

Moderne Experimentalphysik III: Teilchenphysik

Sommersemester 2018

Thomas Müller, Roger Wolf

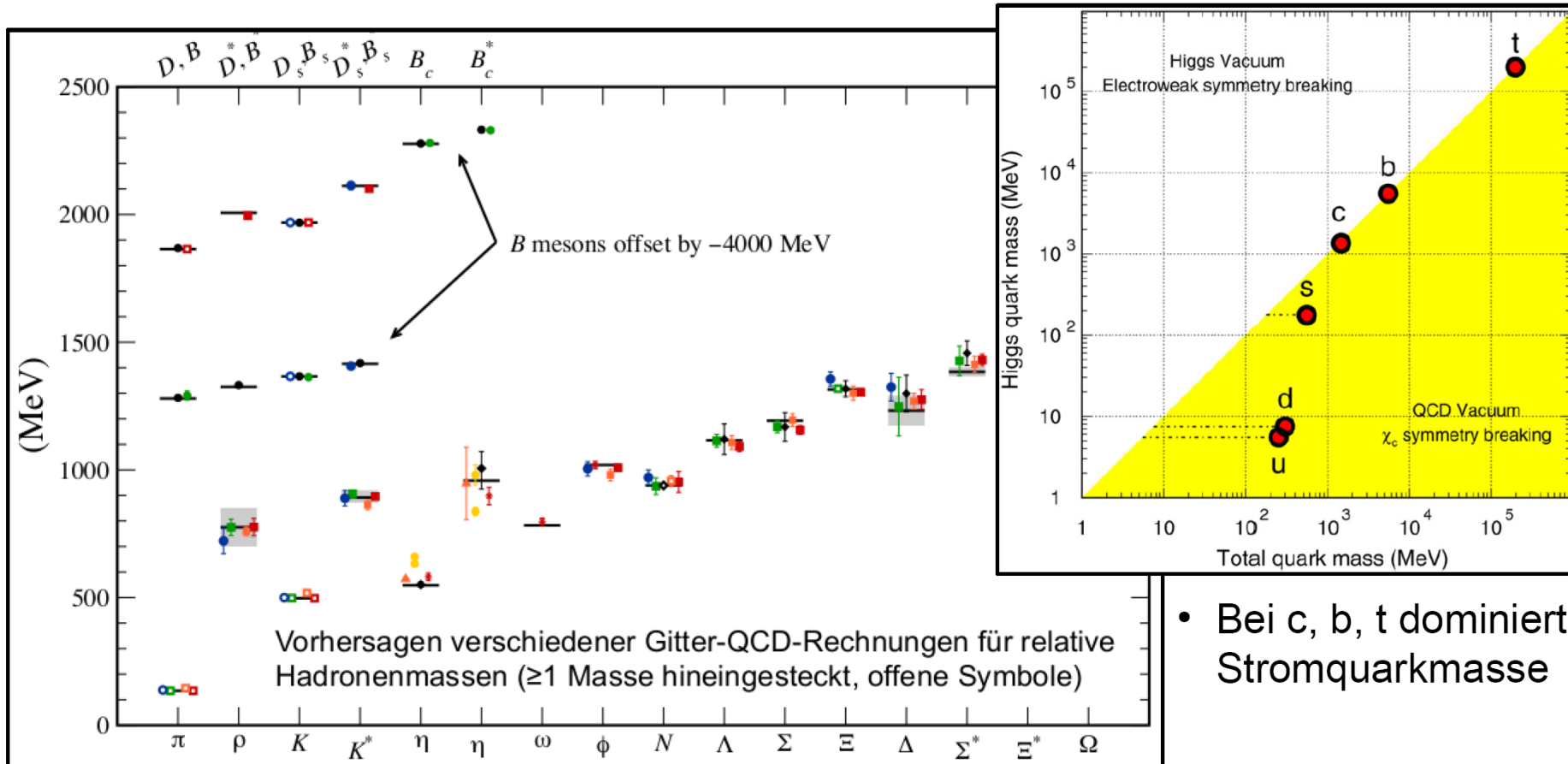
05. Juni 2018 – VL 11

Institut für Experimentelle Teilchenphysik (ETP)



Hadronmassen ↔ 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



- Bei c, b, t dominiert Stromquarkmasse

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)

