

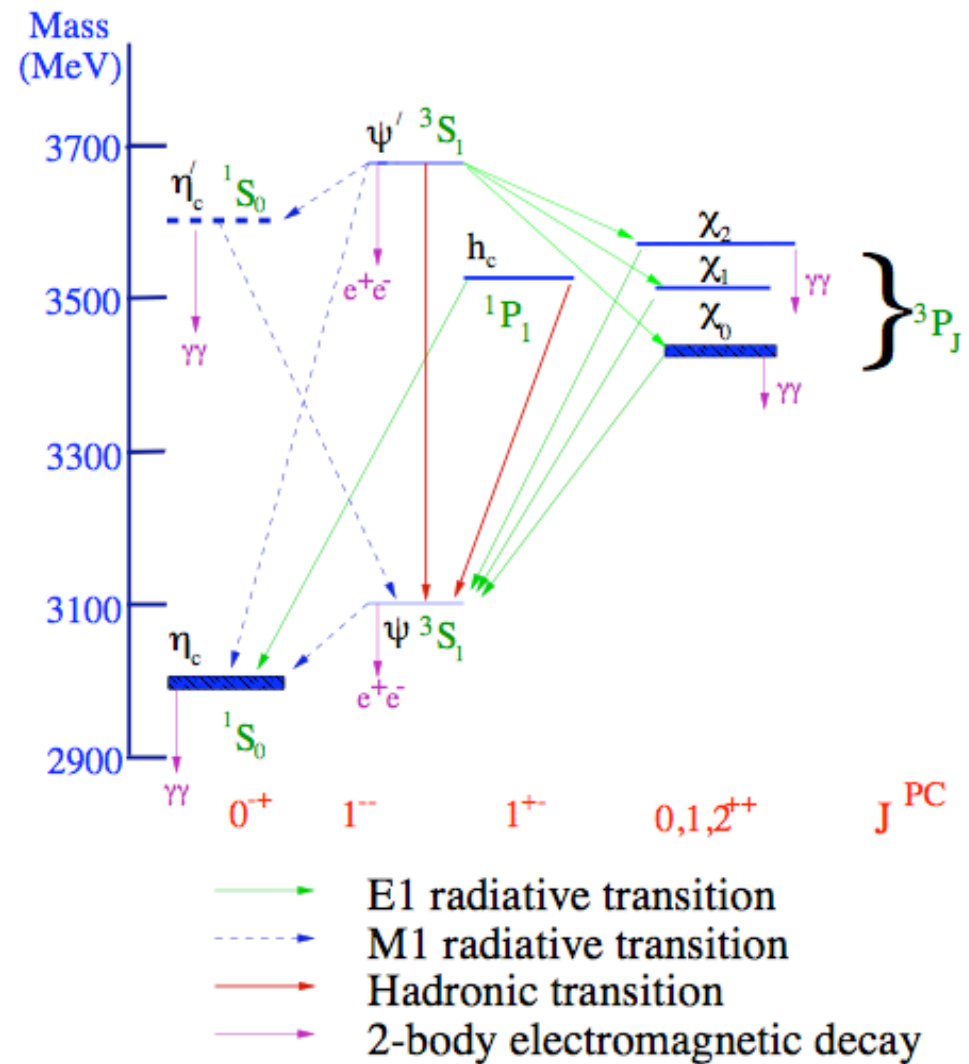
Spettroscopia e produzione del charmionio: nuovi risultati

Enrico Robutti
I.N.F.N. Genova

Incontri di Fisica delle Alte Energie
Catania, 30 Marzo - 2 Aprile 2005

Sommario

- Nuovi avvistamenti dell' h_c :
 - E835;
 - CLEO;
 - ricerca di Belle
- La $X(3872)$:
 - situazione sperimentale e modelli teorici;
 - nuovi risultati alle B -factories;
 - produzione in $p\bar{p}$
- Nuova risonanza $X(3940)$ in $B \rightarrow J/\psi \omega K$? (Belle)
- $e^+e^- \rightarrow$ doppio charmonio ($Y(3940)$)
- Produzione di charmonio in $B \rightarrow (c\bar{c}) K$

