

Kerne und Teilchen

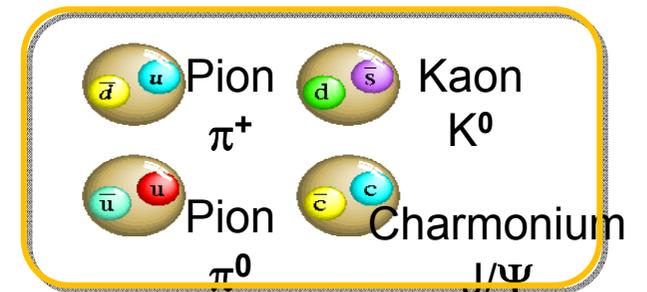
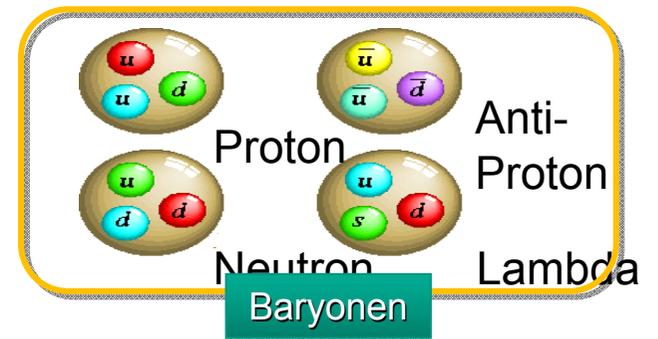
Moderne Physik III

Vorlesung # 15

7. Grundlagen der Elementarteilchen-Physik

7.1 Der Teilchenzoo

7.2 Hadronen und Leptonen



u up quark SLAC	c charm quark Brookhaven & SLAC	t top quark Fermilab	g gluon DESY
d down quark SLAC	s strange quark Manchester University	b bottom quark Fermilab	γ photon Washington University
ν_e electron neutrino Savannah River Plant	ν_μ muon neutrino Brookhaven	ν_τ tau neutrino Fermilab	W W boson CERN
e electron Cornell University	μ muon CERN and Harvard	τ tau SLAC	Z Z boson CERN

7.1 Der Teilchenzoo

- Fundamentale Bestandteile der Materie: **$S = 1/2$ Fermionen** (Leptonen, Quarks)
Fundamentale Austauschwechselwirkungen: **$S = 1$ Eichbosonen** (γ , W^\pm , Z , g)

$S = 1/2$ Fermionen

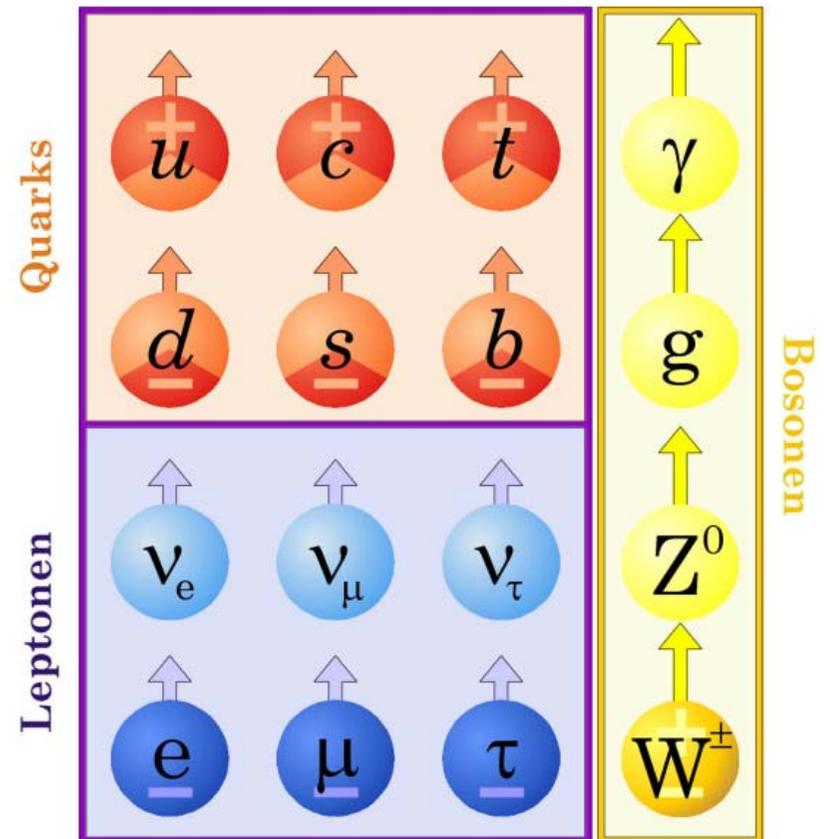
- treten in 3 Generationen (Familien) auf

Quarks (punktförmig)

drei Dubletts: **up-down** (**u,d**),
charm-strange (**c,s**), **top-bottom** (**t,b**)
unterliegen allen drei Wechselwirkungen
Ladungen $Q = +2/3$ (u,c,t) $Q = -1/3$ (d,s,b)

