

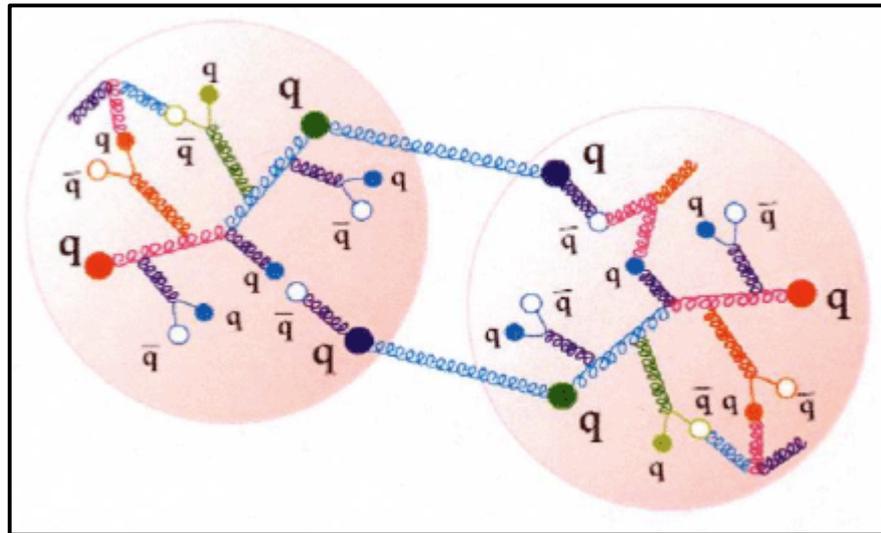
Moderne Experimentalphysik III: Kerne und Teilchen (Physik VI)

Günter Quast, Roger Wolf, Pablo Goldenzweig
27. Juni 2017

INSTITUTE OF EXPERIMENTAL PARTICLE PHYSICS (IEKP) – PHYSICS FACULTY



Kapitel 8: Quarks, Gluonen and Hadronen



Kapitel 8.1: Quarkmodell und Hadronen

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
Quarks	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
	d down	s strange	b bottom	g gluon
Leptons	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV ⁰
	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
	e electron	μ muon	τ tau	W[±] weak force

Bosons (Forces)

The PARTICLE ZOO

Wieviele Elementarteilchen kennen wir heute?



Hadrons:

Baryons:

Leptons:

ν_e μ^- e^-
 ν_μ ν_τ τ^-

Mesons:

The PARTICLE ZOO

Wieviele Elementarteilchen kennen wir heute?



Hadrons:

Leptons:

e^-
 μ^-
 ν_e
 ν_μ
 ν_τ
 τ^-

π^- D^0 B^- η

η'
Mesons: B^+

η_c 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^-

Baryons:

$$J^P = 0^-$$

Wieviele Elementarteilchen kennen wir heute?



Hadrons:

Leptons:

e^-
 μ^-
 ν_e
 ν_μ
 ν_τ
 τ^-

J/ψ
 π^-
 D^0
 B^-
 η
 η'
 ϕ
 K^{*-}
 ρ^0

Mesons:

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^{*+}
 D^{*-}
 D^+
 B_c^+
 B_s^0
 B^{*+}
 D^{*0}
 B^{*0}
 D_s^{*+}
 B^0
 B_c^-
 B_s^{*0}

Baryons:

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

The PARTICLE ZOO

Wieviele Elementarteilchen kennen wir heute?



Leptons:

- e^-
- μ^-
- ν_e
- ν_τ
- ν_μ
- τ^-

Hadrons:

Mesons:

- J/ψ
- π^-
- D^0
- B^-
- η
- η'
- ϕ
- K^{*-}
- ρ^0
- η_c
- 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_c^+
- B_s^0
- B^{*+}
- D^{*0}
- B^{*0}
- D_s^{*+}
- B^0
- B_c^-
- B_s^{*0}

Baryons:

- Ω_{bb}^-
- p
- n
- Σ^0
- Ξ_c^+
- Λ_b^+
- Δ^{++}
- Σ^+
- Ξ^-
- Ξ^0
- Ξ_{cb}^0
- Λ_c^+
- $\Xi_{bb}^{\prime-}$
- $\Xi_{cb}^{\prime+}$
- Σ^-
- Ξ^0
- Ξ_{cb}^0
- Δ^+
- Δ^-
- Σ_c^+
- Λ^0
- Σ_b^-
- Δ^0
- Σ_c^{++}
- Ξ_{cb}^+
- Ξ_c^0
- Σ_b^+
- Σ_b^0
- Ξ_{cc}^{++}
- $\Xi_c^{\prime+}$
- Ξ_{cb}^0
- Ξ_c^0
- Ξ_b^-
- Ξ_b^0
- Ξ_{cc}^+
- $\Xi_b^{\prime-}$
- Ξ_{bb}^0
- Σ_c^0
- Ω_b^-
- Ω_c^0
- Ω_{cb}^0
- $\Xi_b^{\prime-}$
- Ω_{cbb}^0
- Ω_{cc}^+
- Ω_{ccb}^+
- Ξ_b^0
- $\Omega_{cb}^{\prime0}$

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

Erste Ordnungsansätze

- **Isospinsymmetrie** analog zu starkem Isospin (VL-10 Folie 9)

$$|q\rangle = \begin{pmatrix} |u\rangle \\ |d\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |T = \frac{1}{2}, T_3 = +\frac{1}{2}\rangle \\ |T = \frac{1}{2}, T_3 = -\frac{1}{2}\rangle \end{pmatrix}; \quad Y = ?$$

$$|\bar{q}\rangle = - \begin{pmatrix} |\bar{d}\rangle \\ |\bar{u}\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |T = \frac{1}{2}, T_3 = +\frac{1}{2}\rangle \\ |T = \frac{1}{2}, T_3 = -\frac{1}{2}\rangle \end{pmatrix}; \quad Y = ?$$



$$Y = 2(Q - T_3)$$

- Mathematischer Formalismus $SU(2)$, wie für Spin- $\frac{1}{2}$ Teilchen (VL-15 Folie 18)

Erste Ordnungsansätze

- **Isospinsymmetrie** analog zu starkem Isospin (VL-10 Folie 9)

$$|q\rangle = \begin{pmatrix} |u\rangle \\ |d\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |T = \frac{1}{2}, T_3 = +\frac{1}{2}\rangle \\ |T = \frac{1}{2}, T_3 = -\frac{1}{2}\rangle \end{pmatrix}; \quad Y = +1/3$$

$$|\bar{q}\rangle = - \begin{pmatrix} |\bar{d}\rangle \\ |\bar{u}\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |T = \frac{1}{2}, T_3 = +\frac{1}{2}\rangle \\ |T = \frac{1}{2}, T_3 = -\frac{1}{2}\rangle \end{pmatrix}; \quad Y = -1/3$$



$$Y = 2(Q - T_3)$$

- Mathematischer Formalismus $SU(2)$, wie für Spin- $\frac{1}{2}$ Teilchen (VL-15 Folie 18)
- **Physikalische Bedeutung:** in der starken WW beliebig mit unitärer Matrix transformierte Zustände im Isospinraum ununterscheidbar \rightarrow QCD ist "flavor-blind"

Beispiel: Leichteste Mesonen (Pionen)

- Zustand aus **Quark und Antiquark**. Direktes Produkt der $2 \otimes \bar{2} = 3 \oplus 1$

$$\begin{aligned}
 |\pi\rangle &= \begin{pmatrix} -|ud\bar{\rangle} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} (|u\bar{u}\rangle - |d\bar{d}\rangle) \\ |\bar{u}d\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |T=1, T_3=+1\rangle \\ |T=1, T_3=0\rangle \\ |T=1, T_3=-1\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -|\pi^+\rangle \\ |\pi^0\rangle \\ |\pi^-\rangle \end{pmatrix} \\
 |\psi\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|u\bar{u}\rangle + |d\bar{d}\rangle)
 \end{aligned}$$

Triplet:
antisymmetrisch (1)