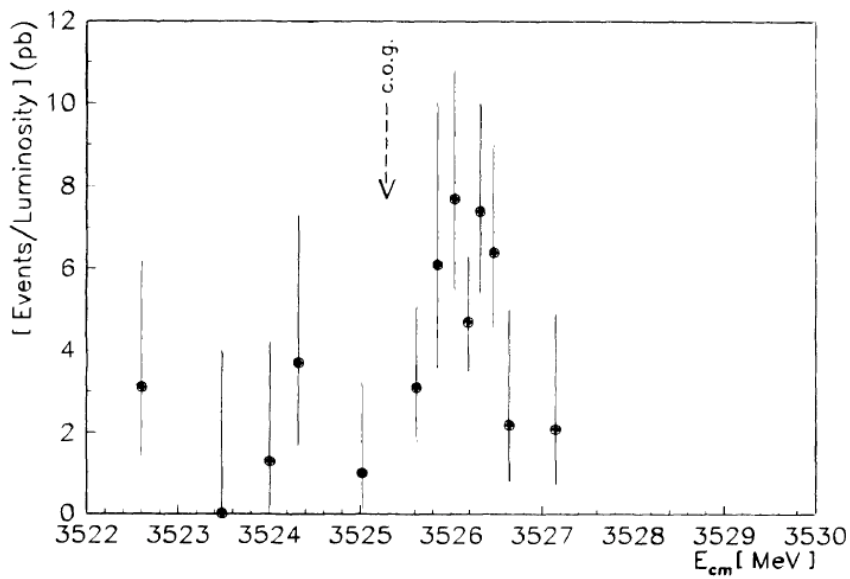
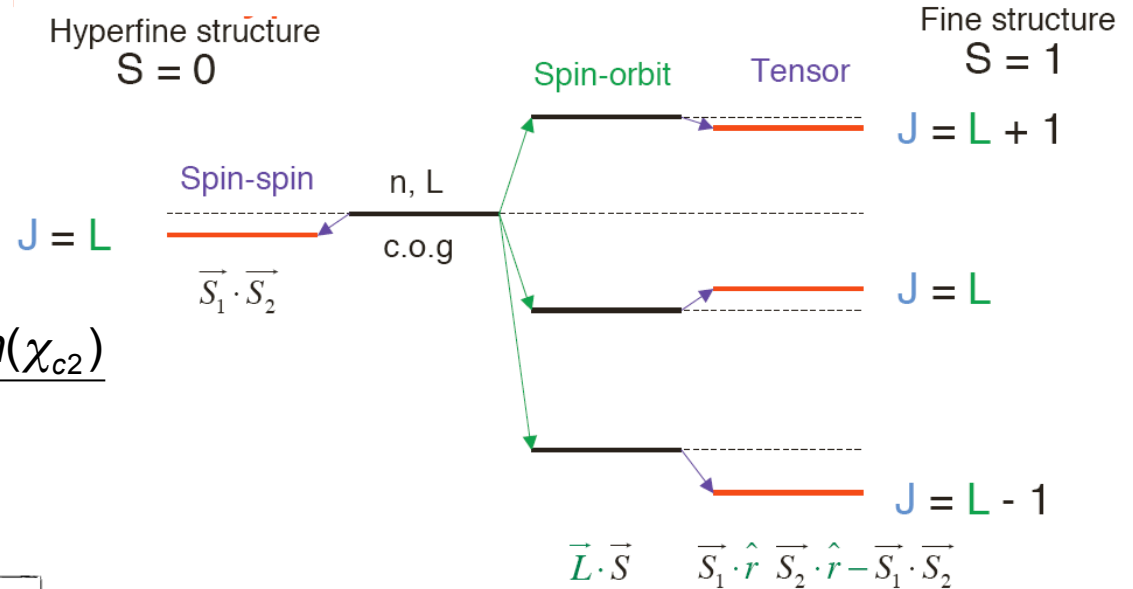


Lo stato 1P_1

□ h_c è lo stato 1P_1 del charmonio: la massa è prevista vicina al centro di gravità degli stati 3P_J :

$$m(\text{c.o.g.}) = \frac{m(\chi_{c0}) + 3m(\chi_{c1}) + 5m(\chi_{c2})}{9}$$

$$= (3525,3 \pm 0,1) \text{ MeV}$$



□ E760 (1992): struttura in $p\bar{p} \rightarrow J/\psi \pi^0$ interpretata come evidenza di h_c :

- $m(h_c) = (3526,2 \pm 0,15 \pm 0,2) \text{ MeV}/c^2$;
- $\Gamma < 1,1 \text{ MeV}$ (90% C.L.)

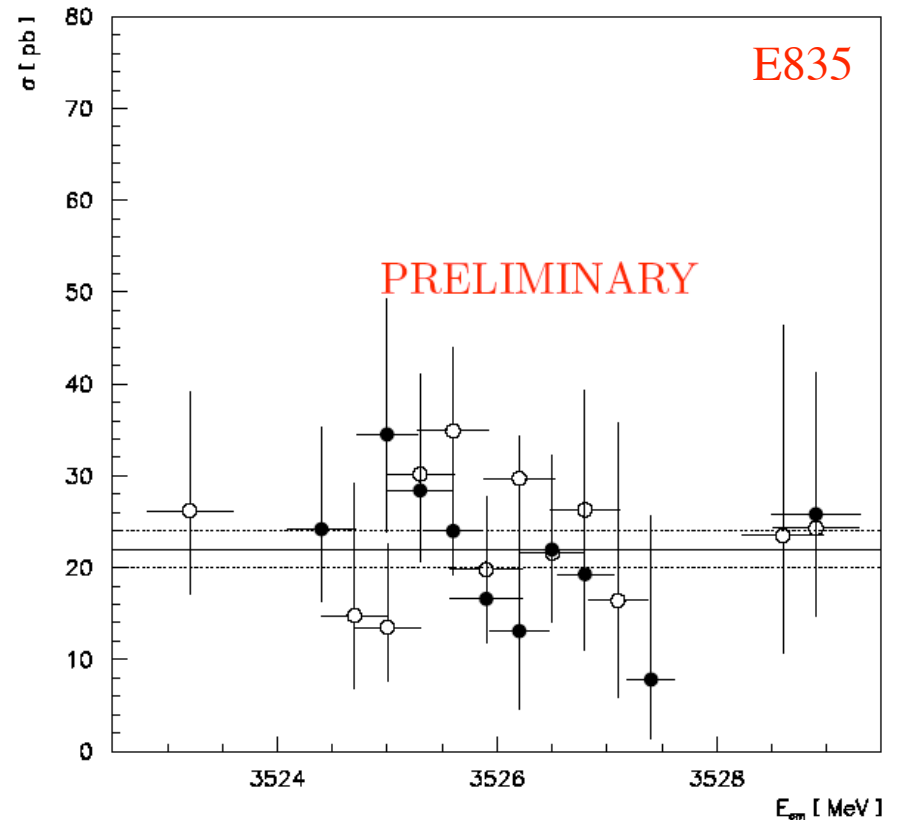
E835: ricerca di $h_c \rightarrow J/\psi \pi^0$

