

# XYZ ed esotici a BESIII

Riccardo Farinelli  
in rappresentanza  
dell'esperimento BESIII



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI FERRARA  
- EX LABORE FRUCTUS -



# Indice

---

- Spettroscopia del charmonio
- Esperimento BESIII
- Aggiornamento sugli stati esotici vettoriali
- La conservazione dell'isospin in  $Z_c(3900)$



Cosa sono gli XYZ  
e  
perché sono così interessanti

# Spettroscopia esotica

- Spettroscopia esotica

- BESIII

- Stati Z  
 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-(\pi^0 J/\psi)$

Sommario stati Z

- Stati Y  
 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$

$e^+e^- \rightarrow K^+K^- J/\psi$

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

**nature** International weekly journal of science  
 Home | News & Comment | Research | Careers & Jobs | Current Issue | Archive | Audio & Video | For Authors  
 Archive | Volume 498 | Issue 7454 | News | Article

NATURE | NEWS  
 عربي

**Quark quartet opens fresh vista on matter**  
 First particle containing four quarks is confirmed.  
 Devin Powell  
 18 June 2013

PDF | Rights & Permissions

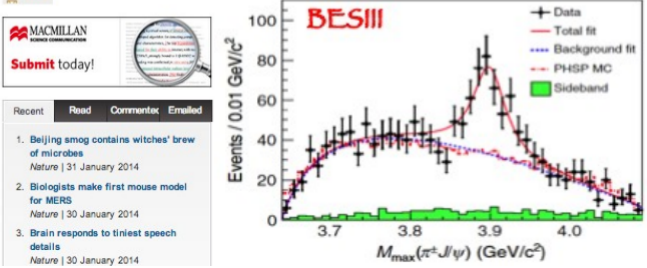
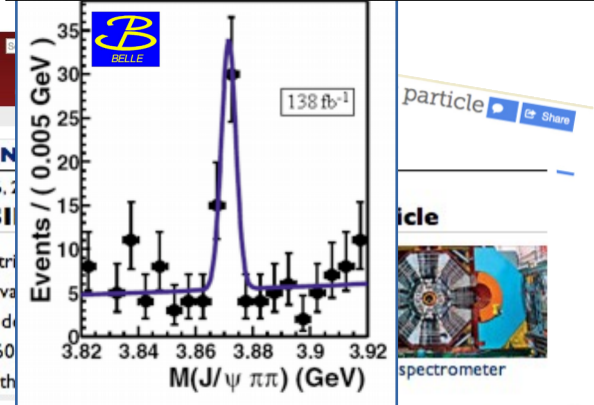
The BESIII detector in China is one of two experiments to detect four-quark particles. JHEP

MACMILLAN  
 Submit today!

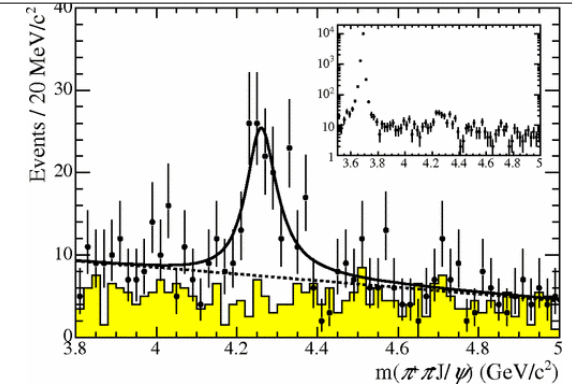
Recent | Read | Comment | Email

1. Beijing smog contains witches' brew of microbes  
 Nature | 31 January 2014
2. Biologists make first mouse model for MERS  
 Nature | 30 January 2014
3. Brain responds to tiniest speech details  
 Nature | 30 January 2014

Belle: PRL **91**, 262001 (2003)



BaBar: PRL **95**, 142001 (2005)



- BaBar nel 2005 scopre  $Y(4260)$
- BESIII osserva la  $Z(3900)$  in  $m(\pi^\pm J/\psi)$  nel canale  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$
- Le interpretazioni teoriche descrivono  $Z(3900)$  come tetraquark, molecole di quark o ibridi del charmonio
- Maggiori studi sono necessari per comprendere queste nuove strutture che non sono vietate dal Modello Standard

- Molte particelle oltre alla  $Y(4260)$  e  $Z(3900)$  sono state scoperte in canali di decadimento simili a quelli del charmonio, la cui sovrabbondanza necessita maggiore chiarezza
- L'osservazione da LHCb di due candidati pentaquark nel 2015 indirizza la ricerca verso questa nuova possibilità di aggregazione della materia



# Spettroscopia del charmonio: un'inattesa abbondanza

[PRD 72 (2005) 054026] & [PDG]

- Spettroscopia esotica

- BESIII

- Stati Z  
 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-(\pi^0 J/\psi)$