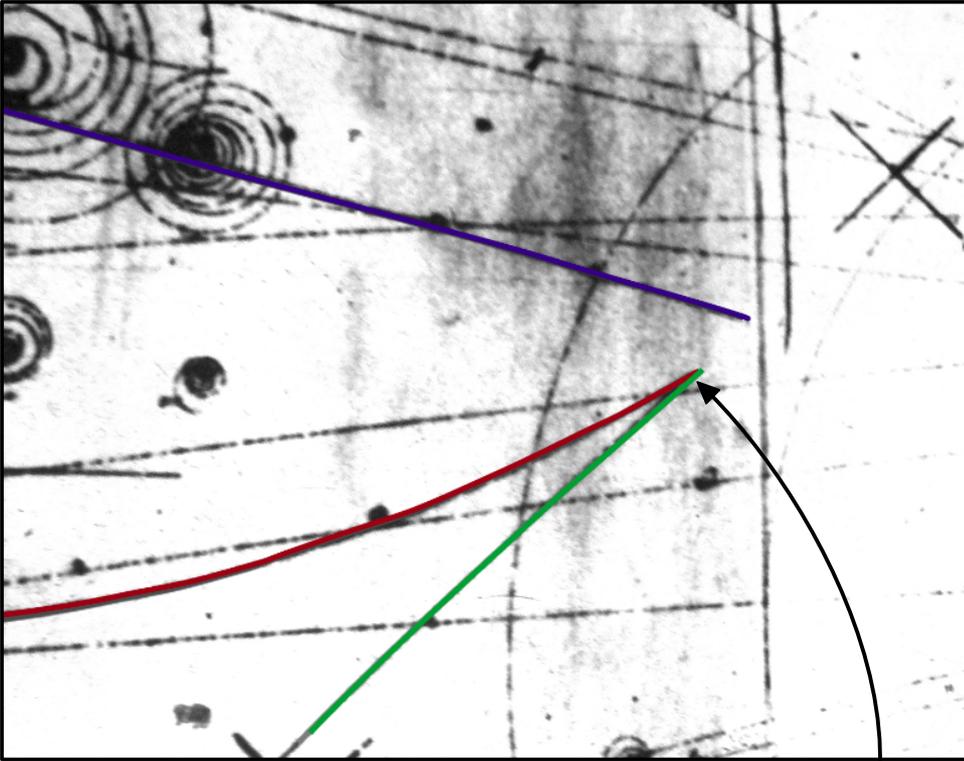
Singulett:(1)
symmetrisch

(1) unter Vertauschung der Quarkwellenfunktionen

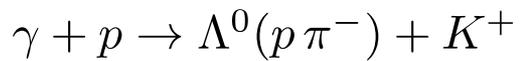
In der Natur so nicht realisiert
(s. weiterer Verlauf dieser VL)

Entdeckung der Strangeness

- 1940er Jahre zunächst in kosmischer Höhenstrahlung



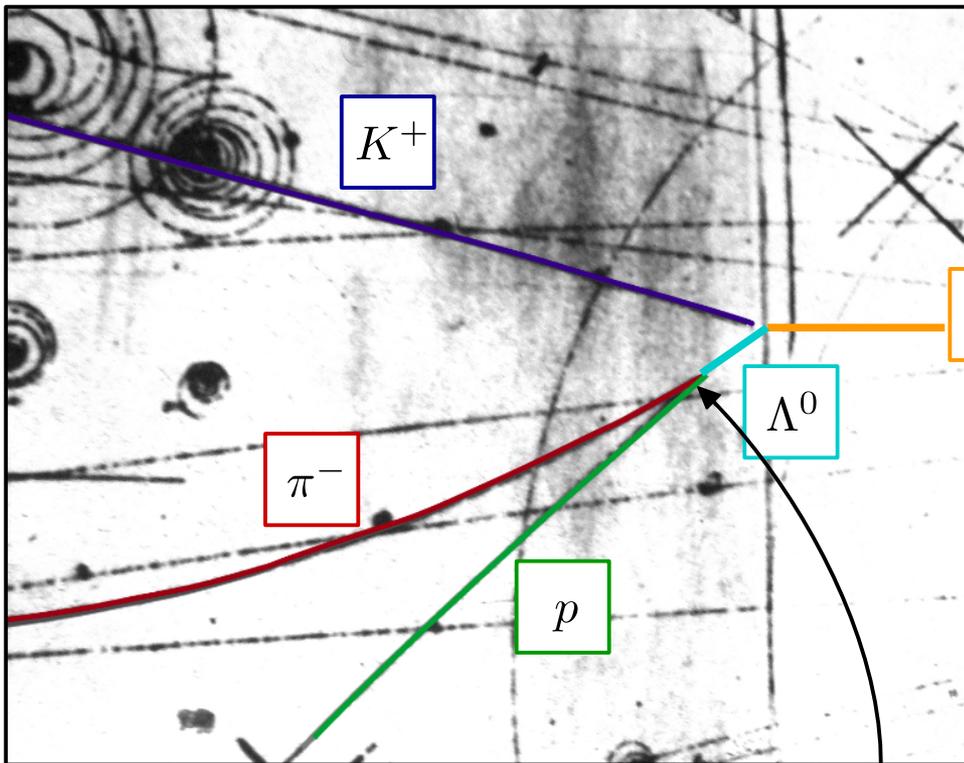
DESY-Blasenkammeraufnahme



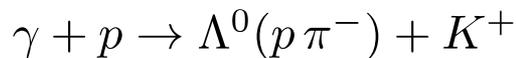
“V”-Teilchen

Entdeckung der Strangeness

- 1940er Jahre zunächst in kosmischer Höhenstrahlung



DESY-Blasenkammeraufnahme

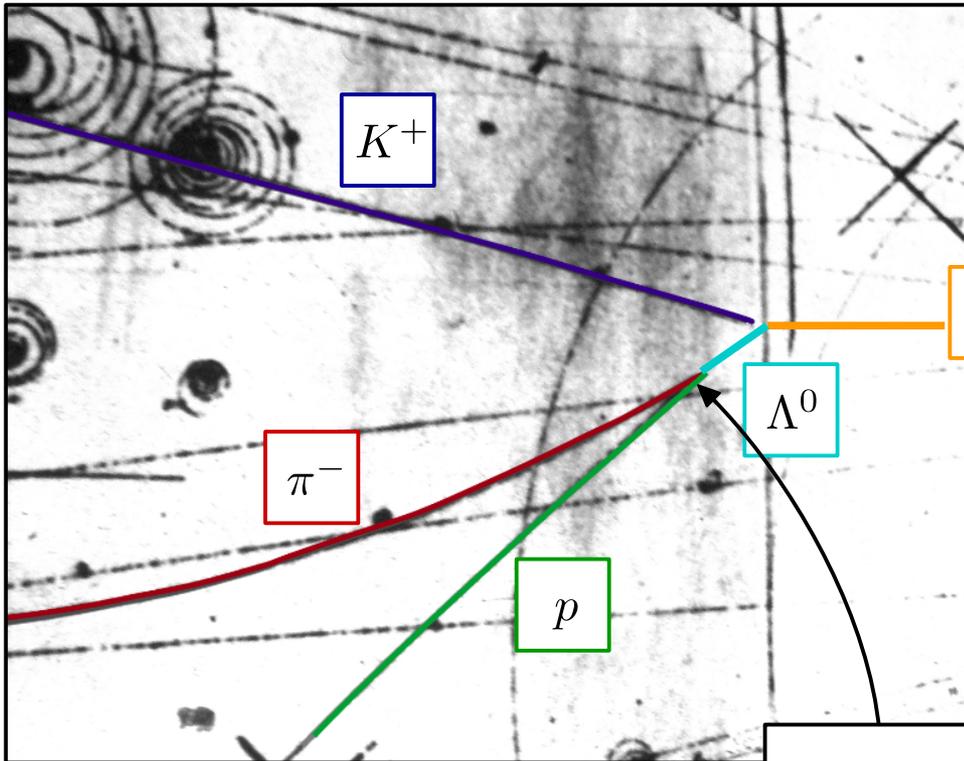


“V”-Teilchen

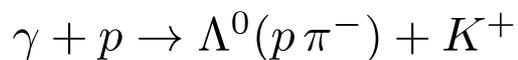
- Erzeugung in starker oder elektromagnetischer WW
- Lange Lebensdauer (\rightarrow Zerfallslängen im cm-Bereich)
- Einführung **neuer Quantenzahl: S**, 1950er Jahre)
- S: erhalten in starker und elektromagnetischer WW, verletzt in schw. WW
- Lange Lebensdauer durch geringe Übergangswahrscheinlichkeit für S-verletzende Zerfälle