$$\mathcal{L} = 90 \text{ pb}^{-1}$$

- Esperimento in **formazione $p\bar{p}$** : scansione dell'energia del fascio a passi di ~ 250 keV
 - dati alla $\chi_{c1,2}$ e $\psi(2S)$ usati per la stima del fondo non risonante
- J/ψ ricostruite in e^+e^-
- Fit cinematico
- Assumendo nessuna interferenza con n.r. e J/ψ non polarizzate, per $m(h_c) = 3526,2$ MeV, $\Gamma(h_c) = 750$ keV:

$$\mathcal{B}(h_c \rightarrow p\bar{p}) \times \mathcal{B}(h_c \rightarrow J/\psi \pi^0) < 0,6 \times 10^{-7} \text{ (90\% C.L.)}$$

$$\text{(cfr. E760: } (1,7 \pm 0,4) \times 10^{-7} < \mathcal{B}(p\bar{p}) \times \mathcal{B}(J/\psi \pi^0) < (2,4 \pm 0,6) \times 10^{-7}\text{)}$$



E835: ricerca di $h_c \rightarrow \eta_c \gamma$

□ Ricostruzione di $p\bar{p} \rightarrow \gamma\gamma\gamma$:

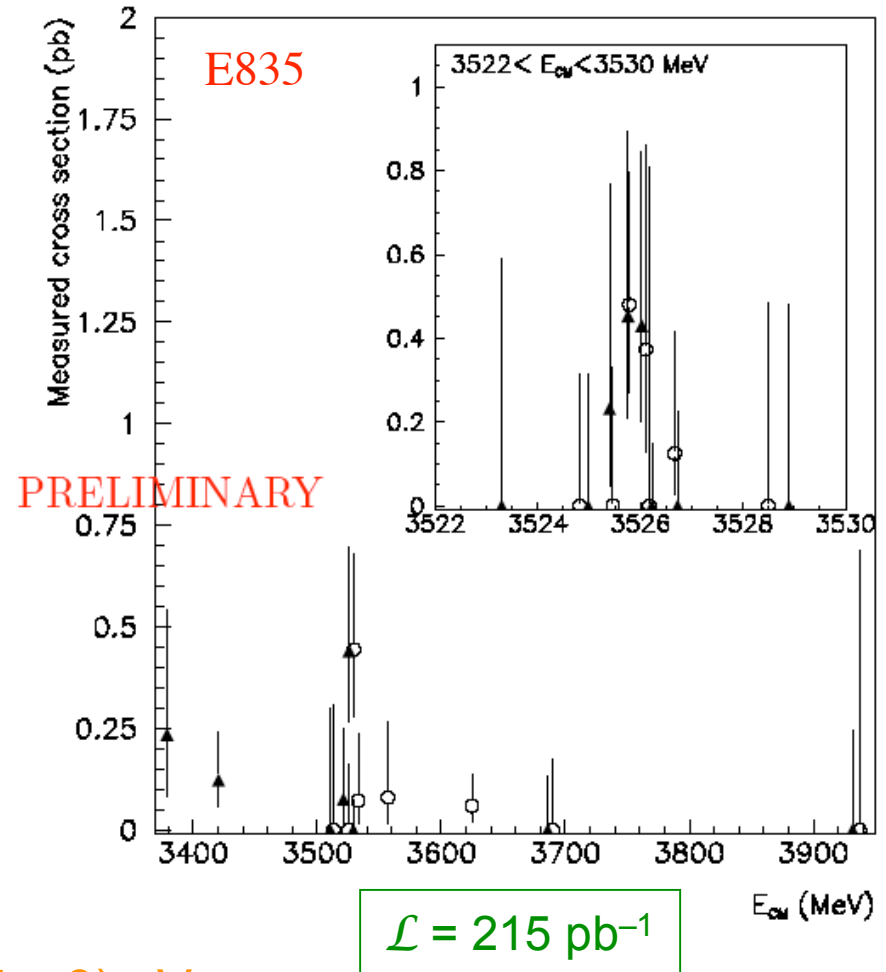
- veto π^0 ;
- fit cinematico $p\bar{p} \rightarrow \gamma\gamma\gamma$;
- distribuzione angolare $\eta_c \rightarrow \gamma\gamma$
- distribuzione angolare $h_c \rightarrow \eta_c \gamma$
- veto η, ω, η' : $m(\gamma_i \gamma_j) > 1 \text{ GeV}/c^2$;
- fit cinematico $h_c \rightarrow \eta_c \gamma \rightarrow \gamma\gamma\gamma$:
 $P(\chi^2) > 10^{-2}$

□ 23 candidati in $\sim 215 \text{ pb}^{-1}$: 13 in $\sim 30 \text{ pb}^{-1}$ entro 0,5 MeV: interpretando come risonanza ($\Gamma = 0,5 - 1,0 \text{ MeV}$):

$$m(h_c) = (3525,8 \pm 0,2 \pm 0,2) \text{ MeV}/c^2$$

$$\Gamma(h_c \rightarrow p\bar{p}) \times \mathcal{B}(h_c \rightarrow \eta_c \gamma) < (11 \pm 5 \pm 3) \text{ eV}$$

□ Significatività: conservativamente $P \sim 10^{-3}$ (3σ)

