

• Beobachtung von Hadronen

- \leftrightarrow Beobachtung eines ganzen Teilchen-Zoo's
(viele Mesonen ($q\bar{q}$) und Baryonen (qqq))
- \leftrightarrow Beobachtung von Teilchen, die über die starke Wechselwirkung erzeugt werden aber mit großer Lebensdauer zerfallen ($\Lambda(1115) : 2,6 \cdot 10^{-10} s$)
 - Teilchen mit Strangeness

Leptons:		Hadrons:	
e^-	ν_e	Ω_{bbb}^{+++}	Ξ_c^+
μ^-	ν_μ	Σ^0	Ω_{ccc}^{++}
τ^-	ν_τ	Ω_{ccb}^{*0}	Ω_{bb}^{*-}
ω	η	Σ^+	Ξ_c^0
π^+	ρ^-	Ξ_c^-	Ω_c^0
π^0	ρ^+	Ξ_{cb}^+	Λ^0
D_s^-	B^+	Δ_b^+	Ξ_{bb}^+
D_s^+	K^{*-}	Δ_c^+	Σ_c^+
D_s^0	K^{*+}	Σ_b^{*+}	Ξ_{bb}^{*0}
D_s^{*-}	K_L^0	Δ^{*+}	Ξ_c^{*0}
D_s^{*+}	K_L^0	Σ_b^{*+}	Ξ_b^{*0}
D_s^{*0}	D^{*-}	Δ^0	Ξ_c^0
D_s^{*-}	D^{*+}	Σ_b^0	Ξ_{cb}^0
D_s^{*+}	D^{*0}	Ξ_{cc}^0	Ξ_c^0
B_c^{*-}	B_c^{*+}	Ξ_{cc}^{*+}	Ξ_{cc}^{*-}
B_c^{*0}	B_s^0	Ξ_{cc}^{*0}	Σ_c^0
B_c^{*+}	B_s^{*0}	$\Xi_{cc}'^+$	Ξ_{bb}^{*0}
B_c^{*0}	B_s^{*+}	$\Xi_{cc}'^-$	Σ_b^{*-}
B_s^-	B_s^0	Ξ_{cc}^{*+}	Σ_c^0
Ω_b^-	Ω_c^0	Σ_c^{*-}	Ω_{ccb}^0
Ω_b^0	Ω_c^0	Ω_{ccb}^0	Σ_b^{*0}
Ω_b^{*-}	Ω_c^0	Ω_{ccb}^0	Ξ_c^{*+}
Ω_c^0	Ω_c^0	Ω_{ccb}^0	Ξ_b^{*0}
Ω_{cb}^{*0}	Σ_c^0	Σ_c^{*+}	Ξ_b^0
Ω_{cb}^{*0}	Σ_c^0	Σ_c^{*0}	Ξ_c^{*0}
Ω_{cb}^{*0}	Σ_c^0	Ξ_{cc}^{*0}	Ξ_{cc}^{*+}
+150 further known Meson resonances.		+152 further known Baryon resonances.	
$J^P = 0^- \quad J^P = 1^- \quad J^P = 1/2^+ \quad J^P = 3/2^+$			

\leftrightarrow Entwicklung des Quarkmodells

(damals natürlich noch basierend auf deutlich weniger bekannten Zuständen (aus leichten Quarks/Antiquarks (u,d,s))

$\mathcal{O}(400)$ known elementary particles.

plus viele weitere Teilchen, auch mit anderen Quantenzahlen

307

Zusammenfassung: Hadronen, Multipletts, Quarkmodell, Farbe

(VL2, KW 50)

• Beobachtung von Hadronen

- \leftrightarrow Baryonen (qqq) zerfallen immer in Baryonen (p oder n im Endzustand)
- \Leftrightarrow **Baryonenzahlerhaltung**
Nur $q\bar{q}$ -Paare (gleichen Flavours) werden in der starken WW erzeugt/vernichtet
- \Leftrightarrow **Erhaltung der Strangeness in der starken WW**

\Rightarrow Quarkmodell: Gell-Mann (1964)

- u, d, s - Quarks als Basiszustände (Erweiterung des Isospins)
- \Leftrightarrow SU(3)-Multipletts für die Mesonen ($q\bar{q}$) und Baryonen (qqq)
= Erklärung des Teilchenzoo's

Quarkmodell nutzt Konstituentenquarks mit $M \approx 300$ MeV

(entspricht anschaulich effektiven Valenzquarks)

Problem: Total symmetrische Wellenfunktion z.B. der Δ^{++} -Resonanz:

$u \uparrow \quad u \uparrow \quad u \uparrow$

Lösung: Einführen der Farbladung!

$\Rightarrow \Psi_{\text{tot}} = (\Psi_{\text{Flavour}} \cdot \Psi_{\text{Spin}} \cdot \Psi_{\text{Ort}})^{\text{sym}} \cdot (\Psi_{\text{color}})^{\text{antisym.}}$

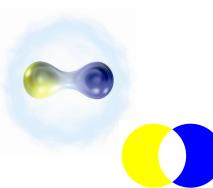
= Basis für die QCD

- \Leftrightarrow Nur farbneutrale Zustände existieren \leftrightarrow Confinement
(Quarks sind in Hadronen "eingesperrt")

308

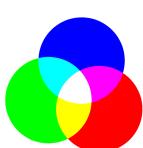
Hadronen als farbneutrale (weiße) Objekte

Hadronen: Die Farben der Konstituenten addieren sich immer zu weiß:

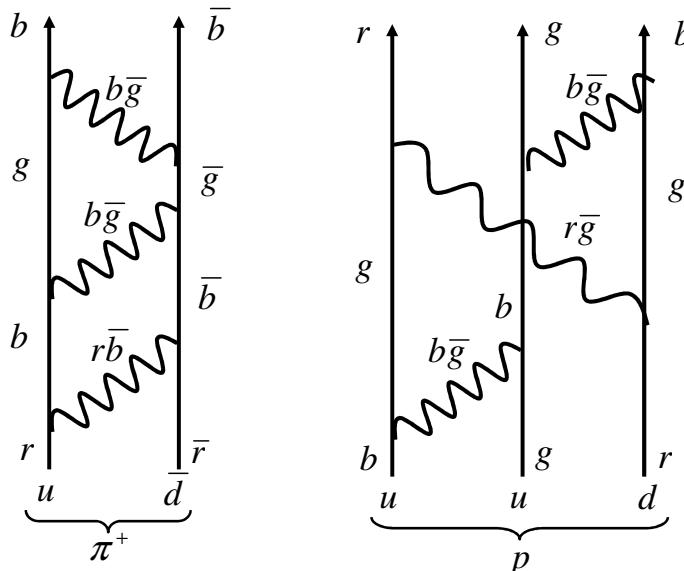


$$|\pi^+\rangle = \begin{cases} |u_r \bar{d}_r\rangle \\ |u_b \bar{d}_b\rangle \\ |u_g \bar{d}_g\rangle \end{cases}$$

$$|p\rangle = \begin{cases} |u_b u_r d_g\rangle \\ |u_r u_g d_b\rangle \\ \vdots \end{cases}$$



das physikalische Pion bzw. Proton sind Mischungen dieser Zustände:



durch ständigen Austausch von Farbe und Antifarbe zwischen den Quarks ändert sich ständig die Farbkombination; dabei bleibt die Gesamtfarbe weiß erhalten