Entdeckung der Strangeness

- 1940er Jahre zunächst in kosmischer Höhenstrahlung



DESY-Blasenkammeraufnahme



“V”-Teilchen

- Erzeugung in starker oder elektromagnetischer WW
- Lange Lebensdauer (\rightarrow Zerfallslängen im cm-Bereich)
- Einführung **neuer Quantenzahl: S**, 1950er Jahre)
- S: erhalten in starker und elektromagnetischer WW, verletzt in schw. WW

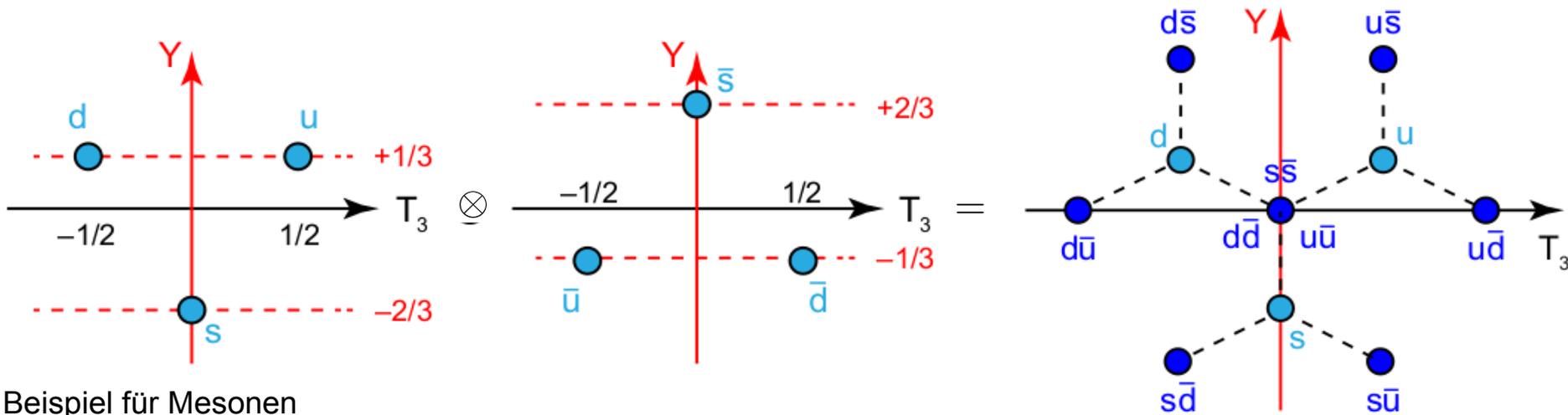
Gell-Mann–Nishijima-Formel:

$$Q = T_3 + \frac{B + S}{2} = T_3 + \frac{Y}{2}$$

Zunächst empirisch, heute durch Quarkinhalt der Hadronen erklärt

Erweiterung des Ordnungsprinzips auf $SU(3)$

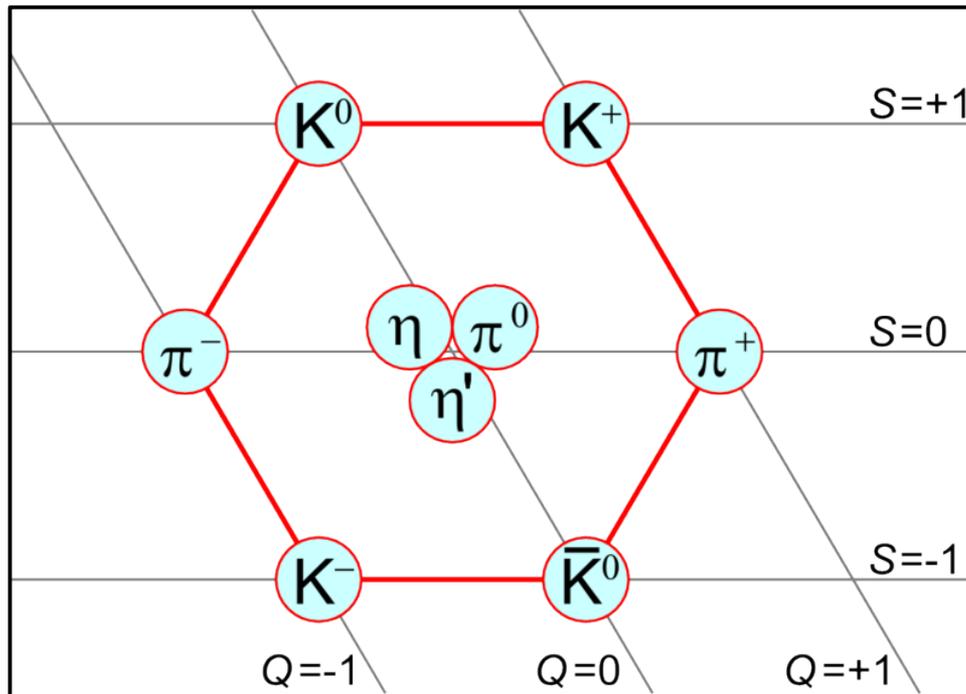
- Zunächst nur für Mesonenanordnungen (1950er Jahre)
- Dann Erweiterung auf alle Hadronen (\rightarrow Gell-Mann, Zweig, Quarkmodell, 1960er Jahre):
 - Hadronen verhalten sich so, als ob sie aus drei Quarks (u, d, s) und deren Anti-quarks aufgebaut seien (noch keine physikalischen Realitäten zu dieser Zeit)
 - **Quarks: fundamentale Darstellungen** (3 und $\bar{3}$) der $SU(3)$ -Gruppe
 - Mesonen : $3 \otimes \bar{3} = 8 \oplus 1$
 - Baryonen: $3 \otimes 3 \otimes 3$



Beispiel für Mesonen

Oktett für Pseudoskalare Mesonen ($J^P = 0^-$)

- **Spin-Singulett** (1S_0): alle Spins in $\downarrow\downarrow$
- Gruppentheorie: $3 \otimes \bar{3} = 8 \oplus 1$
(Flavor-Oktett und Flavor-Singulett)



(1) Anm.: experimentell kleine Mischung ($\theta \approx -15^\circ$)

- Zustände mit $T_3 = 0, S = 0$:

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

$$|\eta_8\rangle = \frac{1}{\sqrt{6}} (u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s})$$

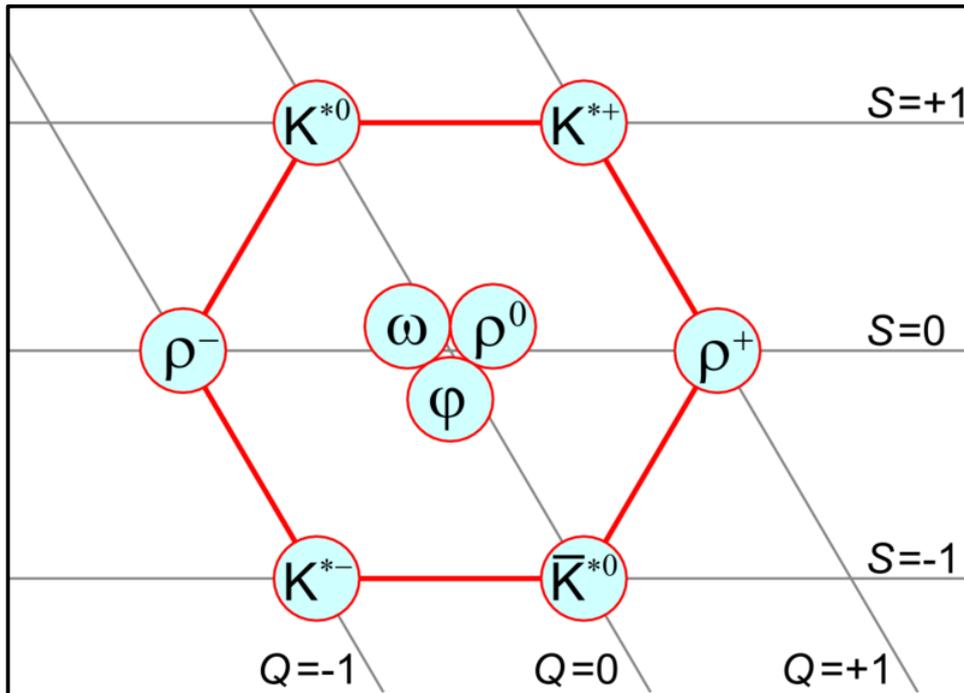
$$|\eta_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}} (u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s})$$