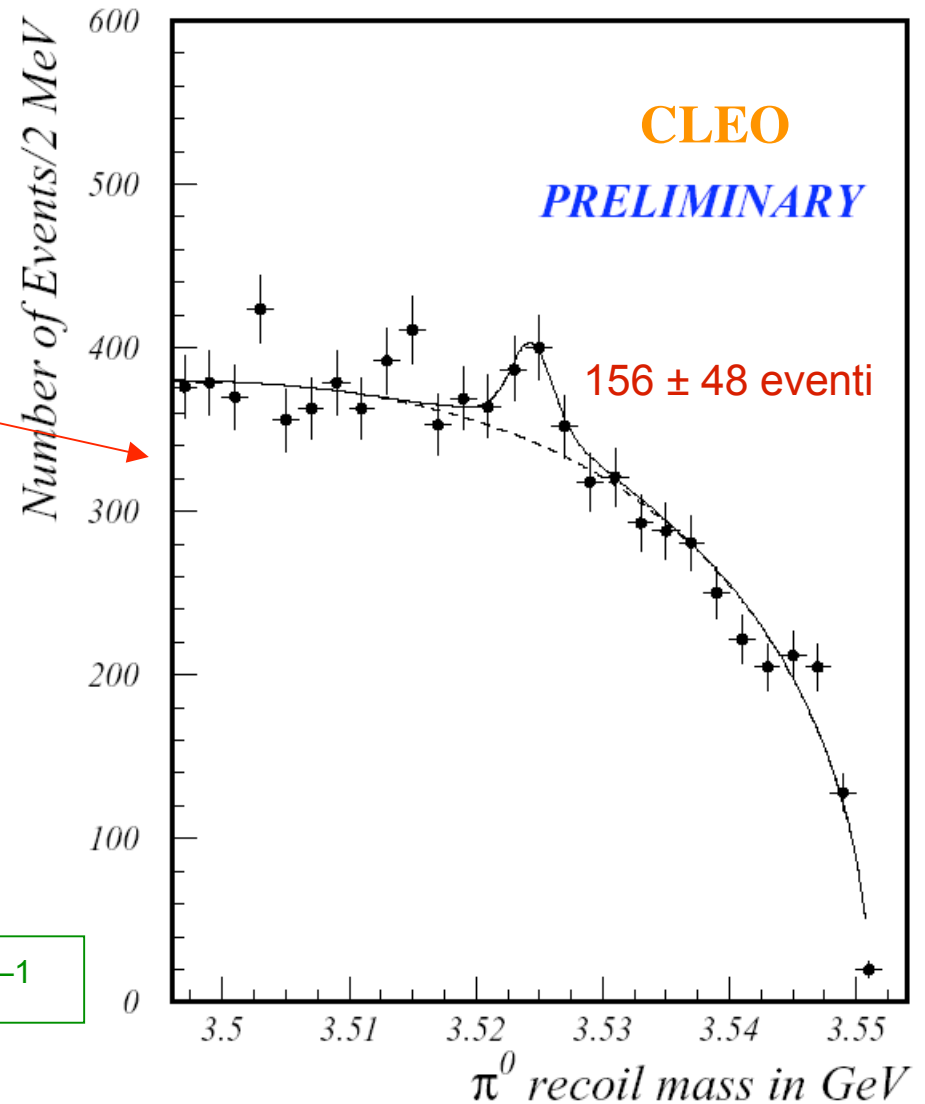


CLEO: ricerca di h_c inclusiva

- $\psi(2S)$ formate in e^+e^- : ricerca di $\psi(2S) \rightarrow h_c \pi^0, h_c \rightarrow \eta_c \gamma$
- Rinculo al sistema ($\pi^0 \gamma$) ricostruito compatibile con massa η_c
 - veto $\psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi \pi$,
- Studio distribuzione massa di rinculo al π^0
- Risultati fit fondo (ARGUS) + segnale (doppia Gaussiana):
significatività: $3,3 \sigma$

$$m(h_c) = (3524,8 \pm 0,7) \text{ MeV}/c^2$$

$$\mathcal{L} = 6 \text{ pb}^{-1}$$



CLEO: ricerca di h_c esclusiva

□ η_c ricostruita in 6 modi di decadimento esclusivi:

- $K_S K^+ K^-$;
- $K^+ K^- \pi^0$;
- $K^+ K^- \pi^+ \pi^-$;
- $2 \pi^+ 2 \pi^-$;
- $\pi^+ \pi^- \eta (\eta \rightarrow \gamma \gamma)$;
- $\pi^+ \pi^- \eta (\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0)$

□ Fit alla massa di rinculo del π^0 sulla somma dei modi con fondo (ARGUS) + segnale (doppia Gaussiana):