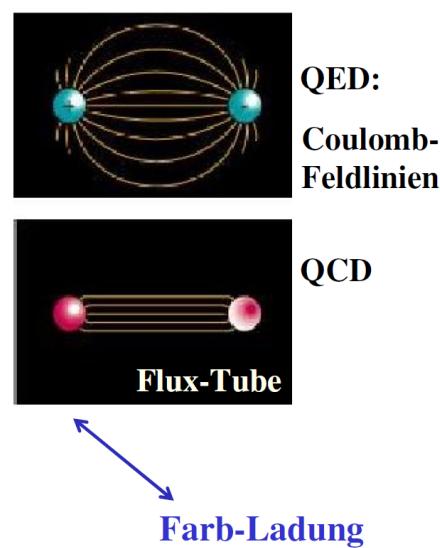
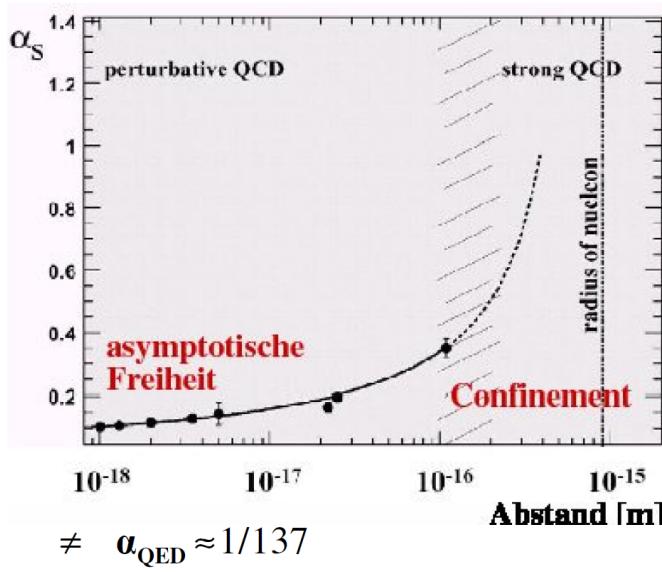
↔ starke WW ändert Farbe, aber erhält den Flavor

309

Hadronen als farbneutrale Objekte

- Es existieren nur farblose Hadronen ↔ keine freien Quarks
(Quarks tragen Farbe)
- Quarks sind in Hadronen eingesperrt (= Confinement)

↔ Kopplungskonstante der starken Wechselwirkung α_s



310

Kopplungskonstante der Starken Wechselwirkung α_s

QCD:

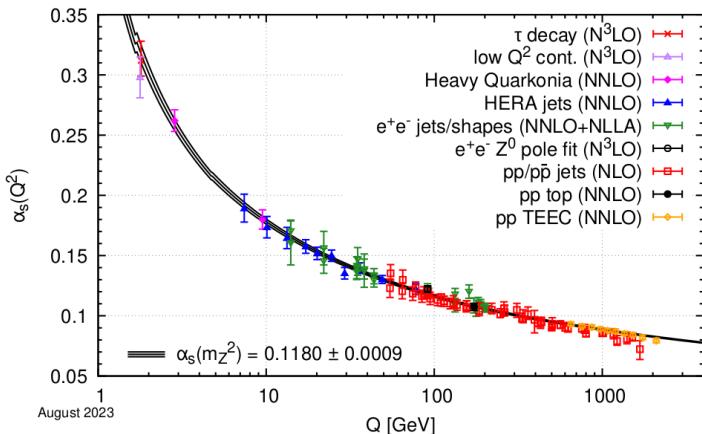
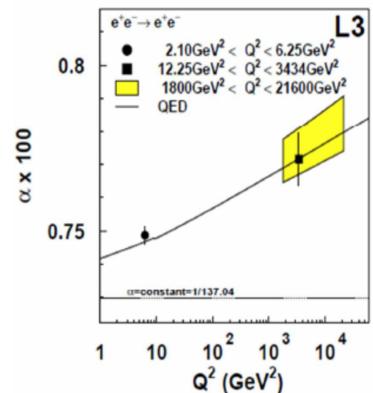


Figure 9.5: Summary of determinations of α_s as a function of the energy scale Q compared to the running of the coupling computed at five loops taking as an input the current PDG average, $\alpha_s(m_Z^2) = 0.1180 \pm 0.0009$. Compared to the previous edition, numerous points have been updated or added.

for comparison:

QED



...dazu später mehr ...

311

Hadronen als farbneutrale Objekte

- Es existieren nur farblose Hadronen \Leftrightarrow keine freien Quarks
(Quarks tragen Farbe)

Quarks sind in Hadronen eingesperrt (= Confinement)

=> keine Hadronen der Struktur $|qq\rangle$, $|qq\bar{q}\rangle$, $|qqqq\bar{q}\rangle$
 \Leftrightarrow würden Farbe tragen

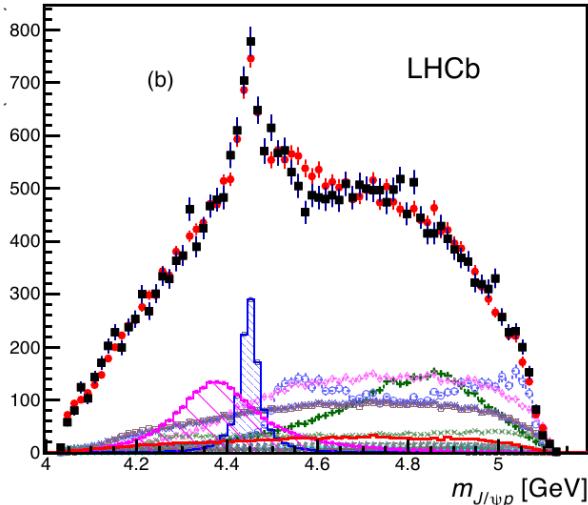
Dagegen sind Pentaquark-Zustände denkbar: z.B. $|qqqq\bar{q}\rangle$

312

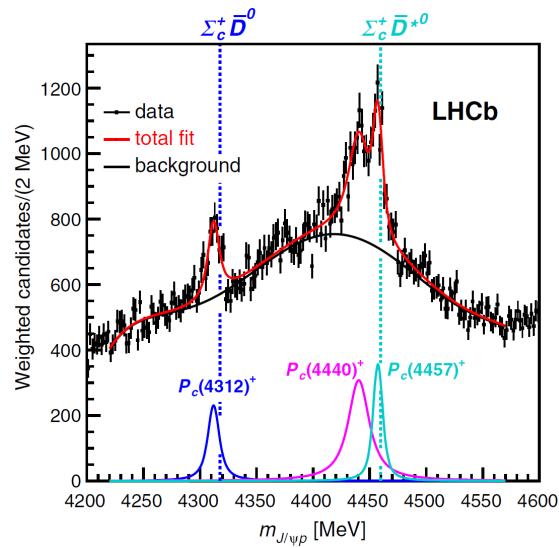
... Evidenz für Pentaquarks ...

$$\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-$$

2015/2016



2019



State	M [MeV]	Γ [MeV]
$P_c(4312)^+$	$4311.9 \pm 0.7^{+6.8}_{-0.6}$	$9.8 \pm 2.7^{+3.7}_{-4.5}$
$P_c(4440)^+$	$4440.3 \pm 1.3^{+4.1}_{-4.7}$	$20.6 \pm 4.9^{+8.7}_{-10.1}$
$P_c(4457)^+$	$4457.3 \pm 0.6^{+4.1}_{-1.7}$	$6.4 \pm 2.0^{+5.7}_{-1.9}$

