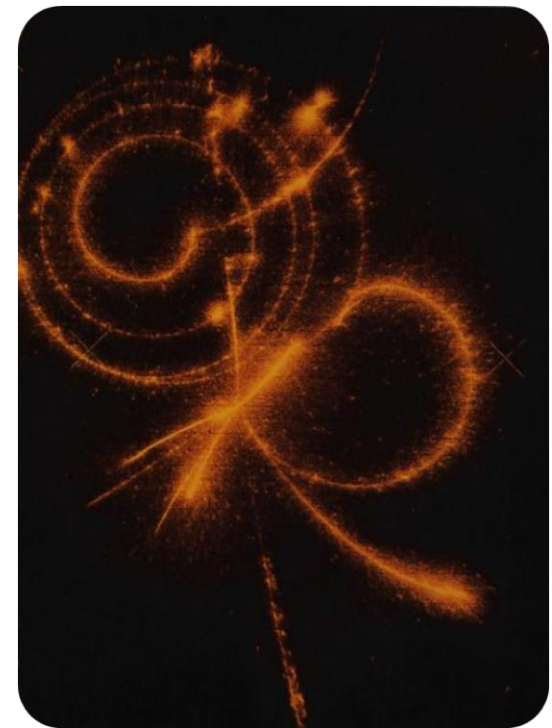


# Kerne und Teilchen

## Physik VI

**Vorlesung # 12 25.5.2010**

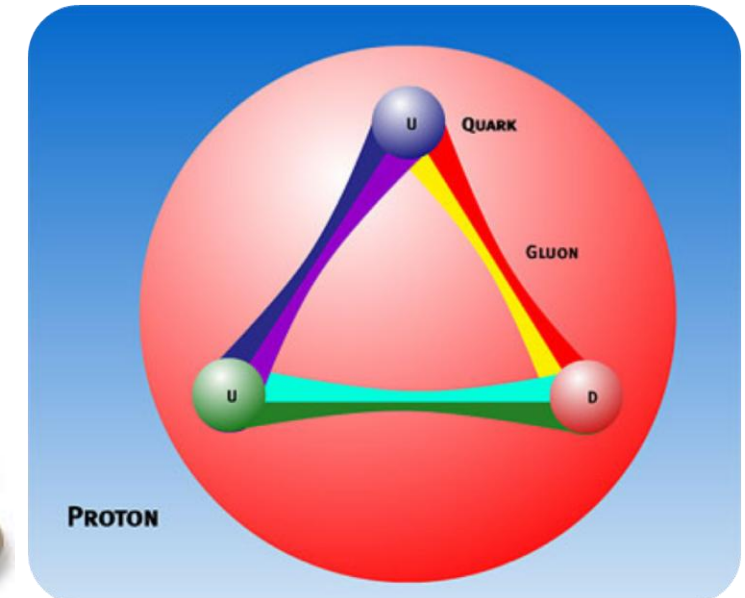
Three quarks for Muster Mark!  
-James Joyce, *Finnegans Wake*



Guido Drexlin, Institut für Experimentelle Kernphysik

## Elementarteilchen-Phänomenologie

- Mesonen: Klassifikation
- Mesonen: Zerfallsprozesse in Feynman-Diagrammen
- Standardmodell der Teilchenphysik
- starke Wechselwirkung: Farbe
- Gluonen



# Kernspaltung, Elementarteilchen

- **spontane Spaltung:** Oberflächenterm  $E_s$  & Coulombterm  $E_c$  als Funktion der Deformation des Kerns – für  $Z > 114$   
induzierte Spaltung: Anregungsenergie durch den Einfang eines Neutrons ( $E_{\text{kin}} = \text{eV} - \text{MeV}$ )

$$\Delta E = \frac{\varepsilon^2}{5} (2a_s \cdot A^{2/3} - a_c \cdot Z^2 \cdot A^{-1/3})$$

- **Elementarteilchen im Standardmodell:**

3 Fermion-Generationen mit  $M = \text{sub-eV} (\nu) - 170 \text{ GeV} (\text{top})$

drei Leptonen-Dubletts:  $(\nu_e, e^-)$ ,  $(\nu_\mu, \mu^-)$ ,  $(\nu_\tau, \tau^-)$

drei Quark-Dubletts:  $(u, d)$ ,  $(c, s)$ ,  $(t, b)$

- **Baryonenzahl B & Leptonzahl L:**

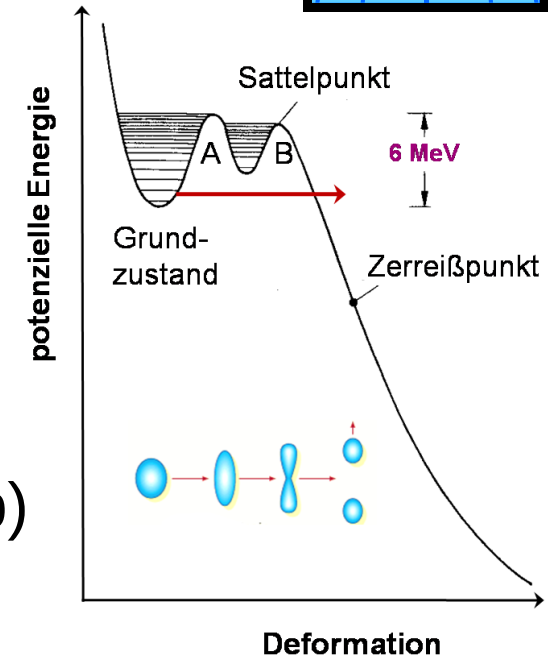
Baryonen:  $B(u, d, c, s, t, b) = +1/3$

$B(p, n, \Lambda^0, \dots) = +1$

Leptonen:  $L(\nu_e, e^-, \nu_\mu, \mu^-, \nu_\tau, \tau^-) = +1$

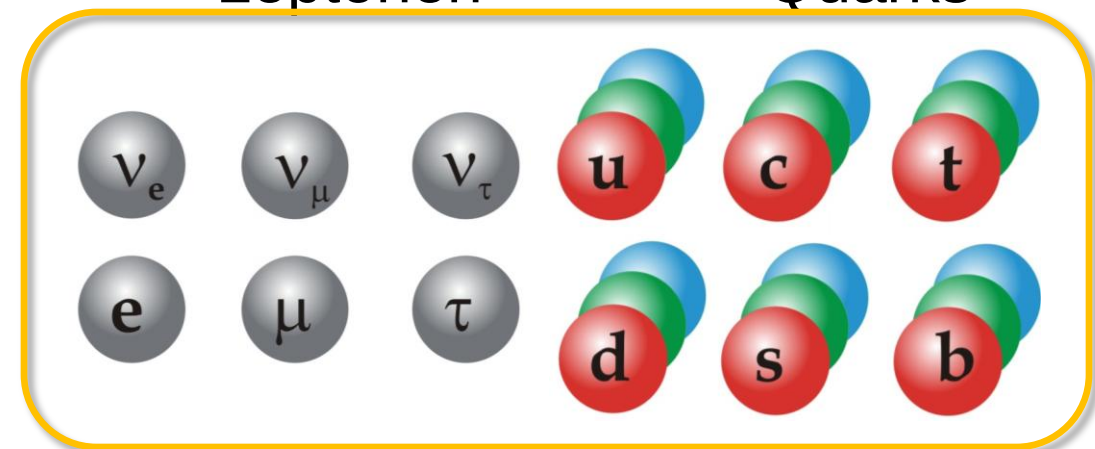
Familien-  $L = L_e + L_\mu + L_\tau$

Leptonzahl (aber  $\nu$ -Oszillationen)