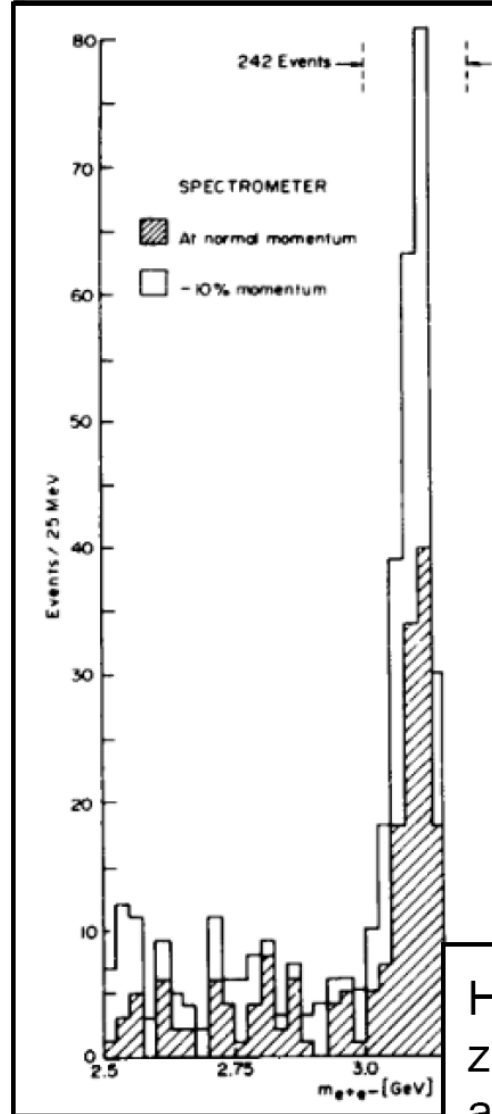
Quarkonium

- 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 ($b\bar{b}$)

Entdeckung des J/ψ

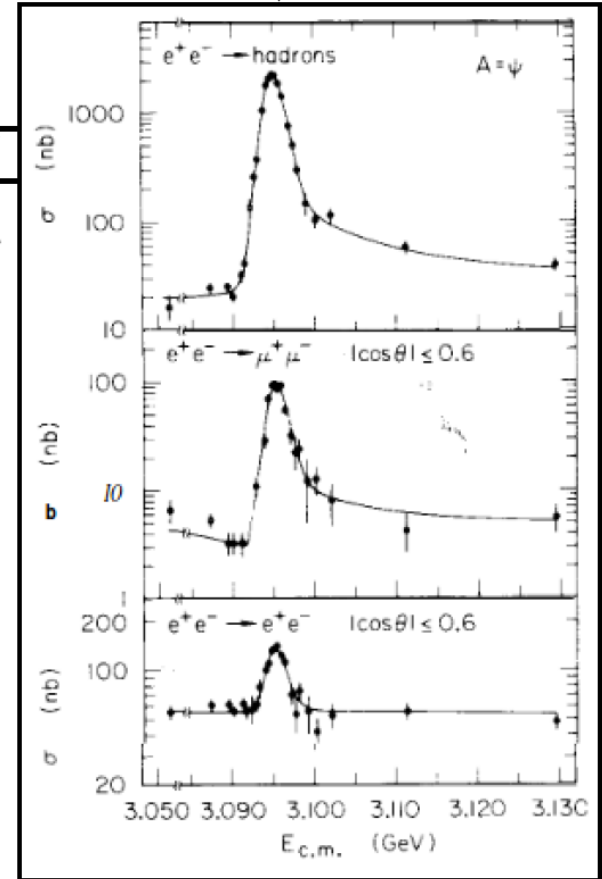
- Postulat eines 4. Quarks
1970
- Verhindere strangeness ändernde neutrale Ströme im Quarkmodell (\rightarrow GIM-Mechanismus)
- Entdeckung des J/ψ im November 1974 durch zwei unabhängige Forschergruppen (S. Ting, BNL, ψ und B. Richter SLAC, J)
- Später Entdeckung weiterer Resonanzen
- Interpretation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

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



S. Ting et al

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma^*$$



B. Richter et al

Historisch wichtigster Schritt zur Anerkennung von Quarks als physikalische Realität

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

- Weitere Anregungszustände (in spektroskopischer Notation):