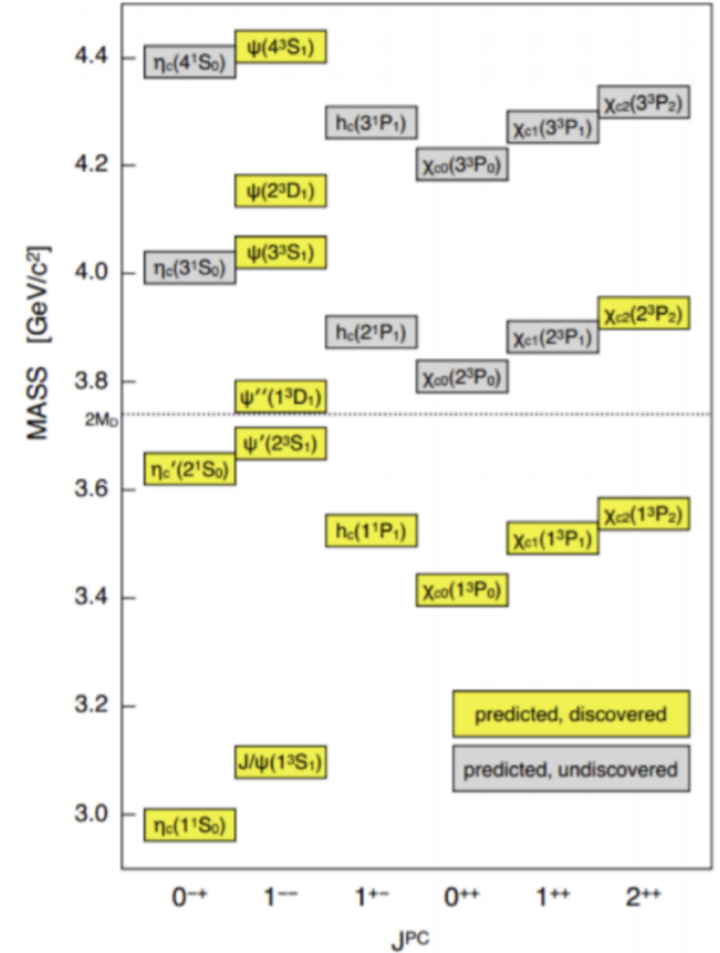
Sommario stati Z

- Stati Y  
 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$

$e^+e^- \rightarrow K^+K^- J/\psi$

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

- Stati legati del quark charm e il suo anti-quark creano stati  $c\bar{c}$  e in funzione dei loro numeri quantici presentano valori di massa diversi
- A  $2M_D \sim 3750$  MeV vi è la soglia di decadimento di  $c\bar{c}$  in due mesoni charmati. Al di sotto di questa soglia gli stati predetti del charmonio coincidono con quelli scoperti ma oltre questa soglia la ricerca degli stati charmati continua
- Numerosi stati sopra la soglia sono stati osservati decadere in stati del charmonio. Una **sovrabbondanza** di stati detti Y in  $J^{PC} = 1^{- -}$  indica che qualcos'altro oltre a stati  $c\bar{c}$  è presente
- **Esempi** di alcuni decadimenti di interesse degli XYZ:
  - X(3872)  $\rightarrow \gamma \pi^+\pi^- J/\psi$
  - Y(4260)  $\rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$
  - Y(4360)  $\rightarrow \pi^+\pi^- \psi(2S)$
  - Z(3900)  $\rightarrow \pi^+ J/\psi$
  - Z(4020)  $\rightarrow \pi^+ \psi(2S)$
- Recenti risultati mostrano anche **possibili legami** tra questi stati ma rimane necessario capire se quest'abbondanza di stati Y o stati Z sia riconducibili alla stessa particella



# Spettroscopia del charmonio: un'inattesa abbondanza

[PRD 72 (2005) 054026] & [PDG]

- Spettroscopia esotica

- BESIII

- Stati Z  
 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0 J/\psi$

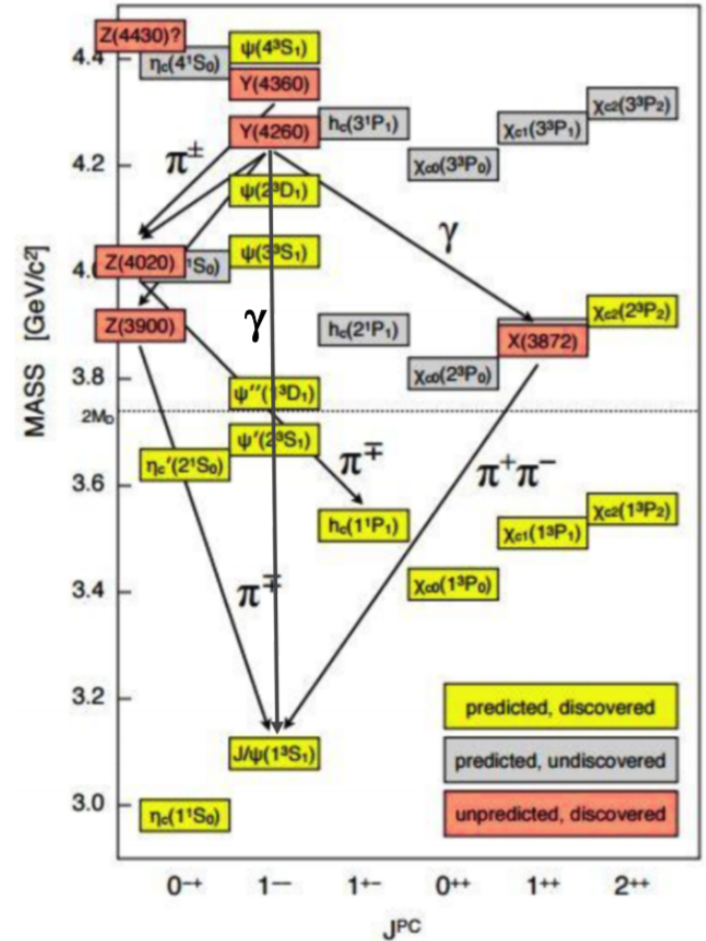
Sommario stati Z

- Stati Y  
 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$

$e^+e^- \rightarrow K^+K^- J/\psi$

$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0 \psi(2S)$

- Stati legati del quark charm e il suo anti-quark creano stati  $c\bar{c}$  e in funzione dei loro numeri quantici presentano valori di massa diversi
- A  $2M_D \sim 3750$  MeV vi è la soglia di decadimento di  $c\bar{c}$  in due mesoni charmati. Al di sotto di questa soglia gli stati predetti del charmonio coincidono con quelli scoperti ma oltre questa soglia la ricerca degli stati charmati continua
- Numerosi stati sopra la soglia sono stati osservati decadere in stati del charmonio. Una **sovrabbondanza** di stati detti Y in  $J^{PC} = 1^{--}$  indica che qualcos'altro oltre a stati  $c\bar{c}$  è presente
- **Esempi** di alcuni decadimenti di interesse degli XYZ:
  - $X(3872) \rightarrow \gamma \pi^+\pi^- J/\psi$
  - $Y(4260) \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$
  - $Y(4360) \rightarrow \pi^+\pi^- \psi(2S)$
  - $Z(3900) \rightarrow \pi^+ J/\psi$
  - $Z(4020) \rightarrow \pi^+ \psi(2S)$
- Recenti risultati mostrano anche **possibili legami** tra questi stati ma rimane necessario capire se quest'abbondanza di stati Y o stati Z sia riconducibili alla stessa particella



# Spettroscopia del charmonio: un'inattesa abbondanza

[PRD 72 (2005) 054026] & [PDG]

