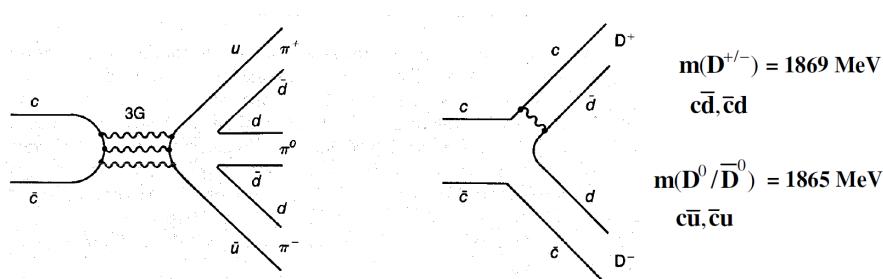


- Experimenteller Nachweis der Farbe

$$R = \frac{\sigma_{tot}(e^+e^- \rightarrow q\bar{q})}{\sigma_{tot}(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = \sum_q e_q^2 N_c \quad \Rightarrow \textcolor{blue}{N_c = 3}$$

- $e^+e^- \rightarrow$ Hadronen:

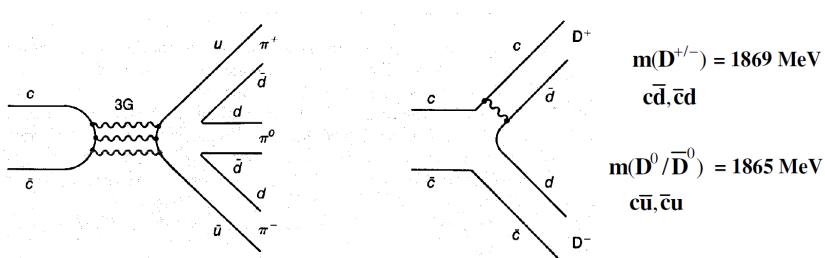
Beobachtung sehr schmaler Zustände großer Masse $\Leftrightarrow \bar{c}c$ -Bindungszustände
Unterhalb der open-charm-Schwelle
OZI-Regel \Leftrightarrow Zerfälle mit unterbrochenen Quarklinien sind unterdrückt



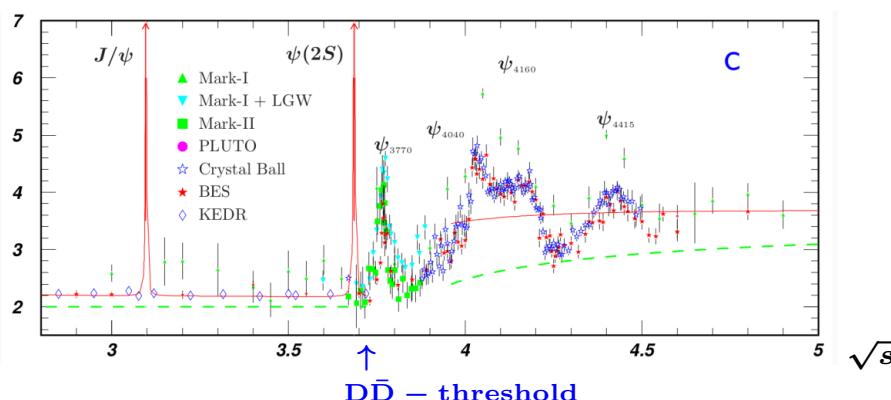
$J/\psi(1S)$	$\psi(2S)$	$\psi(3770)$
$m = 3096, 9$ MeV	$m = 3686, 1$ MeV	$m = 3773, 1$ MeV
$\Gamma = 0, 093$ MeV	$\Gamma = 0, 294$ MeV	$\Gamma = 27, 2$ MeV
	$\psi(2S) \rightarrow J/\psi(1S)X$ möglich	

324

Zusammenfassung: $\bar{c}c$ -Bindungszustände (VL1, KW51)



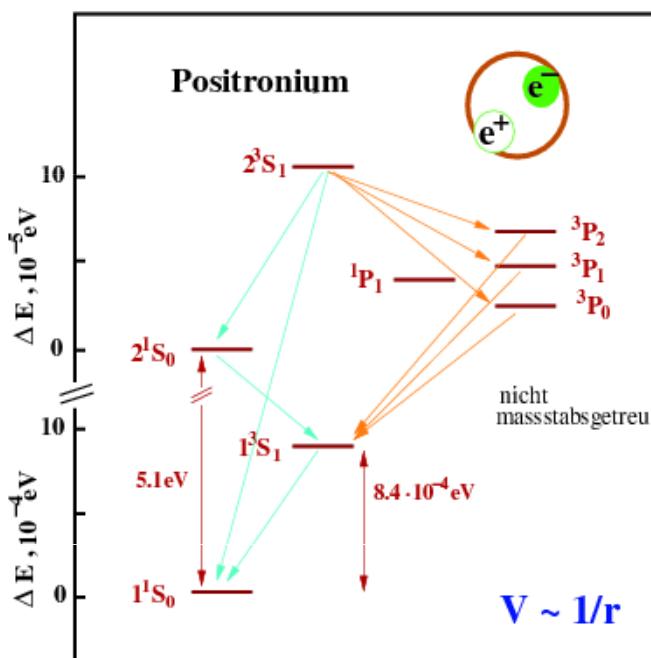
- Zerfälle mit unterbrochenen Quarklinien sind unterdrückt = OZI-Regel (Okubo, Zweig, Iizuka)
- $J/\psi(1S)$, $\psi(2S)$ können nicht in D-Mesonen zerfallen \Leftrightarrow zu kleine Masse
- $\psi(3770)$ kann in D-Mesonen zerfallen, Phasenraum klein, trotzdem viel größere Breite als $J/\psi(1S)$, $\psi(2S)$