⇒ minimaler Quarkinhalt: $duucc\bar{c}$

313

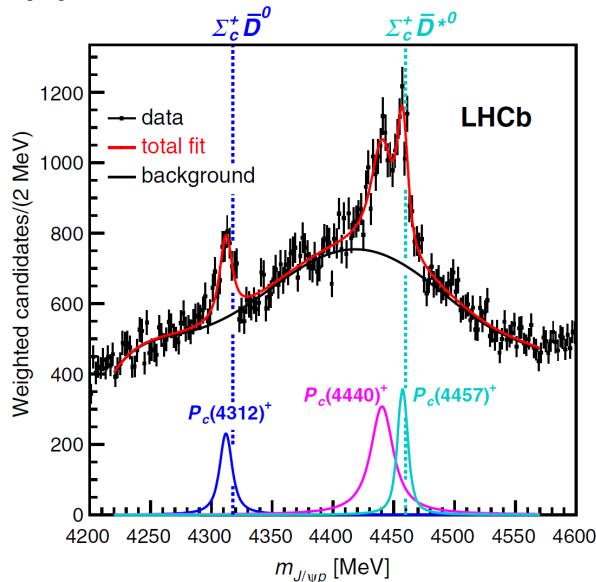
LHCb-Ergebnisse

[PRL 122, 222001 (2019)]

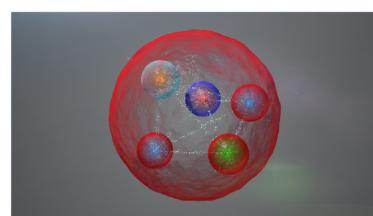
... Evidenz für Pentaquarks ...

$$\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-$$

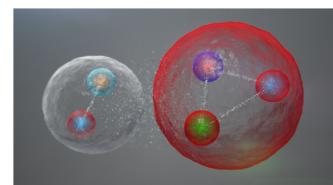
2019



Interpretation = ?



Pentaquark = kompaktes Objekt ?



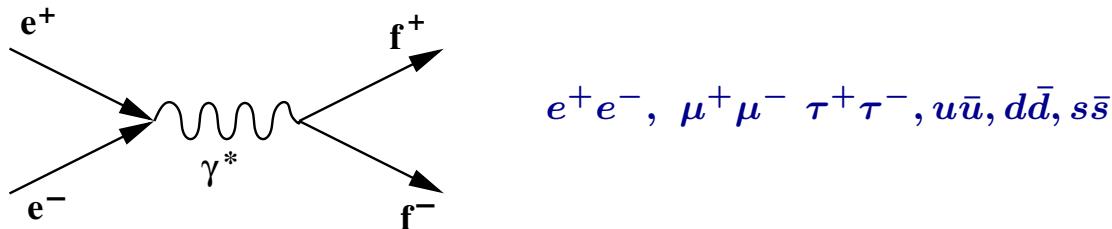
Pentaquark = Molekül ?

⇒ minimaler Quarkinhalt: $duucc\bar{c}$

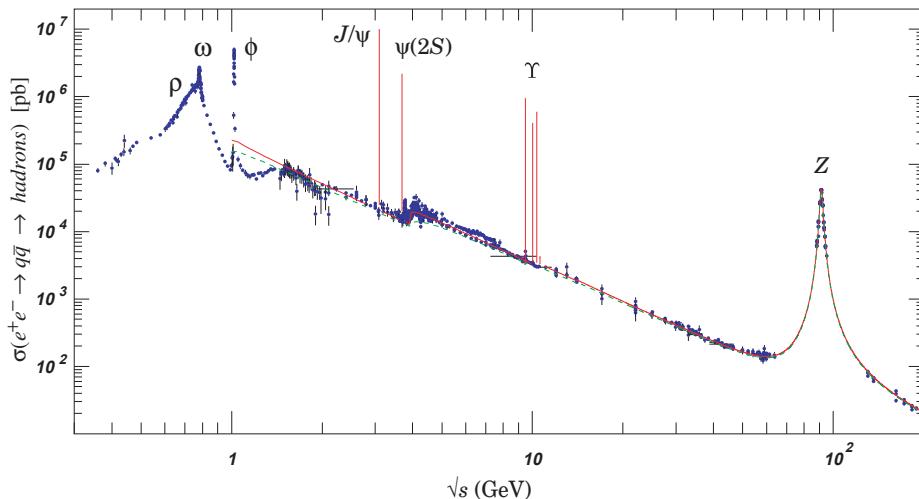
314

Anzahl der Farben \Rightarrow Experimentelle Bestimmung

Hochenergetische Elektron-Positron Reaktionen:



σ and R in e^+e^- Collisions



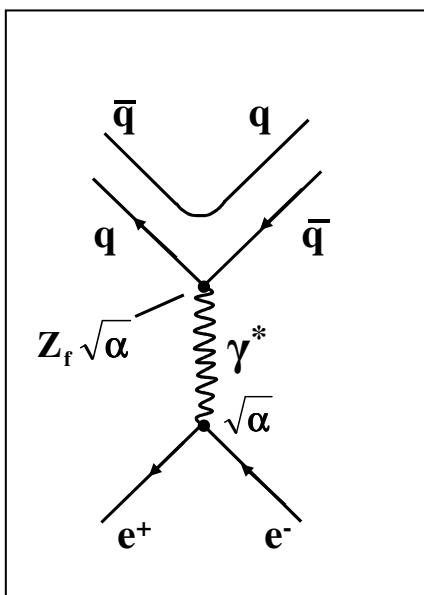
Beobachtung:

- bei niedrigen Energien: Dominanz von ρ, ω, ϕ
- zwei schmale $c\bar{c}$ und drei schmale $b\bar{b}$ -Zustände ...dazu später mehr ...
- neuer Flavour \Rightarrow Anstieg des Wirkungsquerschnitts

315

Nichtresonante Erzeugung von Hadronen

- Im Bereich zwischen den Resonanzen keine Bildung gebundener kurzlebiger Quark – Antiquark – Zustände;
- aber Hadronisierung: Anlagerung weiterer $q\bar{q}$ - Paare an primär erzeugtes Quark und Antiquark:



Quarks tragen elektrische Ladung $Z_f \cdot e \sim Z_f \cdot \sqrt{\alpha}$

$$\sigma_{\text{hadr.}} \sim (Z_f \cdot \sqrt{\alpha} \cdot \sqrt{\alpha})^2 = Z_f^2 \cdot \alpha^2$$

Wegen Farbladung der Quarks (3 Farben)

erhöht sich σ um Faktor 3 gegenüber

$\mu^+\mu^-$ - Produktion:

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow q_f \bar{q}_f) = 3 \cdot Z_f^2 \sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)$$

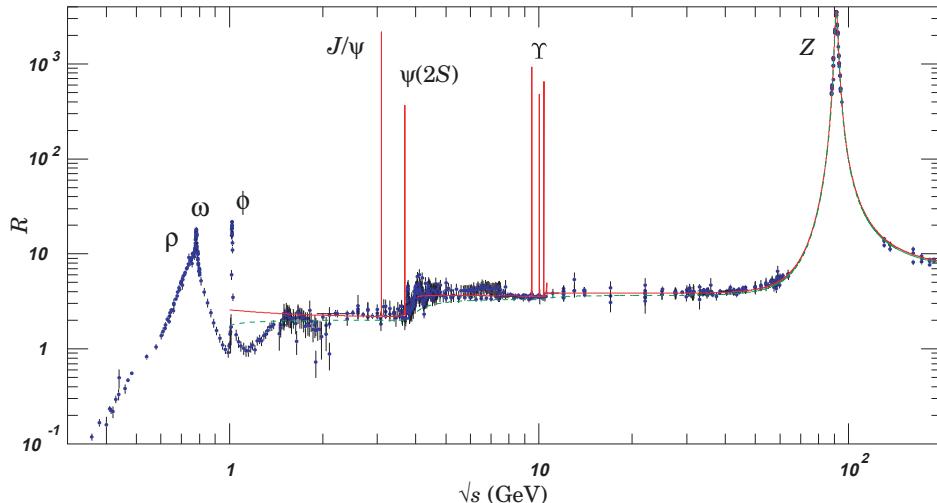
Es gibt verschiedene Farbzustände, in denen das $q\bar{q}$ - Paar erzeugt werden kann