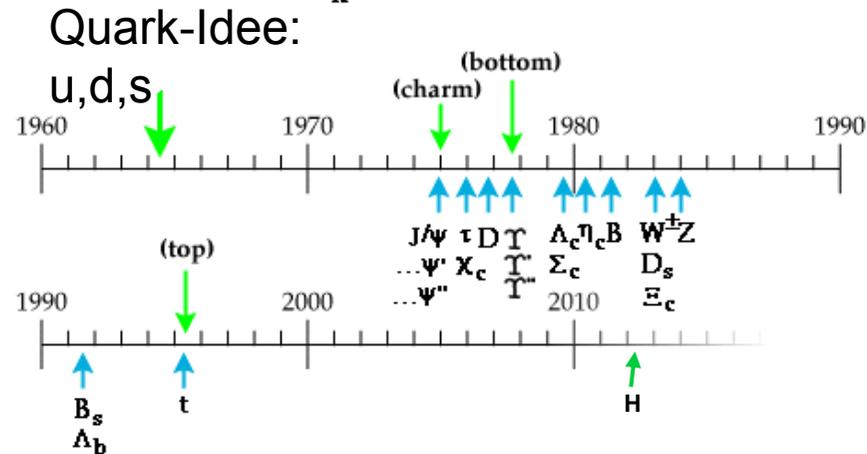
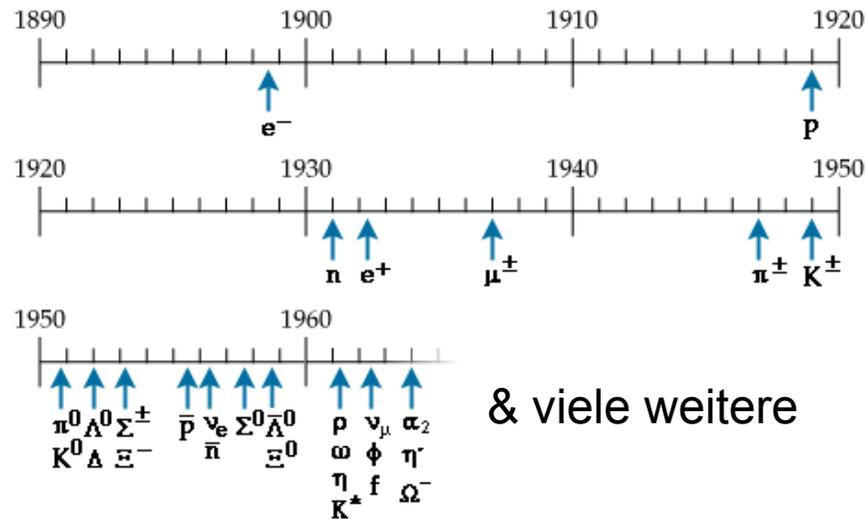
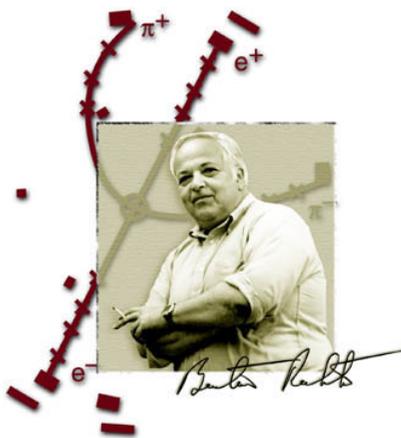
Leptonen (punktförmig)

drei Dubletts: (ν_e, e^-), (ν_μ, μ^-), (ν_τ, τ^-)
Neutrinos ν_ℓ & geladene Leptonen ℓ^-
unterliegen nur der schwachen (ν_ℓ, ℓ^-) &
elektromagnet. Wechselwirkung (ℓ^-)

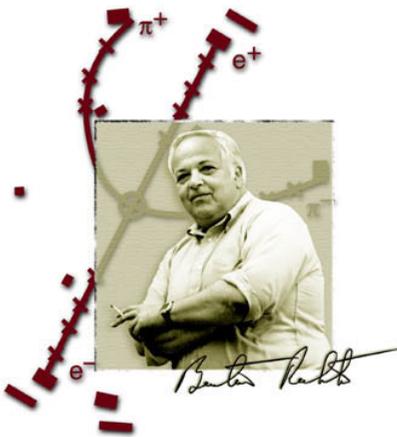


Historisches

- Die fundamentalen Bausteine der Materie und Austauschteilchen wurden in heute berühmten Experimenten nachgewiesen



■ Die fundamentalen Bausteine der Materie und Austauscheteilchen wurden in heute berühmten Experimenten nachgewiesen



1968: SLAC u up quark	1974: Brookhaven & SLAC c charm quark	1995: Fermilab t top quark	1979: DESY g gluon
1968: SLAC d down quark	1947: Manchester University s strange quark	1977: Fermilab b bottom quark	1923: Washington University γ photon
1956: Savannah River Plant ν_e electron neutrino	1962: Brookhaven ν_μ muon neutrino	2000: Fermilab ν_τ tau neutrino	1983: CERN W W boson
1897: Cavendish Laboratory e electron	1937: Caltech and Harvard μ muon	1976: SLAC τ tau	1983: CERN Z Z boson