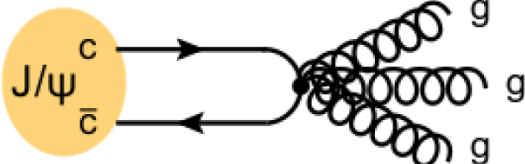
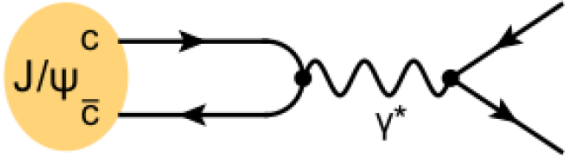
Name	Anregungszustand	Masse (MeV)	Zerfallsbreite
J/ψ	$\psi(1S)$	3096.916(11)	0.0929(28)
ψ'	$\psi(2S)$	3686.109(14)	0.299(8)
$\psi(3770)$	$\psi(3S)$	3772.15(33)	27.2(10)
$\psi(4040)$	$\psi(4S)$	4039(1)	80(10)

Bemerkenswerter Anstieg Zerfallsbreite

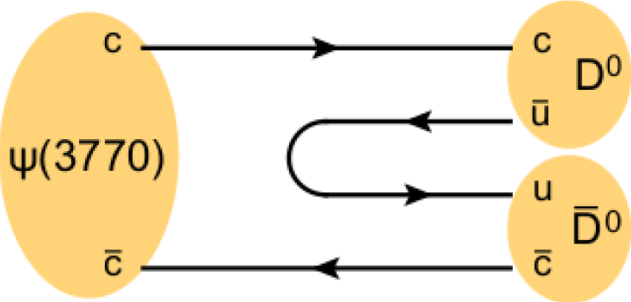
- Bis ψ' Masse unterhalb der Open-Charmschwelle ($2 \cdot m_{D^0} \approx 3730$ MeV): Zerfall also nur möglich durch $c\bar{c}$ -Annihilation

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

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



- Oberhalb der **Open-Charm-Schwelle**, auch weitere Zerfallsprozesse erlaubt:



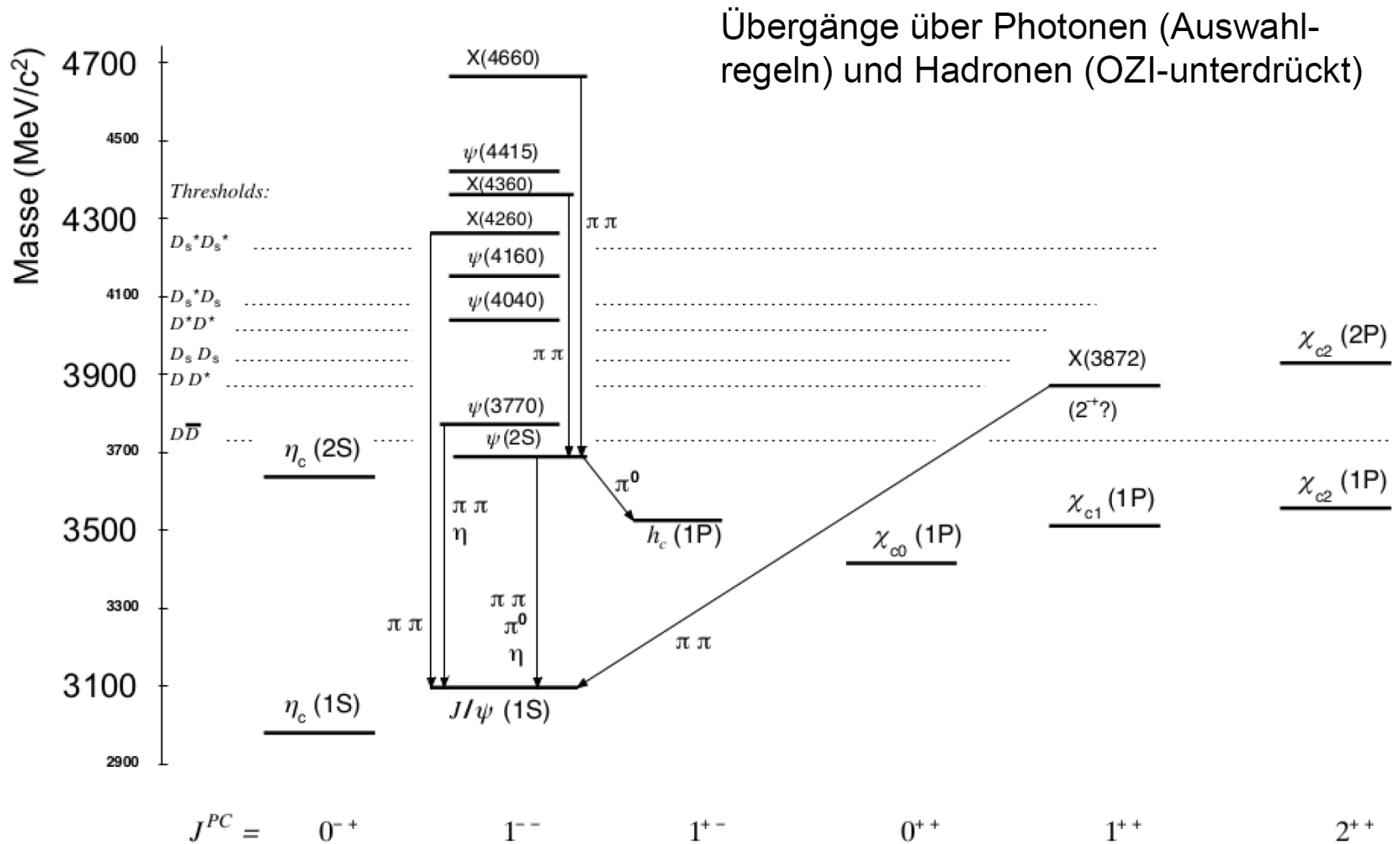
- Trotz starker WW ist auch dieser Zerfall unterdrückt (\rightarrow Okubo-Zweig-Iizuka, OZI-Regel)