- Spettroscopia esotica

- BESIII

- Stati Z  
 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0 J/\psi$

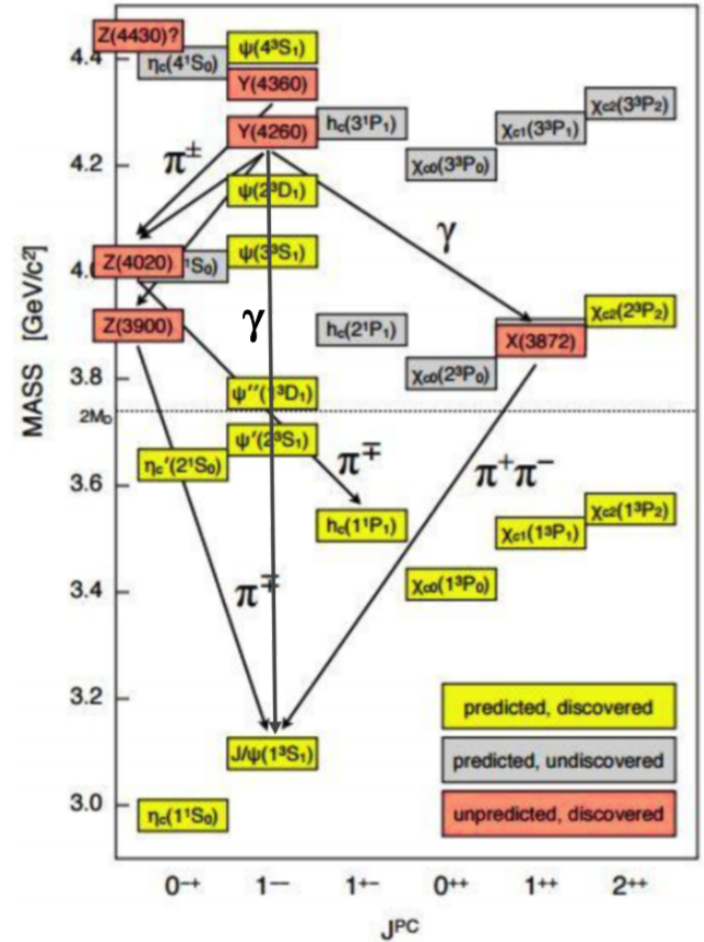
Sommario stati Z

- Stati Y  
 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$

$e^+e^- \rightarrow K^+K^- J/\psi$

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

- Stati legati del quark charm e il suo anti-quark creano stati  $c\bar{c}$  e in funzione dei loro numeri quantici presentano valori di massa diversi
- A  $2M_D \sim 3750$  MeV vi è la soglia di decadimento di  $c\bar{c}$  in due mesoni charmati. Al di sotto di questa soglia gli stati predetti del charmonio coincidono con quelli scoperti ma oltre questa soglia la ricerca degli stati charmati continua
- Numerosi stati sopra la soglia sono stati osservati decadere in stati del charmonio. Una **sovrabbondanza** di stati detti Y in  $J^{PC} = 1^{- -}$  indica che qualcos'altro oltre a stati  $c\bar{c}$  è presente
- **Esempi** di alcuni decadimenti di interesse degli XYZ:
  - $X(3872) \rightarrow \gamma \pi^+\pi^- J/\psi$
  - $Y(4260) \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$
  - $Y(4360) \rightarrow \pi^+\pi^- \psi(2S)$
  - $Z(3900) \rightarrow \pi^+ J/\psi$
  - $Z(4020) \rightarrow \pi^+ \psi(2S)$
- Recenti risultati mostrano anche **possibili legami** tra questi stati ma rimane necessario capire se quest'abbondanza di stati Y o stati Z sia riconducibili alla stessa particella



BESIII è un esperimento  
ideale per questi studi



# Beijing Spectrometer e il collisionatore di elettroni e positroni @ IHEP

Nucl. Instr. Meth. A614, 345 (2010)

- Spettroscopia esotica

- BESIII

- Stati Z  
 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-(\pi^0 J/\psi)$

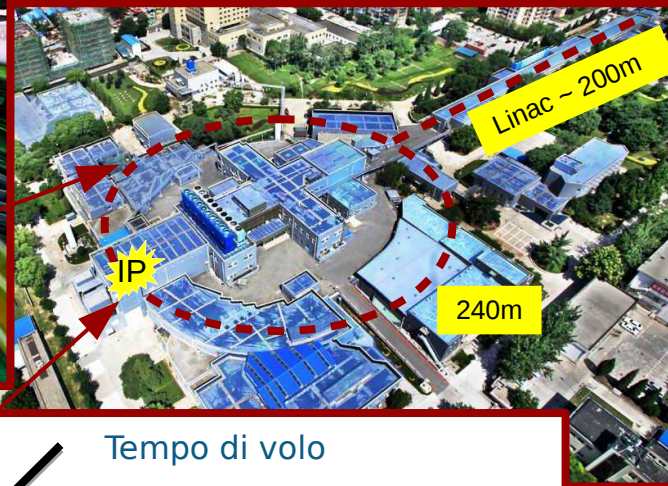
Sommario stati Z

- Stati Y  
 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$

$e^+e^- \rightarrow K^+K^- J/\psi$

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

- Beijing Electron-Positron Collider BEPCII e Beijing Spectrometer BESIII sono macchine che operano nella regione  $\tau$ -charm
- Luminosità =  $10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- **Energia<sub>cm</sub> : 2 – 4.6 GeV**
- L'esperimento è in presa dati e continuerà fino al 2027
- Il programma di fisica include:
  - Test di precisione EW
  - Studi di spettroscopia adronica ad alta statistica
  - Stati esotici charmati
  - Studi di fisica nella regione  $\tau$ -charm
  - ...





# Stati Z

PRL <b>110</b> , 252001 (2013)
--------------------------------

PRL <b>115</b> , 112003 (2015)
--------------------------------

PRL <b>119</b> , 072001 (2017)
--------------------------------

$e^+e^- \rightarrow \pi(\pi J/\psi)$

# Stati Z: $e^+e^- \rightarrow \pi^+(\pi^- J/\psi), \pi^0(\pi^0 J/\psi)$

PRL 110, 252001 (2013)

PRL 115, 112003 (2015)

- Spettroscopia esotica

- BESIII

- Stati Z  
 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^0(\pi^-\pi^0 J/\psi)$

Sommario stati Z

- Stati Y  
 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0 J/\psi$

$e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^0 J/\psi$

$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^0\pi^-\pi^0 \psi(2S)$

- Struttura elettricamente carica simile al charmonio:

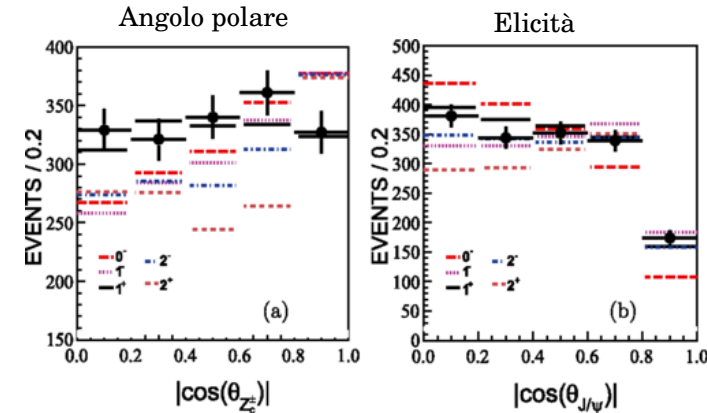
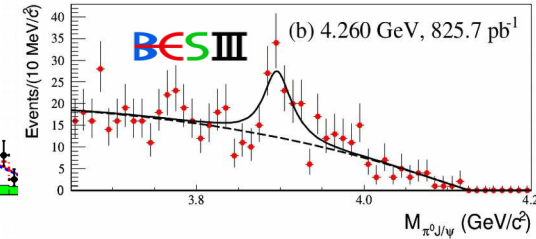
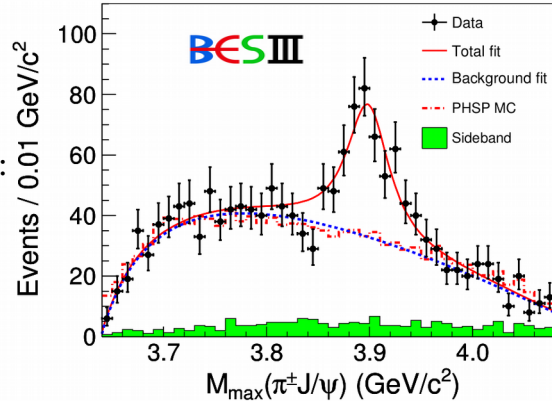
- Decade in  $J/\psi \rightarrow$  contiene  $c\bar{c}$
- Carica elettricamente  $\rightarrow$  contiene  $u\bar{d}$

$$M = 3899.0 (\pm 3.6 \pm 4.9) \text{ MeV}, \Gamma = 46 (\pm 10 \pm 20) \text{ MeV}$$