Antiteilchen & Erhaltungszahlen L, B

- Dirac-Gleichung sagt Existenz von **Antiteilchen** mit identischer Masse aber entgegengesetzten Quantenzahlen (Ladung Q , magnet. Moment μ) voraus:

Leptonische Antiteilchen: Dubletts $(\bar{\nu}_e, e^+)$, $(\bar{\nu}_\mu, \mu^+)$, $(\bar{\nu}_\tau, \tau^+)$

Antiquarks: Dubletts (\bar{u}, \bar{d}) , (\bar{c}, \bar{s}) , (\bar{t}, \bar{b})

- Einführung von additiven Erhaltungszahlen L und B :

Leptonenzahl L : für Leptonen (ν_ℓ, ℓ^-) gilt $L = +1$
für Anti-Leptonen $(\bar{\nu}_\ell, \ell^+)$ gilt $L = -1$

$0\nu\beta\beta$
??

Familien-Leptonenzahlen L_e, L_μ, L_τ ($L = L_e + L_\mu + L_\tau$)

$(\nu_e, e^-) \Leftrightarrow L_e = +1$ $(\nu_\mu, \mu^-) \Leftrightarrow L_\mu = +1$ $(\nu_\tau, \tau^-) \Leftrightarrow L_\tau = +1$

$\nu_e - \nu_\mu$
 $\nu_\mu - \nu_\tau$

Baryonenzahl B : für Quarks (u, d, c, s, t, b) gilt $B = +1/3$
für Anti-Quarks $(\bar{u}, \bar{d}, \bar{c}, \bar{s}, \bar{t}, \bar{b})$ gilt $B = -1/3$

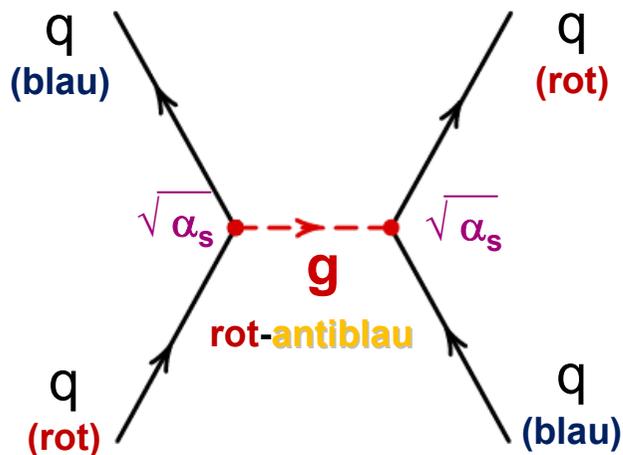
p -Zerfall
??

Eichbosonen

- Die drei fundamentalen Wechselwirkungen werden vermittelt durch (vektorielle) **S = 1 Bosonen** (Eichbosonen, Feldquanten)

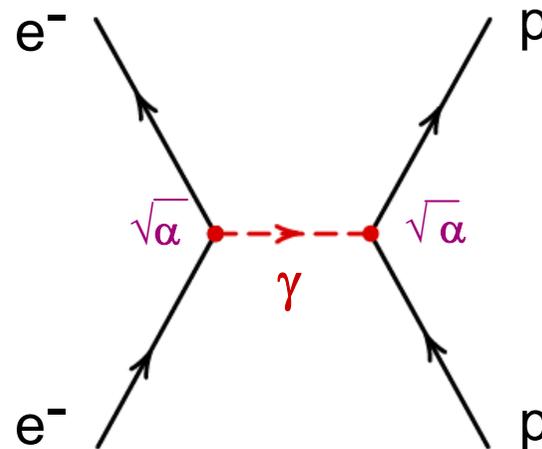
Starke Wechselwirkung

8 geladene Gluonen **g**
 'nacktes' Gluon: $M = 0$
 Reichweite $\sim 10^{-15}$ m
 Farbladung
 Quark-Wechselwirkung



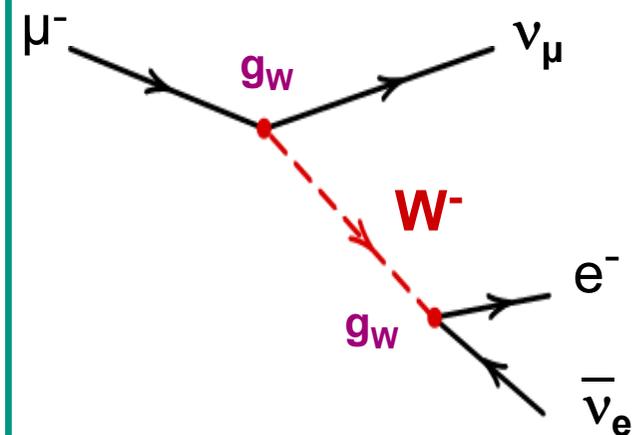
Elektromagnetische Ww.

