Σ^+ Ξ^- Ξ^0 $\Xi_{cb}^{\prime 0}$ Ω_c^{*0} Λ^0
 Δ^{+-} Λ_c^+ $\Xi_{bb}^{\prime -}$ $\Xi_{cb}^{\prime +}$ Ω_b^{*-} Σ^- Ξ^0 $\Xi_{cb}^{\prime 0}$ Ω_c^{*0} Λ^0
 Δ^- Σ_b^{*+} Δ^+ Δ^- Σ_c^+ Ξ^{*-} Ω_{cb}^{*0} Ω^- Ω_{cc}^{*+}
 Σ_b^- Σ_b^+ Δ^0 Ξ_{cb}^{*0} Σ_c^{++} Ξ_{bb}^{*0} Ξ_{cb}^+ Ξ_b^{*0} Ξ_c^0
 Δ^0 Σ_b^+ Σ_b^0 Ξ_{cb}^{*0} $\Xi_{cc}^{\prime +}$ $\Xi_c^{\prime +}$ Ξ_{cb}^0 $\Xi_c^{\prime 0}$ Ξ_b^{*-}
 Ξ_b^- Ξ_b^0 Ξ_{cc}^+ $\Xi_{cc}^{\prime +}$ $\Xi_c^{\prime +}$ $\Xi_{bb}^{\prime 0}$ Σ_b^{*-} Σ_c^0 Ξ_{bb}^{*-}
 Ω_b^- Ω_c^0 Ξ_{cb}^{*+} $\Xi_b^{\prime -}$ Ξ_{cc}^{*++} Ω_{cbb}^0 Σ_b^{*0} Ξ_c^{*+}
 Δ^+ Ω_{cb}^0 Σ^{*-} Ω_{ccb}^+ Σ_c^{*+} $\Xi_b^{\prime 0}$ Ξ_c^{*0}
 $\Omega_{cb}^{\prime 0}$ Σ^{*0} Ω_{cc}^+ Ω_{ccb}^+ Σ_c^{*+} $\Xi_b^{\prime 0}$ Ξ_c^{*0}
 Σ^{*+} Σ_c^{*++} Σ_c^{*0} Ξ_{cc}^{*+}

+150 further known Meson resonances.

+152 further known Baryon resonances.

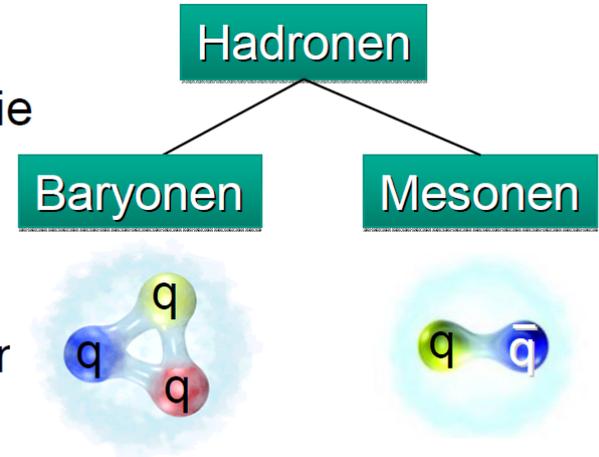
$\mathcal{O}(400)$ known elementary particles.

$$J^P = 0^- \quad J^P = 1^- \quad J^P = 1/2^+ \quad J^P = 3/2^+$$

5.2. Hadronen, Quarks

■ Hadronen:

- stark wechselwirkende Teilchen, werden durch die **Quanten-Chromodynamik QCD** beschrieben
- sind aus Quarks und Gluonen aufgebaut, die durch das QCD-**Confinement** ein gebundenes qqq (Baryonen) oder $q\bar{q}$ (Mesonen) System bilden



■ Leptonen:

- sind punktförmige Spin $\frac{1}{2}$ Teilchen, die sich in 3 Familien e , μ , τ gruppieren

rein leptonische Ww.

β -Zerfall des Myons

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

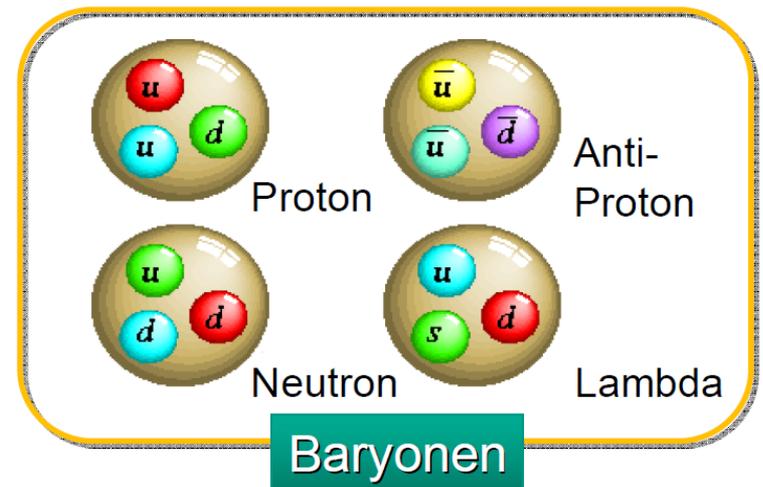
$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