- Confermata da CLEO-c e Belle
- Misurata in canali neutri a differenti energie con una significatività  $> 10 \sigma$
- Il metodo di massima verosimiglianza favorisce  $J^P = 1^+$  con una significatività  $> 7 \sigma$

Tripletto di Isospin stabile

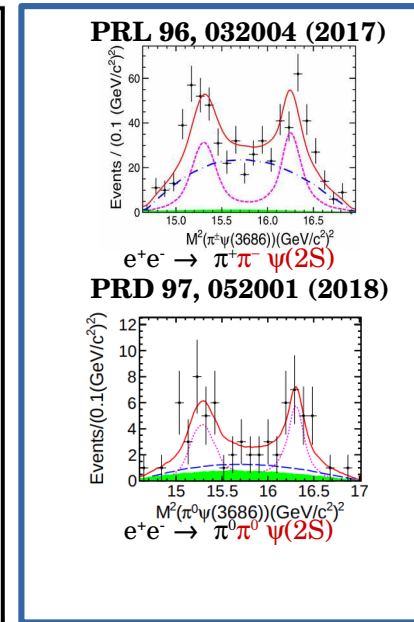
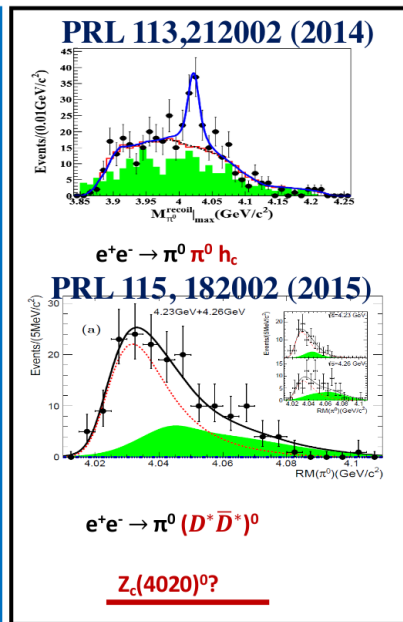
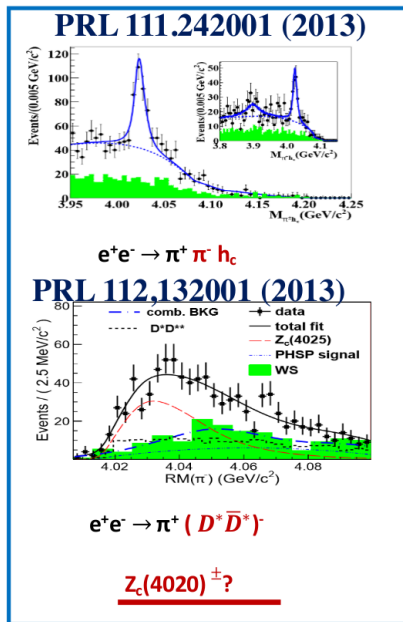
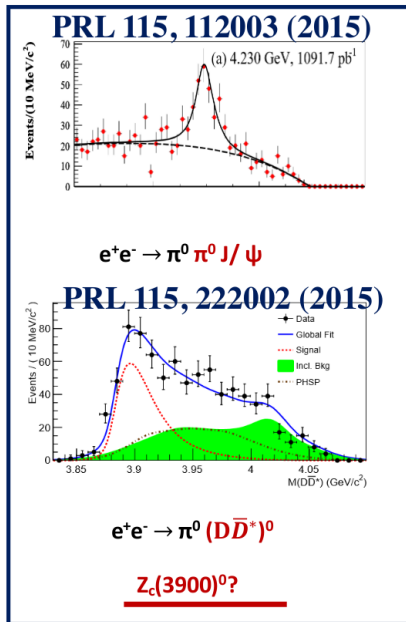
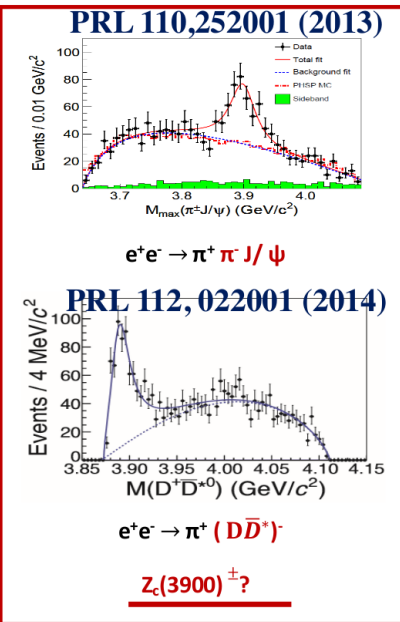
Numeri quantici identificati



PRL 119, 072001 (2017)



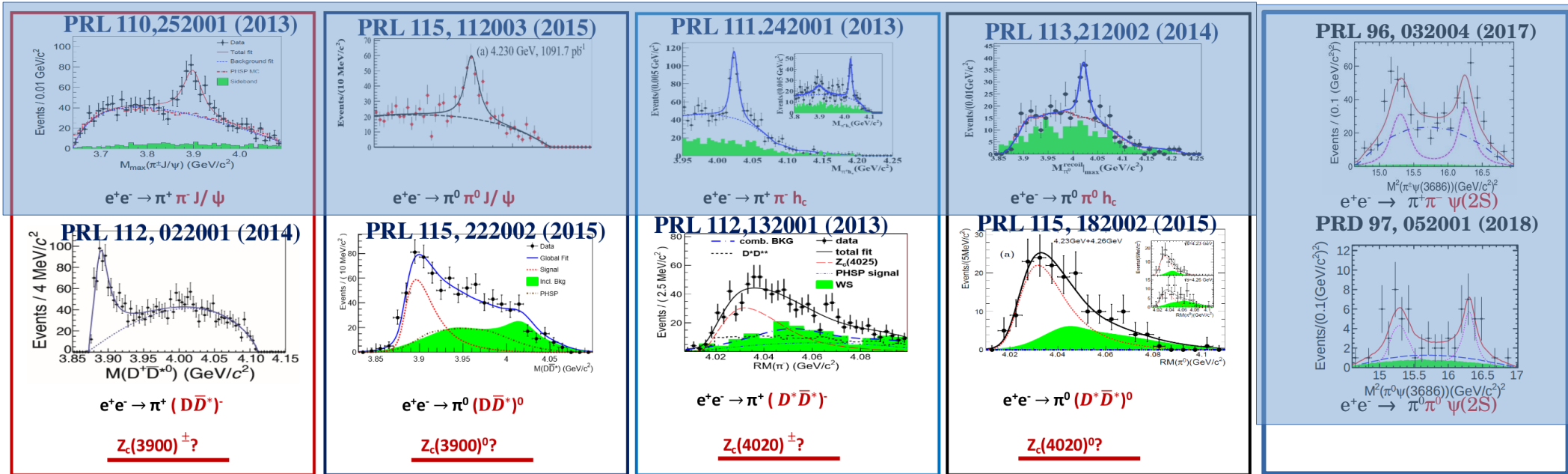
# Sommario di stati Z



- Diversi decadimenti Z sono stati misurati verso stati  $c\bar{c}$  e stati di “open charm”
- Tripletti di isospin sono stati stabiliti per ognuno di questi canali
- Masse e larghezze di queste risonanze sono compatibili