1 neutrales Photon γ
 $M = 0$ ($< 6 \cdot 10^{-17}$ eV)
 Reichweite = ∞
 klassische Ladung **Q**
 γ -Zerfälle, Streuprozesse



Schwache Wechselwirk.

2 geladene Bosonen **W⁺ W⁻**
 $M = 80.42$ GeV
 Reichweite $\sim 10^{-18}$ m
 schwache Ladung **g_w**
 β -Zerfälle, Teilchenzerfälle



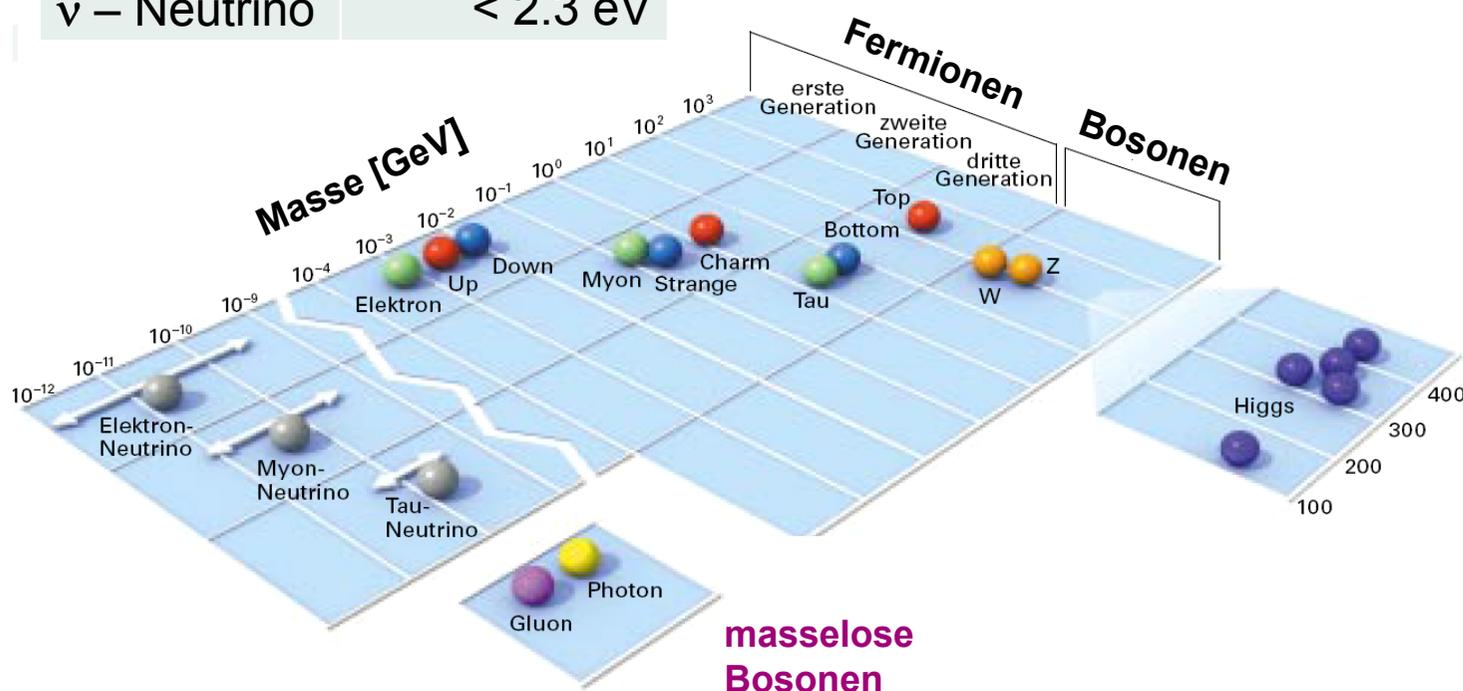
Massen der Fermionen & Bosonen

- Skala der massebehafteten Teilchen umfasst > 11 Größenordnungen

Leptonmassen	
e – Elektron	0.511 MeV
μ – Myon	105.658 MeV
τ – Tau	1776.84 MeV
ν – Neutrino	< 2.3 eV

Bosonmassen	
W – Boson	80.398 GeV
Z ⁰ – Boson	91.188 GeV

Quarkmassen	
u – up	~ 2 MeV
d – down	~ 4.8 MeV
s – strange	92 MeV
c – charm	1.27 GeV
b – bottom	4.2 GeV
t – top	173 GeV

