

## **Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen**

## Karlsruher Institut für Technologie Sommersemester 2019 – 12. Vorlesung (Teil 1)

## ULRICH HUSEMANN, KATHRIN VALERIUS







# Auflösung Aufgabe 21

- Welche der folgenden Aussagen zu Quarkonia sind korrekt? A. Das J/ $\psi$  ist eine Mischung aus zwei Zuständen mit denselben
- Quantenzahlen, daher der Doppelname.
  - B. Die im MIT-Experiment 598 gemessene Breite der J/ $\psi$ -Resonanz ist durch Effekte der Detektorauflösung dominiert.
  - C. Am AGS konnte die Energie des Protonenstrahls eingestellt werden, so dass die Schwerpunktsenergie für  $q\bar{q} \rightarrow e^+e^-$  präzise bekannt war.
  - D. Die J/ $\psi$ -Resonanz besitzt dieselben Quantenzahlen wie das Photon.
  - E. Die Bindungsenergie von Quark und Antiquark im J/ $\psi$  kommt hauptsächlich durch die Coulombanziehung dieser Teilchen zustande.







# Kurze Wiederholung: Quarkonium

- Quarkonium: gebundener qq-Zustand
  - Historische Bedeutung: Etablierung der Quarks als physikalische Realität
  - 1974: Entdeckung des J/ $\psi$  an BNL und SLAC und theoretische Interpretation als gebundener cc-Zustand
  - **1977:** Entdeckung des  $\Upsilon$  am Fermilab  $\rightarrow$  gebundener bb-Zustand
- Anwendungen:
  - Spektroskopie: Vielzahl von Übergängen zwischen Quarkonia unterschiedlicher Quantenzahlen
  - **B-Fabriken**: gezielte BB-Produktion über  $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(4S) \rightarrow BB$
  - Statisches QCD-Potenzial zwischen q $\bar{q}$  aus Termschema





# Farbwechselwirkungen in der QCD



## Kapitel 6.3



## Farbladung in der QCD

- Farbladung der Quarks:
  - Quarks tragen rot, grün, blau
  - Antiquarks tragen antirot, antigrün, antiblau
  - Hadronen sind immer farbneutral (Gruppentheorie, SU(3)-Gruppe: "Farbsingulett")

## Farbladung der Gluonen

- Unterschied zur QED: Photon elektrisch neutral **8 Gluonen**: (Gruppentheorie: SU(3)-Farboktett):  $r\bar{g}, r\bar{b}, g\bar{b}, g\bar{r}, b\bar{r}, b\bar{g}, (r\bar{r}-g\bar{g})/\sqrt{2}, (r\bar{r}+g\bar{g}-2b\bar{b})/\sqrt{6}$
- Farbladung erhalten in allen QCD-Prozessen
- Gluonenaustausch: gebundene Quarks ändern ständig die Farbladung





## **Quark-Antiquark-Annihilation**





# Farbladung in der QCD: Kraftwirkung

- sich an  $\rightarrow$  Mesonen (q $\overline{q}$ ) stabil
- Antisymmetrische Zustände im Farbraum ziehen sich an  $\rightarrow$  Baryonen und Antibaryonen (qqq,  $\overline{q}\overline{q}\overline{q})$  stabil
- Weitere mögliche stabile Kombinationen: exotische Hadronen
  - **Tetraquarks** (qqqq) → signifikantes Signal im Experiment
  - **Pentaquarks** (qqqqqq)
    - → signifikantes Signal im Experiment
  - Glueballs (gg, ggg, ...)
    - $\rightarrow$  experimentell noch unklar



Gleiche Farbladungen stoßen sich ab, Farbe und Antifarbe ziehen







# **Farbe als physikalischer Freiheitsgrad**

- Vorhersage des Quarkmodells: Ω–-Baryon (Quarkinhalt sss) als Teil des Dekupletts mit  $J^P = 3/2^+ \rightarrow$  Entdeckung 1964
  - Wellenfunktion ohne Farbladung: symmetrisch → Widerspruch zu Pauliprinzip

$$|\Omega^{-}\rangle' = \psi_{Ort} \cdot \psi_{Spin} \cdot \psi_{Flav}$$

P = +1 $\rightarrow$  symmetrisch  $J = 3/2 \rightarrow \psi_{\text{Spin}} = |\uparrow\uparrow\uparrow\rangle$  $\rightarrow$  symmetrisch