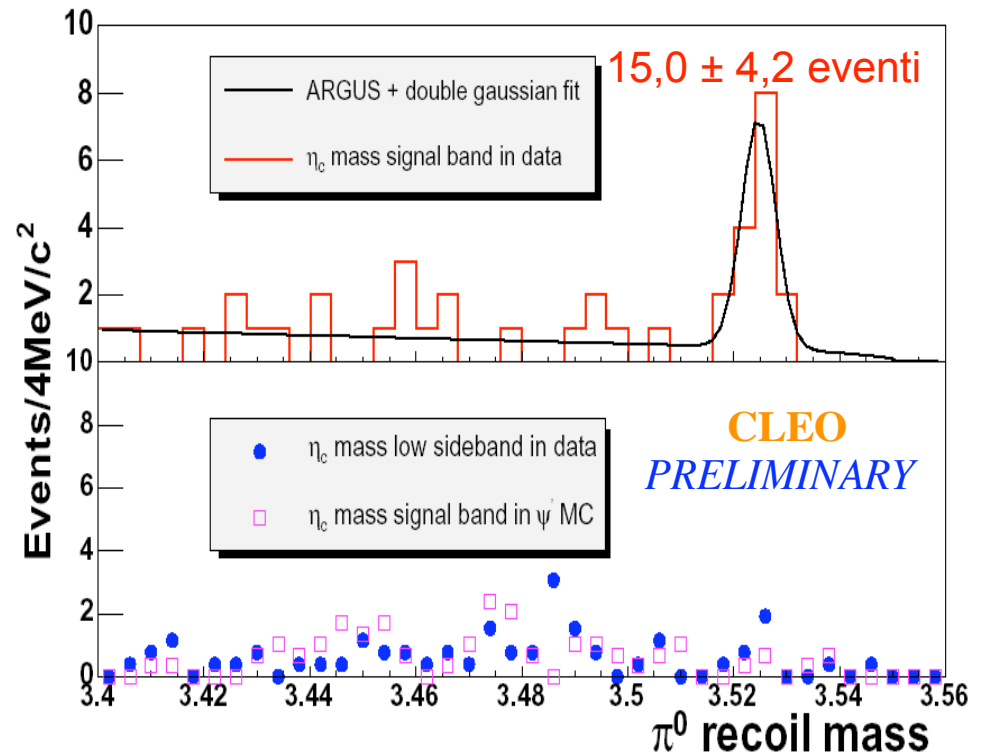
significatività: 5σ

$$m(h_c) = (3524,4 \pm 0,9) \text{ MeV}/c^2$$

□ Combinando i risultati di analisi inclusiva ed esclusiva:

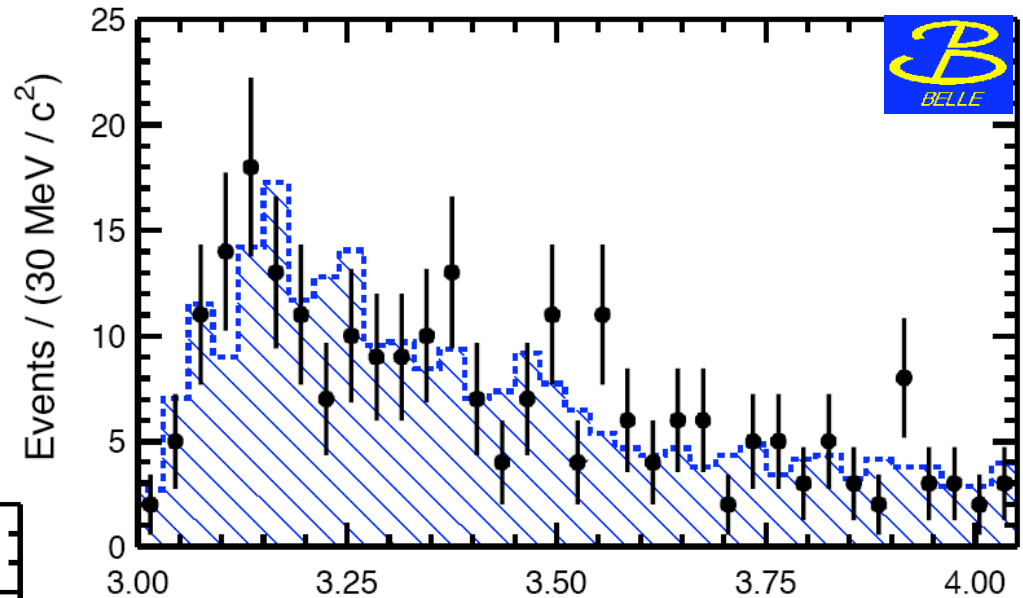
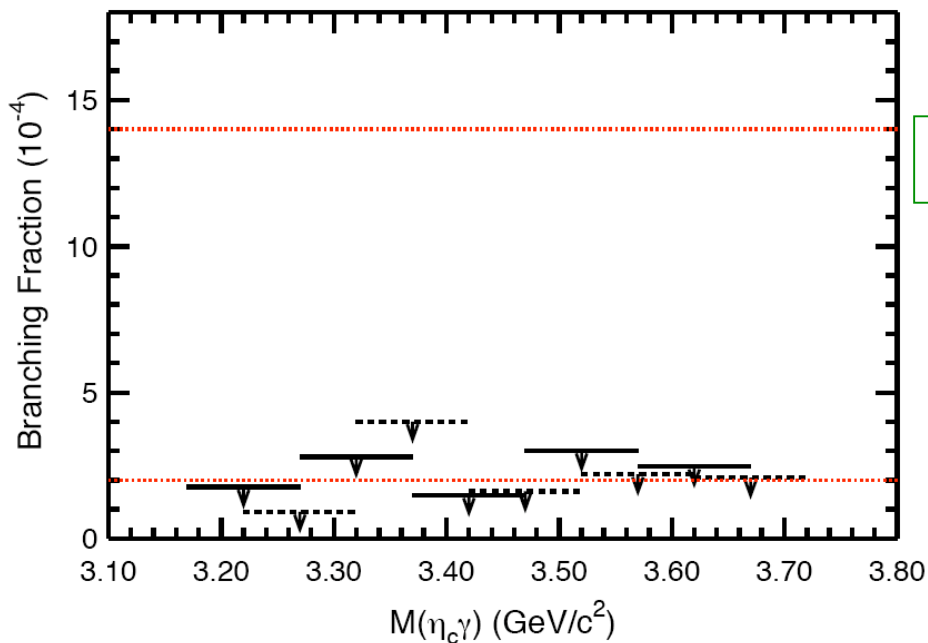
$$m(h_c) = (3524,7 \pm 0,6 \pm 1,0) \text{ MeV}/c^2$$

$$\mathcal{L} = 6 \text{ pb}^{-1}$$



Belle: ricerca di $B^+ \rightarrow h_c K^+$

- In fattorizzazione, $B \rightarrow h_c K$, $B \rightarrow \chi_{c0} K$ sono vietati, ma in realtà $\mathcal{B}(B \rightarrow \chi_{c0} K) \sim 10^{-4}$
- Ricerca nella catena $B^\pm \rightarrow h_c K^\pm$,
 $h_c \rightarrow \eta_c \gamma$, $\eta_c \rightarrow K_S K^+ \pi$