Leptonen

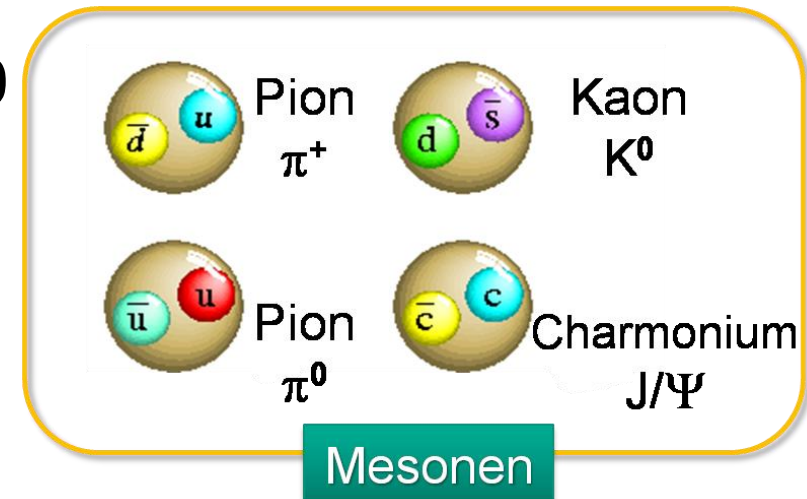
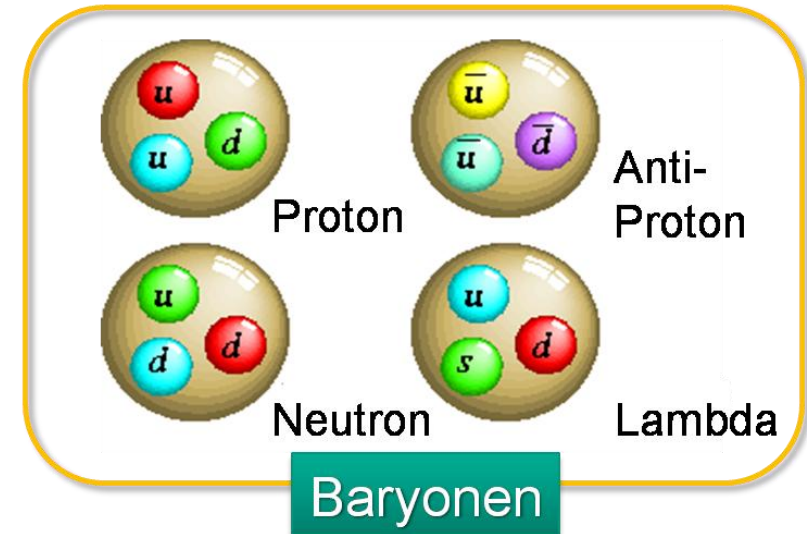
Quarks



# Bosonen, Baryonen & Mesonen



- die **drei fundamentalen Wechselwirkungen** werden vermittelt durch (vektorielle)  **$S = 1$  Bosonen** (Eichbosonen, Feldquanten)
  - starke Wechselwirkung ( $\alpha_s$ ) : **Gluonen**
  - elektromagnet. Wechselwirkung ( $\alpha$ ) : **Photon**
  - schwache Wechselwirkung ( $g_w$ ) :  **$W^+$ ,  $W^-$**
- **Baryonen** sind 3-Quark (qqq) Zustände
  - Spin  $\frac{1}{2}$  und Spin  $\frac{3}{2}$  Baryonen,  $L = 0, 1, \dots$
  - **Parität von Baryonen:  $P = (-1)^L$**
  - Baryonen-Oktett:  **$s = \frac{1}{2}$  Baryonen** mit  $\ell = 0$
  - Baryonen-Dekuplett:  **$s = \frac{3}{2}$  Baryonen** mit  $\ell = 0$
- Mesonen sind gebundene Quark-Antiquark ( $q\bar{q}$ ) Zustände mit der Baryonenzahl  **$B = 0$** 
  - alle Mesonen sind instabil
  - Mesonen mit C-Parität +1 und -1
  - $\pi^0$  ist eigenes Antiteilchen, aber  $K^0 \neq \bar{K}^0$



- **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** =  $-(-1)^\ell = (-1)^{\ell+1}$

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

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

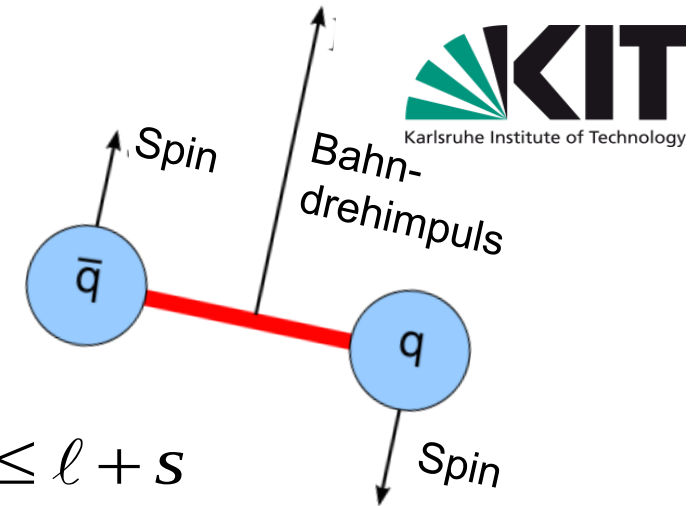
damit ist z.B. bei Pion  $P(\pi) = -1$  (Beispiel eines pseudoskalaren Mesons)

# Mesonen – Klassifikation

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

$$\boxed{n^{2s+1}\ell_J} \quad \text{mit} \quad \boxed{\vec{J} = \vec{S} + \vec{\ell}}$$

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



**n:** radiale Anregung des Mesons

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

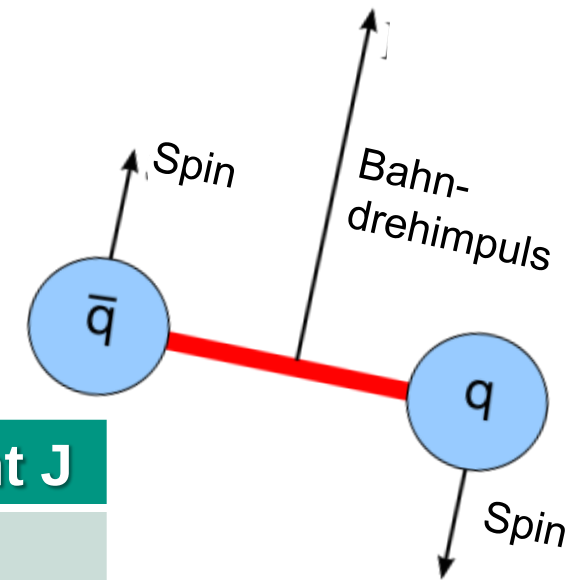
**$1^1S_0$  Mesonen:** ( $\ell = 0, s = 0$ ) **Spin-Singulett Mesonen**  $\pi^+, K^+, K^0, \Phi, \omega, \dots$

**$1^3S_1$  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  **$SU(3)_{\text{Flavour}}$** 
  - 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 |
|---------------------|----------|----------|-----------|----------|
| <b>pseudoskalar</b> | <b>0</b> | <b>0</b> | -         | <b>0</b> |
| pseudovektoriell    | 0        | 1        | +         | 1        |
| <b>vektorielle</b>  | <b>1</b> | <b>0</b> | -         | <b>1</b> |
| skalar              | 1        | 1        | +         | 0        |
| tensoriell          | 1        | 1        | +         | 2        |

## 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 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

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

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

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

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

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





- 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,  $\hookrightarrow$  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%)