OZI-Regel:

Zerfälle durch Feynman-Diagramme mit nicht verbundenen Quarklinien sind unterdrückt

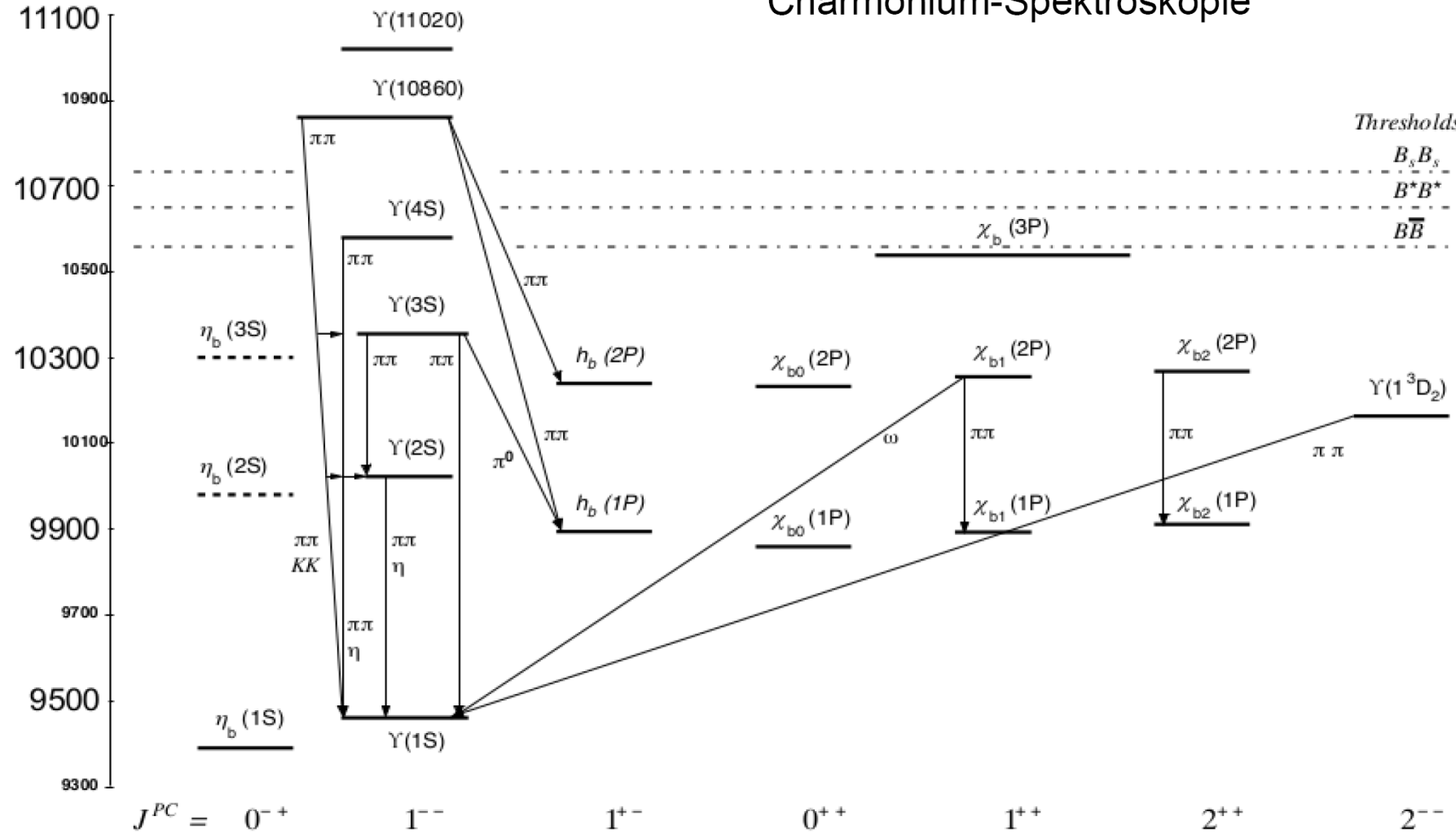
Grund: Verbindung mit Gluonen erfordert hohen Impulsübertrag \rightarrow kleine Kopplung