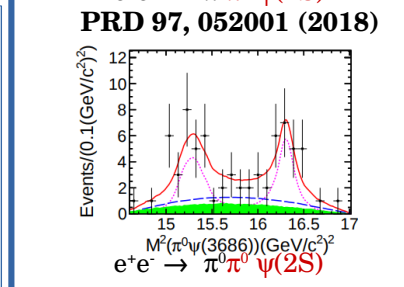
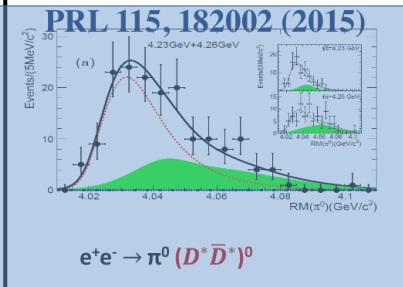
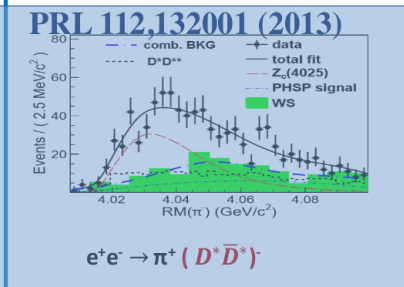
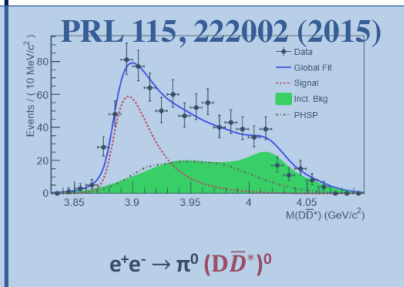
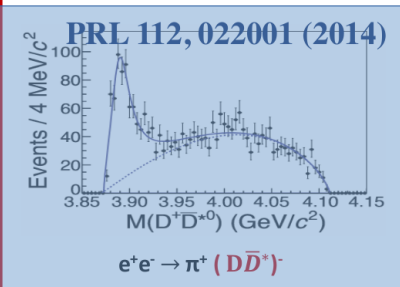
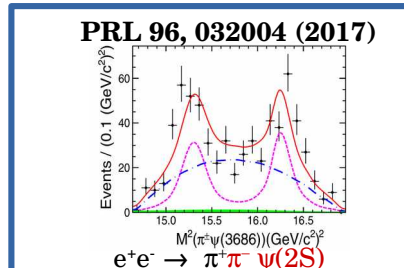
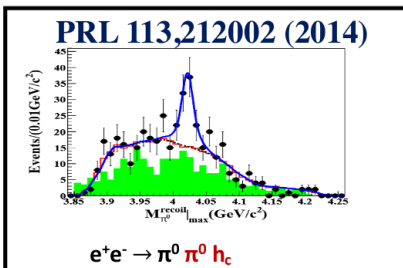
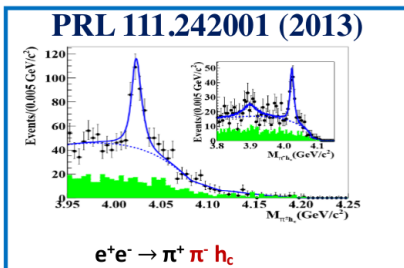
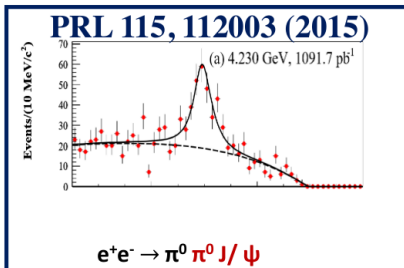
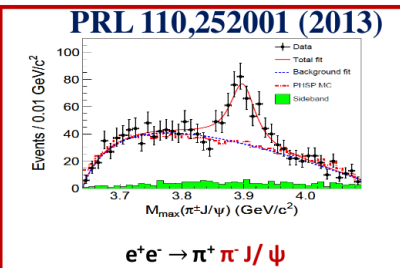
# Sommario di stati Z



- Diversi decadimenti Z sono stati misurati verso stati  $c\bar{c}$  e stati di “open charm”
- Tripletti di isospin sono stati stabiliti per ognuno di questi canali
- Masse e larghezze di queste risonanze sono compatibili



# Sommario di stati Z



$Z_c(3900)^\pm?$

$Z_c(3900)^0?$

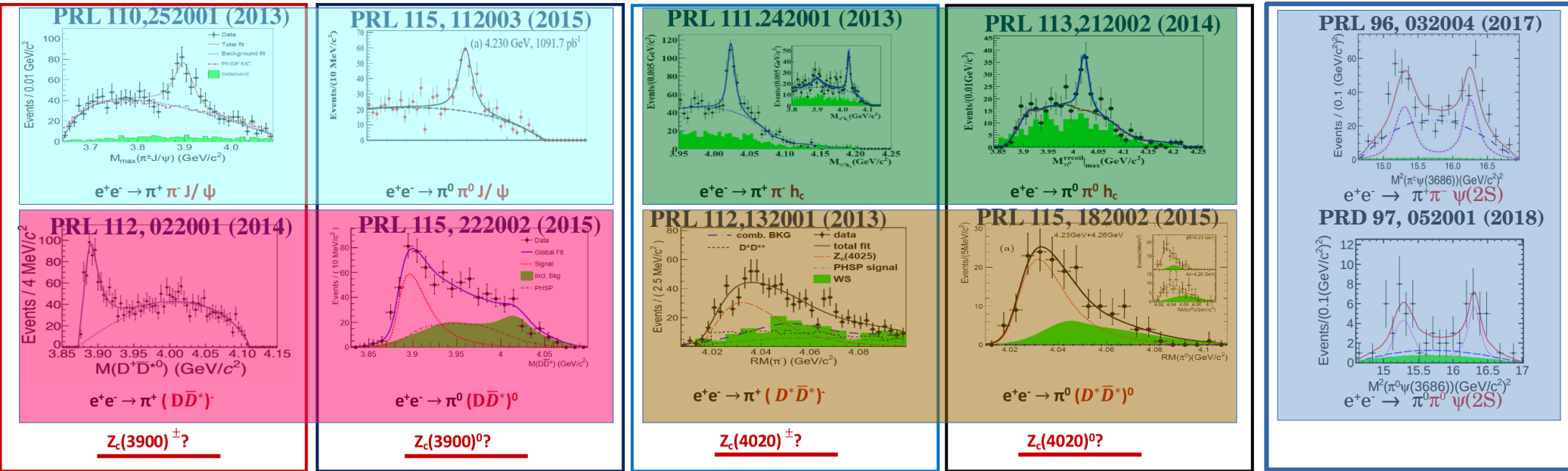
$Z_c(4020)^\pm?$

$Z_c(4020)^0?$

- Diversi decadimenti Z sono stati misurati verso stati  $c\bar{c}$  e stati di “open charm”
- Tripletti di isospin sono stati stabiliti per ognuno di questi canali
- Masse e larghezze di queste risonanze sono compatibili



# Sommario di stati Z



- Diversi decadimenti Z sono stati misurati verso stati  $c\bar{c}$  e stati di “open charm”
- Tripletti di isospin sono stati stabiliti per ognuno di questi canali
- Masse e larghezze di queste risonanze sono compatibili