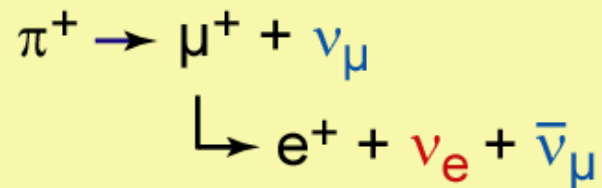
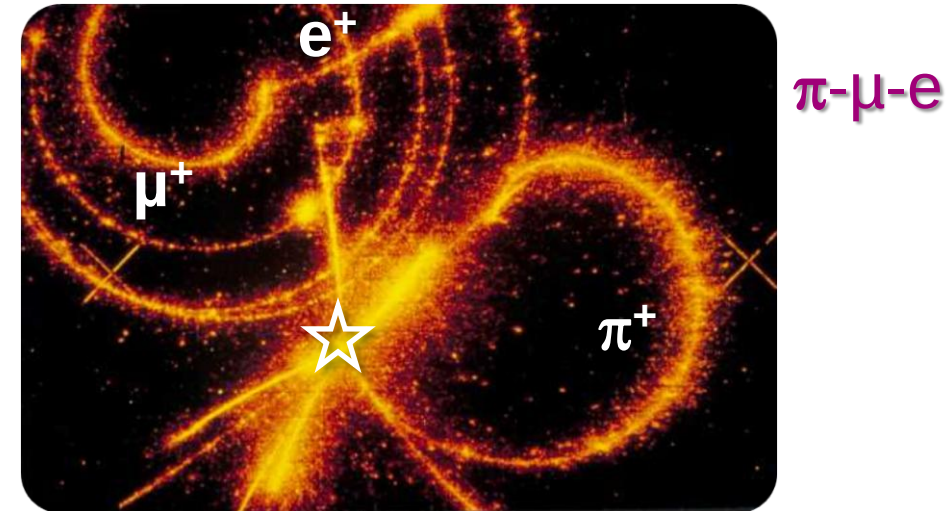
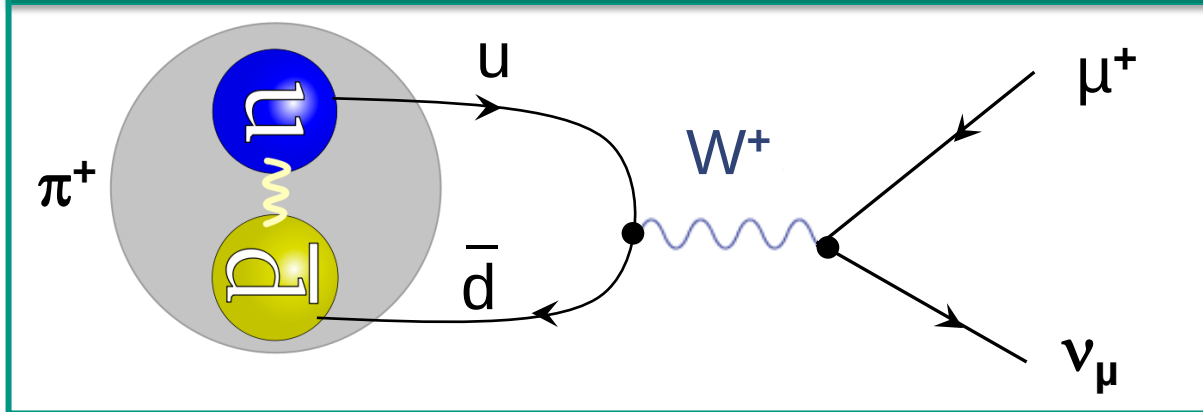
## schwache Wechselwirkung:

- spielt eher untergeordnete Rolle bei Mesonenzerfällen (wichtig:  $\pi$ , 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%)

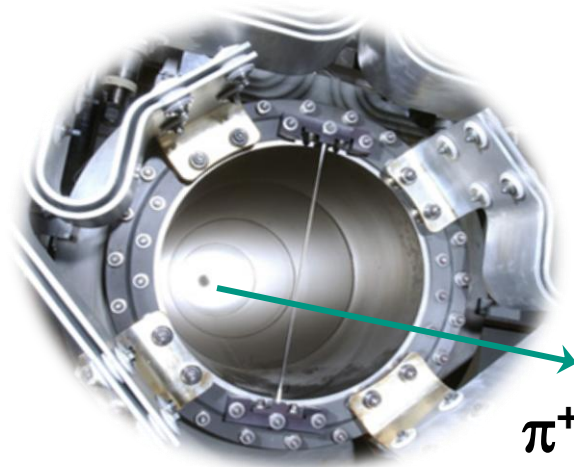
# Mesonen-Zerfälle: geladene Pionen

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

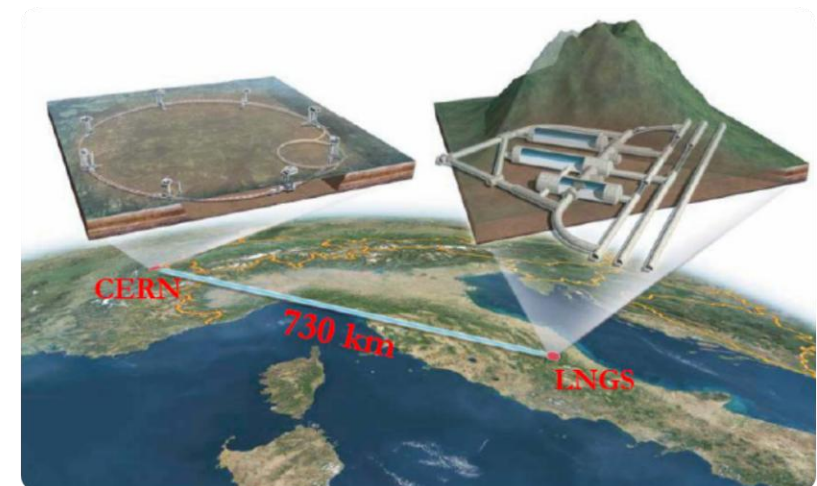
## schwacher Zerfall von geladenen Pionen



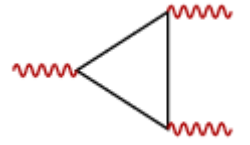
Beispiel: an einem Protonenbeschleuniger werden in einem Target Pionen erzeugt, ihr Zerfall erzeugt Myon-Neutrinos im GeV-Energiebereich



## CERN-LNGS Neutrinostrahl

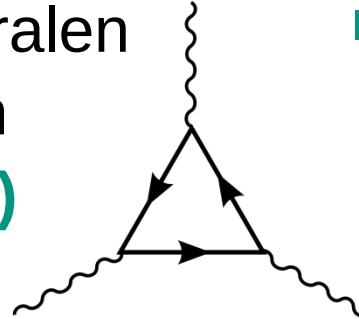


# Mesonen-Zerfälle: neutrale Pionen



- neutrale Pionen  $\pi^0$  zerfallen elektromagnetisch in 2 masselose Photonen ( $\gamma$ )  
 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  erfordert chirale Störungstheorie (Ww. leichter Quarks mit Gluonen)

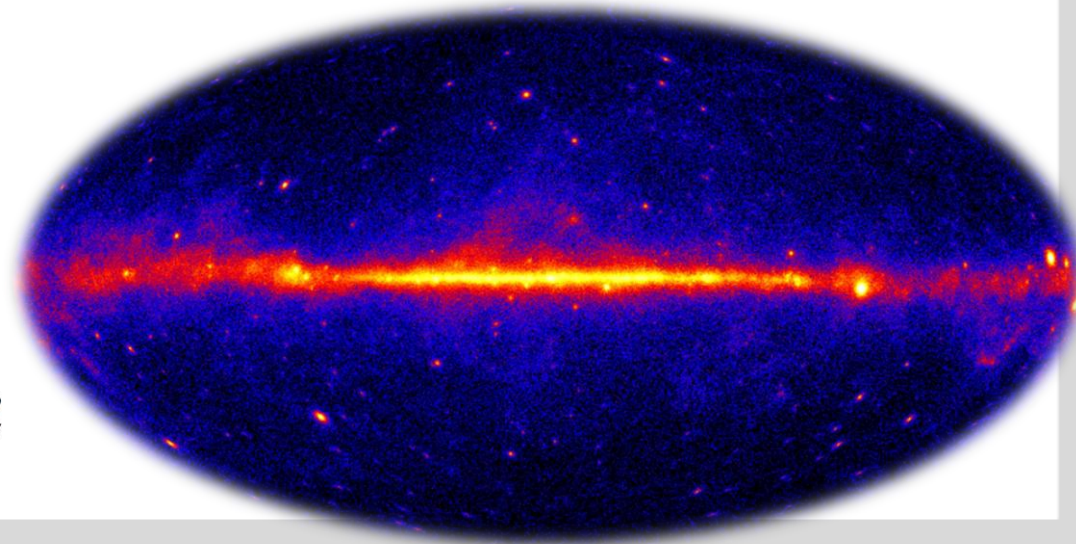
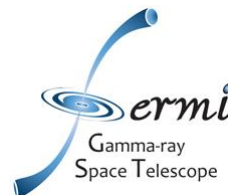
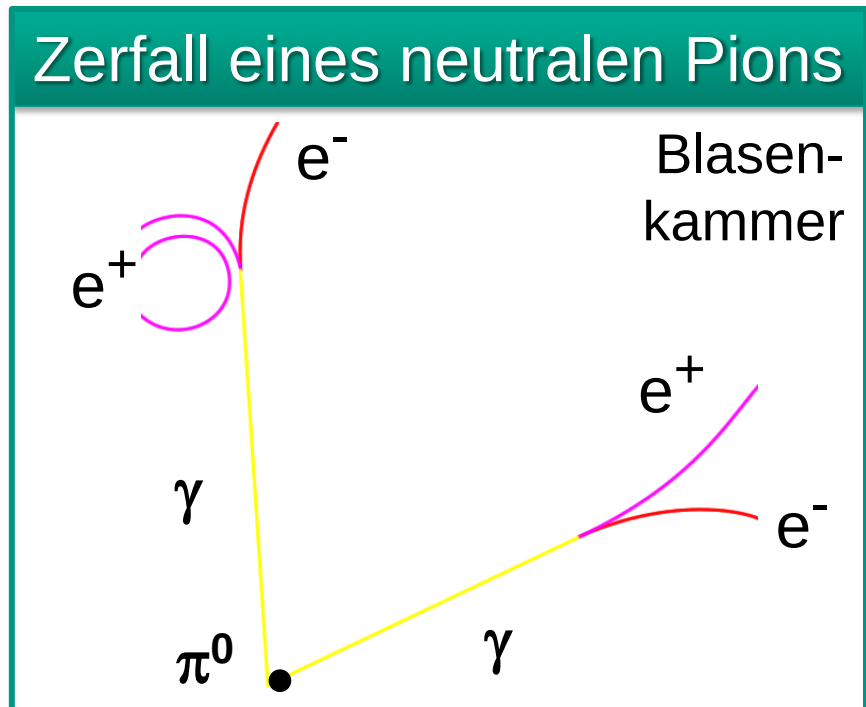
- **Theorie:** Darstellung der 'chiralen Anomalie' des  $\pi^0$ -Zerfalls im Dreiecksdiagramm, **aus  $\Gamma(\pi^0)$**   
↳ **3 Farbfreiheitsgrade**



