

Farbmagnetische Wechselwirkung

kleine Abstände: 1 Gluon - Austausch (analog zu 1 Photon - Austausch)

starke Aufspaltung der S-Zustände $1\downarrow$ und $1\uparrow$:

große Spin-Spin-Wechselwirkung: Charmonium = 1000x Positronium

Spin-Spin-Potential:

$$V_{SS} (e^+e^-) = -\frac{2\mu_0}{3} \vec{\mu}_{e^+} \cdot \vec{\mu}_{e^-} \underbrace{\delta(\vec{x}-0)}_{\text{Punktwechselwirkung}} = \frac{2\pi\hbar^3}{3c} \alpha \cdot \underbrace{\frac{\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{\sigma}_2}{m_e^2}}_{\text{Spins}} \delta(\vec{x})$$

Positronium

magnetische Momente

Punktwechselwirkung

Spins

$$V_{SS} (q\bar{q}) = \frac{8\pi\hbar^3}{9c} \alpha_s \cdot \frac{\vec{\sigma}_q \cdot \vec{\sigma}_{\bar{q}}}{m_q m_{\bar{q}}} \delta(x)$$

Var Faktor anders wg. 3 Farbladungen

α_s statt α

Farbmagn WW hängt von relativer Einstellung der Quarkspins ab.

$|\psi(0)|^2$

Wahrscheinlichkeit, dass sich q und $\bar{q}$ am gleichen Ort aufhalten

$\downarrow$
 $= 0$ für $L = 1, 2, 3, \dots$
 $\neq 0$ nur für $L = 0$!

Erwartungswert von $\sigma_q \cdot \sigma_{\bar{q}}$:

$$\langle \sigma_q \sigma_{\bar{q}} \rangle = 4 \cdot \frac{s_q \cdot s_{\bar{q}}}{\hbar^2} = 2 [S(S+1) - s_q(s_q+1) - s_{\bar{q}}(s_{\bar{q}}+1)]$$
$$= \begin{cases} -3 & \text{für } S=0 \\ +1 & \text{für } S=1 \end{cases}$$

$$S = \text{Gesamtspin} = s_q \pm s_{\bar{q}} = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}$$

Wegen $\vec{S}^2 = (\vec{s}_q + \vec{s}_{\bar{q}})^2$ und binom. Formel

$$\text{gilt: } S^2 = s_q^2 + s_{\bar{q}}^2 + 2\vec{s}_q \cdot \vec{s}_{\bar{q}}$$

Eigenwert von $S^2 = S(S+1) \hbar^2$ etc ..

$$J/\psi \rightarrow \eta' \gamma$$

$$\uparrow\uparrow \rightarrow \uparrow\downarrow$$

Spin - Flip

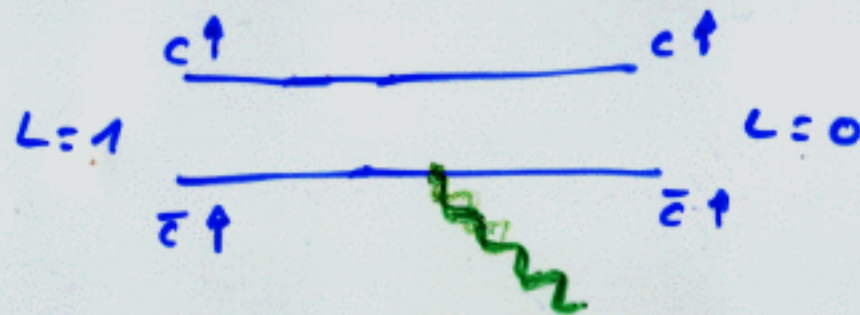
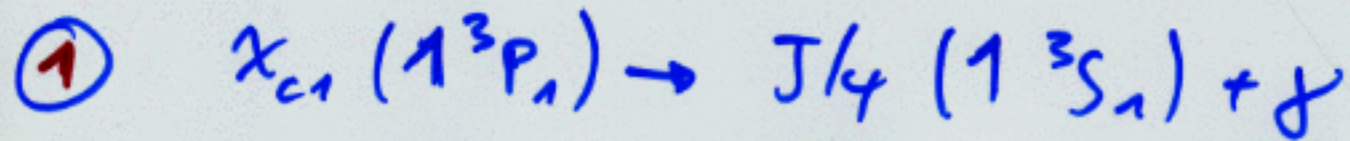
$$1^{--} \rightarrow 0^{-+}$$

e.m. M1-Übergang

$$\Delta m \approx 120 \text{ MeV}$$

Quarkonium - Zerfälle und Bestimmung von χ_c

- 4 Möglichkeiten:
- 1 - elektromagnetisch
 - 2 - $q\bar{q}$ - Annihilation (stark, Zweig - unterdrückt) oder a.m.
 - 3 - starker Zerfall in leichtere Mesonen
 - 4 - schwacher Zerfall