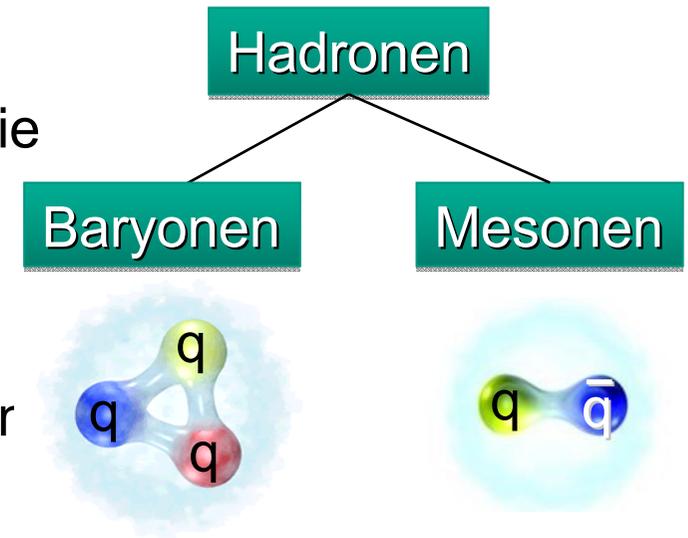


J. Beringer et al.,
 (Particle Data Group)
 Phys. Rev. D86, 1 (2012)

7.2 Hadronen und Leptonen

■ 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



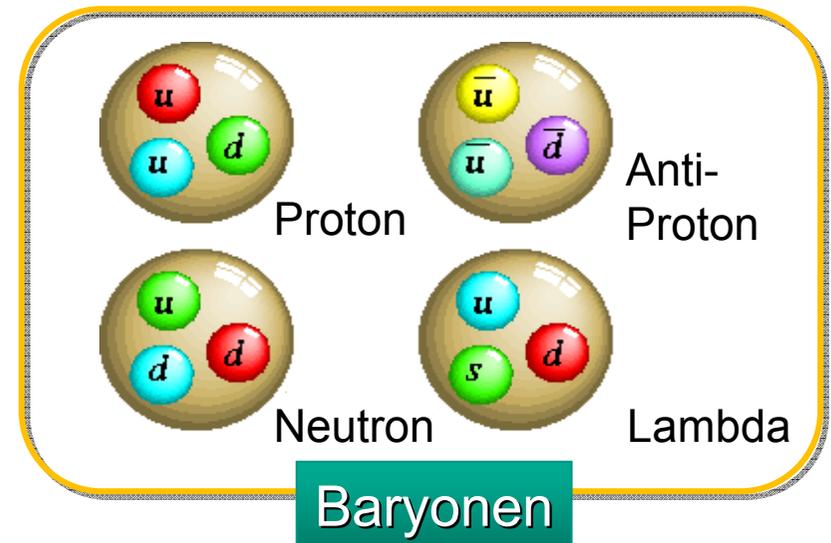
■ Leptonen:

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

<p>A Feynman diagram showing the decay of a muon (μ^-). The muon line enters from the left and splits into a muon neutrino (ν_μ) and a W^- boson. The W^- boson then decays into an electron (e^-) and an electron antineutrino ($\bar{\nu}_e$). The W^- boson is represented by a dashed red line.</p> <p>rein leptonische Ww.</p>	<h3>β-Zerfall des Myons</h3> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px;">$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$</div> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px;">$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$</div> <p>$\tau = 2.2 \mu\text{s}$</p> <p>- Paritätsverletzung, G_F und für $\cos \theta_c$</p>
--	---

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**: ($\ell = 0$)

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

Baryonen-Oktett

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

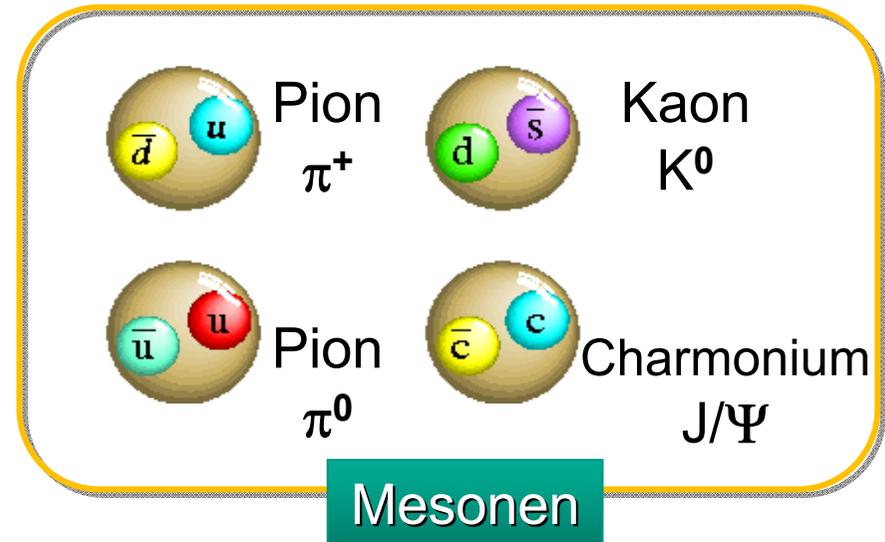
$$\begin{array}{ll}
 \Delta^{++}(1230) = |uuu\rangle & \Delta^+(1231) = |uud\rangle \\
 \Delta^0(1232) = |udd\rangle & \Delta^-(1233) = |ddd\rangle \\
 \Sigma^+(1383) = |uus\rangle & \Sigma^-(1387) = |dds\rangle \\
 \Sigma^0(1384) = |uds\rangle & \\
 \Xi^0(1532) = |uss\rangle & \Xi^-(1535) = |dss\rangle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