- **Experiment:**

- $\pi^0$  ist nie 'direkt' nachweisbar
- 2  $\gamma$ 's mit  $E_\gamma = 67.5$  MeV im CMS
- Gammas erzeugen in Materie zwei  $e^+/e^-$  Paare (Paarbildung)

Astroteilchenphysik: GeV- $\gamma$ 's von hadronischen Beschleunigern

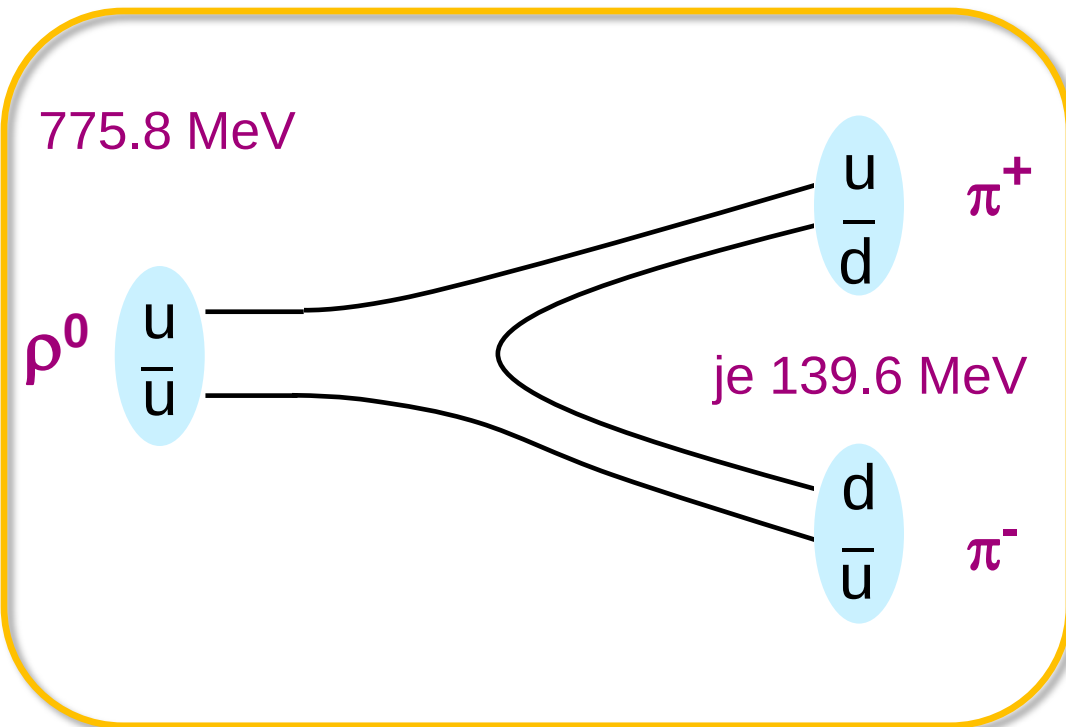


# Mesonen – Zerfälle:

- Zerfälle durch die starke Wechselwirkung am Beispiel der  $\rho^0$ - und  $\omega$  Mesonen

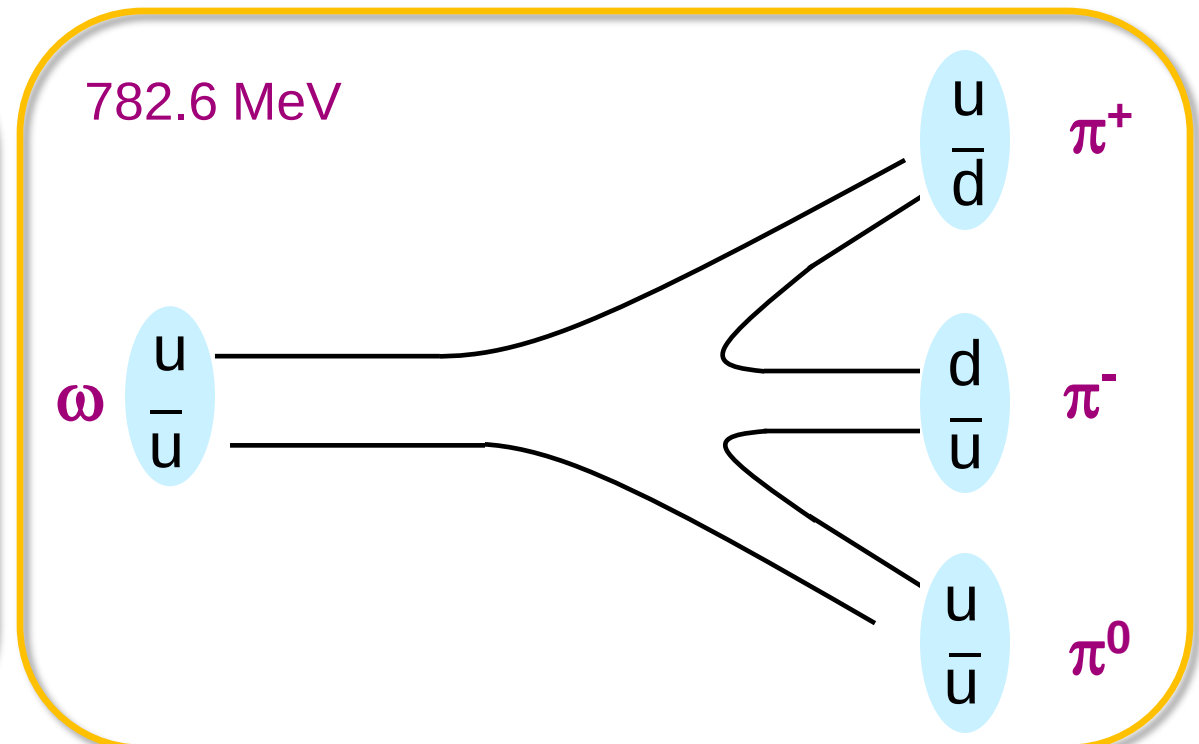
$$\rho^0(770) = \frac{1}{\sqrt{2}} |d\bar{d} - u\bar{u}\rangle$$