$\tau = 2.2 \mu\text{s}$

- Paritätsverletzung, G_F und für $\cos \theta_c$

Baryonen

- Baryonen sind gebundene 3-Quark (qqq) Zustände mit Baryonenzahl $B = +1$, Antibaryonen mit $B = -1$
- Bei der Diskussion von Baryonen (und Mesonen) ist der **Isospin I** wichtig
 Grund: $m(\text{up}) \sim m(\text{down}) \sim 2\text{-}5 \text{ MeV}$, Isospinsymmetrie zeigt sich z.B. bei Δ^{++} (uuu), Δ^+ (uud), Δ^0 (udd), Δ^- (ddd) alle mit ähnlicher Masse $\sim 1232 \text{ MeV}$
 - p Proton (uud) $m = 938.3 \text{ MeV}$
 - n Neutron (udd) $m = 939.6 \text{ MeV}$
 - Λ^0 Lambda (uds) $m = 1115.6 \text{ MeV}$
 - Σ^+ Sigma (uus) $m = 1189.4 \text{ MeV}$
- - Das leichteste Baryon, das Proton, ist bei Baryonenzahl-Erhaltung stabil
 - Jedes Baryon hat ein Antiteilchen: $p \bar{p}$
 - Spin $\frac{1}{2}$ und Spin $\frac{3}{2}$ Baryonen, $L = 0, 1, \dots$
 - **Parität von Baryonen: $P = (-1)^L$**



Baryonen – Klassifikation

- Baryonen können über die starke bzw. schwache Wechselwirkung zerfallen, dabei bleibt die (additive) Baryonenzahl B erhalten
 - in Feynman-Diagrammen darf eine Quarklinie nicht unterbrochen werden, der Flavour- oder der QCD-Ladungszustand darf sich jedoch ändern
- Acht **$s = 1/2$ Baryonen**: ($\ell = 0$)

$$\begin{aligned}
 p(938) &= |uud\rangle & n(940) &= |udd\rangle \\
 \Lambda(1115) &= |(ud - du)s\rangle \\
 \Sigma^+(1189) &= |uus\rangle & \Sigma^-(1197) &= |dds\rangle \\
 \Sigma^0(1192) &= |(ud + du)s\rangle \\
 \Xi^0(1315) &= |uss\rangle & \Xi^-(1321) &= |dss\rangle
 \end{aligned}$$

Baryonen-Oktett

- Zehn **$s = 3/2$ Baryonen**: ($\ell = 0$)

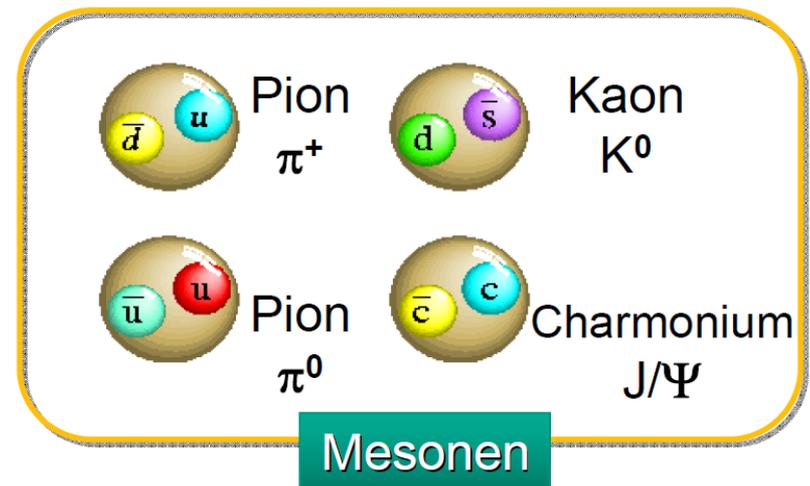
$$\begin{aligned}
 \Delta^{++}(1230) &= |uuu\rangle & \Delta^+(1231) &= |uud\rangle \\
 \Delta^0(1232) &= |udd\rangle & \Delta^-(1233) &= |ddd\rangle \\
 \Sigma^+(1383) &= |uus\rangle & \Sigma^-(1387) &= |dds\rangle \\
 \Sigma^0(1384) &= |uds\rangle \\
 \Xi^0(1532) &= |uss\rangle & \Xi^-(1535) &= |dss\rangle \\
 \Omega^-(1672) &= |sss\rangle
 \end{aligned}$$

Baryonen-Dekuplett

Mesonen

- Mesonen sind gebundene Quark-Antiquark ($q\bar{q}$) Zustände mit der Baryonenzahl $B = 0$, Antimesonen haben ebenfalls $B = 0$

- π^0	Pion	$(u\bar{u}/d\bar{d})$	$m = 135.0$ MeV
- π^+	Pion	$(u\bar{d})$	$m = 139.6$ MeV
- K^+	Kaon	$(u\bar{s})$	$m = 493.7$ MeV
- η	Eta	$(u\bar{u}/d\bar{d})$	$m = 547.7$ MeV
- ρ	Rho	$(u\bar{d})$	$m = 775.8$ MeV
- D^+	D	$(c\bar{d})$	$m = 1869.4$ MeV
- B^0	B^0	$(d\bar{b})$	$m = 5279$ MeV