316

Anzahl der Farben \Rightarrow Experimentelle Bestimmung

Hochenergetische Elektron-Positron Reaktionen:

$$R = \frac{\sigma_{tot}(e^+e^- \rightarrow q\bar{q})}{\sigma_{tot}(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = \sum_q Z_f^2 N_c$$



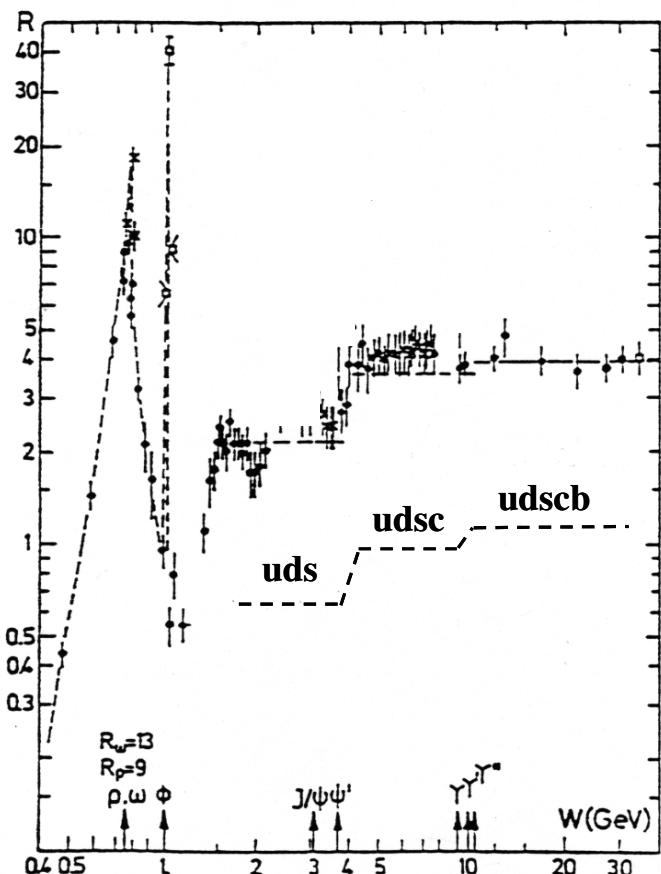
Beobachtung:
Neuer Flavour
 \Rightarrow Wirkungsquerschnitt
 wächst um $e_q^2 N_c$

u, d	$\Rightarrow (\frac{2}{3})^2 + (\frac{1}{3})^2$	$\Rightarrow \frac{5}{9} \cdot N_c$
u, d, s	$\Rightarrow (\frac{2}{3})^2 + (\frac{1}{3})^2 + (\frac{1}{3})^2$	$\Rightarrow \frac{2}{3} \cdot N_c$
u, d, s, c	$\Rightarrow (\frac{2}{3})^2 + (\frac{1}{3})^2 + (\frac{1}{3})^2 + (\frac{2}{3})^2$	$\Rightarrow \frac{10}{9} \cdot N_c$
u, d, s, c, b	$\Rightarrow (\frac{2}{3})^2 + (\frac{1}{3})^2 + (\frac{1}{3})^2 + (\frac{2}{3})^2 + (\frac{1}{3})^2$	$\Rightarrow \frac{11}{9} \cdot N_c$

\Rightarrow **Anzahl der Farben:**
 $N_c = 3 \Leftrightarrow$ QCD

(weitere exp. Möglichkeiten:
 τ -Lepton-Zerfall, Breite des π^0) 317

Anzahl der Farben - experimentelle Bestimmung -



$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{Hadronen})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = 3 \cdot \sum Z_f^2$$

\leftarrow mit Farbfaktor $N_c=3$

\leftarrow ohne Farbfaktor

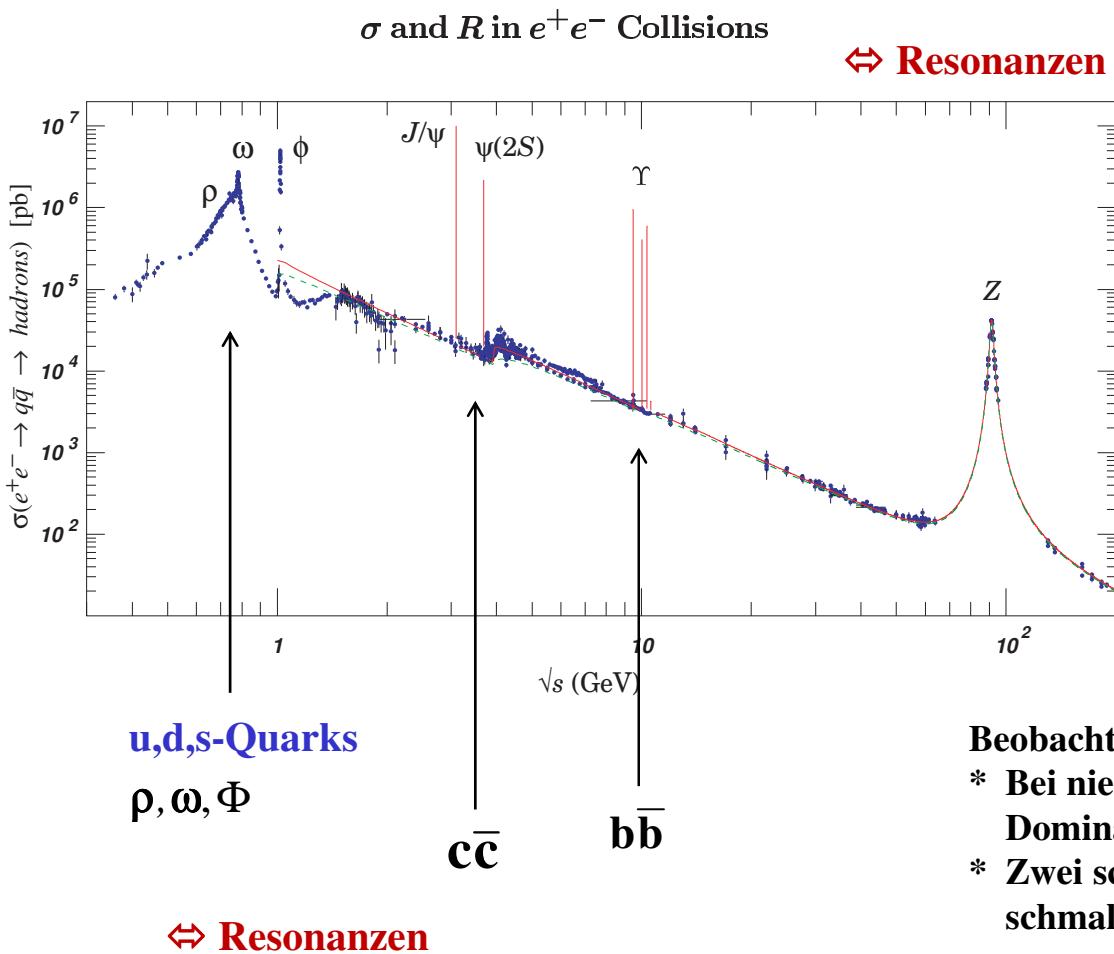
\rightarrow Zahl der Quark-Farben = 3
 \rightarrow Quarkladungen drittelzahlig