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



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

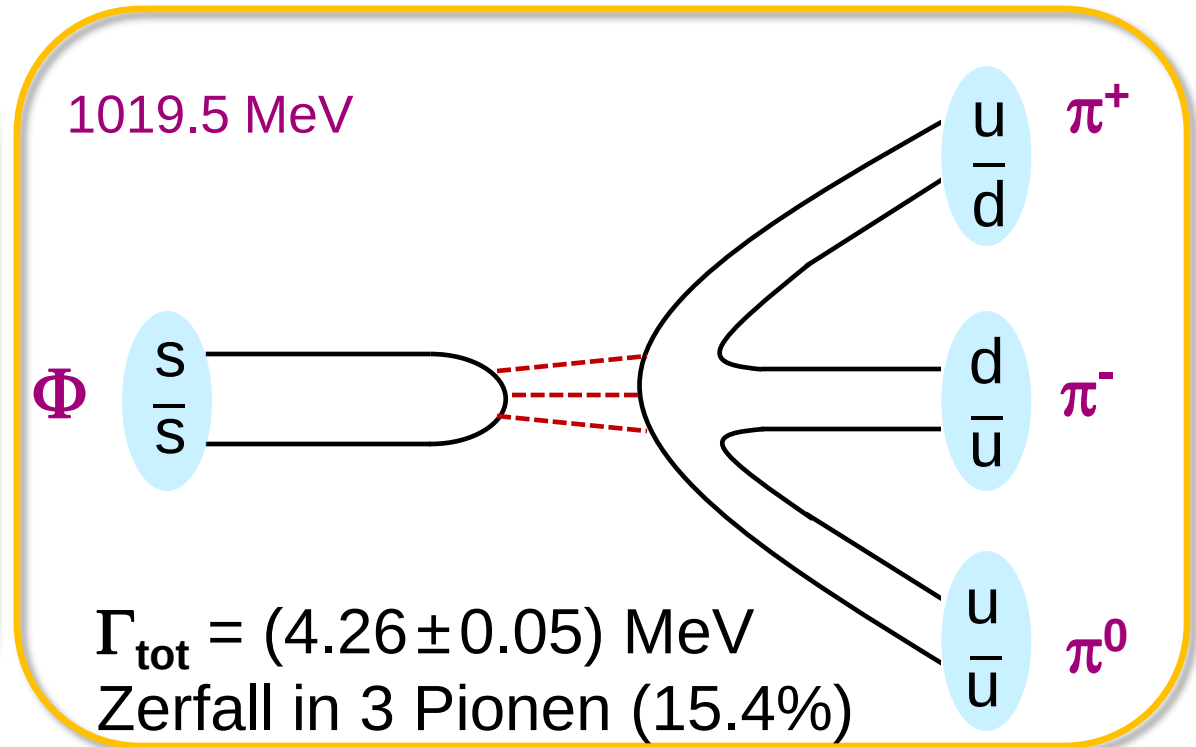
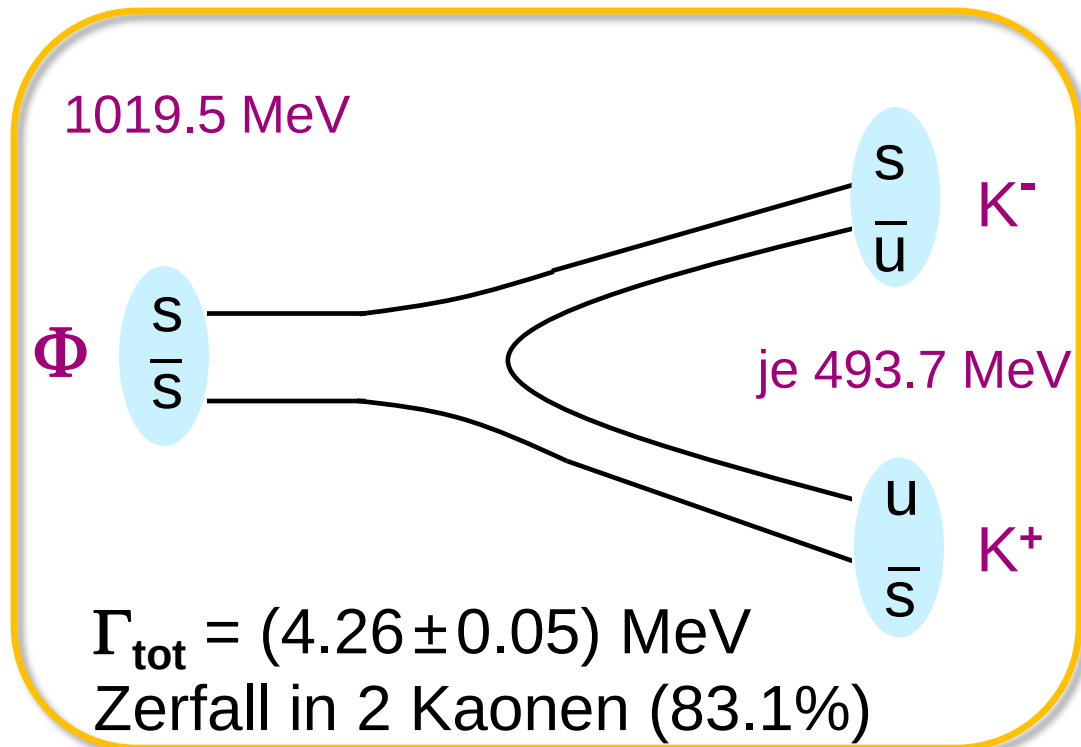
$\tau = 7.8 \cdot 10^{-23} \text{ s}$   
Zerfall in 3 Pionen (89.1%)





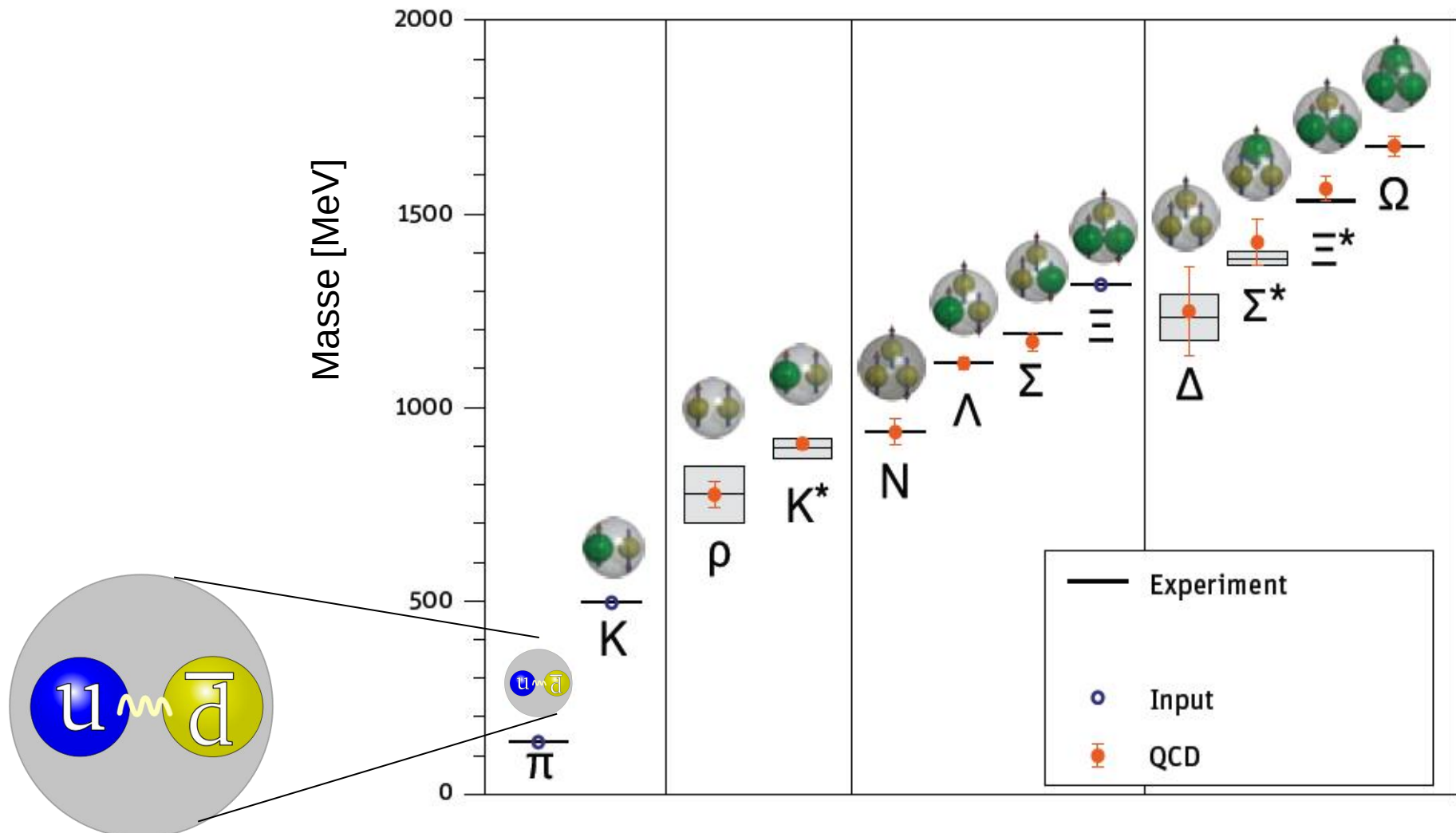
# Mesonen – Zerfälle & Zweig-Regel

- 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  $\Phi$  Vektor-Mesons: ~83% in  $K^+ K^-$ , nur ~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 QCD-Zuständen?