- η_8 und η_1 haben die gleichen QZ
→ Mischzustände möglich

$$\begin{pmatrix} |\eta\rangle \\ |\eta'\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |\eta_8\rangle \\ |\eta_1\rangle \end{pmatrix}^{(1)}$$

Oktett für Vektorensonen ($J^P = 1^-$)

- **Spin-Triplett** (3S_1): alle Spins in $\uparrow\uparrow$
- Gruppentheorie: $3 \otimes \bar{3} = 8 \oplus 1$
(Flavor-Oktett und Flavor-Singulett)



- Zustände mit $T_3 = 0$, $S = 0$:

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

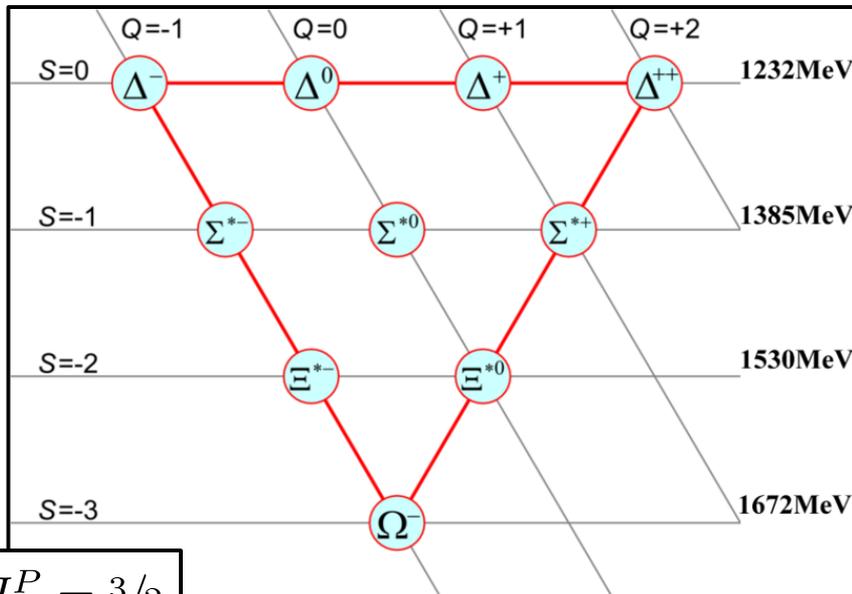
$$|\omega\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (u\bar{u} + d\bar{d})$$

$$|\varphi\rangle = -s\bar{s}$$

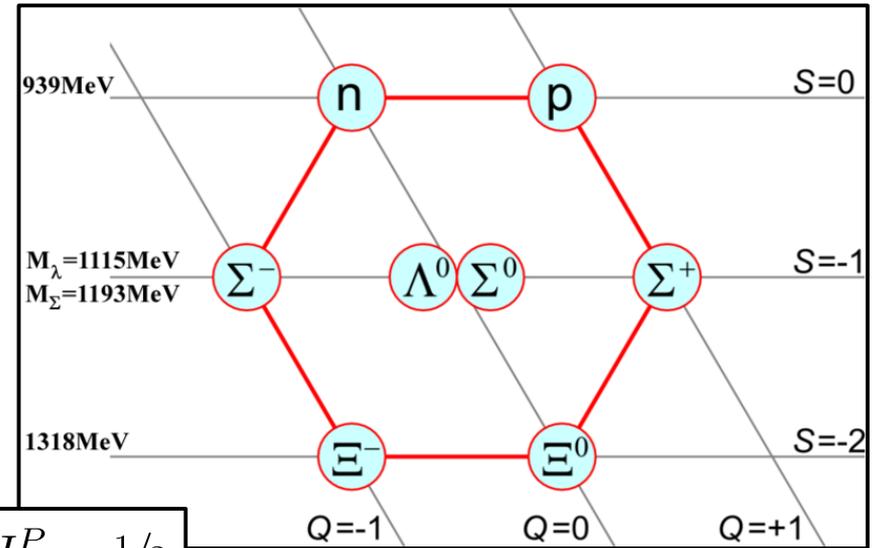
- Ideale Mischung zwischen u und d
- u/d und s entkoppeln

Baryonen-Multipletts

- **Halbzahliger Spin:** $\uparrow\uparrow\uparrow$ ($J^P = 3/2$, symmetrisch) oder $\uparrow\uparrow\downarrow$ ($J^P = 1/2$, gemischt, (anti-)/symmetrisch)
- Gruppentheorie: $3 \otimes 3 \otimes 3 = 10 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 1$ (Flavor-Dekuplett (symmetrisch), -Oktett (gemischt (anti-)/symmetrisch), -Singulett (antisymmetrisch))
- Ortswellenfunktion: immer symmetrisch ($\ell = 0$)



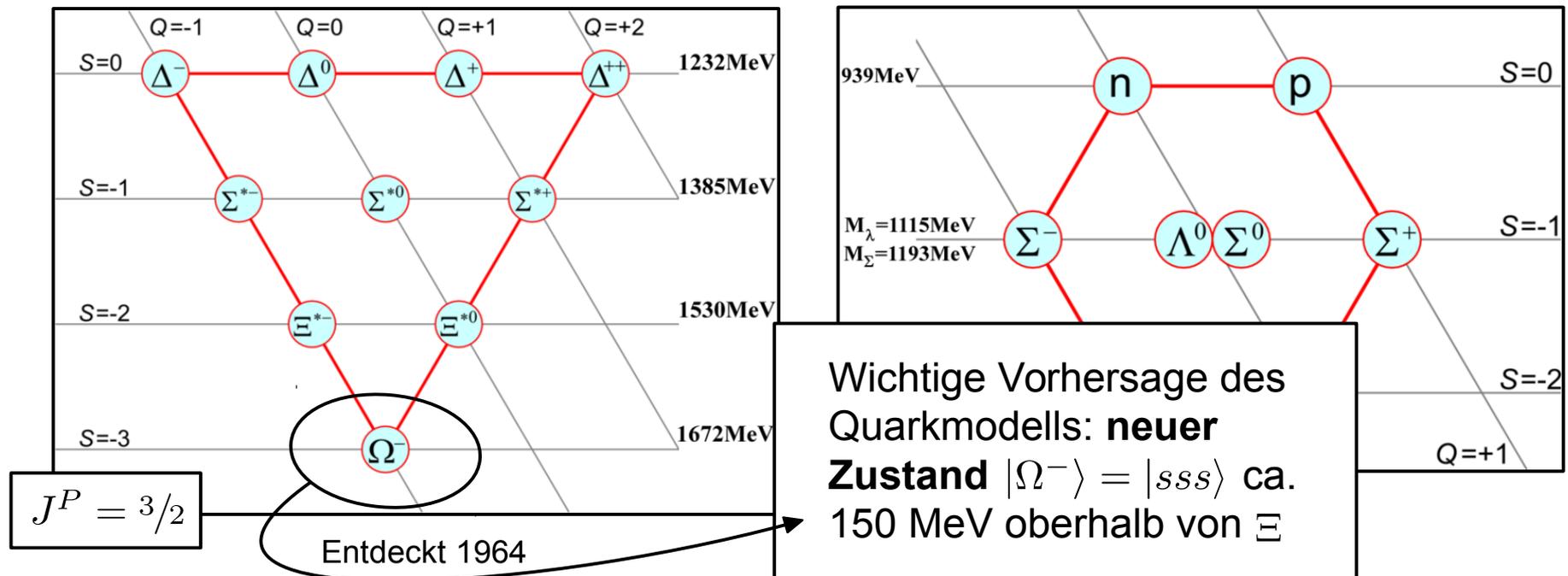
$$J^P = 3/2$$



$$J^P = 1/2$$

Baryonen-Multipletts

- **Halbzahliger Spin:** $\uparrow\uparrow\uparrow$ ($J^P = 3/2$, symmetrisch) oder $\uparrow\uparrow\downarrow$ ($J^P = 1/2$, gemischt, (anti-)/symmetrisch)
- Gruppentheorie: $3 \otimes 3 \otimes 3 = 10 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 1$ (Flavor-Dekuplett (symmetrisch), -Oktett (gemischt (anti-)/symmetrisch), -Singulett (antisymmetrisch))
- Ortswellenfunktion: immer symmetrisch ($\ell = 0$)