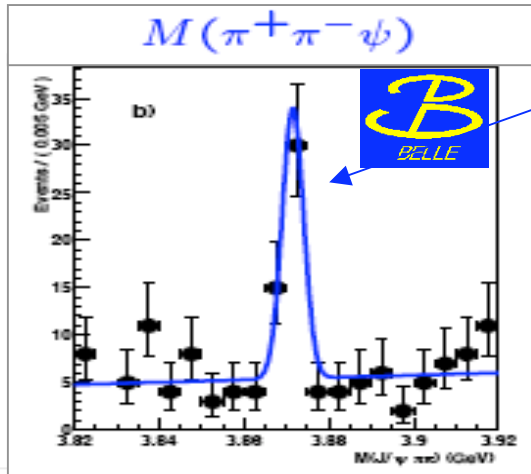
$\mathcal{L} = 140 \text{ fb}^{-1}$

$M(K_S K \pi \gamma) \text{ (GeV / c}^2\text{)}$

- Limiti superiori ottenuti in funzione di $m(h_c)$, assumendo $\mathcal{B}(h_c \rightarrow \eta_c \gamma) = 50\%$:
per $m(h_c) = 3530 \text{ MeV/c}^2 \Rightarrow$

$$\mathcal{B}(B^\pm \rightarrow \eta_c K^\pm) < 3,2 \times 10^{-4}$$

La X(3872): evidenze sperimentali



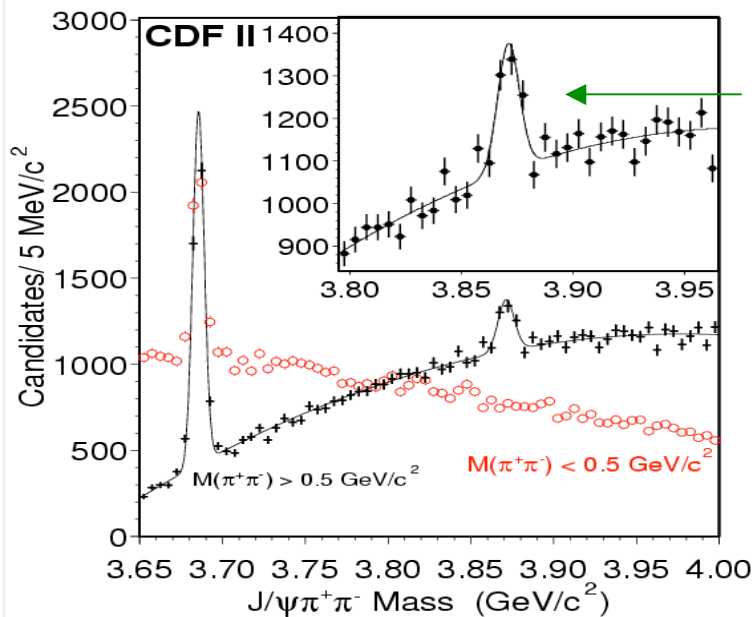
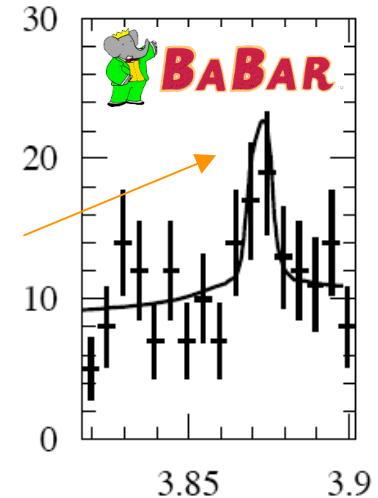
$m = (3872,0 \pm 0,6 \pm 0,5) \text{ MeV}/c^2$

sign.: 10,3 σ (?)

$m = (3873.4 \pm 1,4) \text{ MeV}/c^2$

sign.: 3,5 σ

$X(3872) \rightarrow J/\psi \pi^+\pi^-$

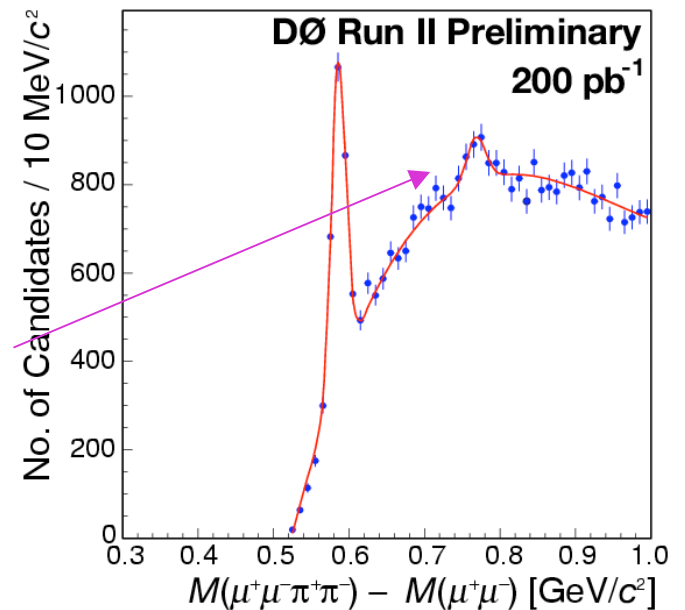


$m = (3871,3 \pm 0,7 \pm 0,4) \text{ MeV}/c^2$

sign.: 11,6 σ

$m = (3866,3 \pm 3,5 \pm 3,9) \text{ MeV}/c^2$

sign.: 4,4 σ



Nuovo stato del charmonio?