## ■ zahlreiche Suchen nach **exotischen Baryon- & Mesonzuständen**

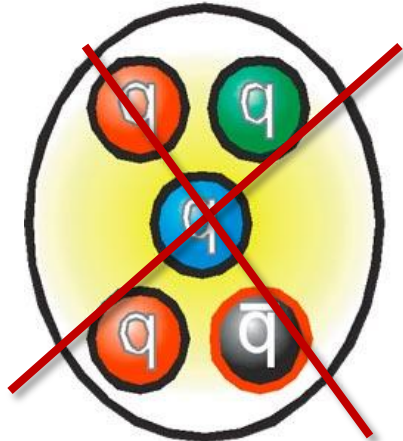
- Quantenchromodynamik (QCD) erlaubt die Existenz z.B. von Tetraquarks  
2010: Resultate des BELLE Experiments in Japan können als möglicher Hinweis für ein Tetraquark gedeutet werden



normales Baryon



normales Meson



Pentaquark



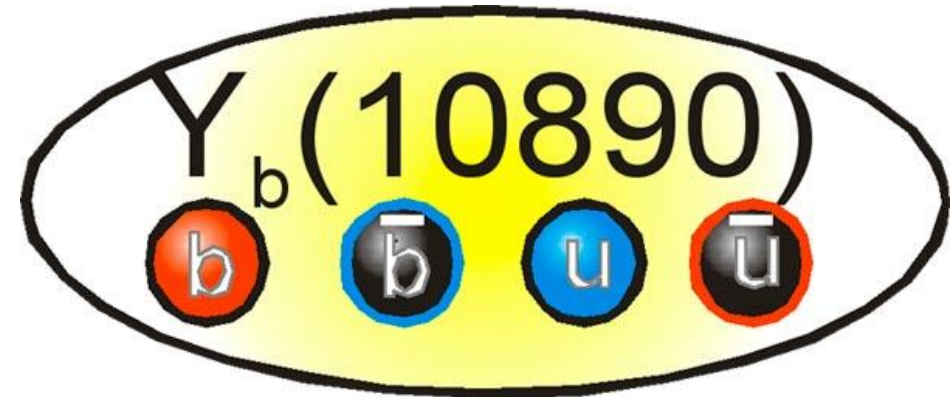
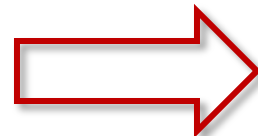
Tetraquark



Glueball



Hybridmeson



**Evidence grows for tetraquarks**

Physics world Apr 27, 2010

(vgl. Kap. 7.2)

# 5.3 Wechselwirkungen im Standardmodell

- im Standardmodell werden Wechselwirkungen durch Eichsymmetrien beschrieben:

**Vereinheitlichung** von **elektromagnetischer** & **schwacher Wechselwirkung** zur **elektroschwachen Wechselwirkung** (zentrale Vorhersage: Existenz von neutralen schwachen Strömen mit einem massiven  $Z^0$  Eichboson)

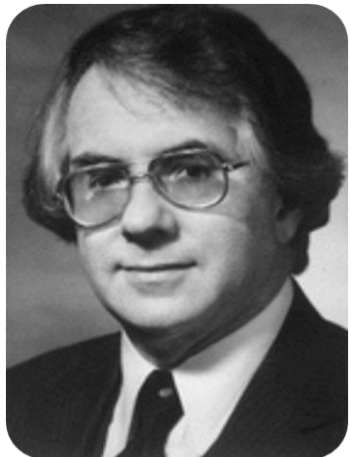
- starke Wechselwirkung : Quantenchromodynamik
- elektroschwache Wechselwirkung: Weinberg-Salam-Glashow Modell

Fernziel: große Vereinheitlichung (**G**rand **U**nified **T**heories, **GUTs**)

| Wechselwirkung        | Boson                                                         | Masse [GeV]          | rel. Stärke [ $3 \times 10^{-17}$ m] | Reichweite [m]                         | Potenzial                                   |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------|
| <b>stark</b>          | <b>Gluonen</b>                                                | <b>0</b>             | <b>60</b>                            | <b><math>2.5 \cdot 10^{-15}</math></b> | <b><math>\alpha r^{-1} + \beta r</math></b> |
| <b>elektromagnet.</b> | <b>Photon</b>                                                 | <b>0</b>             | <b>1</b>                             | <b><math>\infty</math></b>             | <b><math>1/r</math></b>                     |
| <b>schwach</b>        | <b><math>W^+</math> <math>W^-</math><br/><math>Z^0</math></b> | <b>80.4<br/>91.2</b> | <b><math>10^{-4}</math></b>          | <b><math>\sim 10^{-18}</math></b>      | <b><math>\delta(r)</math></b>               |

# Standardmodell der Teilchenphysik

- die theoretischen Vorhersagen des Standardmodells stehen mit allen experimentellen Resultaten in sehr guter Übereinstimmung (Ausnahme: endliche Neutrinomassen)
- kosmologische Beobachtungen (Dunkle Materie, dunkle Energie, Materie/Antimaterie Asymmetrie) deuten auf Physik jenseits des Standardmodells hin (**BSM**, **B**eyond the **S**tandard **M**odel, z.B. Supersymmetrie)



Sheldon Lee  
Glashow



Abdus  
Salam

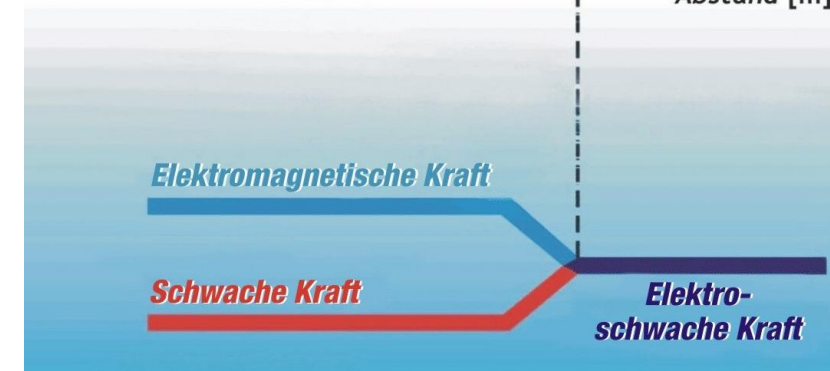
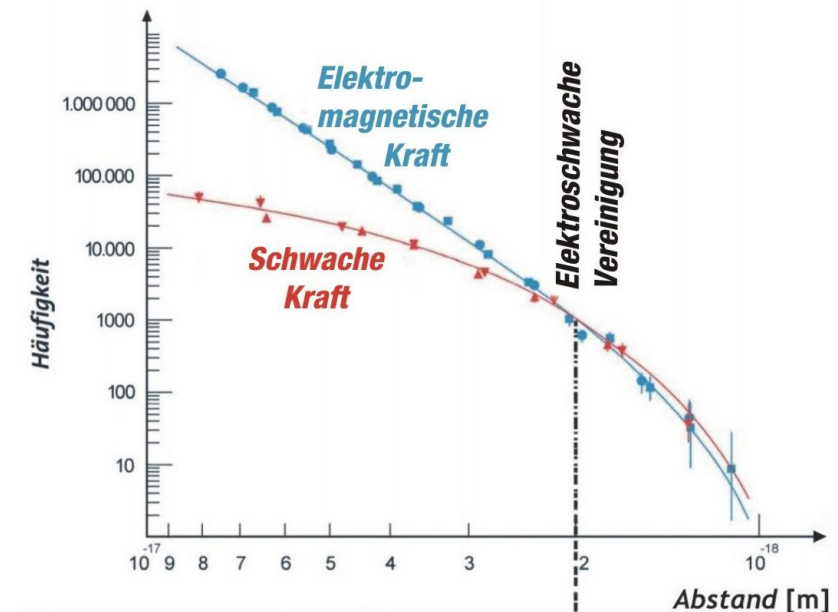