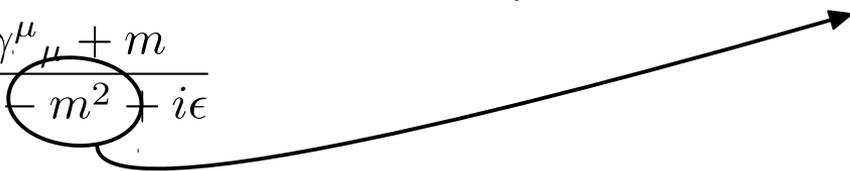


Anmerkungen zur Flavorsymmetrie

- Flavorsymmetrie: **keine exakte Symmetrie** in der Natur (→ explizite Brechung durch Quarkmassen)
 - $SU(3)$: Brechung durch deutlich größere (effektive) Masse des s-Quarks im Vergleich zu u und d
 - $SU(4)$: noch stärker gebrochen, durch große Masse des c-Quarks

Zur Definition der Quarkmasse

- Für Quarks als nicht frei in der Natur auftretende Teilchen ist die **Definition einer Masse problematisch**
- Zunächst in der Störungstheorie: Quarkmassen abhängig von Energieskala μ bei der das Quark “betrachtet” wird → **laufende Quarkmassen**
- Für freie Fermionen: → **Polmasse** (Parameter in Fermion-Propagator)

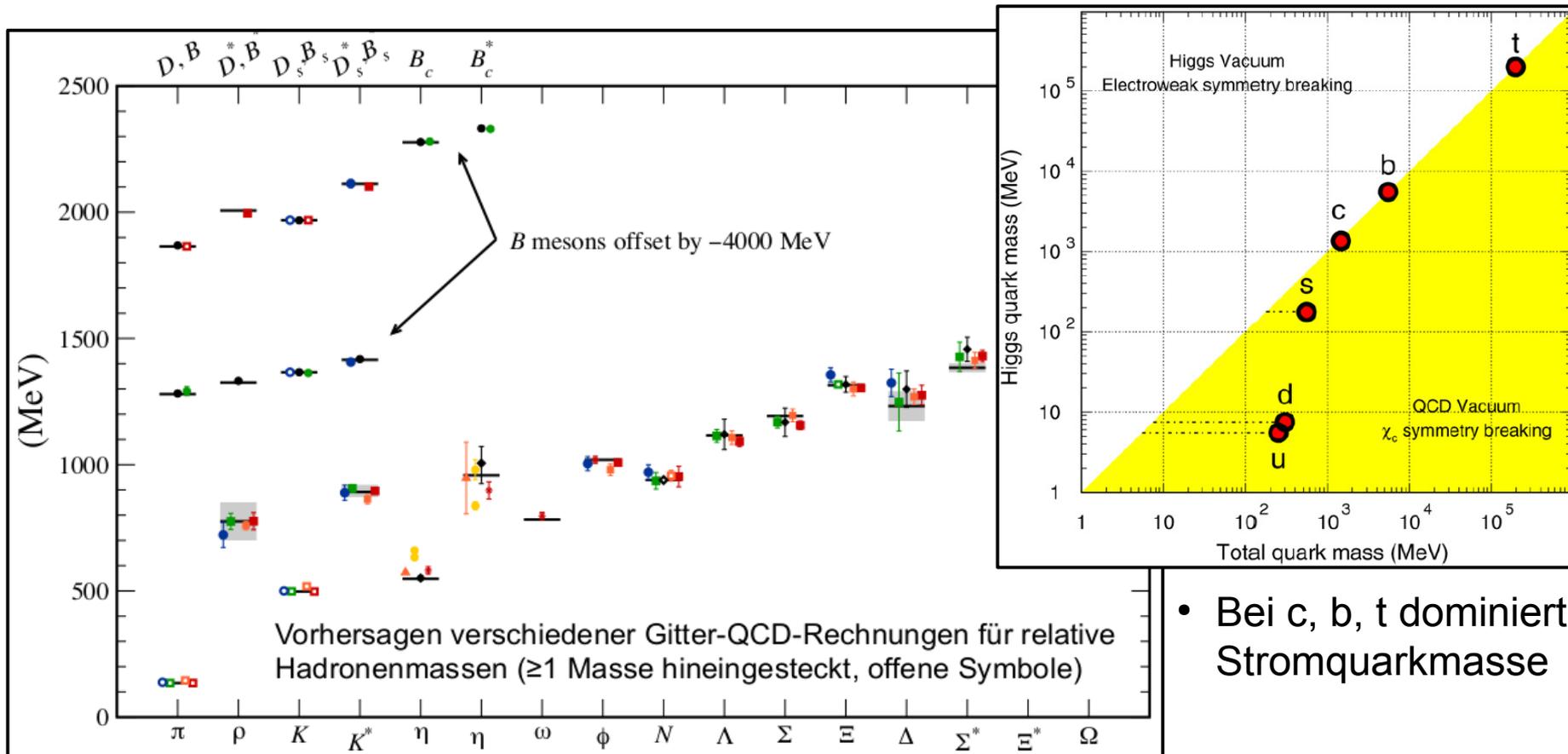
$$\tilde{S}_F(p) = \frac{\gamma^\mu p_\mu + m}{p^2 - m^2 + i\epsilon}$$


- Quarks nur im Limit sehr hoher Energien quasi frei → **Stromquarkmassen**

Quark	Masse (MeV)	Anmerkung
u	$2.3 \pm_{0.5}^{0.7}$	$m^{\overline{MS}}(\mu = 2 \text{ GeV})$
d	$4.8 \pm_{0.3}^{0.5}$	$m^{\overline{MS}}(\mu = 2 \text{ GeV})$
s	95 ± 5	$m^{\overline{MS}}(\mu = 2 \text{ GeV})$
c	1275 ± 25	$m^{\overline{MS}}(\mu = m_c)$
b	4180 ± 30	$m^{\overline{MS}}(\mu = m_b)$
t	173210 ± 870	\approx Polmasse

Hadronmassen \leftrightarrow Quarkmasse

- Massen der Hadronen aus leichten Quarks (u, d, s) **viel größer als Stromquarkmassen** ($m_N = 940 \text{ MeV}$, $m_\pi = 140 \text{ MeV}$, $m_K = 500 \text{ MeV}$)
- Physikalischer Grund: Großteil der Masse aus Bindungsenergie



Schwere Quarks

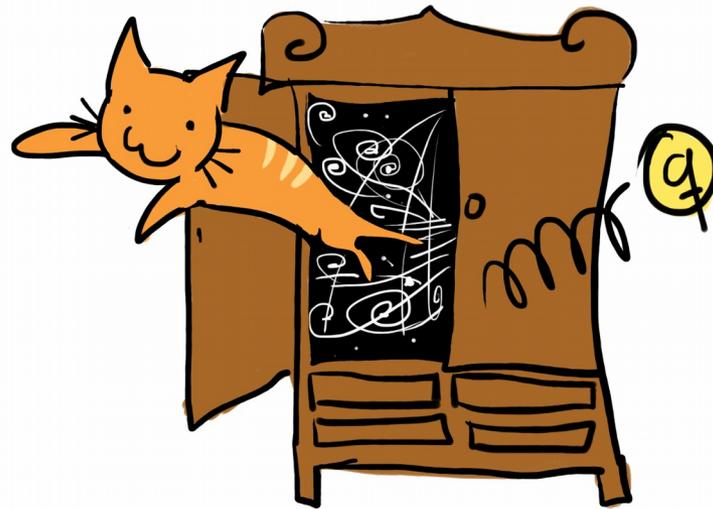
- **Paarweise Erzeugung** in starker oder elektromagnetischer WW (\rightarrow Flavor QZ erhalten)
- Mesonen mit c- oder b-Quarks: **lange Lebensdauer** ($\mathcal{O}(10^{-12} - 10^{-13})$ s) \rightarrow Zerfall durch schwache WW
- **Sonderstellung t-Quark**: Zerfall nach ca. 10^{-25} s (deutlich vor der Ausbildung von Hadronen bei etwa 10^{-23} s)

Wie zerfällt das t-Quark? Ist dieser Zerfall auch ein Prozess der schw. WW?