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 $\pi^0 \rightarrow 2 \gamma$

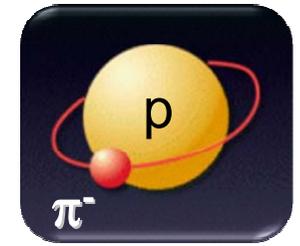
- geladene Pionen

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

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

- 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

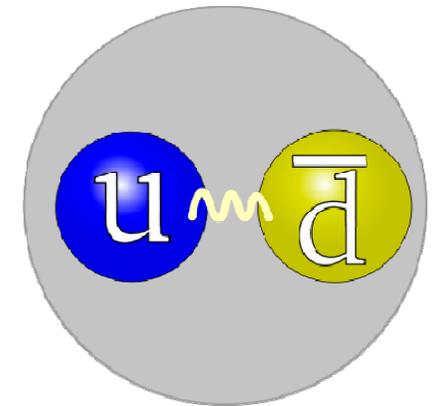
- Isospin-Komponente I_3 :

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

- **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 **$P = -(-1)^e = (-1)^{e+1}$**

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

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

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

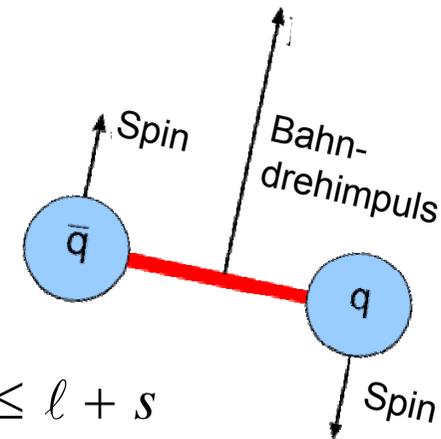
- Notation in der **Meson-Spektroskopie**:

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

mit

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

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



n: radiale Anregung des Mesons

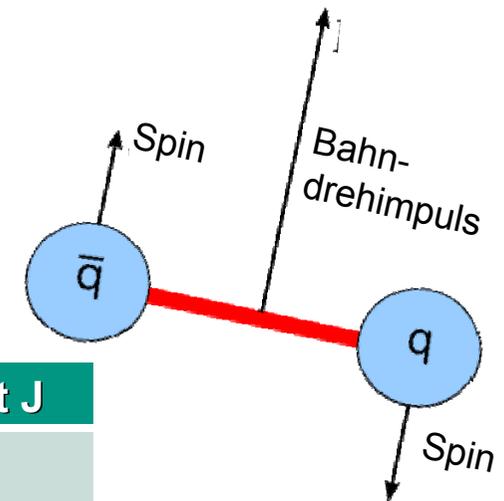
ℓ: orbitale Anregung des Mesons $\ell = 0$: S-Zustand, $\ell = 1$: P-Zustand, ...

1^1S_0 Mesonen: ($\ell = 0, s = 0$) **Spin-Singulett Mesonen** $\pi^+, K^+, K^0, \Phi, \omega, \dots$

1^3S_1 Mesonen: ($\ell = 0, s = 1$) **Spin-Triplett Mesonen** $\rho^+, K^{*+}, K^{*0}, \eta, \eta'$

- 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 $S(\text{s-Quark}) = -1$, $S(\text{Anti-s-Quark}) = +1$
 - der (starke) Isospin (leichte u,d Massen) beruht auf der **SU(2) Symmetrie**

- Die wichtigsten Arten sind die **Vektormesonen** & **pseudoskalaren Mesonen**
 - die **pseudoskalaren Mesonen** ($S=0, \ell=0$) [Spin-Singulett Mesonen] bilden als leichteste Mesonen den 'Grundzustand' von gebundenen $q\bar{q}$ -Systemen
 - die **vektoriellen Mesonen** ($S=1, \ell=0$) [Spin-Triplett Mesonen] haben aufgrund der Spin-Spin-Wechselwirkung deutlich höhere Massen als die pseudoskalaren Mesonen im Grundzustand
 - die skalaren & tensoriellen Mesonen sind sehr schwer, noch heute andauernde Untersuchungen ihrer spezifischen Eigenschaften (Massen, Zerfallsmoden)



Mesonart	Spin	Orbital	Parität P	Gesamt J
pseudoskalar	0	0	-	0
pseudovektoriell	0	1	+	1
vektorielle	1	0	-	1
skalar	1	1	+	0
tensoriell	1	1	+	2