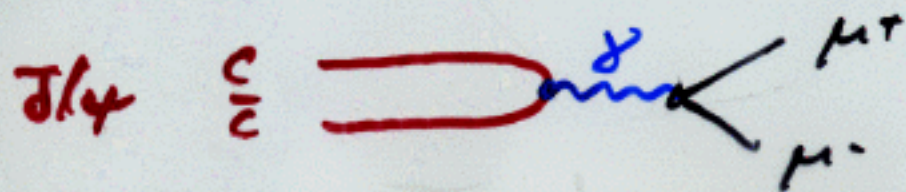
Änderung des
Anregungszustands
durch Photon-Emission

Auswahlregeln
aus Spin, Parität

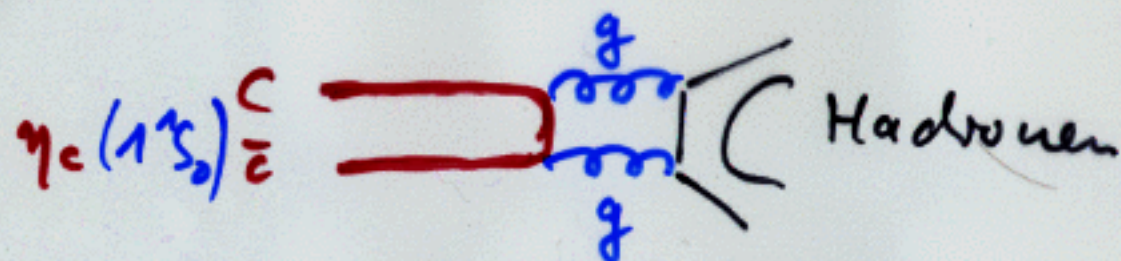
Multipol-Entwicklung

②

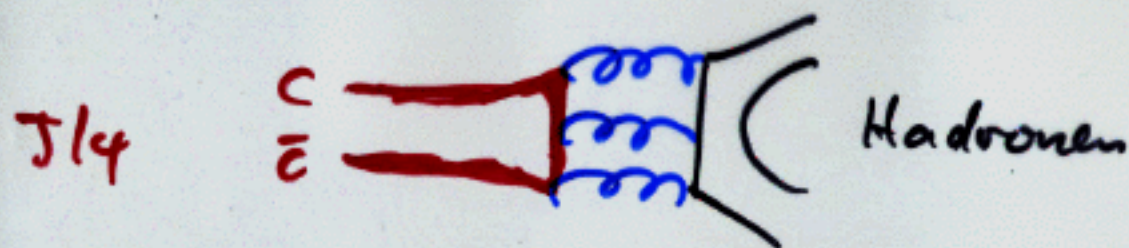
$q\bar{q}$ - Annihilation in Photon oder Gluonen



erlaubt für $J^{PC} = 1^{--}$ -
Zustände
(1 Gluon nicht erlaubt, wg. Farberhaltung)



Zustände mit $C = +1$ können
an 2 Gluonen koppeln



Zustände mit $C = -1$ benötigen
mindestens 3 Gluonen!

$\hookrightarrow B(J/\psi \rightarrow \text{Hadronen}) \approx 70\%$

starke WW

$B(J/\psi \rightarrow \gamma \rightarrow \begin{Bmatrix} \text{Hadronen} \\ \text{Leptonen} \end{Bmatrix}) \approx 30\%$

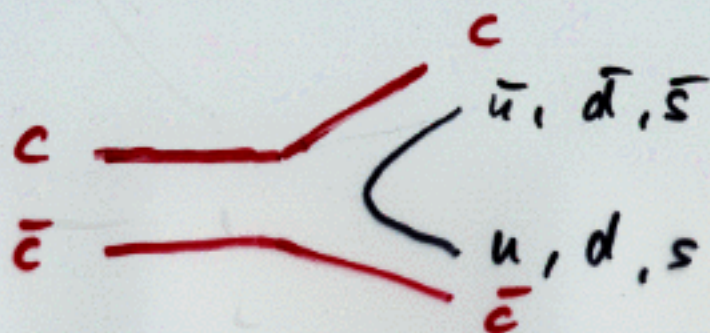
e.m. WW

elektromagnetischer und starker Zerfall hier ca. gleich
groß, weil der starke Zerfall 3 Gluonen benötigt
und somit von Größenordnung $(\alpha_s)^3$ ist $\Rightarrow$ "Zweig-
Unterdrückung", wenn Quark-Linien nicht durchgängig sind.