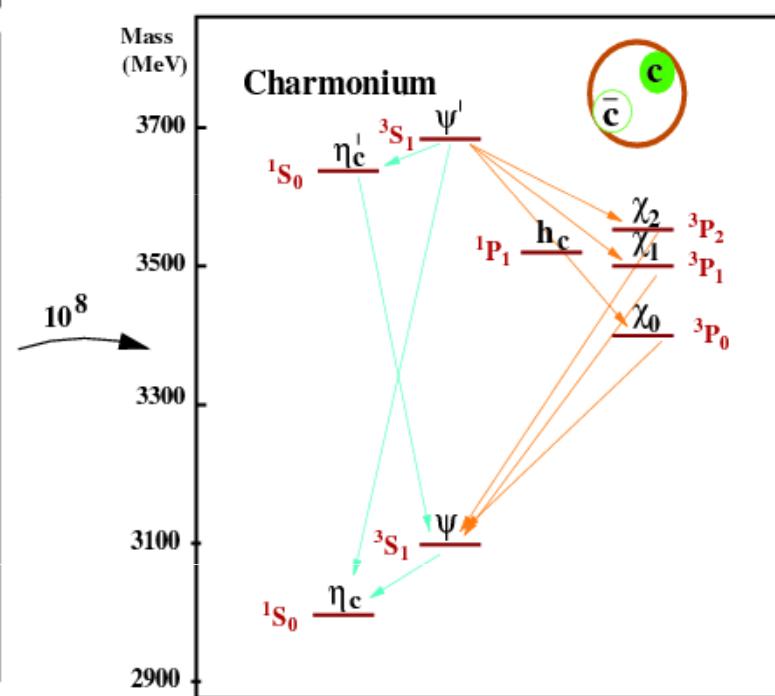
325

Positronium \Leftrightarrow Charmonium

Elektromagnetische Wechselwirkung



Starke Wechselwirkung



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

326

Einschub:

Spektroskopische Notation

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: $I^G(J^{PC})$

327

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:

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

(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)

328

Ladungskonjugation C : Teilchen \rightarrow Antiteilchen - Transformation **\Rightarrow 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) ...

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

 \leftrightarrow Geladene Teilchen können nicht Eigenzustände des C-Operators sein:

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

329

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:

$$\text{Parität: } P = (-1)^{L+1}$$

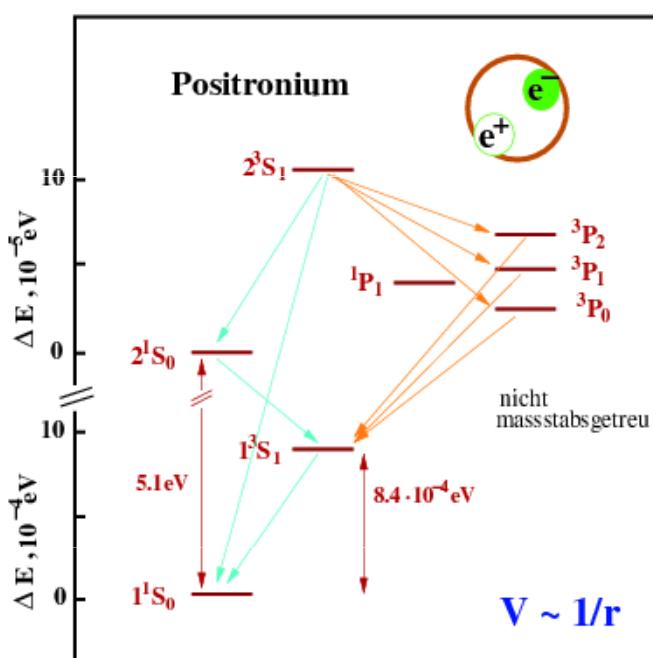
$$\text{C-Parität: } C = (-1)^{L+S}$$

$$\text{G-Parität: } G = (-1)^{L+S+I}$$

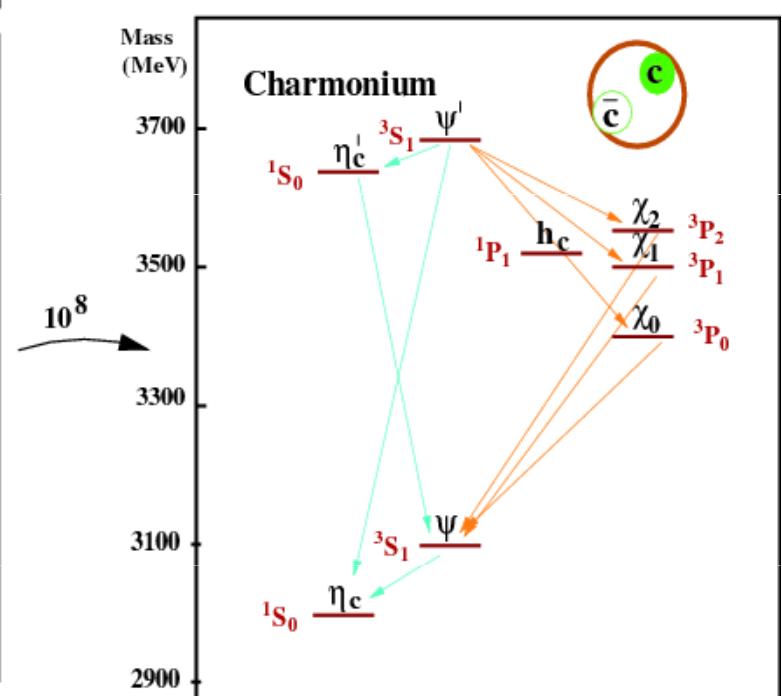
330

Positronium \leftrightarrow Charmonium

Elektromagnetische Wechselwirkung



Starke Wechselwirkung



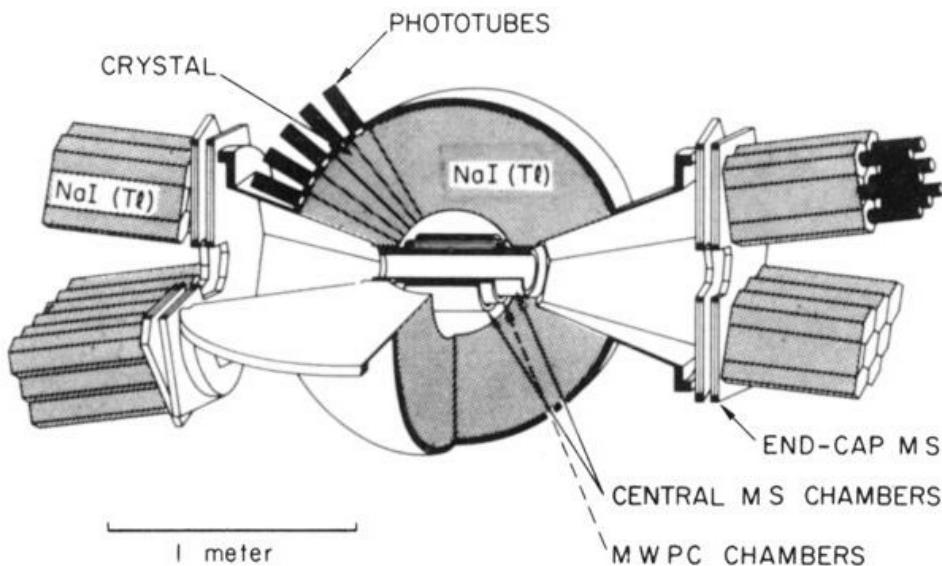
⇒ Rückschlüsse auf das Bindungspotential möglich : $V_{\text{stark}} = -\frac{4 \alpha_s}{3 r} + k \cdot r$

331

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

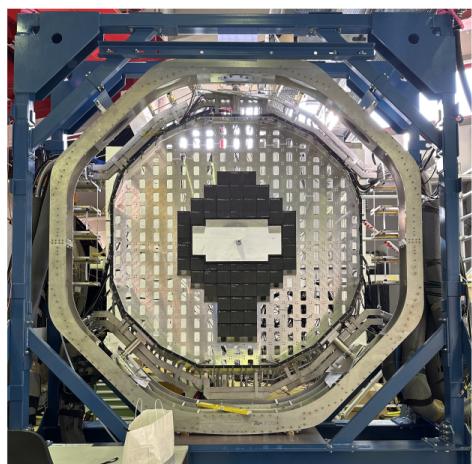
$$e^+ e^- \rightarrow \psi(2S) \rightarrow \gamma X$$