- ψ_2 (1^3D_2 , $J^{PC} = 2^-$): $\frac{\mathcal{B}(X \rightarrow \chi_{c1}\gamma)}{\mathcal{B}(X \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-)}$ troppo piccolo (Belle)
- $h_c(2P)$ (2^1P_1 , $J^{PC} = 1^{+-}$): distribuzione angolare in disaccordo (Belle)
- η_{c2} (1^1D_2 , $J^{PC} = 2^{-+}$): $\mathcal{B}(B^\pm \rightarrow X K^\pm) \times \mathcal{B}(X \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-) \sim 10^{-5}$ troppo piccolo (Belle, BABAR)
- $\chi_{c1}(2P)$ (2^3P_1 , $J^{PC} = 1^{++}$): $\frac{\mathcal{B}(X \rightarrow J/\psi \gamma)}{\mathcal{B}(X \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-)}$ troppo piccolo (Belle)
- ψ_3 (1^3D_3 , $J^{PC} = 3^-$): $\frac{\mathcal{B}(X \rightarrow \chi_{c2}\gamma)}{\mathcal{B}(X \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-)}$ troppo piccolo (Belle)
- $J^P = 0^+, 1^-, 2^+$ esclusi perché $\Gamma < 2,3$ MeV troppo stretta e $\frac{\mathcal{B}(X \rightarrow D\bar{D})}{\mathcal{B}(X \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-)}$ troppo piccolo (Belle)

Altre interpretazioni recenti

□ “Molecola” $D^0 \bar{D}^{*0}$ (stato debolmente legato in onda S) (E. Braaten, M. Kusunoki, hep-ph/0412268):

– basato su fattorizzazione, simmetria di isospin e heavy quark, e

$\mathcal{B}(B \rightarrow D^{(*)} \bar{D}^{(*)} K)$;

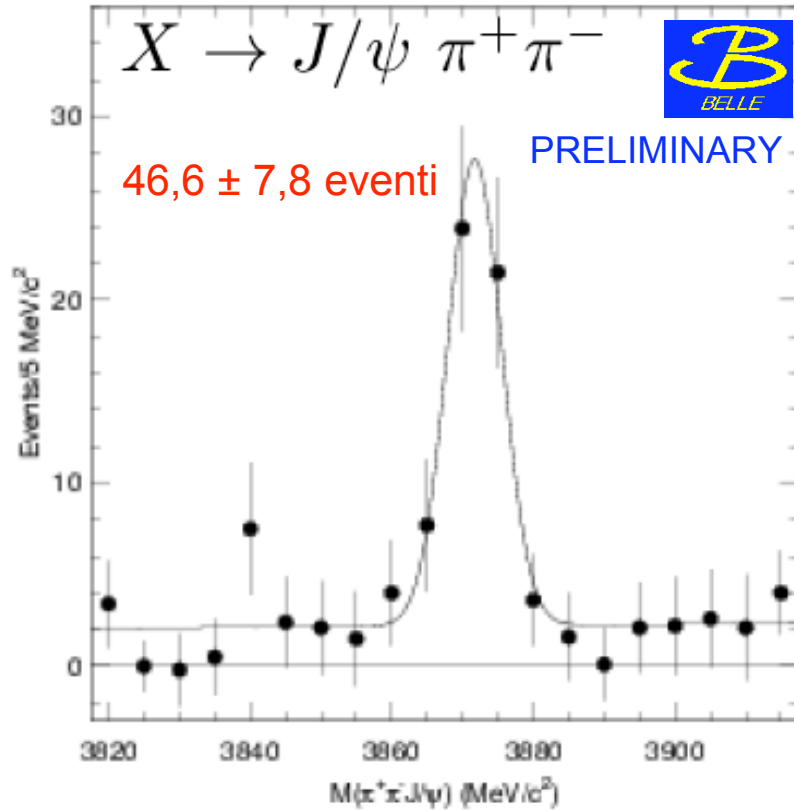
– predice $B^0 \rightarrow X(3872) K^0$ **soppresso** (oltre un ordine di grandezza) rispetto a $B^+ \rightarrow X(3872) K^+$

□ Diquark-antidiquark (L. Maiani et al., Phys. Rev. D 71 (2005), 014028):

– prevede 2 stati neutri ($X_u = [cu] [\bar{c}\bar{u}]$, $X_d = [cd] [\bar{c}\bar{d}]$) e due carichi ($X^+ = [cu] [\bar{c}\bar{d}]$, $X^- = [cd] [\bar{c}\bar{u}]$);