Termschema Charmonium



Termschema Bottomonium

Masse (MeV/c²)



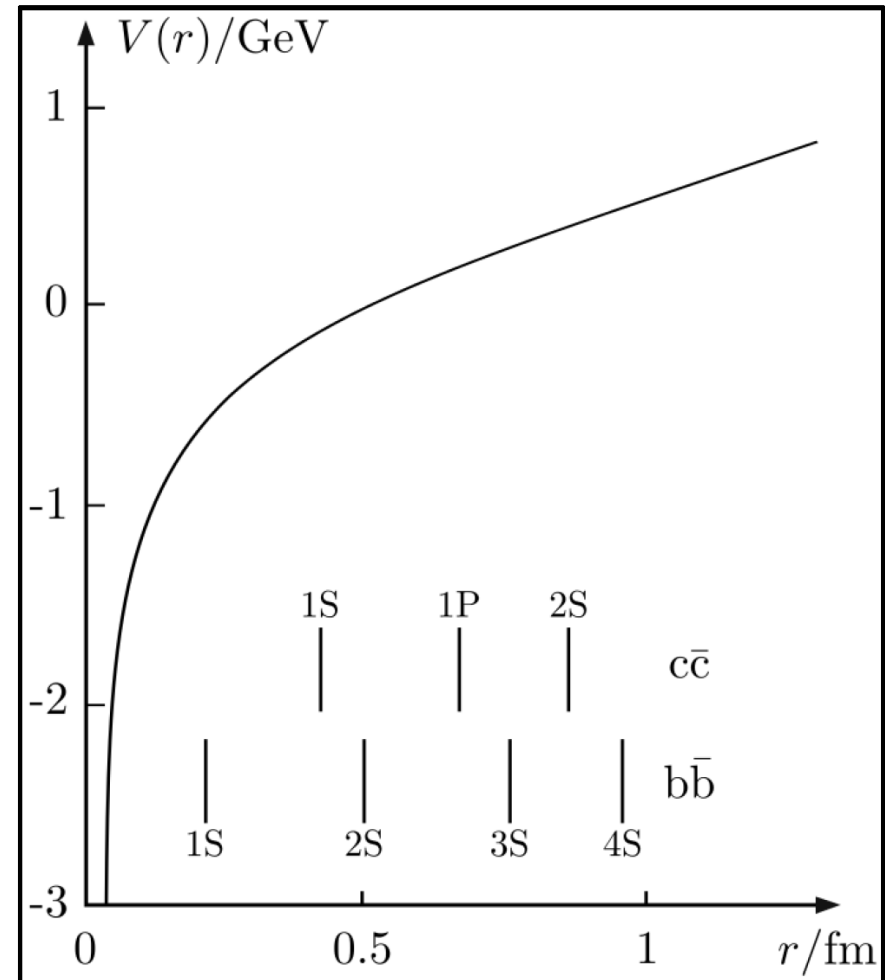
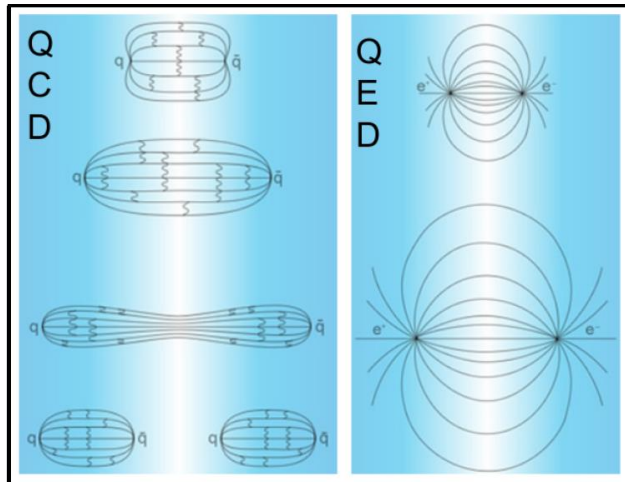
Bottomonium-Spektroskopie analog zu Charmonium-Spektroskopie