THE CRYSTAL BALL EXPERIMENT

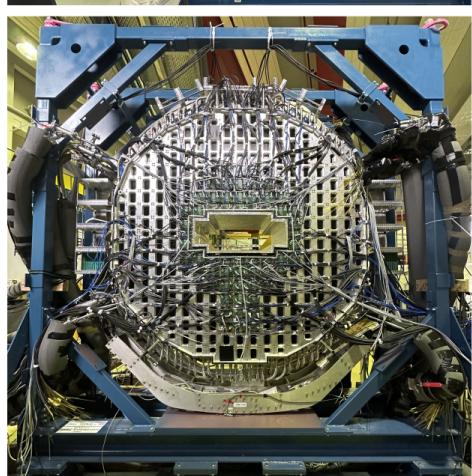
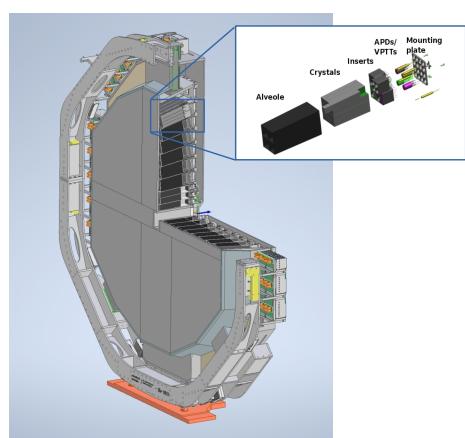
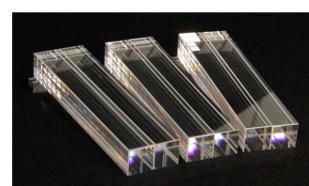


332

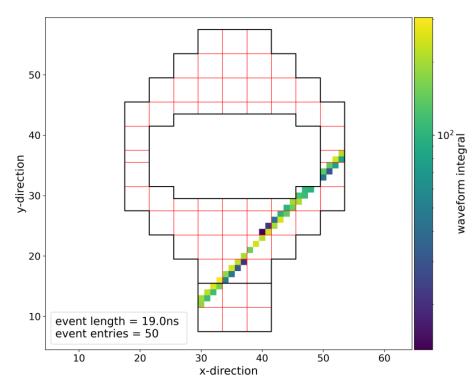
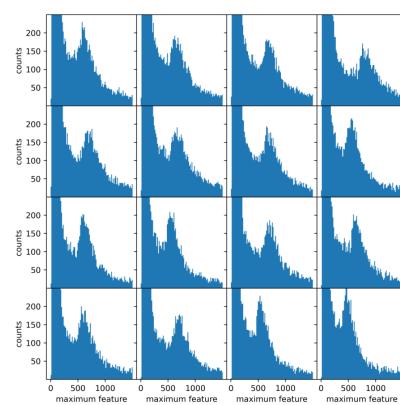
Bsp. für ein elektromagnetisches Kalorimeter - PANDA-Vorwärtsendkappe



aktuell im Aufbau:
20% der Module
installiert

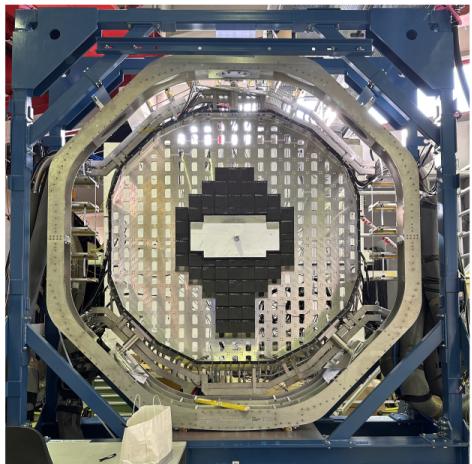


Cosmics (Muonen)

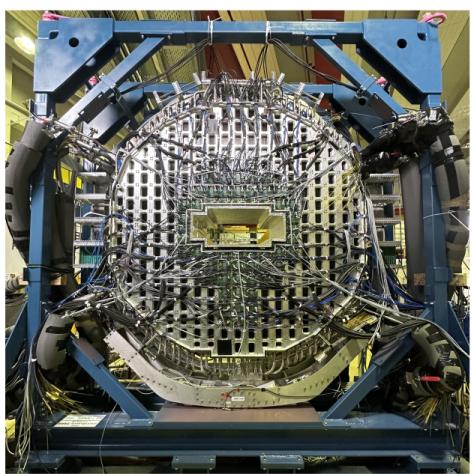
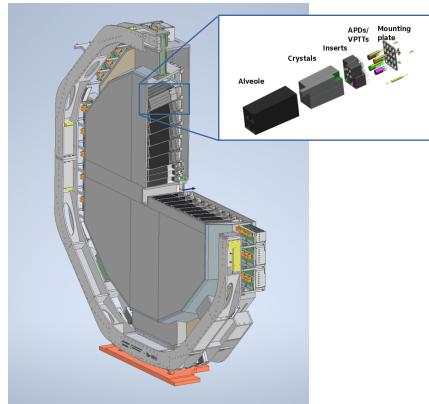


333

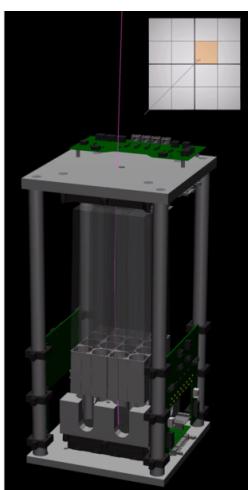
Bsp. für ein elektromagnetisches Kalorimeter - PANDA-Vorwärtsendkappe