③

Zerfall in offenen Charm (über der $D\bar{D}$ -Schwelle)

(über der $D\bar{D}$ -Schwelle)



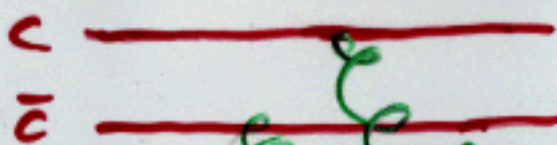
D^0, D^+, D_s

↓
"breit"

$\bar{D}^0, D^-, \bar{D}_s$
1864.6 MeV 1869.4 MeV 1968.5 MeV

Zweig- unterdrückte starke Zerfälle (unter der $D\bar{D}$ -Schwelle)

$\psi(2S)$

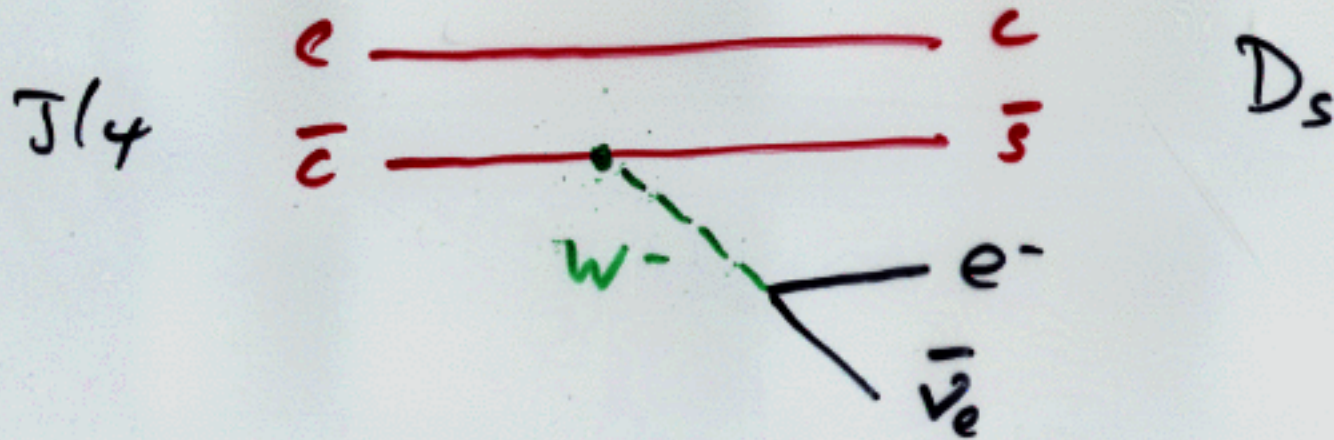


J/ψ ($1S$)

④

Schwacher Quark-Zerfall

(kleine Zerfallsrate, sehr seltener Prozess, weil starke / e.m. Zerfälle immer wichtiger)



Verhältnis der Zerfallsraten in Photonen bzw. Hadronen ergibt
Messung der starken Kopplungskonstante α_s (und dessen „Running“)

Beispiele: $\Gamma(\eta_c(1^1S_0) \rightarrow 2\gamma) = \underbrace{\frac{3 \cdot 4\pi Z_c^4 \cdot \alpha_{em}^2 \hbar^2}{m_c^2 c}}_{\substack{= \text{Positronium} \cdot \text{Farbfaktor,} \\ \text{Ladung, Masse der Quarks}}} |\psi(0)|^2 (1 + \text{Korr.})$

$\Gamma(\eta_c(1^1S_0) \xrightarrow{\alpha_s^2} 2g \xrightarrow{1} \text{Had.}) = \frac{2 \cdot 4\pi \cdot \alpha_s^2 \hbar^3}{3 m_c^2 c} |\psi(0)|^2 (1 + \text{Korr.})$

$\Rightarrow \frac{\Gamma(2\gamma)}{\Gamma(2g)} = \frac{8}{9} \frac{\alpha_{em}^2}{\alpha_s^2} \cdot (1 + \text{Korr.}) \Rightarrow \boxed{\alpha_s \approx 0.25}$

nicht wirklich klein,
ca -0.5
Theorie, höhere
Ordnungen

$\frac{\Gamma(J/\psi \rightarrow 3g \rightarrow \text{Had.})}{\Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma^* \rightarrow \text{Lept.})} \propto \frac{\alpha_s^3}{\alpha_{em}^2}$

okay!

b $\bar{b}$ -System:

$\frac{\Gamma(\Upsilon \rightarrow 3g \rightarrow \text{Had.})}{\Gamma(\Upsilon \rightarrow \gamma \gamma \rightarrow \gamma \text{ Had.})} \propto \frac{\alpha_s^3}{\alpha_{em} \alpha_s^2} \propto \frac{\alpha_s}{\alpha_{em}} \Rightarrow \boxed{\alpha_s = 0.163}$

13-18

$\alpha_s(3 \text{ GeV}) = 0.25 \Leftrightarrow$ „laufen“ $\Rightarrow \alpha_s(10 \text{ GeV}) \approx 0.16$ starke Kopplung nimmt mit Abstand ab!