Mesonen – Spin Singulett

Spin-Singulett Mesonen

pseudoskalare Mesonen

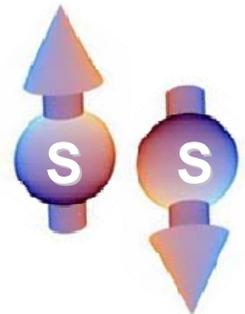
- die neun **1^1S_0 Mesonen (Nonett)**: ($\ell = 0, s = 0$)
 - sind die Mesonen mit der Grundzustandskonfiguration und haben die kleinsten Massen (oft Zerfall über schwache Wechselwirkung)
- pseudoskalares Nonett umfasst als Mitglieder:
 - geladene & neutrale Pionen als **Isospintriplett**
 - geladene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

$$\pi^+ (140) = |u\bar{d}\rangle \quad \pi^- (140) = |\bar{u}d\rangle \quad \pi^0 (135) = \frac{1}{\sqrt{2}} |d\bar{d} - u\bar{u}\rangle$$

$$K^+ (494) = |u\bar{s}\rangle \quad K^- (494) = |\bar{u}s\rangle$$

$$K^0 (498) = |d\bar{s}\rangle \quad \bar{K}^0 (498) = |\bar{d}s\rangle$$

$$\Phi (1020) = -|s\bar{s}\rangle \quad \omega(782) = \frac{1}{\sqrt{2}} |d\bar{d} + u\bar{u}\rangle$$



Mesonen – Spin Triplet

Spin-Triplett Mesonen

Vektorielle Mesonen

$$\frac{m(\rho^+)}{m(\pi^+)} \sim 5.5$$

- 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

$$\begin{aligned} \rho^+(770) &= |u\bar{d}\rangle & \rho^-(770) &= |\bar{u}d\rangle & \rho^0(770) &= \frac{1}{\sqrt{2}}|d\bar{d} - u\bar{u}\rangle \\ K^{*+}(892) &= |u\bar{s}\rangle & K^{*-}(892) &= |\bar{u}s\rangle \\ K^{*0}(896) &= |d\bar{s}\rangle & \bar{K}^{*0}(896) &= |\bar{d}s\rangle \\ \eta(547) &\sim \frac{1}{\sqrt{6}}|u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s}\rangle & \eta'(958) &\sim \frac{1}{\sqrt{6}}|u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s}\rangle \end{aligned}$$



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:

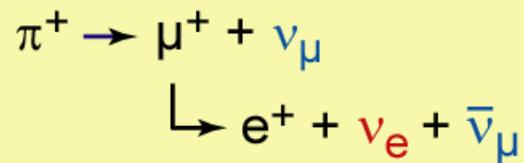
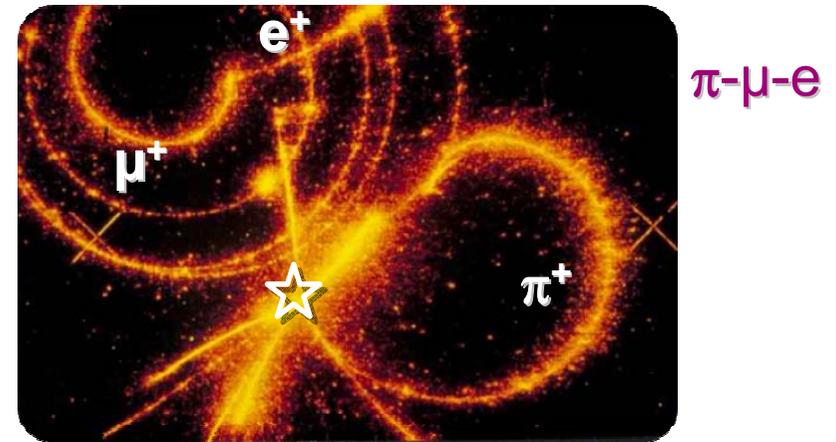
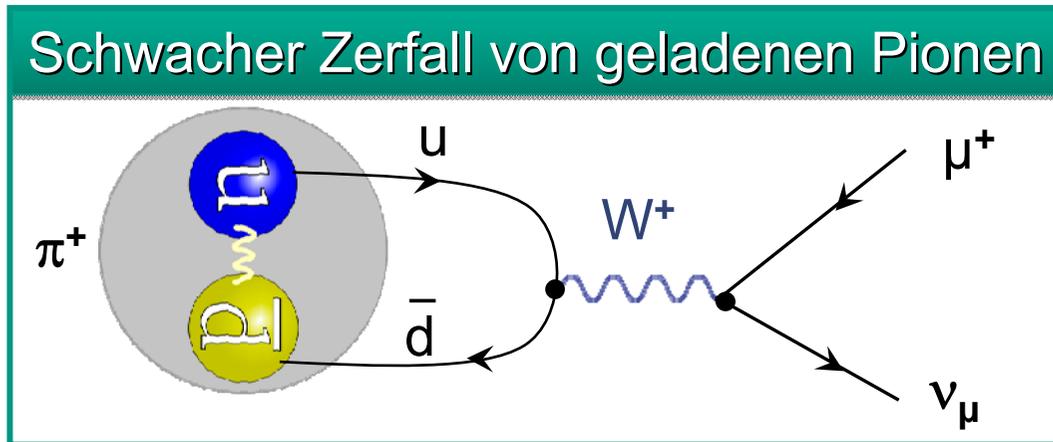
- spielt zweitwichtigste Rolle bei Mesonenzerfällen
- typische Lebensdauern $10^{-17} \dots 10^{-19}$ s
- beim Zerfall kann es zur Verletzung des starken Isospins (u,d) kommen
- Beispiele: $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$, $\eta \rightarrow \gamma + \gamma$ (39%) $\eta \rightarrow 3 \pi$ (55%)