- - da für alle Mesonen $B = 0$ gilt, sind **alle**

Mesonen instabil und zerfallen

- jedes Meson hat ein Antiteilchen: Beispiel der geladenen Pionen $\pi^+ \pi^-$
- neutrale Mesonen können ihre eigenen Antiteilchen sein: π^0
aber: $K^0 \neq \bar{K}^0$ (neutrale Kaonen mit $K^0 = |ds\rangle$ & $\bar{K}^0 = |\bar{d}\bar{s}\rangle$ sind verschieden)
- C-Parität: $C = +1$ falls $|q\bar{q}\rangle = +1 |q\bar{q}\rangle$, $C = -1$ falls $|q\bar{q}\rangle = -1 |q\bar{q}\rangle$

Pionen

- Pionen sind die leichtesten Mesonen, unterliegen allen 3 Wechselwirkungen:

- **starke Wechselwirkung**

Erzeugung / Einfang / Absorption / Zerfall des Pions

- **schwache Wechselwirkung**

Pionzerfall $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ oder $\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$

- **elektromagnetische Wechselwirkung**

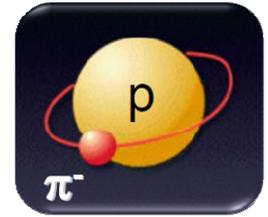
Pionzerfall $\pi^0 \rightarrow 2 \gamma$

- geladene Pionen

$$\begin{aligned} |\pi^+\rangle &= |u \bar{d}\rangle \\ |\pi^-\rangle &= |\bar{u} d\rangle \end{aligned}$$

- neutrale Pionen

$$|\pi^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|u \bar{u}\rangle + |d \bar{d}\rangle)$$



$\pi^- + p$
(pionisches Atom)

Parameter	π^+, π^-	π^0
Masse	139.57 MeV	134.98 MeV
Lebensdauer τ	$2.6 \cdot 10^{-8}$ s	$8.4 \cdot 10^{-17}$ s
Wegstrecke $c \cdot \tau$	7.8 m	25.1 nm
Spin / Parität	0^-	0^-
Isospin	Triplett	Triplett
Zerfallsmodus	$\mu^+ + \nu_\mu$	2γ
Ww. des Zerfalls	schwach	elektromagnet.

Pionen

- Geladene & neutrale Pionen bilden ein **Isospin-Triplett** mit **I = 1**

$$|\pi^+\rangle = |u \bar{d}\rangle$$

$$I_3 = +1$$

$$|\pi^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|u \bar{u}\rangle + |d \bar{d}\rangle)$$

$$I_3 = 0$$

$$|\pi^-\rangle = |\bar{u} d\rangle$$

$$I_3 = -1$$

Isospin-Modell beruht auf der Kleinheit und Fast-Identität der u, d-Massen, d.h. man betrachtet die drei Ladungszustände des Pions als ein Teilchen

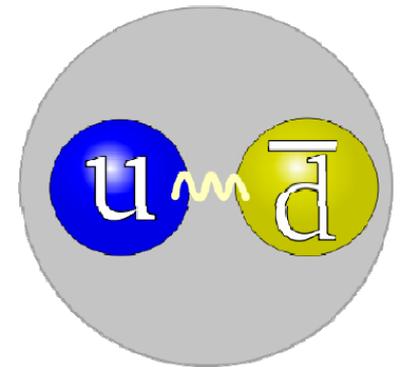
- Isospin-Komponente I_3 :

$$I_3 = \frac{1}{2} \cdot [(n_u - n_{\bar{u}}) - (n_d - n_{\bar{d}})]$$

- **Eta = isoskalärer Partner** des neutralen Pions mit **I = 0**

$$|\eta\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|u \bar{u}\rangle - |d \bar{d}\rangle)$$

das η Meson ist ein anderes Teilchen als das π^0 (andere Masse, Lebensdauer, Zerfallsmoden)



Mesonen – Klassifikation

- **Mesonen-Klassifikationsschema** entsprechend intrinsischer Eigenschaften

Quarkflavour-Inhalt **f**

Mesonen mit **u**p, **d**own, **s**trangeness, **c**harm, **b**ottom – Quarks/Antiquarks

Gesamtdrehimpuls **J**

gebildet aus der Summe von Spin **S** + Bahn-(Orbital-) Drehimpuls **L**

S Gesamtspin des Quark-Antiquark-Paares

Triplett **S** = 1 ($\uparrow\uparrow$), Singulett **S** = 0 ($\uparrow\downarrow$)

L relativer Bahndrehimpuls des Quark-Antiquark Paares

Parität **P**

2 Paritäts-Zustände: gerade (even) **P** = +1, ungerade (odd) **P** = -1

Parität von Mesonen **P** = $-(-1)^l = (-1)^{l+1}$

basiert aus **Definition**: $P(\text{Fermion}, q) = +1$, $P(\text{Antifermion}, q) = -1$

da **P** eine multiplikative Quantenzahl ist, gilt für $P(q\bar{q}) = (+1) \cdot (-1) \cdot (-1)^l$

damit ist z.B. bei Pion $P(\pi) = -1$ (Beispiel eines pseudoskalaren Mesons)

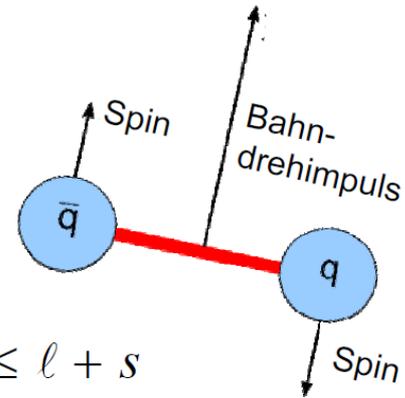
■ Notation in der **Meson-Spektroskopie**:

$$n^{2s+1} \ell_J$$

mit

$$\vec{J} = \vec{s} + \vec{\ell}$$

$$|\ell - s| \leq J \leq \ell + s$$



n: radiale Anregung des Mesons

ℓ: orbitale Anregung des Mesons ℓ = 0 : S-Zustand, ℓ = 1 : P-Zustand, ...