## Stati Y

PRL <b>118</b> , 092001 (2017)	$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$
PRD <b>97</b> , 052001(2018)	$e^+e^- \rightarrow \pi^0\pi^0 \psi(2S)$
PRD <b>96</b> , 032004(2017)	$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- \psi(2S)$
ArXiv:1802.01216 → PRD accettato	$e^+e^- \rightarrow KK \psi(2S)$

# Y state: $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$

- Spettroscopia esotica

- BESIII

- Stati Z  
 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-(\pi^0 J/\psi)$

Sommario stati Z

- Stati Y  
 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$

$e^+e^- \rightarrow K^+K^- J/\psi$

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

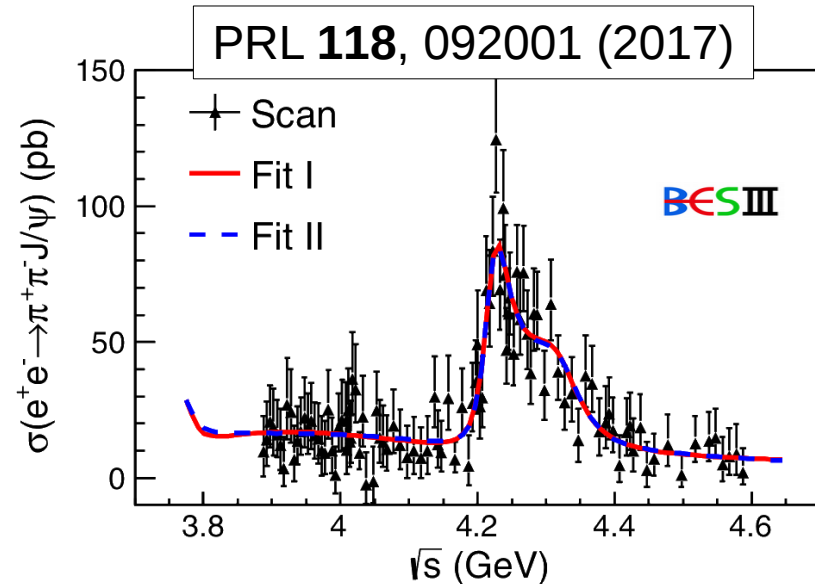
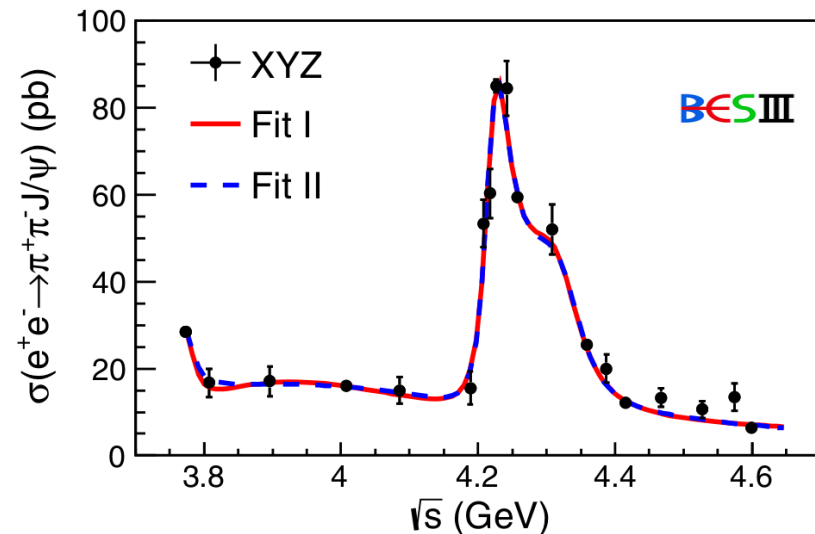
$L = 9.05 \text{ fb}^{-1}$  da 3.77 a 4.60 GeV

- Le misure sono state effettuate con 2 set di misure separati
- Il fit con un solo picco ha una significatività minore rispetto a **due risonanze** che descrivono i dati con una significatività  $> 7.6 \sigma$

$$M_1 = 4222 \pm 3.1 \pm 1.4 \text{ MeV}, \Gamma_1 = 44.1 \pm 4.3 \pm 2.0 \text{ MeV}$$

$$M_2 = 4320 \pm 10.4 \pm 7.0 \text{ MeV}, \Gamma_2 = 101.4^{+25.3}_{-19.7} \pm 10.2 \text{ MeV}$$

- Y(4320)** è stata vista per la prima volta in assoluto e massa e larghezza risultano essere compatibili con **Y(4360)** misurata da Belle e Babar



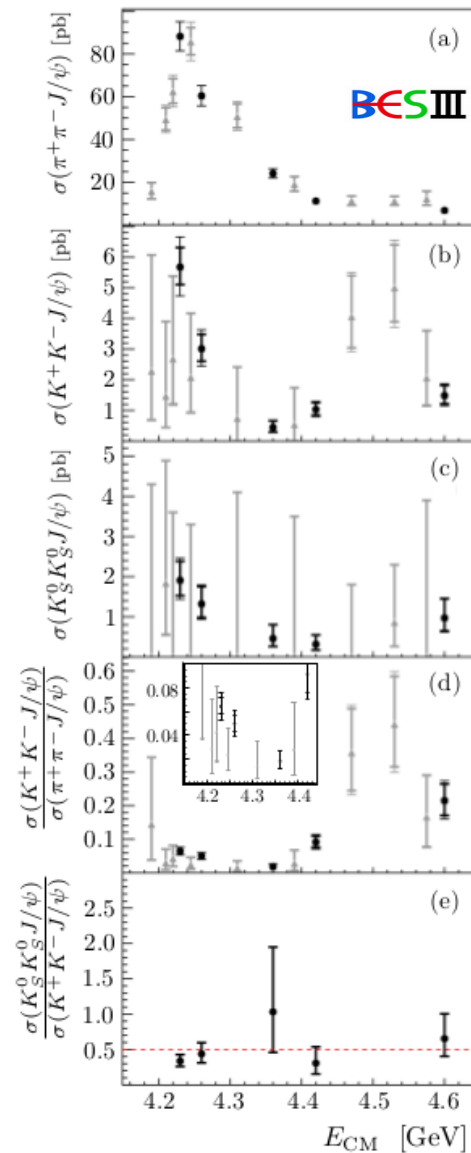


# Y state: $e^+e^- \rightarrow K^+K^- J/\psi$ && $e^+e^- \rightarrow K_S^0 K_S^0 J/\psi$

$L = 4.7 \text{ fb}^{-1}$  from 4.189 to 4.60 GeV

- Usando lo stesso set di dati si è misurata la sezione d'urto  $e^+e^-$  in  $\pi^+\pi^- J/\psi$  e in  $K^+K^- J/\psi$  e  $K_S^0 K_S^0 J/\psi$
- La sezione d'urto coi **kaoni** è di **1/10** rispetto a quella coi **pioni** e per energia attorno ai 4.5 GeV mostra aumento di sezione d'urto, quindi la loro dipendenza dall'energia in questa regione è differente e non si può concludere che Y(4260) decada in  $K^+K^- J/\psi$
- La sezione d'urto coi kaoni neutri rapportata ai kaoni carichi viene usata per testare la **simmetria di isospin** che in accordo con la teoria deve essere  $\frac{1}{2}$ . Questo risultato viene confermato dai dati sperimentali