Kapitel 8.2: Quarkonium

THE CHRONICLES OF
QUARKONDA
THE CAT, THE QUARK AND THE BUBBLE CHAMBER



dingercatadventures.blogspot.com 

Quarkonium

- Gebundenes **Quark-Antiquark-System**, Quarks von gleichem flavor
- QCD-Analogon zu Positronium
- Bewegung eines Quarks im Potential des anderen erlaubt **Rückschlüsse auf QCD Potential**
- Bekannte Quarkonia: Charmonium ($c\bar{c}$), Bottomonium ($b\bar{b}$)

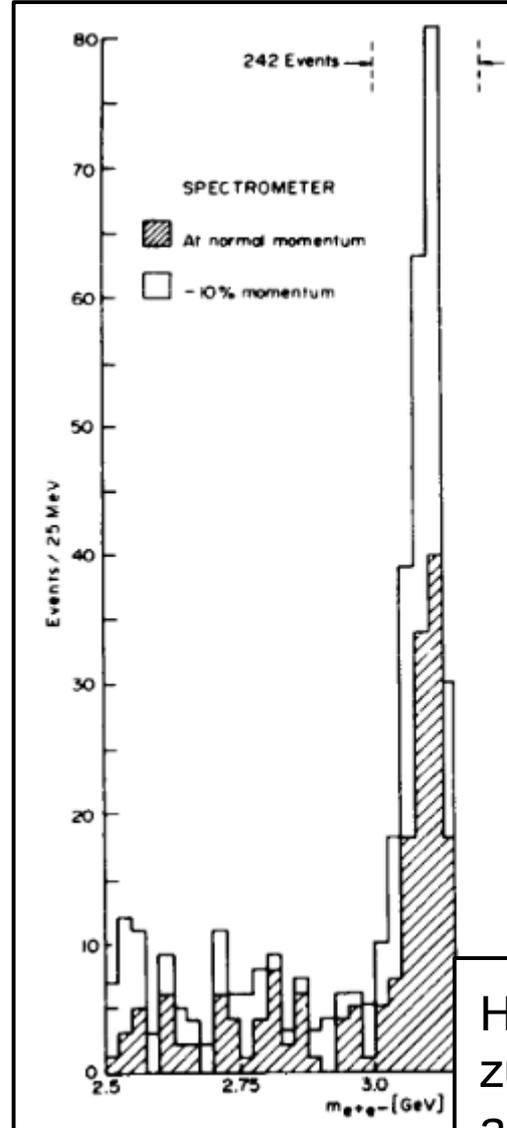
Warum gibt es keine
Quarkoniazustände mit
u-, d- oder s-Quarks?



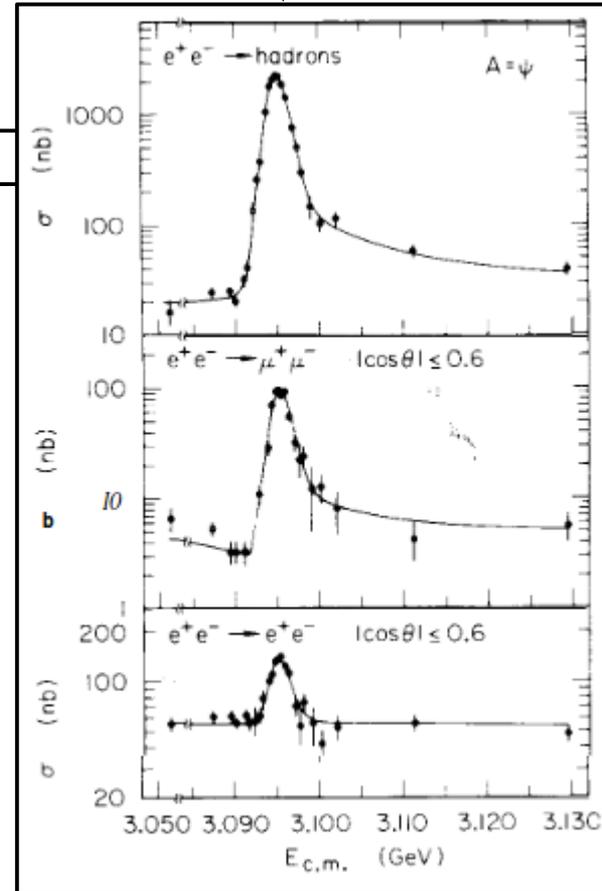
Entdeckung des J/ψ

- **Postulat eines 4. Quarks 1970**
- Verhindere strangeness ändernde neutrale Ströme im Quarkmodell (\rightarrow GIM-Mechanismus)
- **Entdeckung des J/ψ** im November 1974 durch zwei unabhängige Forschergruppen (S. Ting, BNL, ψ und B. Richter SLAC, J)
- Später Entdeckung weiterer Resonanzen
- Interpretation als **gebundener $c\bar{c}$ -Zustand**

$$p + Be \rightarrow e^+ + e^- + X$$



S. Ting et al



B. Richter et al

Historisch wichtigster Schritt zur Anerkennung von Quarks als physikalische Realität

Charmonium Eigenschaften

- **Eigenschaften des J/ψ :**
 - Sehr schmale Resonanz (93 keV)
 - Masse ~ 3 GeV
 - Produktion in $e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow$ Vektormeson, gleiche QZ, wie das Photon
 $J^{CP} = 1^{--}$

- Weitere Anregungszustände (in spektroskopischer Notation):

Name	Anregungszustand	Masse (MeV)	Zerfallsbreite
J/ψ	$\psi(1S)$	3096.916(11)	0.0929(28)
ψ'	$\psi(2S)$	3686.109(14)	0.299(8)
$\psi(3770)$	$\psi(3S)$	3772.15(33)	27.2(10)
$\psi(4040)$	$\psi(4S)$	4039(1)	80(10)

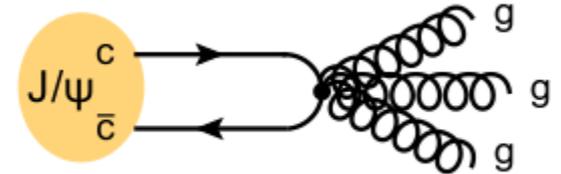
Bemerkenswerter
Anstieg Zerfalls-
breite

- Bis ψ' Masse unterhalb der Open-Charm-Schwelle ($2 \cdot m_{D^0} \approx 3730$ MeV): Zerfall also nur möglich durch $c\bar{c}$ -Annihilation

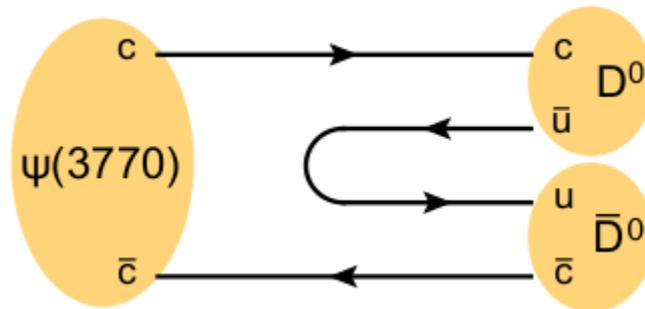
$c\bar{c}$ -Annihilation und OZI-Regel

- $c\bar{c}$ -Annihilation:

- Erlaubte Zerfälle:



- Oberhalb der **Open-Charmschwelle**, auch weitere Zerfallsprozesse erlaubt:



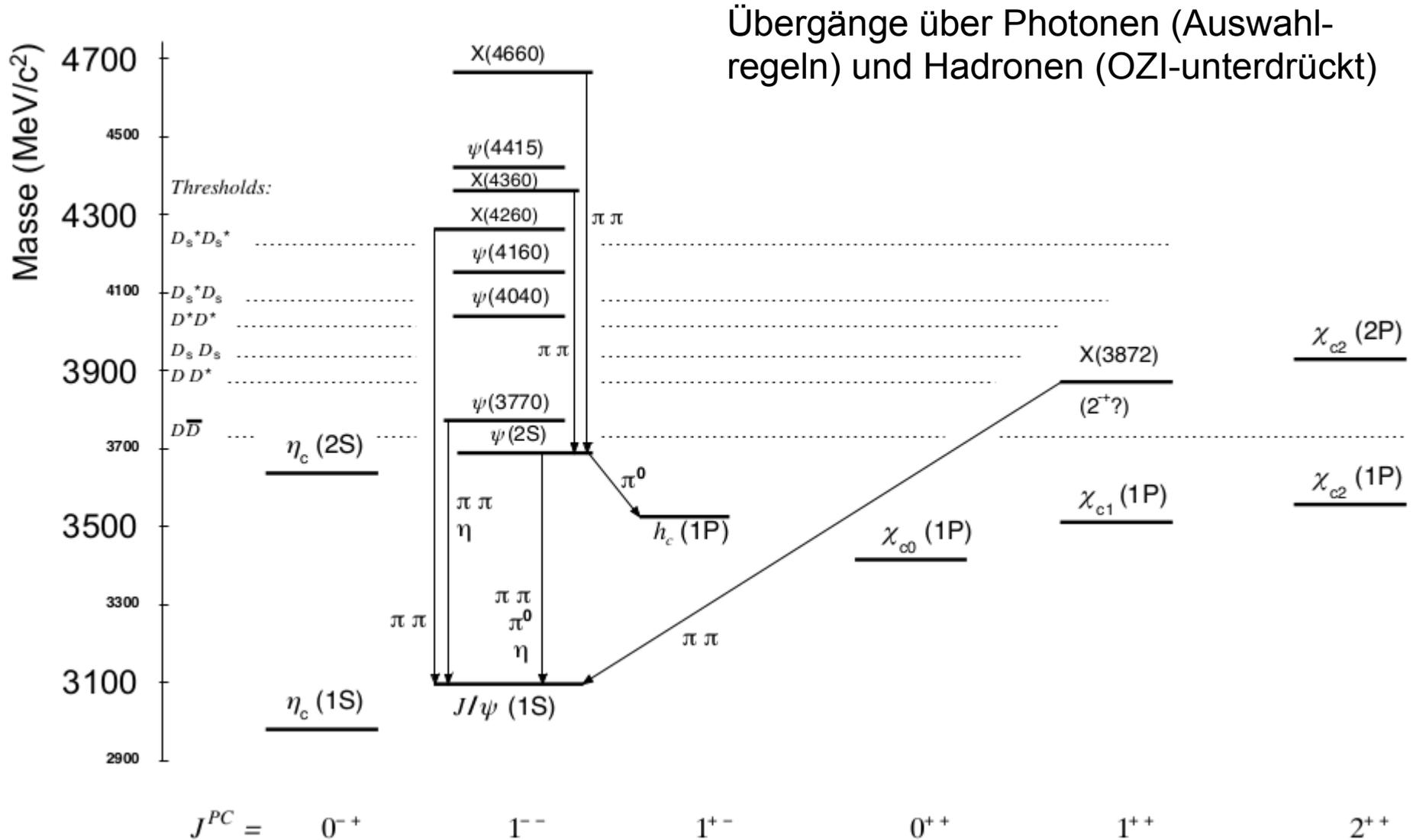
- Trotz starker WW ist auch dieser Zerfall unterdrückt (\rightarrow Okubo-Zweig-Iizuka, OZI-Regel)

OZI-Regel:

Zerfälle durch Feynman-Diagramme mit nicht verbundenen Quarklinien sind unterdrückt

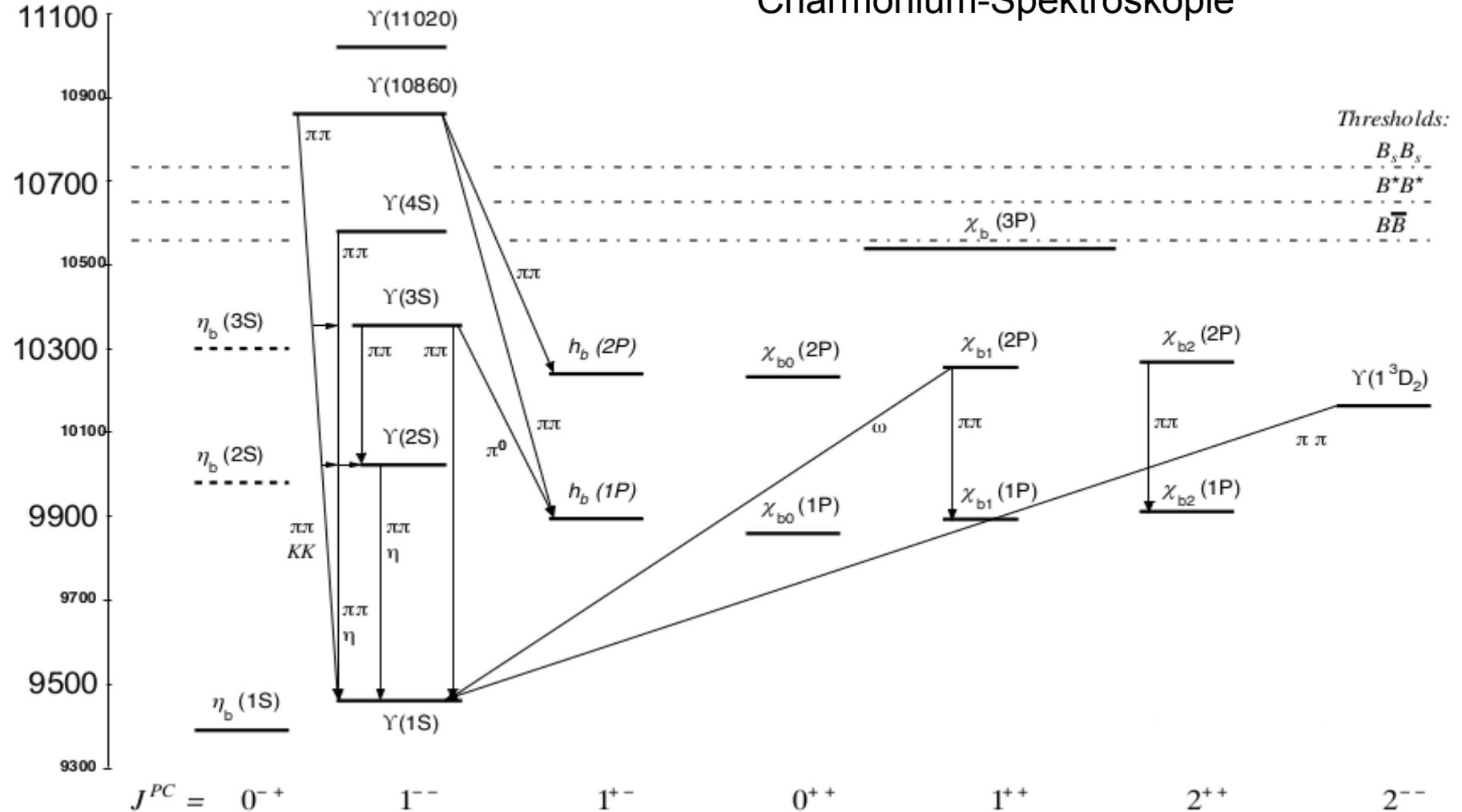
Grund: Verbindung mit Gluonen erfordert hohen Impulsübertrag \rightarrow kleine Kopplung

Termschema Charmonium



Termschema Bottomonium

Masse (MeV/c²)