Lösung: zusätzliche antisymmetrische Farbwellenfunktion  $\psi_{\text{Farbe}} = \frac{1}{\sqrt{6}} \epsilon_{ijk} |q_i q_j q_k\rangle \text{ mit } i, j, k = r, g, b$ 



or/

 $\psi_{\text{Flavor}} = |\text{SSS}\rangle$  $\rightarrow$  symmetrisch



 $\rightarrow$  Gesamtwellenfunktion antisymmetrisch:  $|\Omega^-\rangle = \psi_{Ort} \cdot \psi_{Spin} \cdot \psi_{Flavor} \cdot \psi_{Farbe}$ 

Sommersemester 2020









## Anzahl der Farbladungen • Hochenergetische e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>-Kollisionen mit Schwerpunktsenergie $\sqrt{s}$ : Erzeugung von Fermionen über virtuelle Photonen im s-Kanal Solution Wirkungsquerschnitt für $e^+e^- \rightarrow$ Hadronen: Kontinuum mit Resonanzen 10 $J/\psi$ -3 10 $\psi(2S)$ -4 Z 10 0 0 0 0 0 0 $e^+$ -6 10 10 -8 0 10 **10<sup>2</sup>** √s (GeV) 10









## Anzahl der Farbladungen

- Wirkungsquerschnitt für  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  (Kontinuum):  $\sigma_{\mu\mu}(s) = \frac{4\pi\alpha^2(\hbar c)^2}{2}$
- Wirkungsquerschnitt für  $e^+e^- \rightarrow$  Hadronen (Kontinuum):
  - Kopplung ans virtuelle Photon proportional zur Ladung der Quarks  $q_q = z_q e$ Wirkungsquerschnitt = (inkohärente) Summe über alle "aktiven"
  - **Quarkflavors q** (d. h.  $\sqrt{s}$  oberhalb der qq-Produktionsschwelle), jeweils mit N<sub>c</sub> Farbladungen

$$\sigma_{\text{had}}(s) = \sum_{i} N_c z_{q_i}^2 \frac{4\pi \alpha^2 (\hbar}{3s}$$







## Anzahl der Farbladungen





## Erwartung für Stufen im *R*-Verhältnis:

Aktive Flavors	√ <b>S</b> min	R
u, d, s	ca. 1 GeV	2/3
u, d, s, c	ca. 3,7 GeV	10/9
u, d, s, c, b	ca. 10,6 GeV	11/9

Sommersemester 2020







# Laufende Kopplung in der QED

- Vakuumpolarisation in der QED:
  - Quantenfeldtheorie: Vakuum besteht aus Quantenfluktuationen
  - QED-Vakuum: virtuelle Elektron-Positron-Paare

- Effekt: "nacktes" Elektron umgeben von Elektron-Positron-Paaren
  - Abschirmung der Ladung
  - Abschirmungseffekt wird schwächer mit kürzerem Abstand zum Elektron (entspricht höherem Impulsübertrag bei Bestimmung der Ladung)











# Laufende Kopplung in der QED

Maß f
ür Abstand zur Ladung: Impuls
übertrag Q<sup>2</sup>, z. B. in  $e^+$ 

**E** Feinstrukturkonstante  $\alpha$  als **laufende** Kopplung

$$\alpha(Q^2) = \frac{\alpha(\mu^2)}{1 - \frac{\alpha(\mu)}{3\pi} \ln\left(\frac{Q^2}{\mu^2}\right)}$$

für Messung von  $\alpha$ )

Kopplung ansteigend mit ansteigender Energie **PDG 2019**:  $\alpha(0)^{-1} = 137,035999139(31)$  $\alpha(m_7^2)^{-1} = 127,955(10)$ 







# Laufende Kopplung in der QCD

Gluonen tragen selbst Farbladung: Wechselwirkung mit Quarks und anderen Gluonen (vgl. Kapitel 2.5)

## Vakuumpolarisation in der QCD:

- Abschirmung der Farbladung durch virtuelle Quark-Antiquark-Paare
- "Verschmierung" der Farbladung durch
- Genauere Rechnung zeigt: Antiabschirmung durch Gluonen dominiert





# Laufende Kopplung in der QCD

Energieabhängigkeit der starken Kopplungskonstante  $\alpha_S$ :

$$\alpha_{S}(Q^{2}) = \frac{\alpha_{S}(\mu^{2})}{1 + \frac{\alpha_{S}(\mu)}{12\pi} (11N_{c} - 2N_{f}) \ln\left(\frac{Q^{2}}{\mu^{2}}\right)}$$
  