5.3 Das statische Potential der QCD

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

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

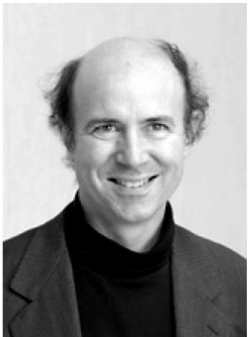
- Kurze Abstände: Austausch einzelner Gluonen (\rightarrow coulombartige WW)
- Große Abstände ($r \gtrsim 0.5$ fm): QCD-confinement \rightarrow lineares Potential (Farbstring mit $k \approx 1$ GeV/fm)



5.4 Die Farbkraft

Asymptotische Freiheit in der QCD

- Bei extrem kurzen Abständen sollten sich die Quarks entsprechend der QCD (Wilzeck, Gross, Politzer) wie nahezu freie Teilchen verhalten
 - ↳ **asymptotische Freiheit**
 - dieser Effekt der QCD ermöglicht die Anwendung des Quark-Parton Modells zur Interpretation der tiefinelastischen eN-Streuung

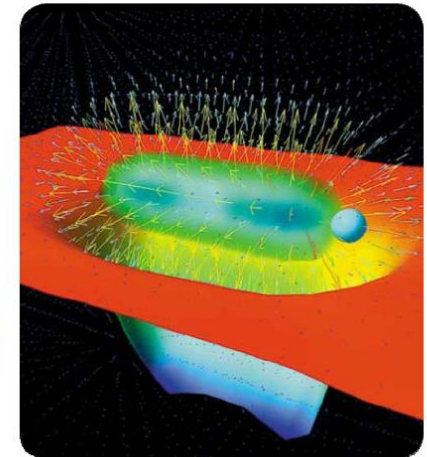
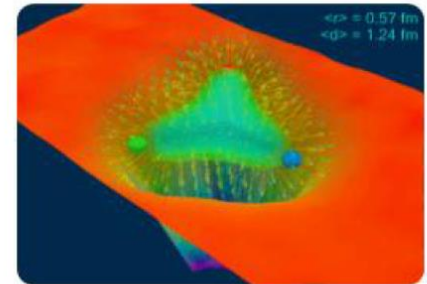


Nobelpreis 2004



"for the discovery of asymptotic freedom in the theory of the strong interaction"

Frank Wilczek David J. Gross H. David Politzer



Farbe als Freiheitsgrad in Hadronenwellenfunktionen

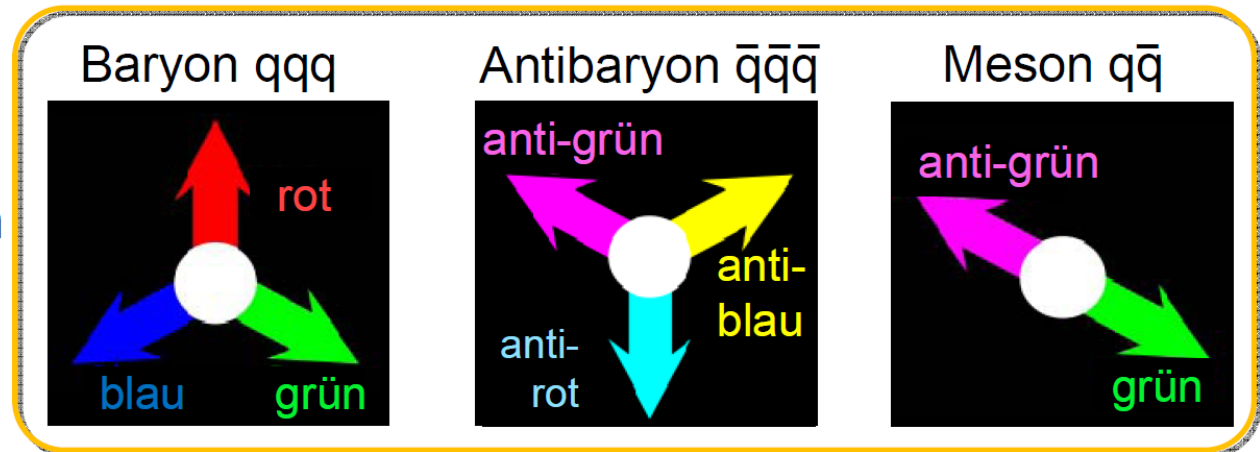
- Baryonen und Mesonen sind nach außen stets QCD - 'farbneutrale' Objekte, d.h. alle **Hadronen** befinden sich in einem **Farb-Singulett-Zustand**