$$\frac{dN}{d\Omega} = \propto (1 + \cos^2 \theta)$$

Winkelverteilung der Jets

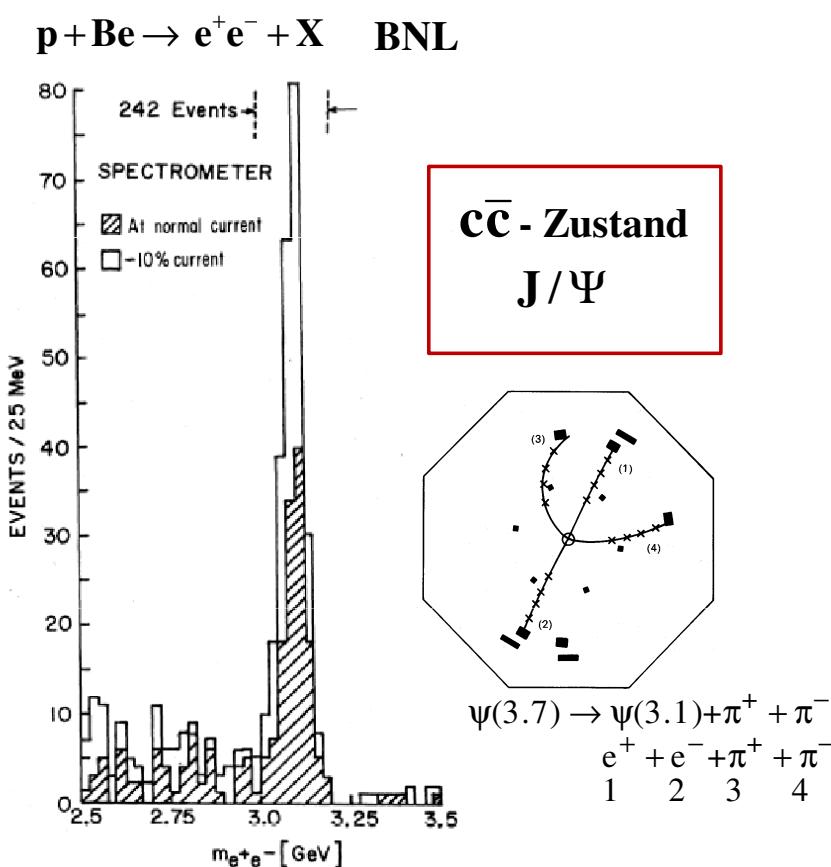
=> Spin 1/2 -Quarks

Hochenergetische Elektron-Positron-Annihilation:

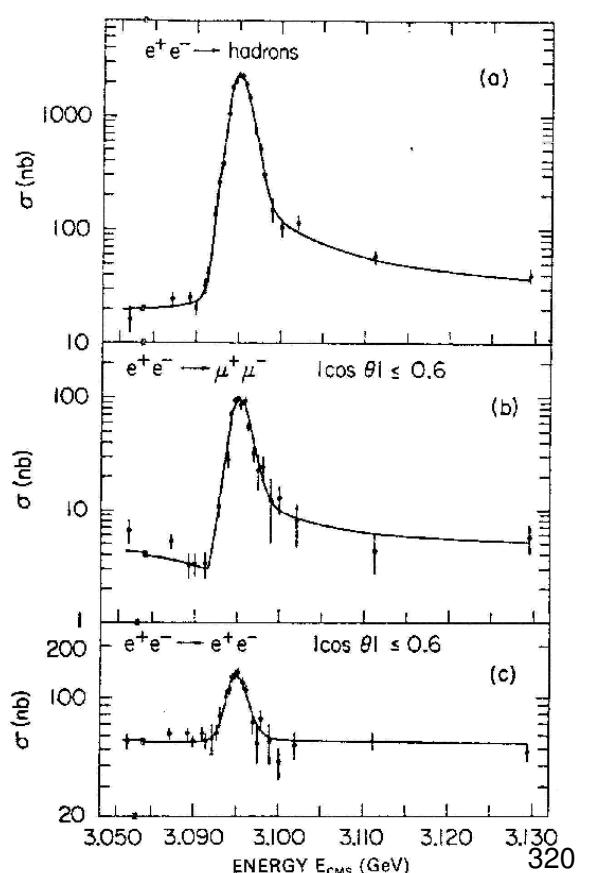


319

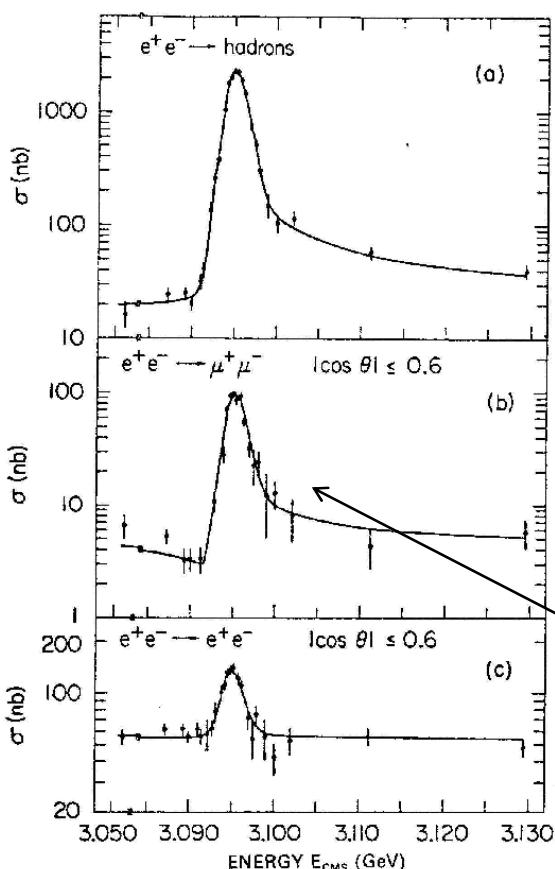
Schwere Quarks



e^+e^- – Annihilation : Spear-Speicherring (Stanford)



e^+e^- – Annihilation :
Spear-Speicherring (Standford)



$c\bar{c}$ - Zustand
 J/Ψ

November-Revolution der Teilchenphysik
1974

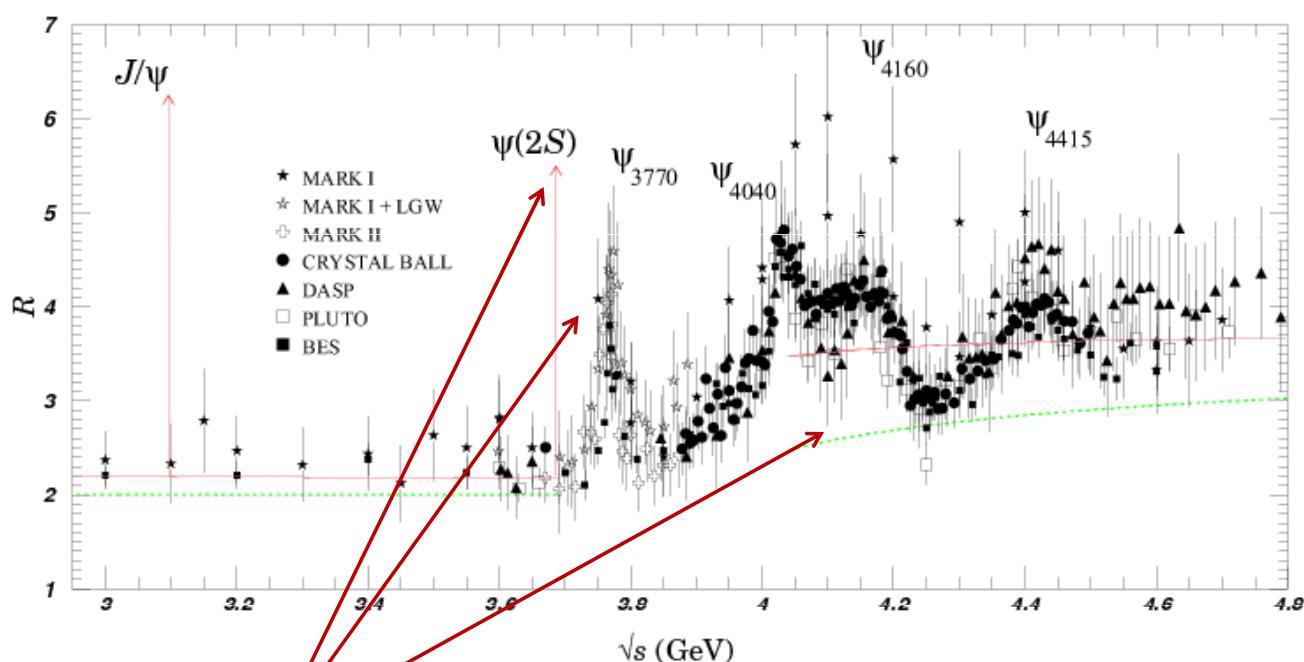
⇒ Beobachtung von $c\bar{c}$ - Bindungs-
zuständen ⇔ Resonanzen