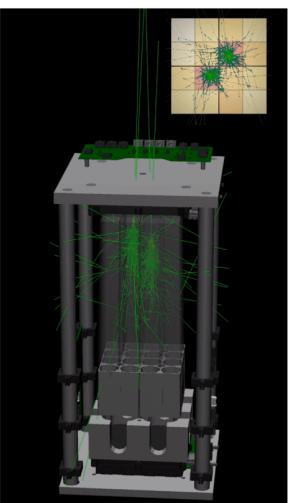
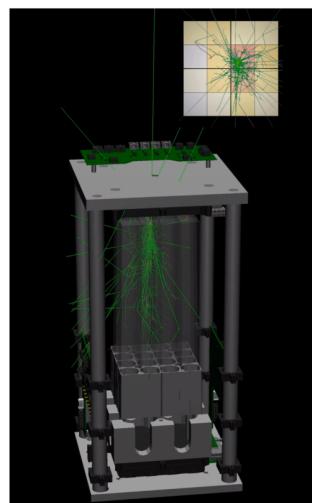
aktuell im Aufbau:
20% der Module
installiert



Muon



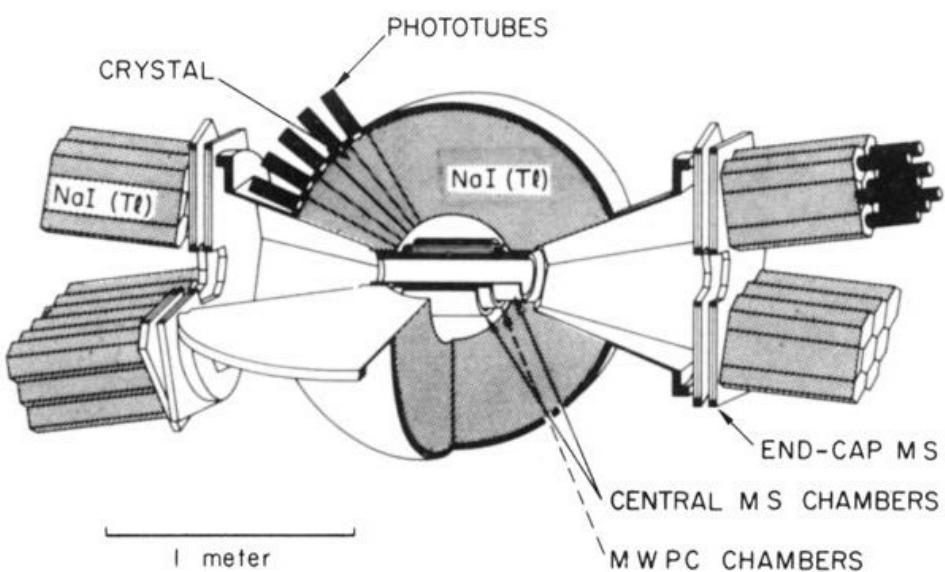
Elektromagnetische Shower: γ , 2γ



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

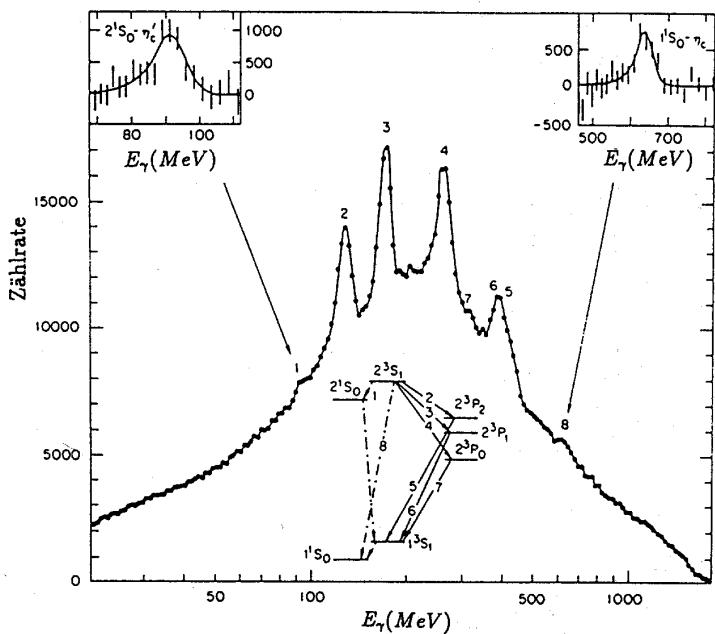
$$e^+ e^- \rightarrow \psi(2S) \rightarrow \gamma X$$

THE CRYSTAL BALL EXPERIMENT



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

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



Breite der Linien: exp. Auflösung
 ↔ Messen der Photonen

$\eta'_c (= \eta_c(2S))$ wurde nie bestätigt
 CBall: 3592 ± 5 MeV
 (~ 50 MeV tiefer als von
 Potentialmodellen erwartet)