1¹S₀ Mesonen: (ℓ = 0, s = 0) **Spin-Singulett Mesonen** π⁺, K⁺, K⁰, Φ, ω, ...

1³S₁ Mesonen: (ℓ = 0, s = 1) **Spin-Triplett Mesonen** ρ⁺, K^{*+}, K^{*0}, η, η'

- Mit den drei leichten Quark-Flavours (u,d,s) & den entsprechenden Anti-quarks lassen sich insgesamt 9 Mesonen (Nonett) im Grundzustand bilden, zugrunde liegende **Symmetrietransformation** ist **SU(3)_{Flavour}**
 - die Quantenzahl S (Strangeness) wird in der starken & elektromagnetischen Wechselwirkung erhalten, es gilt S(s-Quark) = -1, S (Anti-s-Quark) = +1
 - der (starke) Isospin (leichte u,d Massen) beruht auf der **SU(2) Symmetrie**

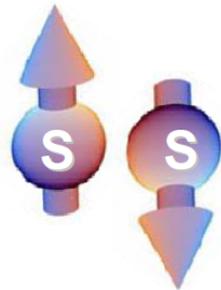
Mesonen – Spin Singulett

Spin-Singulett Mesonen

pseudoskalare Mesonen

- die neun **1^1S_0 Mesonen (Nonett)**: ($\ell = 0, s = 0$)
 - sind die Mesonen mit der Grundzustandskonfiguration und haben die kleinsten Massen (oft Zerfall über schwache Wechselwirkung)
- pseudoskalares Nonett umfasst als Mitglieder:
 - geladene & neutrale Pionen als **Isospintriplett**
 - geladene & neutrale Kaonen als Teilchen mit Strangeness

$$\begin{aligned}\pi^+(140) &= |u\bar{d}\rangle & \pi^-(140) &= |\bar{u}d\rangle & \pi^0(135) &= \frac{1}{\sqrt{2}}|d\bar{d} - u\bar{u}\rangle \\ K^+(494) &= |u\bar{s}\rangle & K^-(494) &= |\bar{u}s\rangle \\ K^0(498) &= |d\bar{s}\rangle & \bar{K}^0(498) &= |\bar{d}s\rangle \\ \Phi(1020) &= -|s\bar{s}\rangle & \omega(782) &= \frac{1}{\sqrt{2}}|d\bar{d} + u\bar{u}\rangle\end{aligned}$$



Mesonen – Spin Triplett

Spin-Triplett Mesonen

Vektorielle Mesonen

- Die neun **1^3S_1 Mesonen (Nonett)**: ($\ell = 0$, $s = 1$)
 - sind deutlich schwerer als die Spin-Singulett Mesonen
- Grund: Größe der **Hyperfeinstruktur-Aufspaltung** ist aufgrund der Spin-Spin-Wechselwirkung der Quarks (basierend auf dem Austausch von Gluonen) viel größer als im elektromagnetischen Fall

$$\rho^+(770) = |u\bar{d}\rangle \quad \rho^-(770) = |\bar{u}d\rangle \quad \rho^0(770) = \frac{1}{\sqrt{2}}|d\bar{d} - u\bar{u}\rangle$$

$$K^{*+}(892) = |u\bar{s}\rangle \quad K^{*-}(892) = |\bar{u}s\rangle$$

$$K^{*0}(896) = |d\bar{s}\rangle \quad \bar{K}^{*0}(896) = |\bar{d}s\rangle$$

$$\eta(547) \sim \frac{1}{\sqrt{6}}|u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s}\rangle \quad \eta'(958) \sim \frac{1}{\sqrt{6}}|u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s}\rangle$$



Mesonen – Zerfälle: Grundlagen

- Ein Meson-Zerfallsmodus tritt nur auf, falls er kinematisch möglich ist

Starke Wechselwirkung:

- spielt eine dominante Rolle bei Mesonenzerfällen
- leichte Mesonen: $\tau \sim 10^{-23} \dots 10^{-24}$ s, große Zerfallsbreite (10-100 MeV)
- wird charakterisiert durch Erhaltungssätze (Quarkflavours, Isospin)
- Beispiele: $\rho^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$, $\omega \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0$

Elektromagnetische Wechselwirkung:

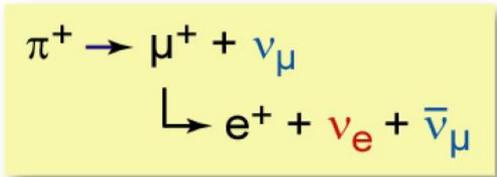
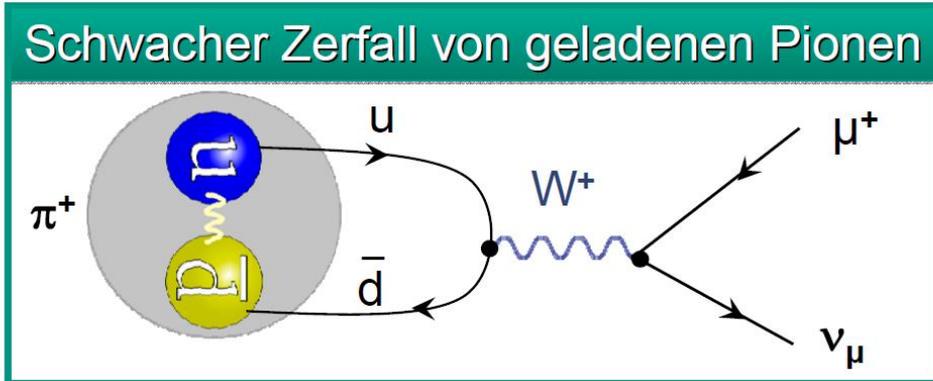
- spielt zweitwichtigste Rolle bei Mesonenzerfällen
- typische Lebensdauern $10^{-17} \dots 10^{-19}$ s
- beim Zerfall kann es zur Verletzung des starken Isospins (u,d) kommen
- Beispiele: $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$, $\eta \rightarrow \gamma + \gamma$ (39%) $\eta \rightarrow 3 \pi$ (55%)

Schwache Wechselwirkung:

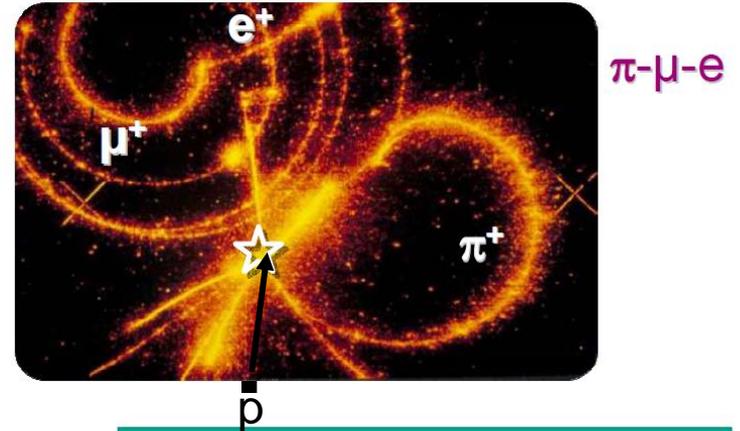
- spielt eher untergeordnete Rolle bei Mesonenzerfällen (wichtig: π , K)
- typische Lebensdauern $\sim 10^{-8}$ s
- Änderung von Quark-Flavours (s-u), Verletzung von Symmetrien (Parität)
- Beispiele: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ (100%) , $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ (64%) $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$ (21%)

Mesonen – Zerfälle durch Schwache WW:

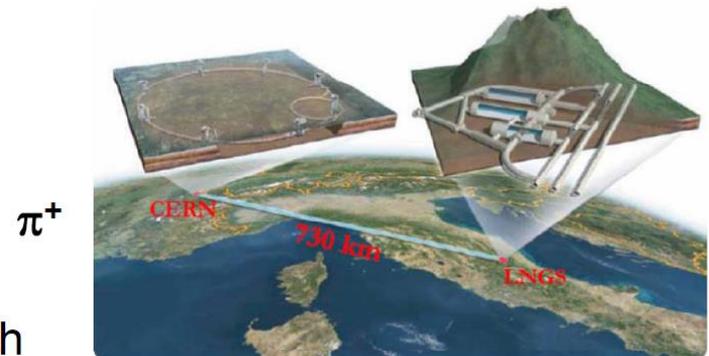
- Pionen zerfallen bevorzugt in leichtere Leptonen ($\mu = 105 \text{ MeV}$, $e = 0.5 \text{ MeV}$)



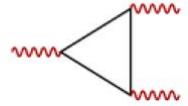
Beispiel: an einem Protonenbeschleuniger werden in einem Target Pionen erzeugt, ihr Zerfall erzeugt Myon-Neutrinos im GeV-Energiebereich



CERN-LNGS Neutrinostrahl

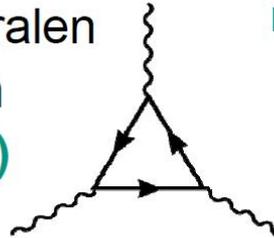


Mesonen-Zerfälle durch El.-Magn. WW:

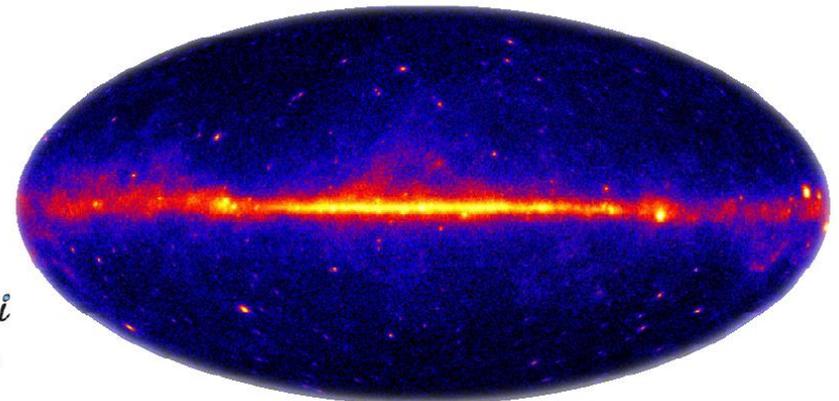
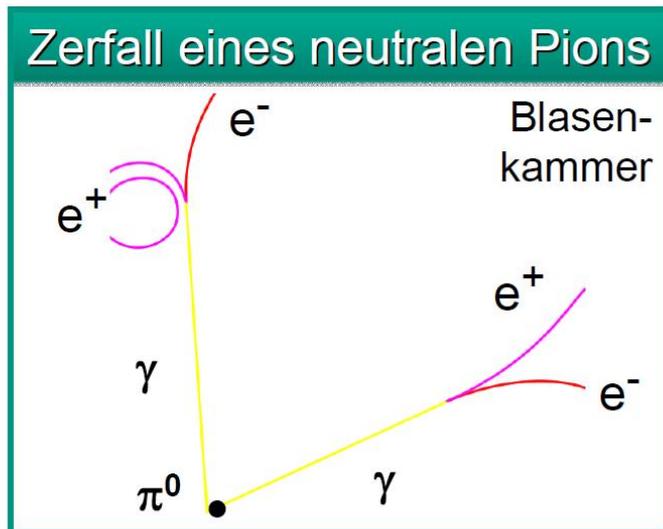


- Neutrale Pionen π^0 zerfallen elektromagnetisch in 2 masselose Photonen (γ)
 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

- **Theorie:** Darstellung der 'chiralen Anomalie' des π^0 -Zerfalls im Dreiecksdiagramm, **aus $\Gamma(\pi^0)$**
 \rightarrow **3 Farbfreiheitsgrade**



- **Experiment:**
 - π^0 ist nie 'direkt' nachweisbar
 - 2 γ 's mit $E_\gamma = 67.5$ MeV im CMS
 - Gammas erzeugen in Materie zwei e^+/e^- Paare (Paarbildung)
- Astroteilchenphysik: GeV- γ 's von hadronischen Beschleunigern



Mesonen – Zerfälle durch Starke WW:

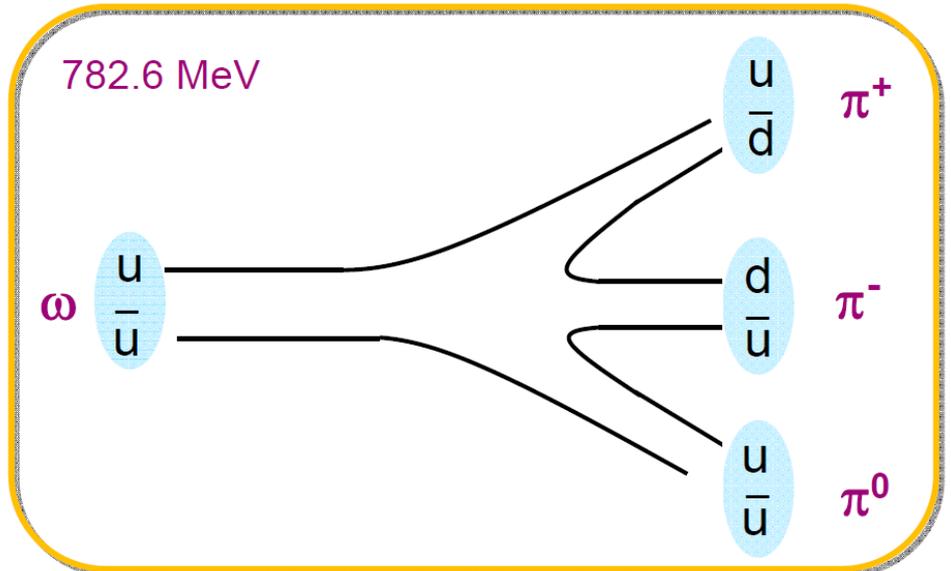
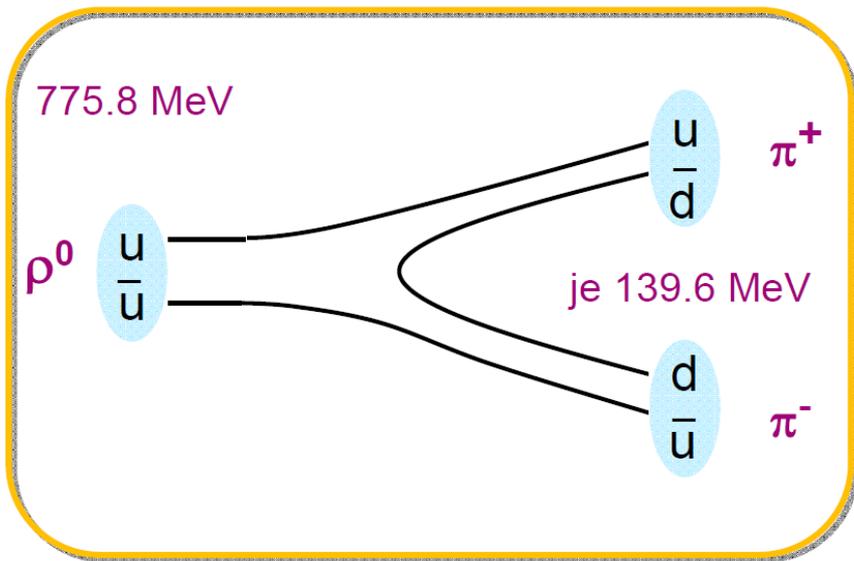
- Zerfälle durch die starke Wechselwirkung am Beispiel der ρ^0 - und ω Mesonen