Beobachtete Breite hier dominant
durch die Auflösung bestimmt
Breite (Γ) < 1,3 MeV

Große Masse, aber kleine Breite
↔ Warum ?

321

Schwere Quarks - weitere Resonanzen



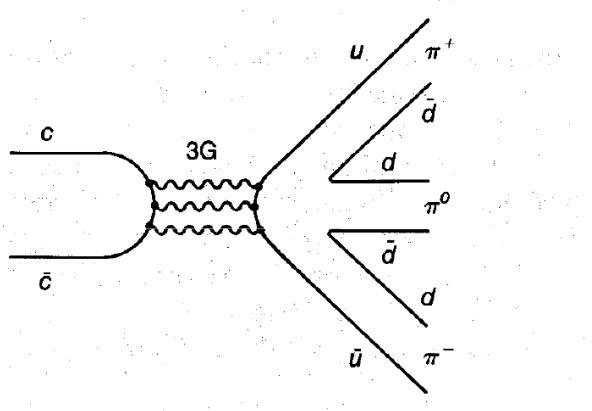
$c\bar{c}$ - Zustände

Breite ab des dritten Zustandes
größer

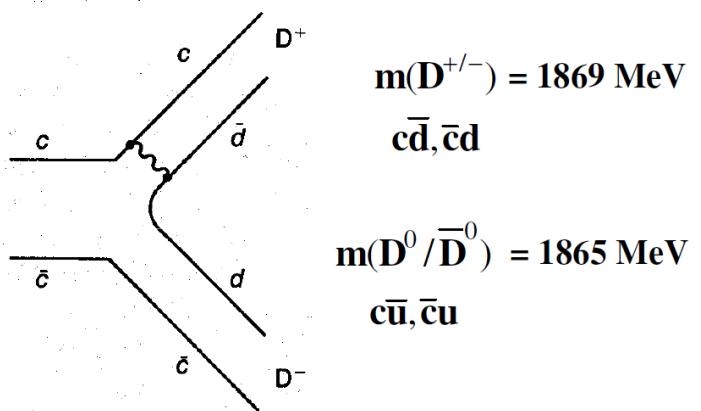
↔ Warum ?

322

Breiten der Charmonium-Zustände



$J/\psi(1S)$
 $m = 3096, 9 \text{ MeV}$
 $\Gamma = 0, 093 \text{ MeV}$
 $\psi(2S) \rightarrow J/\psi(1S)X$ möglich



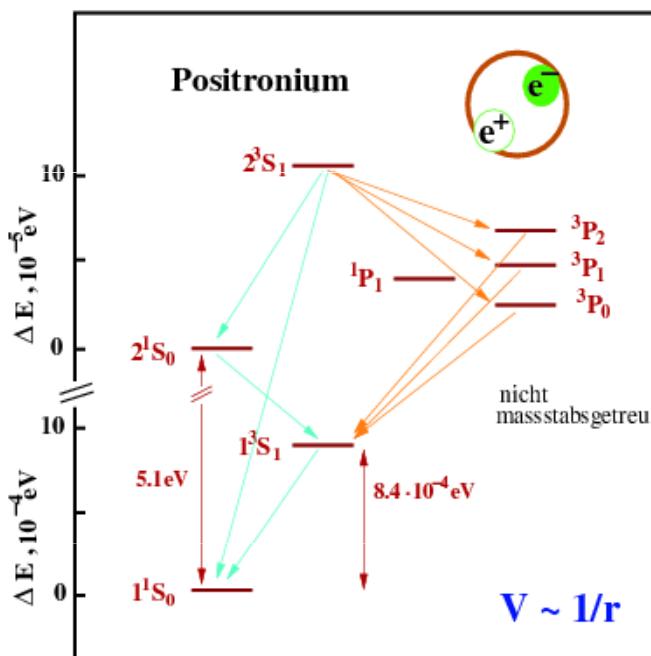
$\psi(3770)$
 $m = 3773, 1 \text{ MeV}$
 $\Gamma = 27, 2 \text{ MeV}$

- Zerfälle mit unterbrochenen Quarklinien sind unterdrückt
 - $J/\psi(1S)$, $\psi(2S)$ können nicht in D-Mesonen zerfallen
 ↪ zu kleine Masse
 - $\psi(3770)$ kann in D-Mesonen zerfallen, Phasenraum klein,
 trotzdem viel größere Breite als $J/\psi(1S)$, $\psi(2S)$
- = OZI-Regel (Okubo, Zweig, Iizuka)

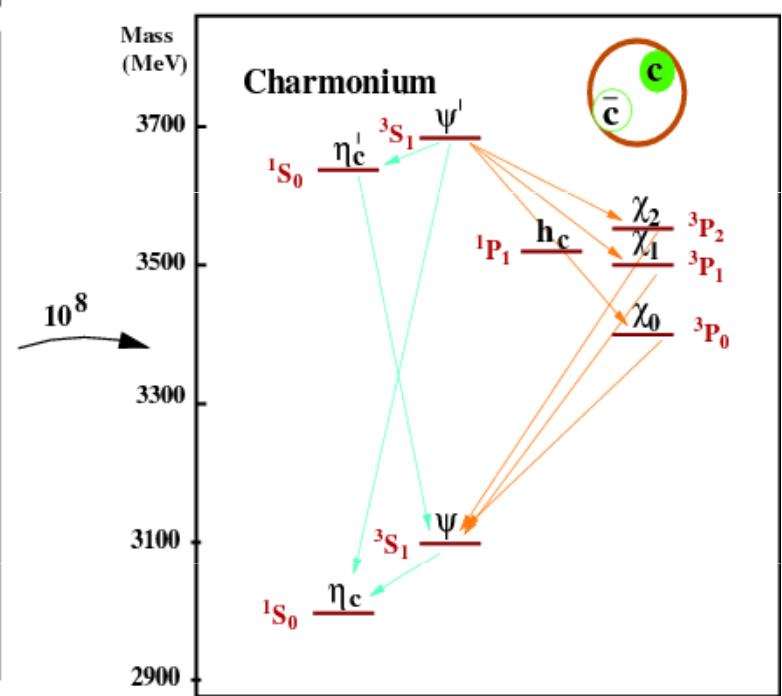
323

Positronium \Leftrightarrow Charmonium

Elektromagnetische Wechselwirkung



Starke Wechselwirkung



\Rightarrow Rückschlüsse auf das Bindungspotential möglich : $V_{\text{stark}} = -\frac{4 \alpha_s}{3 r} + k \cdot r$

324

q	\bar{q}	$^{2S+1}L_J$
		$+ L = 0 \Rightarrow ^1S_0$
		$+ L = 0 \Rightarrow ^3S_1$
		$+ L = 1 \Rightarrow ^1P_1$
		$+ L = 1 \Rightarrow ^3P_0, ^3P_1, ^3P_2$