Aktuell (PDG'2024):
 $M = 3637,7 \pm 0,9$ MeV

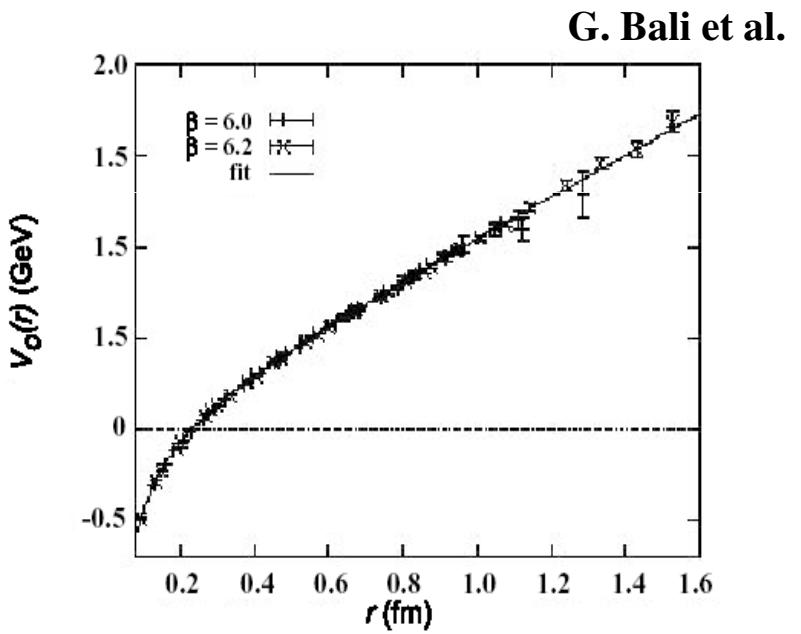
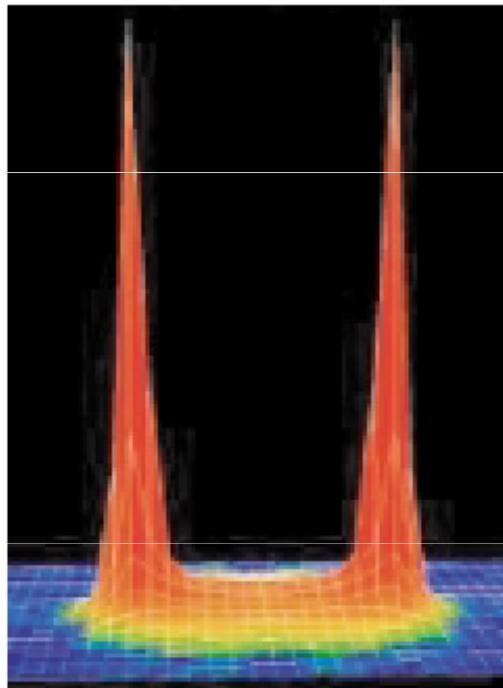
Potentialmodelle beschreiben das beobachtete Spektrum gut.

$$V(r) = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s}{r} + k \cdot r \quad \Leftrightarrow \text{Confinement!}$$

($m_c \approx 1,5$ GeV, $\alpha_s \approx 0,15 - 0,3$, $k \approx 1$ GeV/fm)

336

Fluss-Schlauch (Flux tube), lineares Potential --Gitter QCD

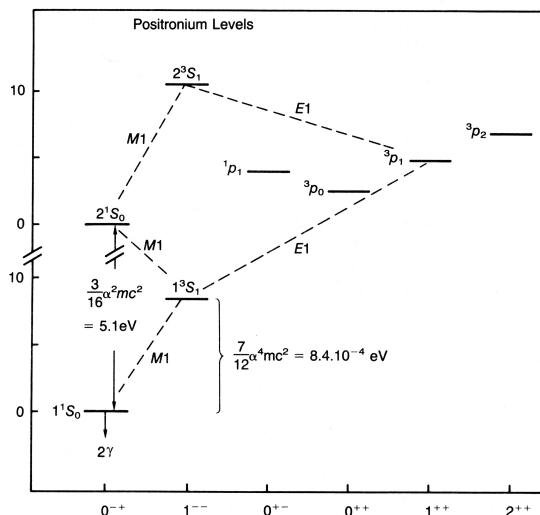


Fortschritte in Gitter QCD entscheidend für quantitatives Verständnis
 des Confinements