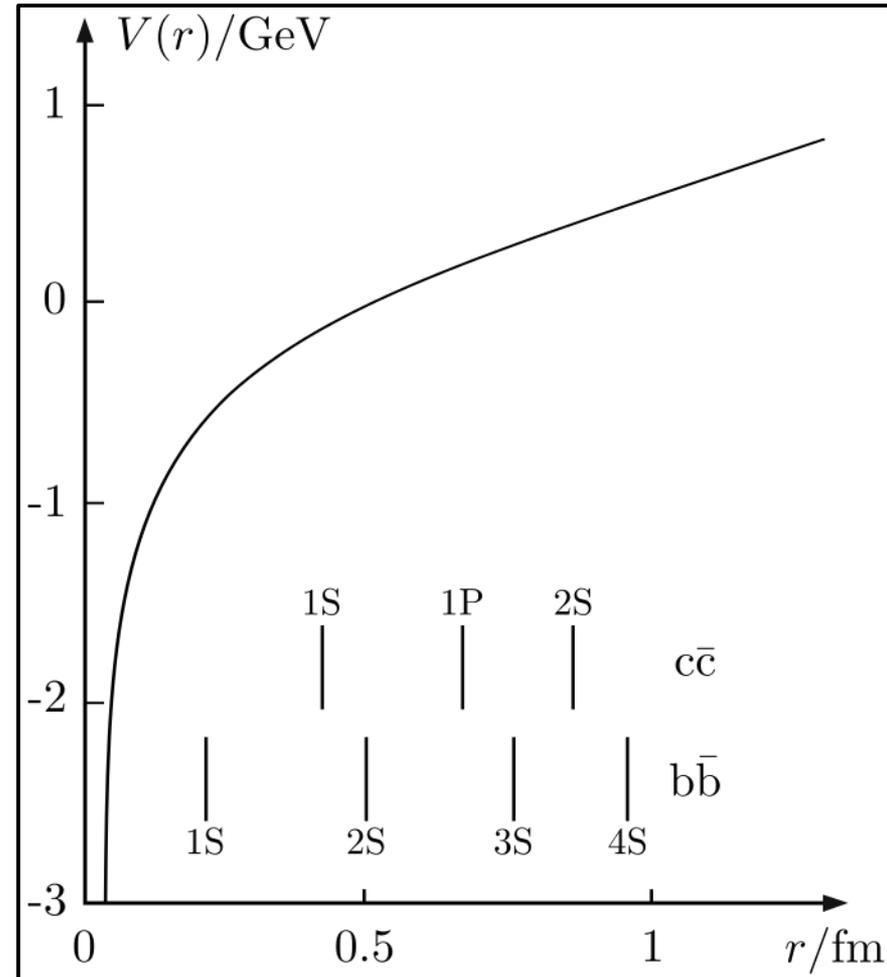


Statisches QCD Potential

- Gebundene $c\bar{c}$ - und $b\bar{b}$ -Zustände: Ähnlichkeiten mit Positronium
- Ansatz für statisches **QCD Potential**: (Cornell-Potential)

$$V(r) = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s (1/r^2) \hbar c}{r} + k r$$

- Kurze Abstände: Austausch einzelner Gluonen (\rightarrow coulombartige WW)
- Große Abstände ($r \gtrsim 0.5$ fm): QCD-confinement \rightarrow lineares Potential (Farbstring mit $k \approx 1$ GeV/fm)



Statisches QCD Potential

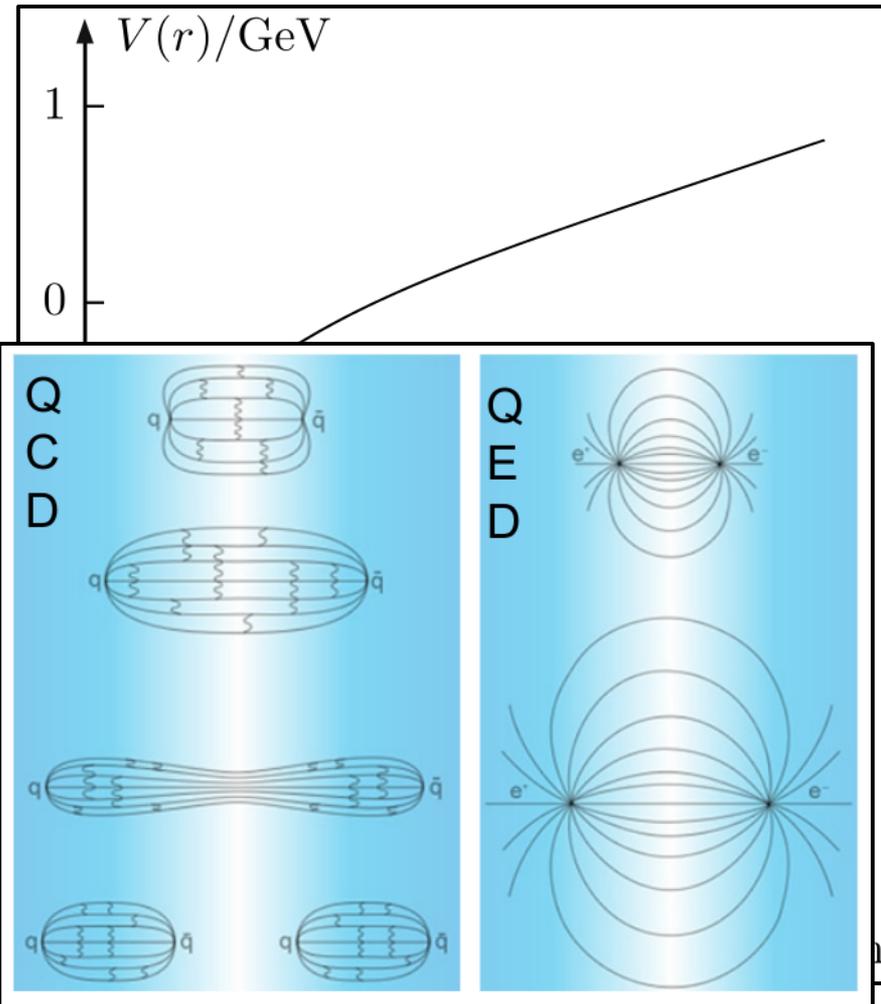
- Gebundene $c\bar{c}$ - und $b\bar{b}$ -Zustände: Ähnlichkeiten mit Positronium

- Ansatz für statisches **QCD Potential**:

$$V(r) = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s (1/r^2) \hbar c}{r} + k r$$

- Kurze Abstände: Austausch einzelner Gluonen (\rightarrow coulombartige WW)
- Große Abstände ($r \gtrsim 0.5$ fm): QCD-confinement \rightarrow lineares Potential (Farbstring mit $k \approx 1$ GeV/fm)
- Bei Trennung farbgeladener Teilchen, Ausbildung von **Flussschläuchen**
- Für $r \approx 1$ fm Ausbildung neuer $q\bar{q}$ -Paare energetisch günstiger

(Cornell-Potential)



KW-21/22

4 Kernmodelle

4.1 Eigenschaften stabler Kerne

4.2 Fermigas und Tröpfchenmodell

4.3 Schalenmodell

4.4 Struktur der Kernkräfte

KW-22

5 Instabile Kerne

5.1 Radioaktives Zerfallsgesetz

5.2 Alpha-, Beta-, Gammastrahlen

5.3 Kernspaltung und Kernfusion

KW-23

6 Anwendungen der Kernphysik

6.1 Energieerzeugung

6.2 Kernphysik in der Medizin

6.3 Nukleare Thermodynamik

6.4 Nukleare Astrophysik

KW-24

7 Symmetrien und Erhaltungssätze

7.1 Symmetrien und Quantenzahlen

7.2 Diskrete und kontinuierliche Symmetrien

7.3 Schlüsselexperimente zu C-, P-, CP-Verletzung

KW-25/26

8 QCD: Quarks, Gluonen und Hadronen

8.1 Quarkmodell und Hadronen

8.2 Quarkonium

8.3 Farbwechselwirkung in der QCD

8.4 Struktur der Nukleonen und Partonmodell

YOU
ARE
HERE