Steven  
Weinberg

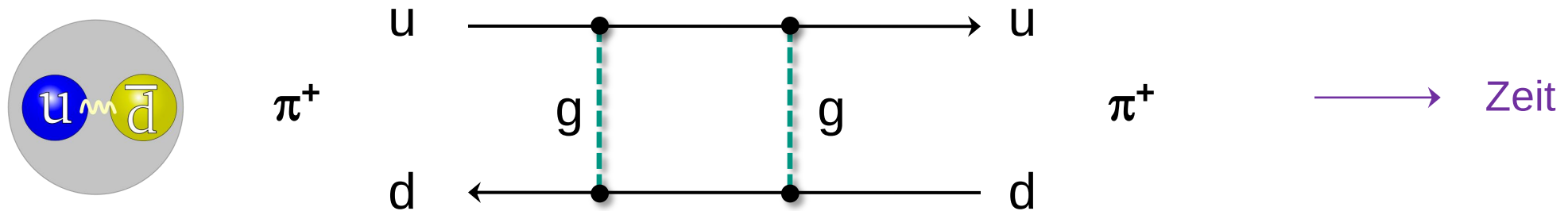


Nobelpreis  
1979

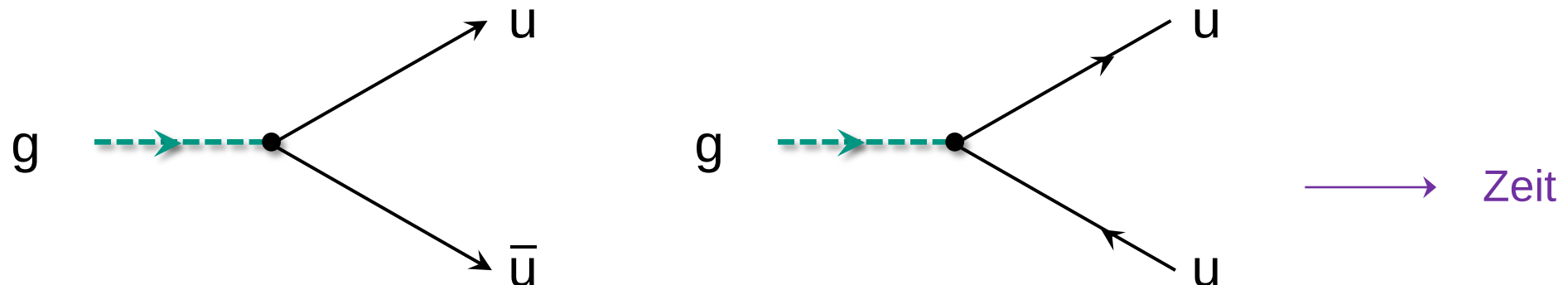
„for their contributions to the unified weak & elmag. Interactions of elementary particles“



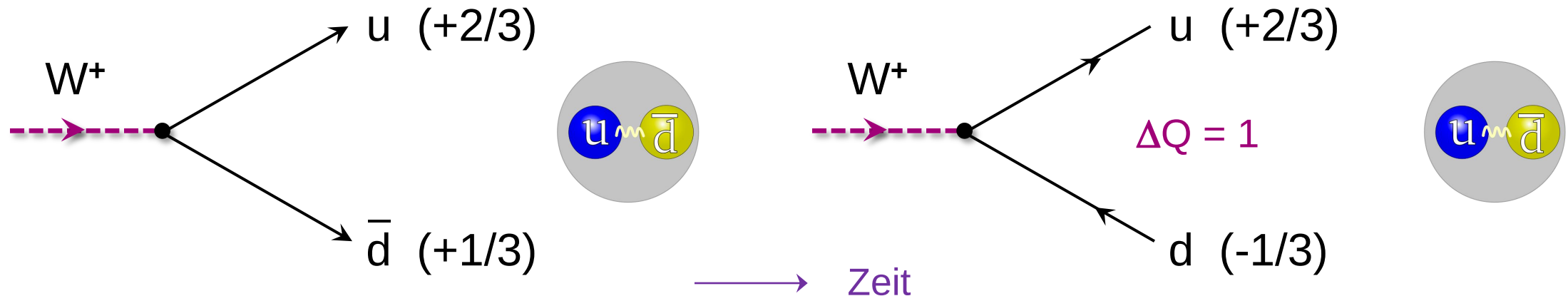
- starke Wechselwirkung: **Austausch von Gluonen** in einem Meson (Pion)  
der Flavourzustand eines Quarks wird nicht geändert (Änderung der Farbe)



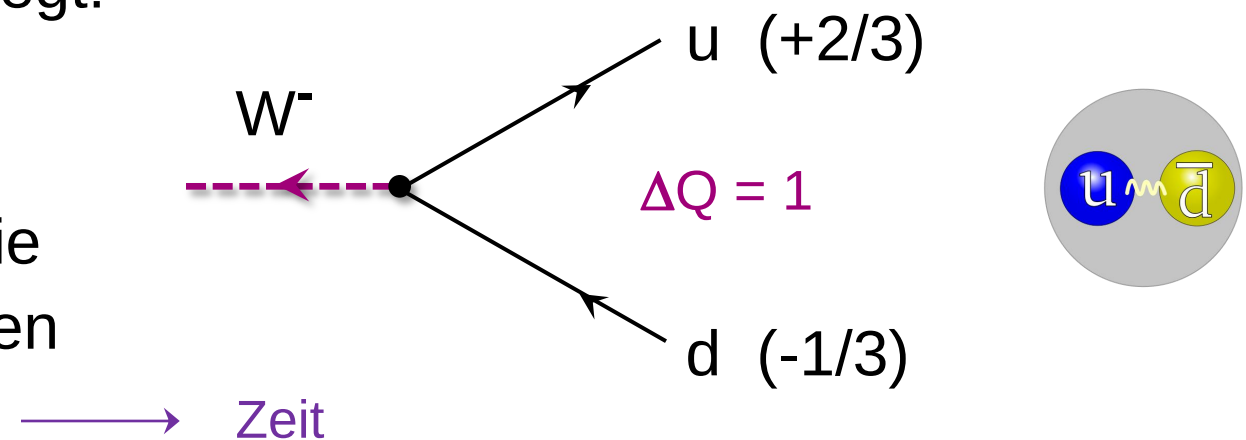
- Erhaltung der Baryonenzahl bei Wechselwirkungen: eine Quarklinie in einem Feynman-Diagramm darf nie unterbrochen werden,  
Beispiel der **Erzeugung eines Quark-Antiquark Paares** durch ein Gluon



- schwache Wechselwirkung: Zerfall eines schweren Teilchens in ein Pion:  
**Änderung des Quarkflavours** in der ununterbrochenen Quarklinie



- die Richtung des ausgetauschten virtuellen Bosons ist nicht festgelegt: in dieser Darstellung emittiert ein zeitlich rückwärts laufendes d-Quark ein  $W^-$  Boson, anstatt wie oben ein  $W^+$  Boson zu absorbieren





# Farbe als Freiheitsgrad

- Baryonen und Mesonen sind nach außen stets QCD - 'farbneutrale' Objekte, d.h. alle **Hadronen** befinden sich in einem **Farb-Singulett-Zustand**

**Baryonen:** 3 Farben (**rgb**)

↪ Addition zur Farbneutralität

**Mesonen:** 1 Farbe & 1 Anti-Farbe ↪ Addition zur Farbneutralität

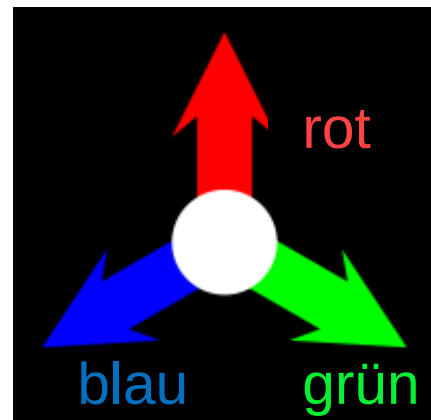
- für Mesonen ergeben sich damit folgende 'Farb-Wahrscheinlichkeiten'

- $\frac{1}{3}$  für rot-antirot,
- $\frac{1}{3}$  für blau-antiblau
- $\frac{1}{3}$  für grün-antigrün

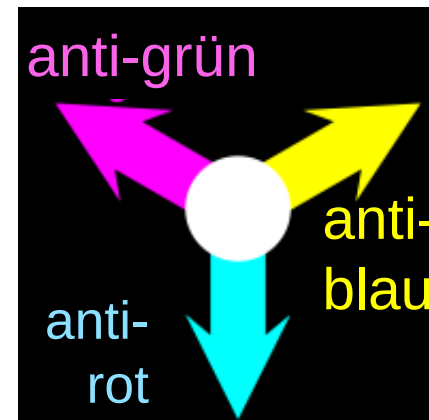
$$(r\bar{r} + b\bar{b} + g\bar{g}) / \sqrt{3}$$