 $I^G(J^{PC})$ for $q\bar{q}$ -states:

$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$$

Parität

$$P = (-1)^{L+1}$$

C-Parität

$$C = (-1)^{L+S}$$

(G-Parität

$$G = (-1)^{L+S+I}$$

 \Leftrightarrow Interne Quantenzahlen in einem nicht-relativistischen Quarkmodell $\downarrow ??$ \Rightarrow Experimentell gemessenen Quantenzahlen: $I^G(J^{PC})$

325

Wiederholung:

- Parität -

Parität = Symmetriecharakter der Wellenfunktion unter Raumspiegelungen

(keine Analogon in der klassischen Mechanik), "diskrete Symmetrie"

$$P : \psi(\vec{r}) \rightarrow \psi(-\vec{r}) \quad \text{Raumspiegelung}$$

$$P^2(\psi(\vec{r})) = \psi(\vec{r}) \Leftrightarrow P\psi(\vec{r}) = \eta_p \psi(\vec{r}) = \pm \psi(\vec{r})$$

Eigenwert: ± 1

Schreiben der Wellenfunktion als:

$$\psi(\vec{r}) = R(r) \cdot Y_{lm}(\theta, \phi) \quad (\text{Radial- und winkelabhängiger Anteil} \\ (\text{Kugelflächenfunktionen}))$$

Anwenden von P : $\Rightarrow R(r)$ verändert sich nicht,

$$Y_{lm}(\theta, \phi) \rightarrow Y_{lm}(\pi - \theta, \phi + \pi) = (-1)^l \cdot Y_{lm}(\theta, \phi)$$

Für ein $(q\bar{q})$ -System:

$$P(q\bar{q}) = P_1 \cdot P_2 \cdot (-1)^l = (-1)^{l+1}$$

entgegengesetzte Eigenparitäten von Teilchen (+1) und Anti-Teilchen (-1)

326

⇒ Nur neutrale Teilchen können Eigenzustände des C-Operators sein:

$$C | \pi^\circ \rangle = \eta_C | \pi^\circ \rangle \quad \eta_C = \pm 1$$

Mesonen aus $q\bar{q}$ aufgebaut: $\Psi(\vec{r}, \vec{s}) = R(r)Y_{lm}(\theta, \phi)\chi(\vec{s})$

Spin der Wellenfunktion

C: $u \leftrightarrow \bar{u} \Rightarrow \vec{r} \rightarrow -\vec{r} \Rightarrow (-1)^{L+1}$

– Austausch des Spins

⇒ Wellenfunktion: (-1) for S = 0, (+1) for S = 1

$$\Rightarrow (-1)^{S+1}$$

... Tafel (Veranschaulichung) ...

$$\Rightarrow C(q\bar{q}) = (-1)^{L+S}$$

↔ Geladene Teilchen können nicht Eigenzustände des C-Operators sein:

$$C | \pi^+ \rangle = \eta | \pi^- \rangle$$

327

G-Parität

⇒ Geladene Teilchen können keine Eigenzustände des C-Operators sein:

$$C | \pi^+ \rangle = \eta | \pi^- \rangle$$

⇒ Nach der Ladungskonjugation C zusätzlich eine Rotation im Isospin-Raum:

$$R = e^{i\pi I_2} : |I, I_z\rangle \rightarrow |I, -I_z\rangle$$

Geladene Zustände können Eigenzustände von $G = C \cdot R$ sein

Für ein $q\bar{q}$ -System: $G = C \cdot (-1)^I$

- $q\bar{q}$ -Zustände - Quantenzahlen:

Parität: $P = (-1)^{L+1}$

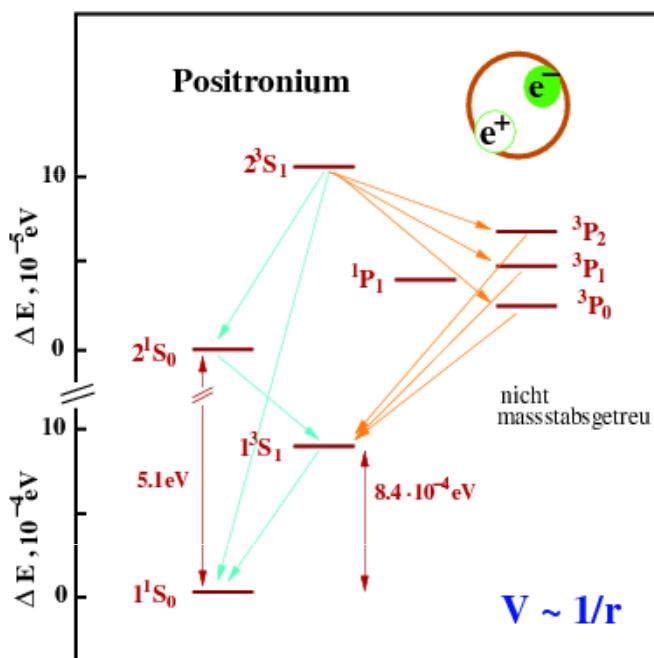
C-Parität: $C = (-1)^{L+S}$

G-Parität: $G = (-1)^{L+S+I}$

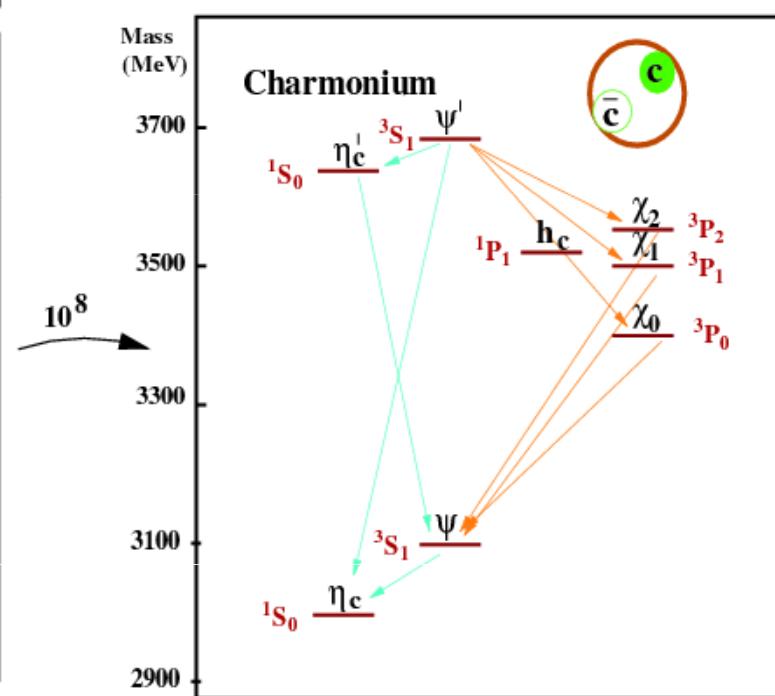
328

Positronium \leftrightarrow Charmonium

Elektromagnetische Wechselwirkung



Starke Wechselwirkung



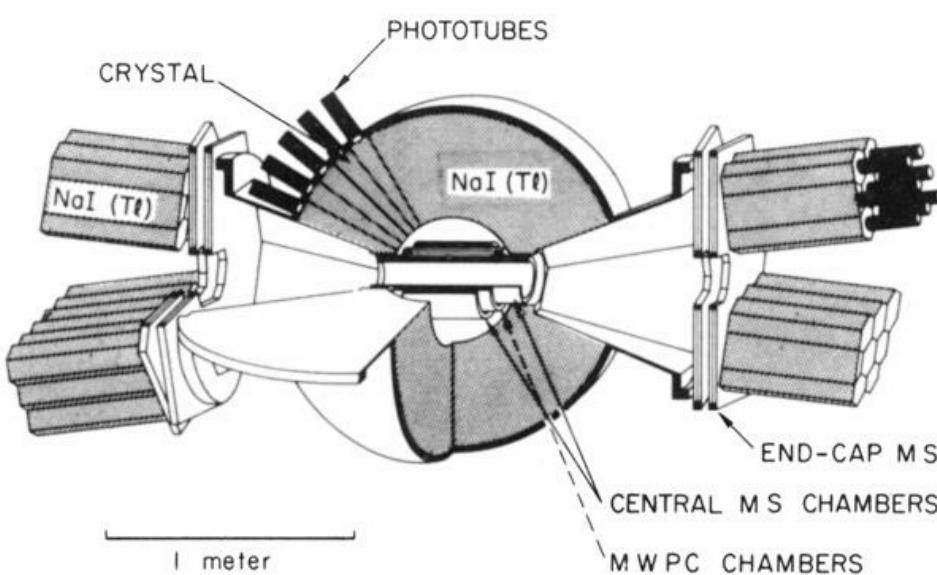
⇒ Rückschlüsse auf das Bindungspotential möglich : $V_{\text{stark}} = -\frac{4 \alpha_s}{3 r} + k \cdot r$

329

Messung radiativer Übergänge - Crystal Ball Exp. (SPEAR, Standford)

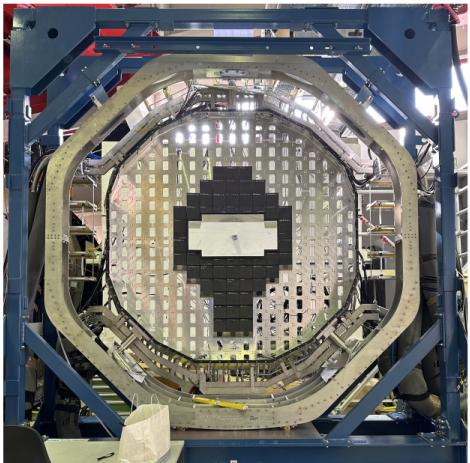
$$e^+ e^- \rightarrow \psi(2S) \rightarrow \gamma X$$

THE CRYSTAL BALL EXPERIMENT

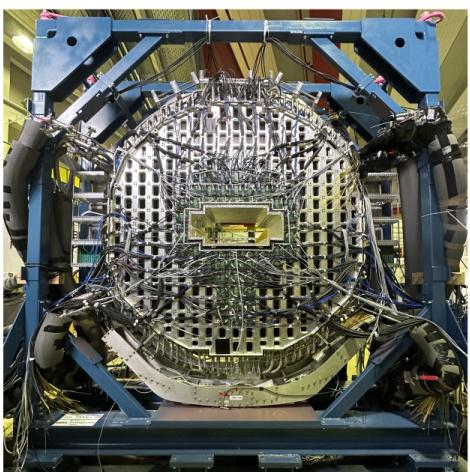
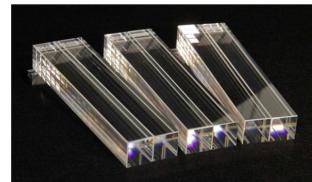
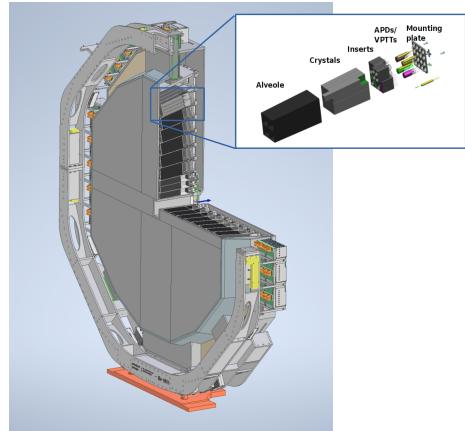


330

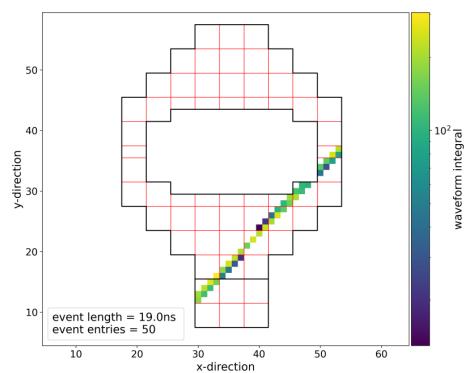
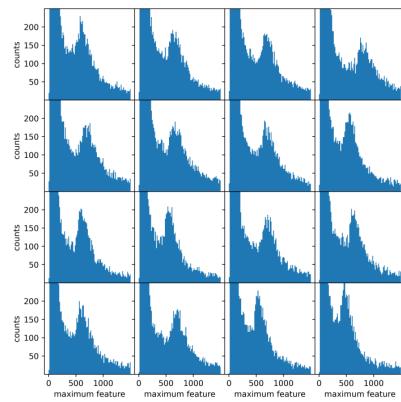
Bsp. für ein elektromagnetisches Kalorimeter - PANDA-Vorwärtsendkappe



aktuell im Aufbau:
20% der Module
installiert

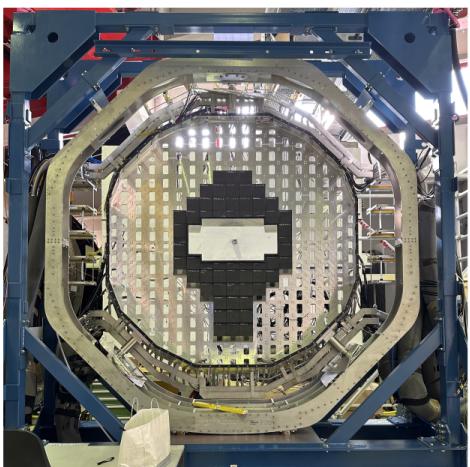


Cosmics (Muonen)

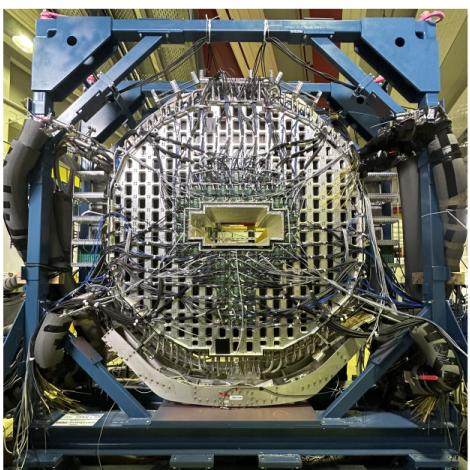
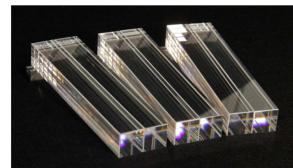
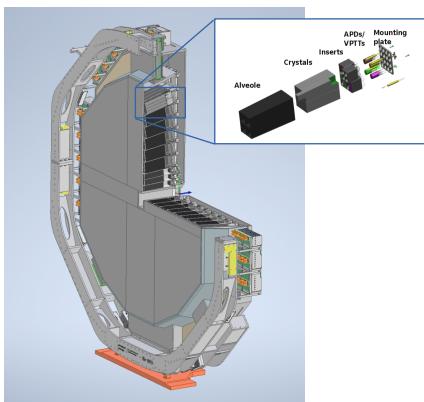


331

Bsp. für ein elektromagnetisches Kalorimeter - PANDA-Vorwärtsendkappe



aktuell im Aufbau:
20% der Module
installiert



Muon



Elektromagnetische Shower: γ , 2γ