ArXiv:1802.01216  
→ PRD accettato



# Y state: $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- \psi(2S)$ & $e^+e^- \rightarrow \pi^0\pi^0 \psi(2S)$

- Spettroscopia esotica

- BESIII

- Stati Z  
 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-(\pi^0 J/\psi)$

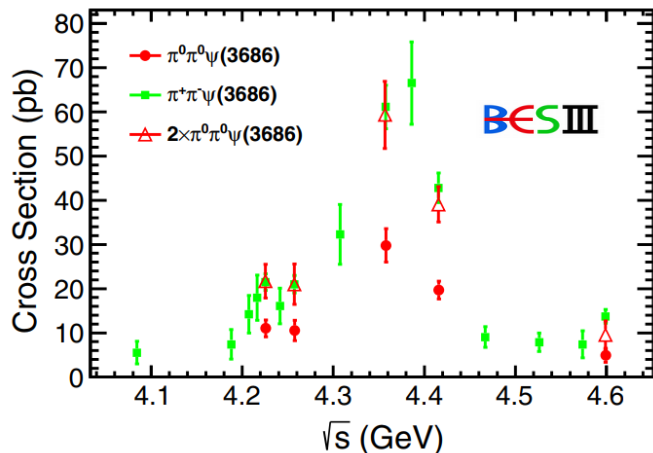
Sommario stati Z

- Stati Y  
 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$

$e^+e^- \rightarrow K^+K^- J/\psi$

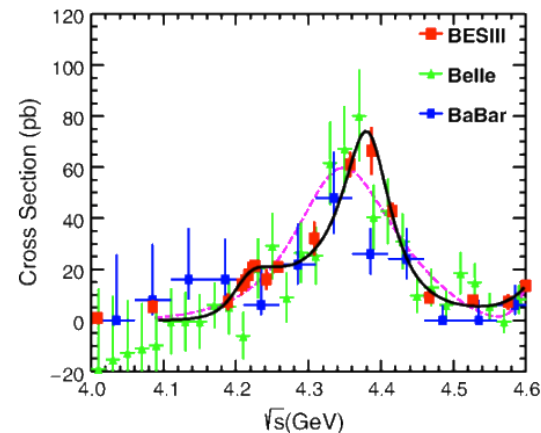
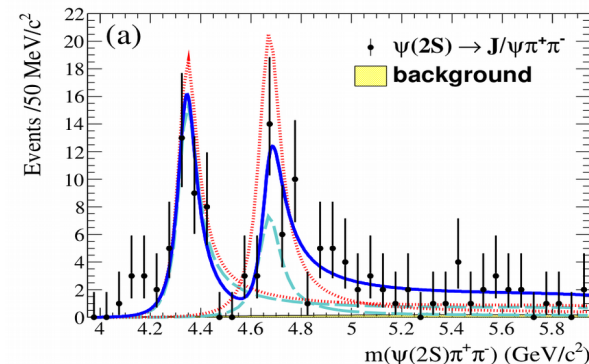
$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\psi(2S)$

- Studiando lo spettro di massa invariante  $m(\pi^+\pi^- \psi(2S))$  BaBar ha scoperto  $Y(4360)$  and  $Y(4660)$
- Le risonanze sono state confermate da Belle e da BESIII fino a 4.6 GeV
- Similmente è stato studiato  $e^+e^- \rightarrow \pi\pi \psi(2S)$  sia nel canale coi pioni carichi sia in un nuovo canale con i pioni neutri e la sezione d'urto misurata nel canale neutro mostra valori dimezzati rispetto al canale carico e questo è in accordo con il valore  $\frac{1}{2}$  atteso dalla **simmetria di isospin**



$$R_{\pi^+\pi^-\psi(3686)} = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \pi^0\pi^0\psi(3686))}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\psi(3686))} = 0.48 \pm 0.04 \pm 0.02$$

BaBar: PRD **89**,111103(R)



BESIII: PRD **96**,032004(2017)

BESIII: PRD **97**,052001(2018)



# Conclusioni

- La regione di energia del charmonio si è rivelata ricca di scoperte attraverso i nuovi stati esotici XYZ che non possono essere descritti dallo spettro del  $c\bar{c}$  sebbene ne mostrino un legame nei loro decadimenti
- Y(4260) mostra la sua doppia struttura in  $\pi^+\pi^- J/\psi$  ma non in  $K^+K^- J/\psi$  nel quale si osserva una struttura attorno ai 4.5 GeV
- Z(3900) e Z(4020) sono state osservate in diversi canali di decadimento ma finché la misura dei numeri quantici non viene effettuata in ogni canale non si può dichiarare essere le stesse particelle
- Solo per Z(3900) sono stati stabiliti sia il tripletto di isospin sia i numeri quantici



Thanks

A thick, vibrant red line that starts thin on the left and curves upwards to the right, ending in a pointed tip. It is positioned directly beneath the word "Thanks".

Backup

# Y state: $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- h_c$

$L \sim 9 \text{ fb}^{-1}$  from 3.868 to 4.60 GeV

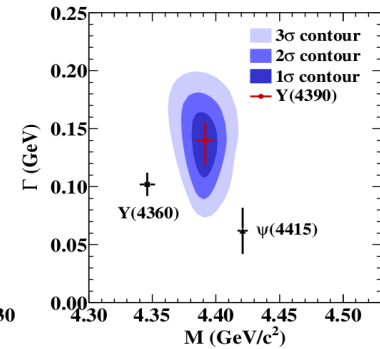
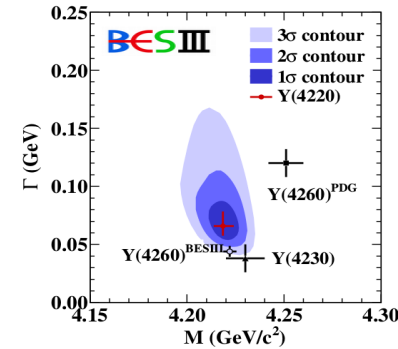
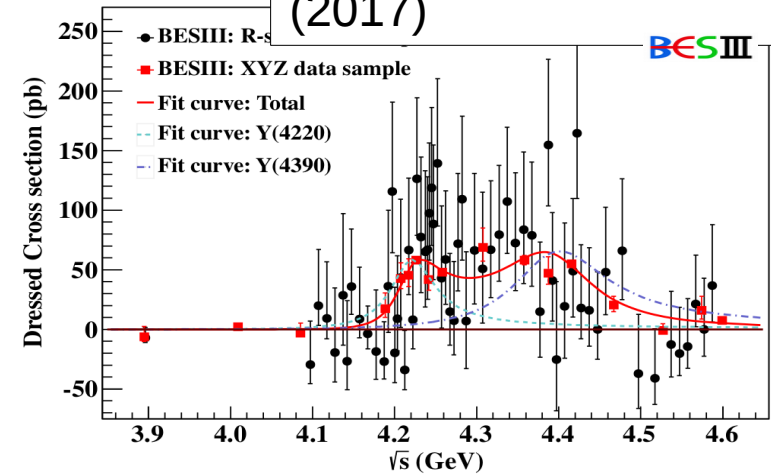
- The data cannot be fitted with a single peak
- Two resonances describes the data with a significance  $> 10 \sigma$

$$M_1 = 4218.4^{+5.5}_{-4.5} \pm 0.9 \text{ MeV}, \quad \Gamma_1 = 66.0^{+16.2}_{-20.6} \pm 0.4 \text{ MeV}$$

$$M_2 = 4391.5^{+6.3}_{-4.5} \pm 0.9 \text{ MeV}, \quad \Gamma_2 = 139.5^{+16.2}_{-20.6} \pm 0.4 \text{ MeV}$$