337

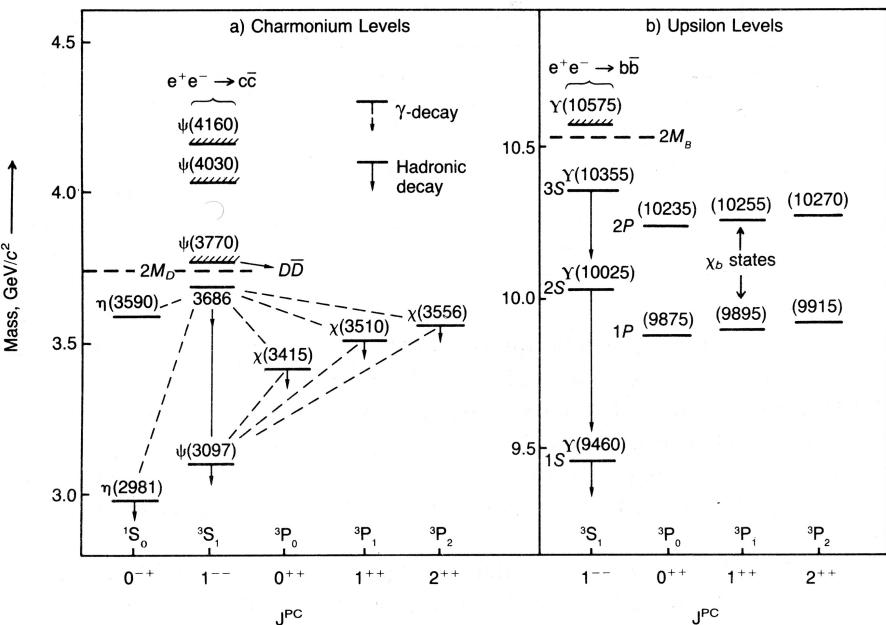
Positronium, Charmonium und Bottomonium Spektrum

Positronium (e^+e^-)



Charmonium ($c\bar{c}$)

Bottomonium ($b\bar{b}$)



⇒ Sehr ähnliche Struktur der Spektren!

$J^{PC} = 1^{+-}$ – Zustände (nicht eingezeichnet)

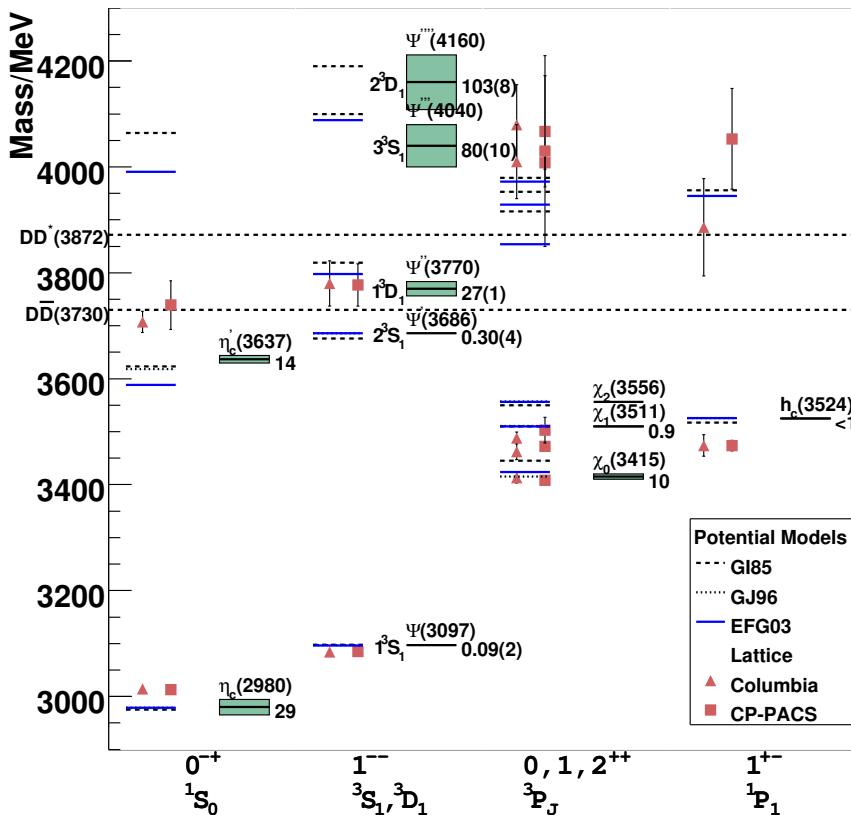
wurden ebenfalls beobachtet

(nicht in der Form von radiativen Übergängen

$$1^{--} \not\rightarrow 1^{+-} \gamma)$$

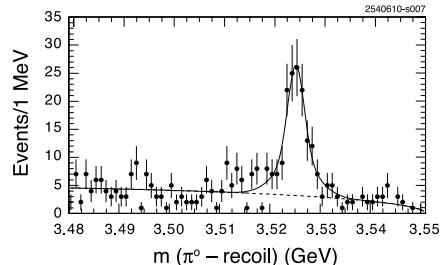
338

Charmonium Spektrum - Ist tatsächlich alles so gut verstanden?