$$\rho^0(770) = \frac{1}{\sqrt{2}} |d\bar{d} - u\bar{u}\rangle$$

$\tau = 4.3 \cdot 10^{-24} \text{ s}$ $\Gamma = (150.3 \pm 1.6) \text{ MeV}$
 Zerfall in 2 Pionen (100%)

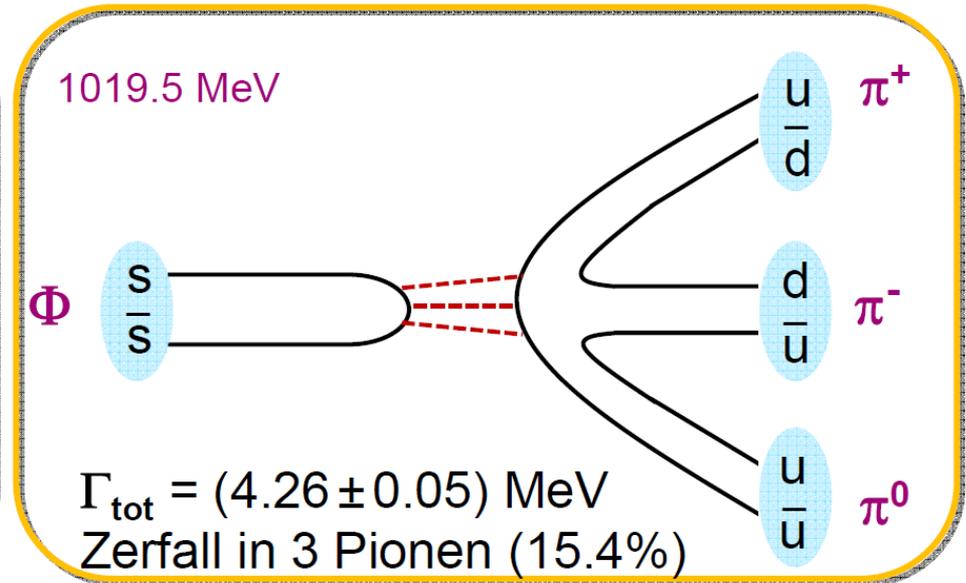
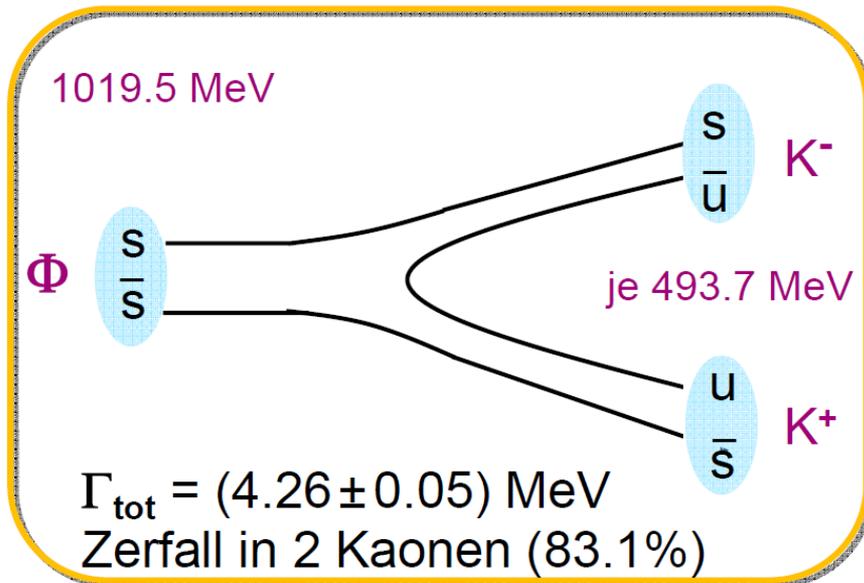
$$\omega(782) = \frac{1}{\sqrt{2}} |d\bar{d} + u\bar{u}\rangle$$

$\tau = 7.8 \cdot 10^{-23} \text{ s}$
 Zerfall in 3 Pionen (89.1%)