- Y(4220)** is compatible with the state found in  $\pi^+\pi^- J/\psi$  at 4222 MeV

PRL **118**, 092002  
(2017)



# Y state: $e^+e^- \rightarrow \omega \chi_{cJ}$

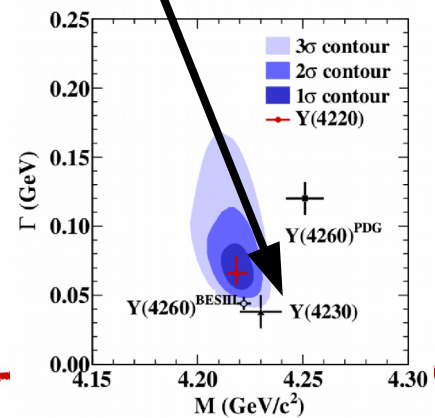
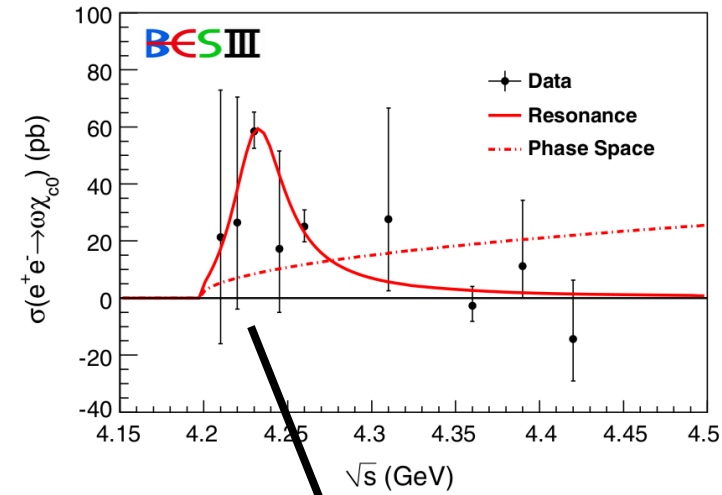
PRL 114, 092003 (2015)

Nine energy points from 4.21 to 4.42 GeV

- The data suffer the low statistic
- A resonances describes the data with a significance  $> 9 \sigma$

$$M = 4230 \pm 8 \pm 6 \text{ MeV}, \Gamma = 38 \pm 12 \pm 2 \text{ MeV}$$

- Only  $\omega \chi_{c0}$  channel shows a significant cross section,  $\omega \chi_{c1,2}$  have a cross section compatible with 0.
- The mass and width are compatible with the Y in  $\pi^+\pi^- h_c$  decay



# X state: $e^+e^- \rightarrow \gamma \pi^+\pi^- J/\psi$

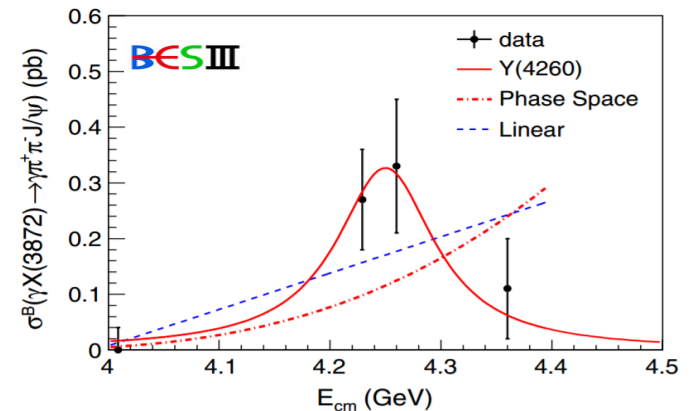
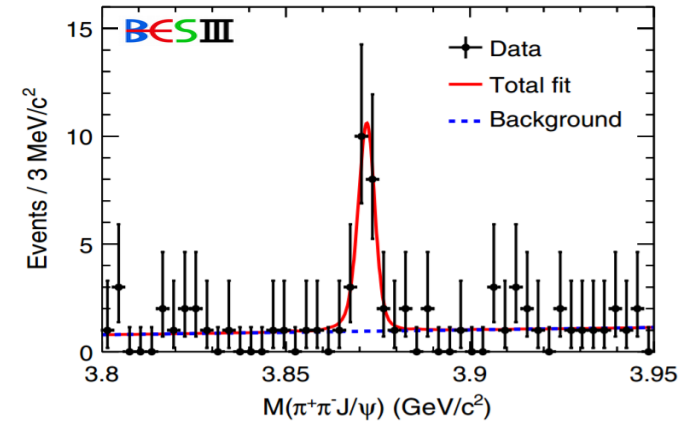
Four energy points from 4.009 to 4.360 GeV

- A resonance describes the data with a significance  $> 6.3 \sigma$

$$M = 3871.9 \pm 0.7 \pm 0.2 \text{ MeV} , \Gamma < 2.4 \text{ MeV (90\% C.L.)}$$

- Cross section is consistent with the expectation for the radiative transition process  $Y(4260) \rightarrow \gamma X(3872)$

PRL 112, 092001 (2014)

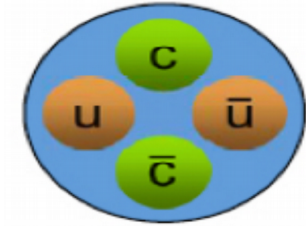




# Nature of these states

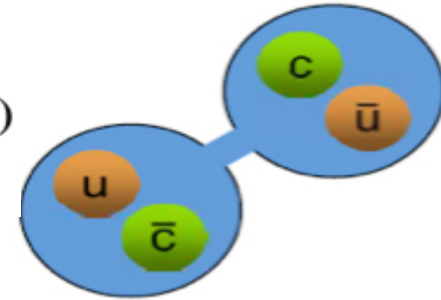
- Tetraquark state?

Phys. Rev. D87,125018(2013); Phys. Rev. D88, 074506(2013);  
Phys. Rev. D89,054019(2014); Phys. Rev. D90,054009(2014);



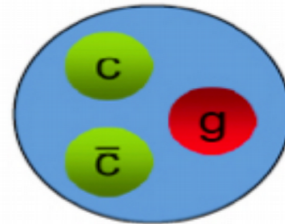
- Molecule state?

Phys. Rev. Lett. 111, 132003 (2013); Phys. Rev. D 89, 094026 (2014)  
Phys. Rev. D 89, 074029 (2014); Phys. Rev. D 88, 074506 (2013)



- Charmonium hybrid?

Phys.Rev. D88 (2013) 045027;



- Other?