- der Farbzustand von Quarks ändert sich andauernd durch den Austausch von Gluonen (tragen ebenfalls Farbe)

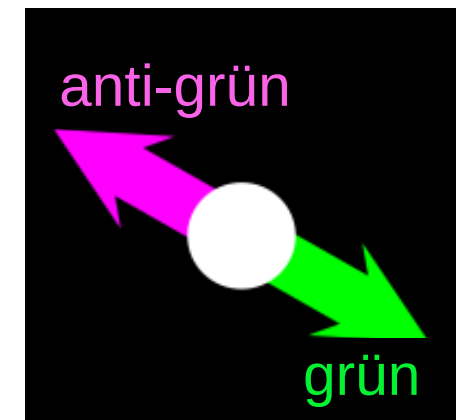
Baryon  $qqq$



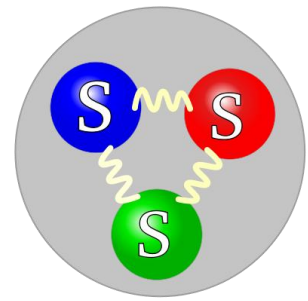
Antibaryon  $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$



Meson  $q\bar{q}$



# Farbe als Freiheitsgrad & Pauli-Prinzip



- der **Farb-Singulett-Zustand** eines Baryons ist wichtig zur Erfüllung eines verallgemeinerten Pauli-Prinzips:

**die Gesamtwellenfunktion eines Baryons muss unter Berücksichtigung aller Quark-Freiheitsgrade antisymmetrisch sein**

- die  $\Delta^{++}$  Resonanz (uuu) & das  $\Omega^-$  (sss) verletzen ohne die Existenz des Farb-Freiheitsgrades das Pauli-Prinzip, Beispiel:  $\Delta^{++}$  Wellenfunktion

$$\Delta^{++} = \underbrace{|uuu\rangle}_{\text{Flavour}} \cdot \underbrace{|\uparrow\uparrow\uparrow\rangle}_{\text{Spin}} \cdot \underbrace{|\ell=0\rangle}_{\text{Orbital-}\ell} \quad \text{symmetrische Gesamtwellenfunktion}$$

$$\Delta^{++} = \underbrace{|uuu\rangle}_{\text{Flavour}} \cdot \underbrace{|\uparrow\uparrow\uparrow\rangle}_{\text{Spin}} \cdot \underbrace{|\ell=0\rangle}_{\text{Orbital-}\ell} \cdot \underbrace{\left| \frac{1}{\sqrt{6}} \varepsilon^{ijk} q_i q_j q_k \right\rangle}_{\text{Farbfreiheitsgrade}}$$

$\varepsilon_{ijk} = +1$  für gerade Permutation  
 $\varepsilon_{ijk} = -1$  für ungerade Permutation  
 $\varepsilon_{ijk} = 0$  für 2 gleiche Indices (Farben)

mit **Farbfreiheitsgraden**: anti-symmetrische  $\Delta^{++}$  Gesamtwellenfunktion

- die Antisymmetrisierung am Beispiel des  $\Delta^{++}$ :

$$\Psi_{\text{Farbe}}(\text{Baryon}) = \frac{1}{\sqrt{6}} \varepsilon^{ijk} q_i \cdot q_j \cdot q_k$$

Summation über die Farbindices  $i, j, k$  von 1 bis 3

Antisymmetrische Darstellung der Farbfreiheitsgrade:

$$\Psi_{\text{Farbe}}(\Delta^{++}) = \frac{1}{\sqrt{6}} |RGB + BRG + GBR - GRB - BGR - RBG\rangle$$

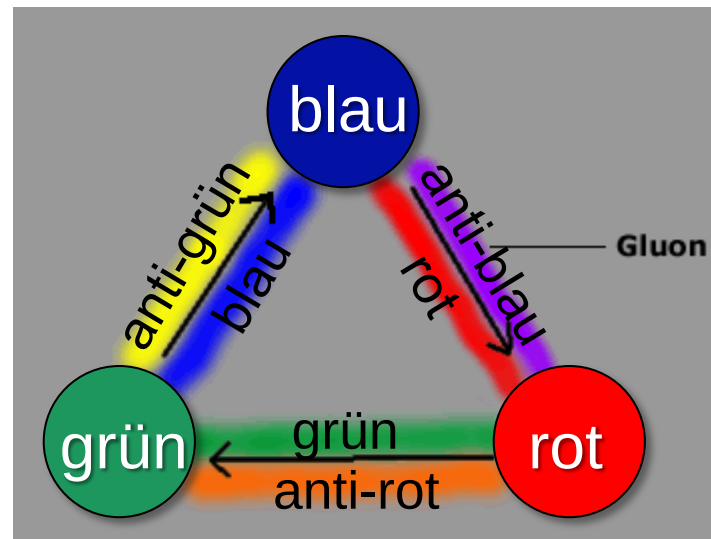
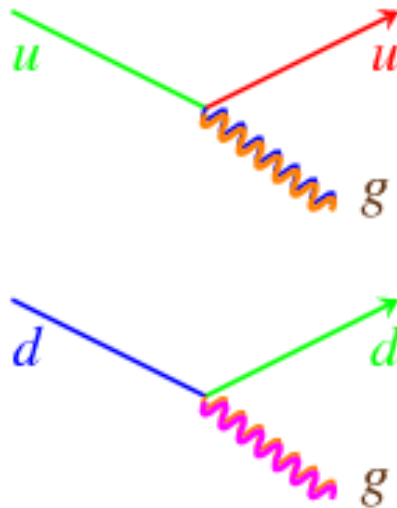
Beispiel: nach Vertauschung der beiden Farbfreiheitsgrade RG ergibt sich:

$$\Psi_{\text{Farbe}}(\Delta^{++}) = \frac{1}{\sqrt{6}} |GRB + BGR + RBG - RGB - BRG - GBR\rangle$$

**die Gesamtwellenfunktion des  $\Delta^{++}$  Baryons ist unter Berücksichtigung aller Quark-Freiheitsgrade wie gefordert antisymmetrisch**

# Gluonen

- in der QCD existieren **8 Gluonzustände** (‘Farbzustände’, ‘**Farboktett**’):
  - alle Zustände sind linear unabhängig
  - jedes Gluon ist ein **masseloses Spin 1 – Boson**
  - jedes Gluon trägt eine **Farbe + Anti-Farbe**
- in nebenstehenden Darstellung ändern die ersten 6 Gluonen die Farbe eines Quarks, die beiden farbneutralen Kombinationen ändern die Farbe bei der Emission/Absorption nicht



$$b\bar{g} \quad \text{grün} \rightarrow \text{blau}$$

$$r\bar{g} \quad \text{grün} \rightarrow \text{rot}$$

$$g\bar{r} \quad \text{rot} \rightarrow \text{grün}$$

$$b\bar{r} \quad \text{rot} \rightarrow \text{blau}$$

$$g\bar{b} \quad \text{blau} \rightarrow \text{grün}$$

$$r\bar{b} \quad \text{blau} \rightarrow \text{rot}$$

$$(r\bar{r} - g\bar{g}) / \sqrt{2}$$

$$(r\bar{r} + b\bar{b} - 2g\bar{g}) / \sqrt{6}$$

# Gluonen

- in der QCD existieren **8 Gluonzustände** (‘Farbzustände’, ‘**Farboktett**’):
  - alle Zustände sind linear unabhängig
  - jedes Gluon ist ein **masseloses Spin 1 – Boson**
  - jedes Gluon trägt eine **Farbe + Anti-Farbe**
- die 8 linear unabhängigen Gluonzustände lassen sich auch durch andere Linear-Kombinationen von Farbfreiheitsgraden darstellen (vgl. zu S. 23)

$$(b\bar{g} + g\bar{b}) / \sqrt{2}$$

$$(r\bar{g} + g\bar{r}) / \sqrt{2}$$

$$(r\bar{r} - b\bar{b}) / \sqrt{2}$$

$$(r\bar{b} + b\bar{r}) / \sqrt{2}$$

$$-i(r\bar{b} - b\bar{r}) / \sqrt{2}$$

$$-i(r\bar{g} - g\bar{r}) / \sqrt{2}$$

$$-i(b\bar{g} - g\bar{b}) / \sqrt{2}$$

$$(r\bar{r} + b\bar{b} - 2g\bar{g}) / \sqrt{6}$$