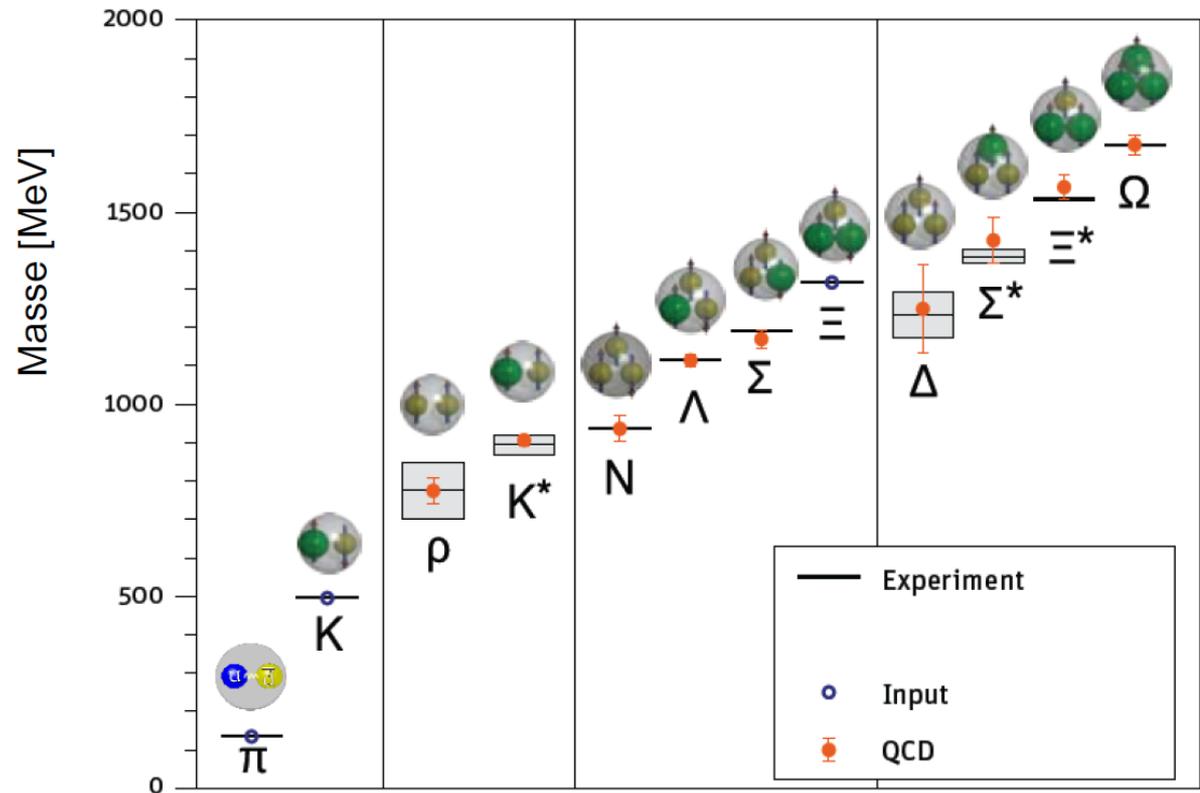
Zweig-Regel

- Bei den Zerfällen von schwereren Mesonen, z.B. des $\Phi(1020)$, ist der Quark-Inhalt der Mesonen im Endzustand wichtig (mit/ohne Strangeness)
- Zerfall eines Φ Vektor-Mesons: $\sim 83\%$ in $K^+ K^-$, nur $\sim 15\%$ in drei Pionen $\pi^+ \pi^- \pi^0$
- Zerfall in $K^+ K^-$: durchgezogene $s\bar{s}$ - Quarklinien
- Zerfall in $\pi^+ \pi^- \pi^0$: nicht durchgezogene $s\bar{s}$ - Quarklinien
- „Zweig-Regel“ \rightarrow geringe Zerfalls-Breite von schweren Mesonen



Massenspektrum von Baryonen/Mesonen

- Das beobachtete Massenspektrum von Baryonen und Mesonen kann heute mit wenigen Input-Massen durch modernen QCD Methoden gut nachgebildet werden



Existenz von exotischen Hadronen?

- Zahlreiche Suchen nach **exotischen Baryon- & Mesonzuständen**

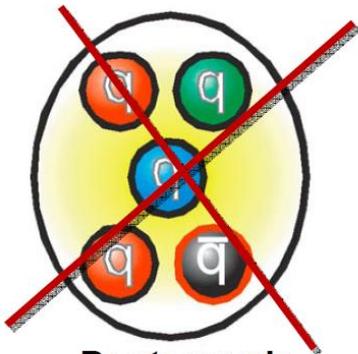


normales Baryon



normales Meson

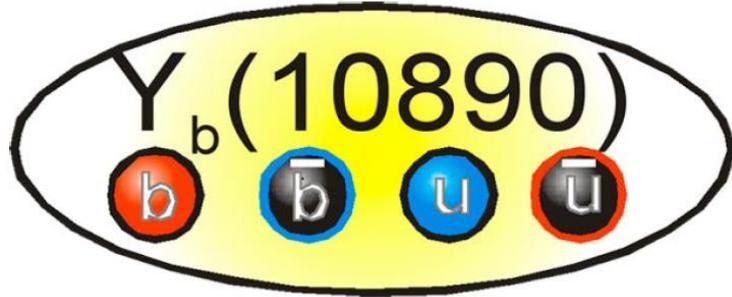
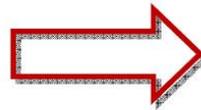
- Quantenchromodynamik (QCD) erlaubt die Existenz z.B. von Tetraquarks
2010: Resultate des BELLE Experiments in Japan können als möglicher Hinweis für ein Tetraquark gedeutet werden



Pentaquark



Tetraquark



Evidence grows for tetraquarks

Physics world Apr 27, 2010



Glueball



Hybridmeson