Gluonen Quarks

Wichtige Erkenntnis (Gross, Politzer, Wilczek, 1974): Für  $N_c = 3$  (Zahl der Farbladungen) und  $N_f \leq 6$  (Zahl der aktiven Quarkflavors): (11  $N_c - 2 N_f$ ) > 0 Große  $Q^2 \rightarrow$  schwache Kopplung: asymptotische Freiheit Kleine  $Q^2 \rightarrow$  starke Kopplung: Confinement











Sommersemester 2020



# Laufende Kopplung in der QCD

- Eingangsgrößen aus unterschiedlichen physikalischen Prozessen:
  - Tau-Lepton-Zerfälle
  - Schwere Quarkonia
  - Tiefinelastische Streuung
  - Hadron- und Lepton-Collider
  - Anpassungen an Präzisionsdaten
  - **Gitter-QCD**
- Kombiniertes Resultat:  $\alpha_s(m_z^2) = 0,1179(10)$ (konsistentes Laufen über drei Größenordnungen im Impulsübertrag)



Sommersemester 2020

Q [GeV]







## **Confinement und Jets**

- Fragmentierung durch räumliche Trennung von q und q in QCD-Prozessen:
  - Bildung von qq-Paaren energetisch günstiger als weitere räumliche Trennung der Quarks
  - Endzustand: Umwandlung in **farbneutrale** Hadronen mit 100% Wahrscheinlichkeit
  - Für hohe Impulsüberträge,  $Q^2 \gtrsim (6 \text{ GeV})^2$ : nur kleine Streuung der Hadronen um Flugrichtung "Mutter"quark→ Jets = kollimierte Teilchenbündel
  - Rekonstruktion von Energie und Impuls des Jets → Rückschluss auf Eigenschaften Mutterquark











- DORIS-Beschleuniger (DESY, 1978): Form der Ereignisse in PLUTO-Experiment deutet auf Zerfall  $\Upsilon(1S) \rightarrow ggg$  hin
- PETRA-Beschleuniger (DESY, 1979): Ereignisse mit drei Jets in e+e--Kollisionen
  - **Experimente TASSO, MARK-J, PLUTO,** 
    - Interpretation: Gluon-Bremsstrahlung

Review: EPJ H35 (2010) 3



## Aufgabe 22

- Welche der Aussagen zur Farbwechselwirkung sind korrekt? A. Das statische Potenzial ist coulombartig für kleine Abstände und linear für
  - große Abstände > 1 fm.
  - B. Die Kopplungskonstante wird stärker für kleine Abstände.
  - C. Die Produktionsrate von Hadronen in e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>-Kollisionen ist proportional zur Zahl der Farbladungen.
  - D. In der Natur gibt es nur Hadronen, die aus Quark-Antiquark-Paaren oder drei Quarks bzw. Antiquarks bestehen.
  - E. Die asymptotische Freiheit in der QCD führt zur Bildung von Jets.
- Bitte beantworten Sie diese Frage anonym auf ILIAS: https://ilias.studium.kit.edu/goto.php?target=fold 1080516&client id=produktiv



## Kurze Zusammenfassung

- Wechselwirkungen in der QCD:
  - Wirkungsquerschnitts in e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>-Kollisionen als Funktion der Schwerpunktsenergie  $\sqrt{s}$

  - **Farbladungen** der Quarks (Farbe) **und** Gluonen (Farbe+Antifarbe) **E** Farbe als physikalischer Freiheitsgrad: z. B. **Antisymmetrie** der  $\Omega^-$ -Wellenfunktion Zahl der Farbladungen: z. B. aus Verhältnis des hadronischen und  $\mu^+\mu^-$ -
- Laufende Kopplungskonstanten:
  - $\rightarrow$  größere Kopplung für größere Impulsüberträge (= kleinere Abstände)
  - QED: Abschirmung der Ladung durch Vakuumpolarisation QCD: Antiabschirmung der Farbladung (Gluonen) dominiert Abschirmung (Quarks)



- → kleinere Kopplung für größere Impulsüberträge → asymptotische Freiheit
- Quarks mit hohen Impulsen: Jets (3-Jet-Ereignisse  $\rightarrow$  Entdeckung des Gluons)