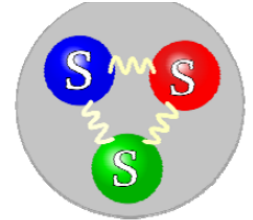
Baryonen: 3 Farben (**rgb**)

Mesonen: 1 Farbe & 1 Anti-Farbe

- 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

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





- 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 (Baryon = Fermion !)
- Die Δ^{++} Resonanz (uuu) & das Ω^- (sss) verletzen ohne die Existenz des Farb-Freiheitsgrades das Pauli-Prinzip, Beispiel: Δ^{++} Wellenfunktion

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

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 Δ^{++} Gesamtwellenfunktion

- Die Antisymmetrisierung am Beispiel des Δ^{++} :

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

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

Antisymmetrische Darstellung der Farbfreiheitsgrade:

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

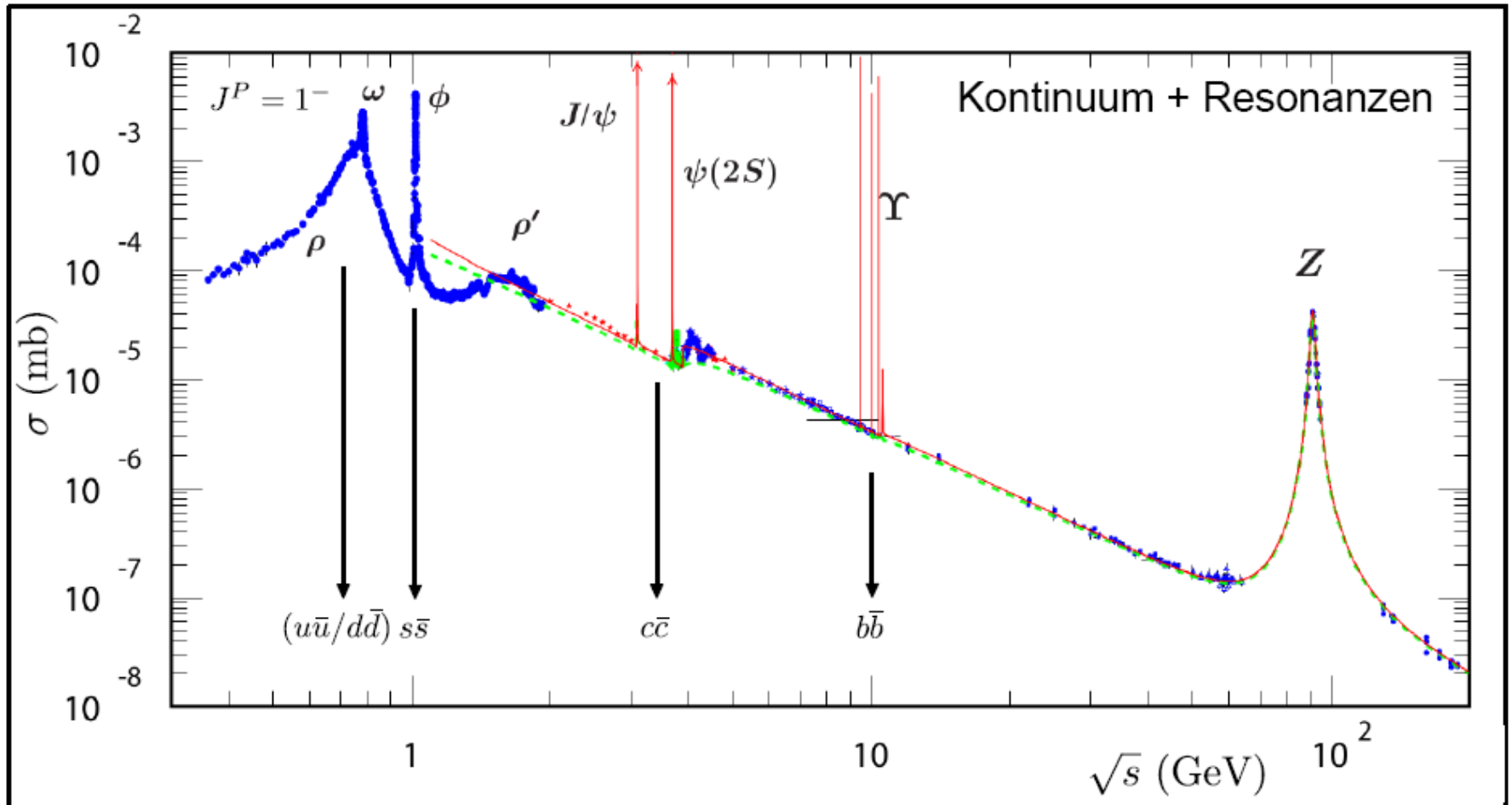
Beispiel: nach Vertauschung der beiden Farbfreiheitsgrade RG ergibt sich:

$$\begin{aligned} \Psi'_{Farbe} (\Delta^{++}) &= \frac{1}{\sqrt{6}} |GRB + BGR + RBG - RGB - BRG - GBR \rangle \\ &= -\Psi_{Farbe} \end{aligned}$$

Die Gesamtwellenfunktion des Δ^{++} Baryons ist unter Berücksichtigung aller Quark-Freiheitsgrade wie gefordert antisymmetrisch

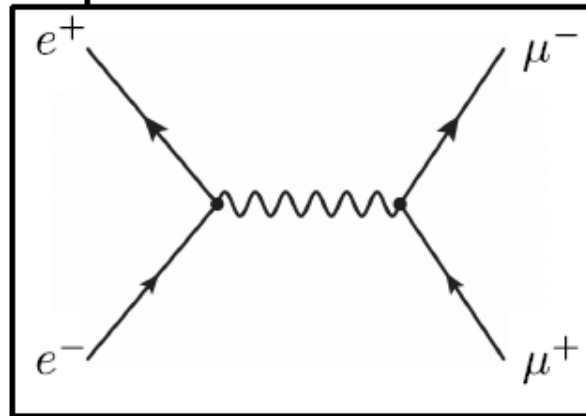
Farbfreiheitsgrad in e+e- Kollisionen

- Zweiter wichtiger Hinweis auf Farbe als weiteren **internen Freiheitsgrad der QM**



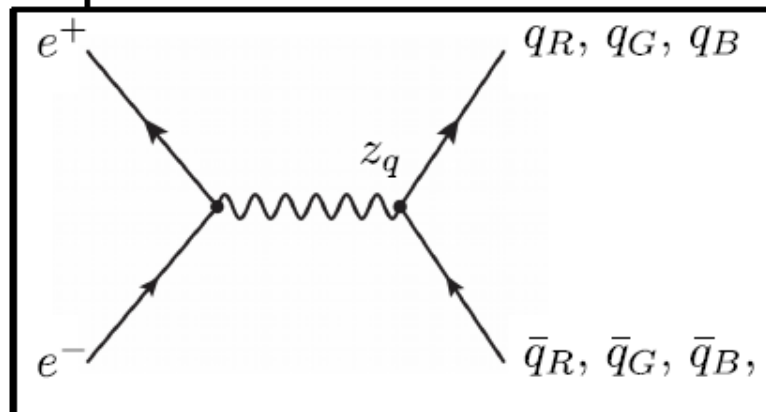
Wirkungsquerschnitt für Myonproduktion:

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-) = \frac{4\pi}{3} \frac{\alpha^2 (\hbar c)^2}{s}$$



Wirkungsquerschnitt für
Hadronproduktion:

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow q\bar{q}) = \sum_q \underbrace{N_c z_q^2}_{\text{Hadron-spezifisch}} \underbrace{\frac{4\pi}{3} \frac{\alpha^2 (\hbar c)^2}{s}}_{\text{Fermion-spezifisch}}$$



Experimentell einfacher zugänglich:

$$R(s) = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow q\bar{q})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = N_c \sum z_q^2$$