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%)

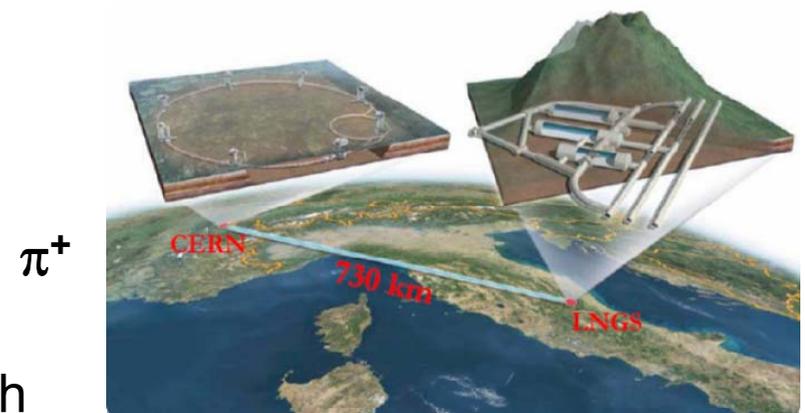
Mesonen – Zerfälle durch Schwache WW:

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

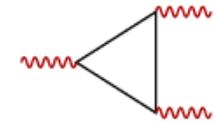


Beispiel: an einem Protonenbeschleuniger werden in einem Target Pionen erzeugt, ihr Zerfall erzeugt Myon-Neutrinos im GeV-Energiebereich

CERN-LNGS Neutrinostrahl

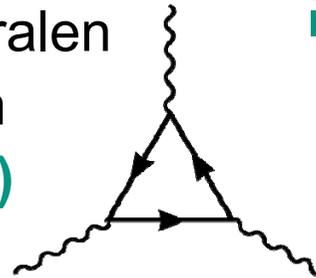


Mesonen-Zerfälle durch El.-Magn. WW:

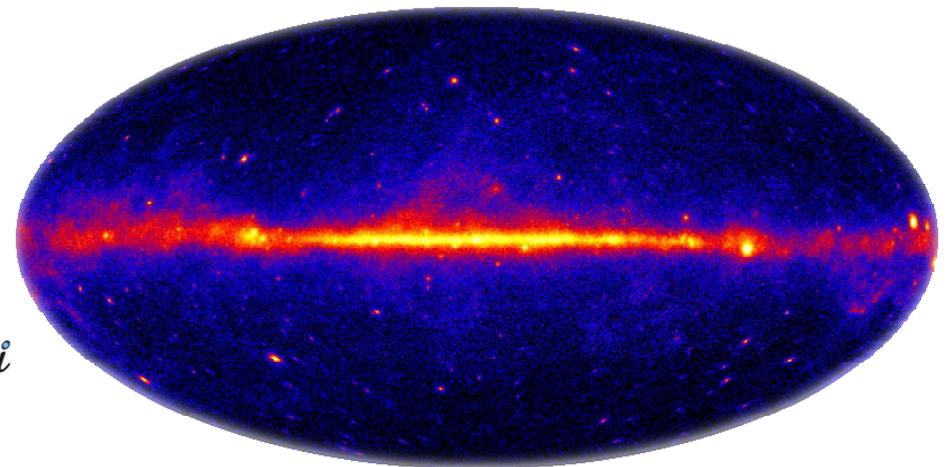
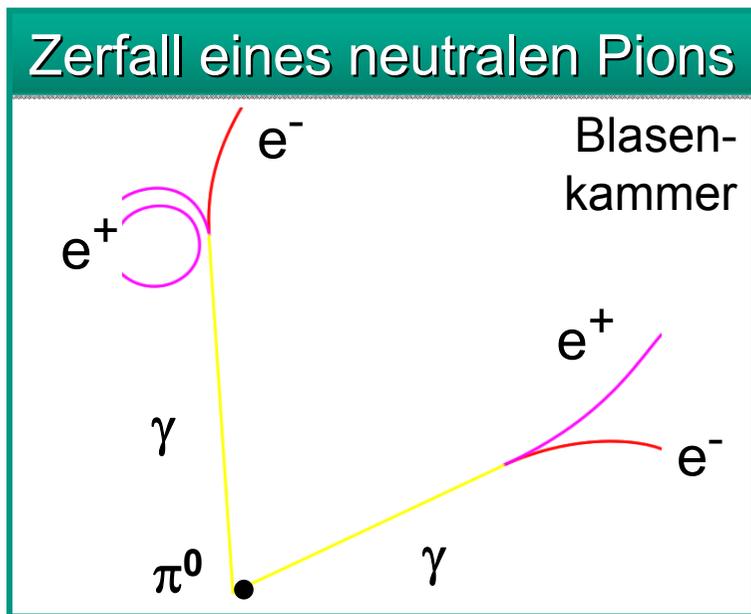


- Neutrale Pionen π^0 zerfallen elektromagnetisch in 2 masselose Photonen (γ)
 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

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

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

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

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

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