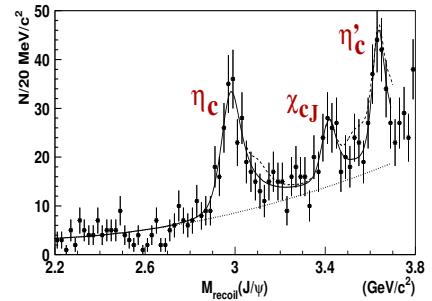
Experimentelle Ergebnisse:

CLEO: $\Psi' \rightarrow \pi^0 h_c$; $h_c \rightarrow \gamma \eta_c$

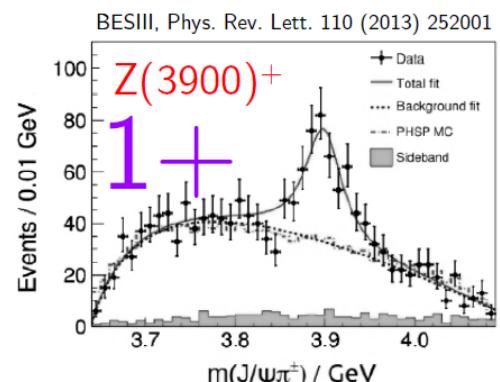
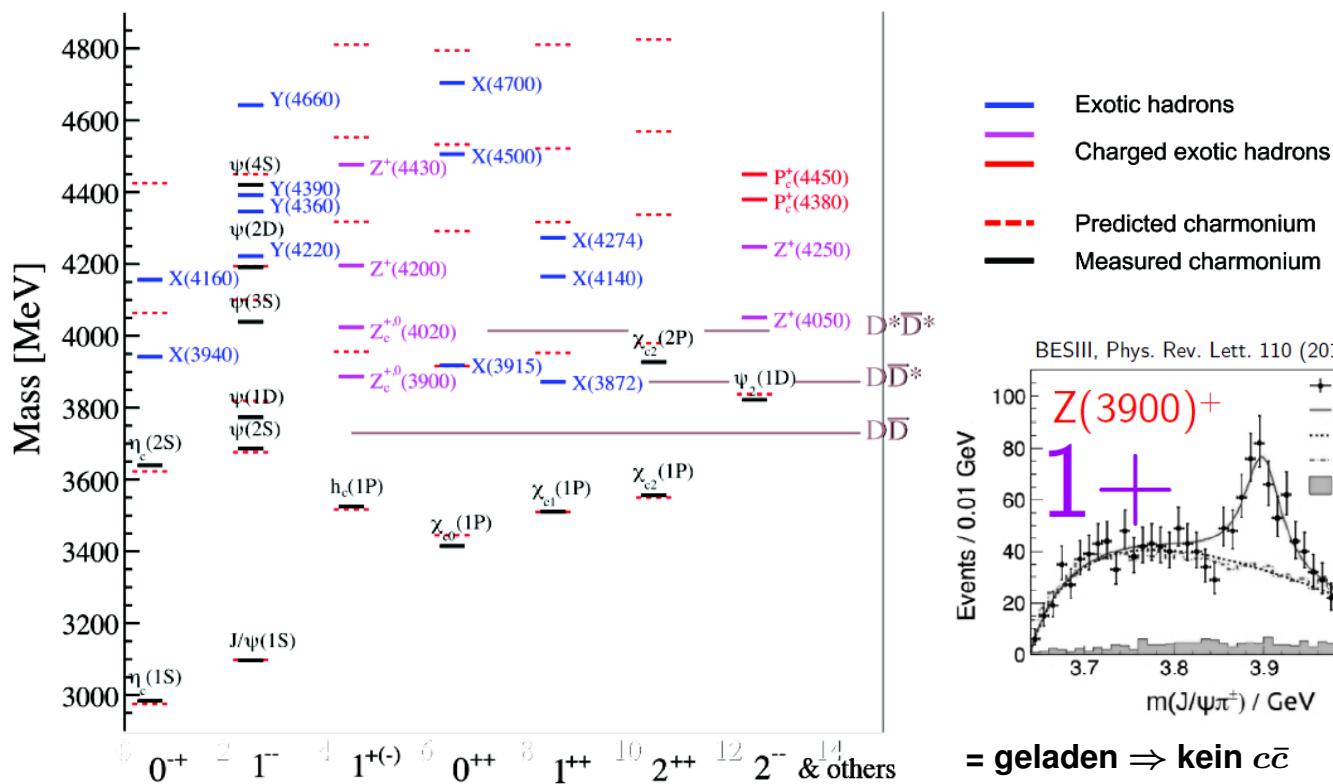


BELLE: Flavor Tagging:

$$e^+ e^- \rightarrow J/\Psi \textcolor{red}{X}$$



Potentialmodelle: Beschreiben das Spektrum im Bereich kleiner Energien gut ...
aber: Probleme oberhalb der Open-Charm-Mesonen-Schwellen ...



= geladen ⇒ kein c̄c

Viele Zustände passen nicht zu den Vorhersagen
Was ist deren Natur???

↔ VL Hadronenphysik

340

FROHE WEIHNACHTEN !!!!

und einen guten Start ins neue Jahr !