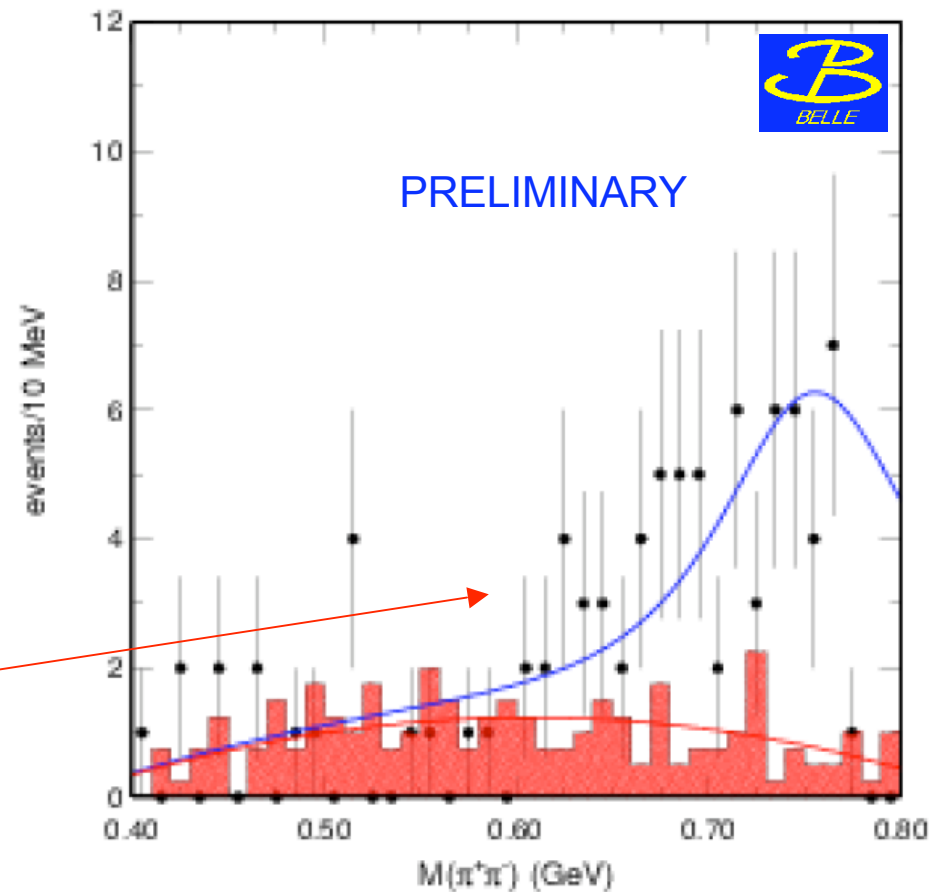
– gli autostati neutri di massa X_h , X_l osservabili sono in generale un mix di X_u e X_d : la differenza di massa è prevista $\Delta m(X^0) = m(X_h) - m(X_l) = (7 \pm 2) \text{ MeV} / \cos \theta$ (θ angolo di mixing)

Belle: update di $B^+ \rightarrow X(3872) K$



$$\mathcal{L} = 253 \text{ fb}^{-1}$$

$$m = (3872,4 \pm 0,7) \text{ MeV}/c^2$$



□ Distribuzione $m(\pi^+ \pi^-)$ sempre compatibile con ρ^0 ($C = +1$)

BABAR: ricerca di $X^+(3872)$

□ Se $X(3872) \rightarrow J/\psi \rho^0$ con isospin conservato $\Rightarrow X$ è isovettore:

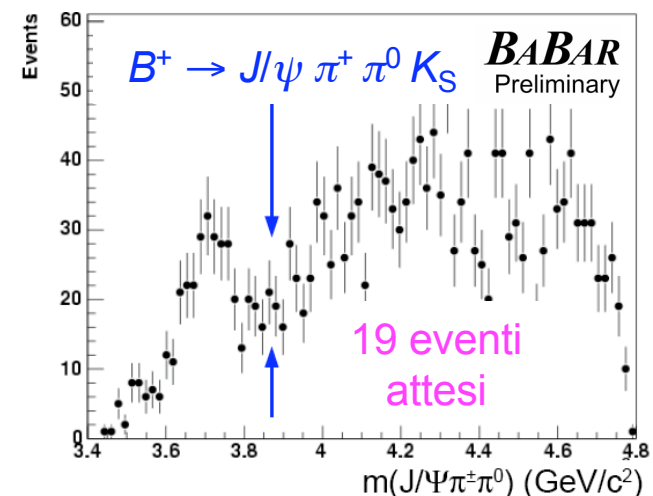
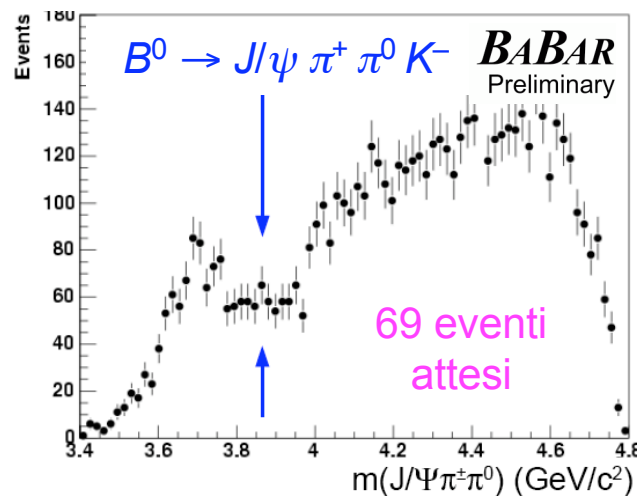
– se anche il decadimento del B conserva l'isospin:

$$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow X^+ K^-) = \mathcal{B}(B^+ \rightarrow X^+ K^0) = 2 \mathcal{B}(B^+ \rightarrow X^0 K^+)$$

□ Studio della massa invariante $J/\psi \pi^+ \pi^0$ in decadimenti ricostruiti

$B^0 \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^0 K^-$, $B^+ \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^0 K_S$

$\mathcal{L} = 210 \text{ fb}^{-1}$



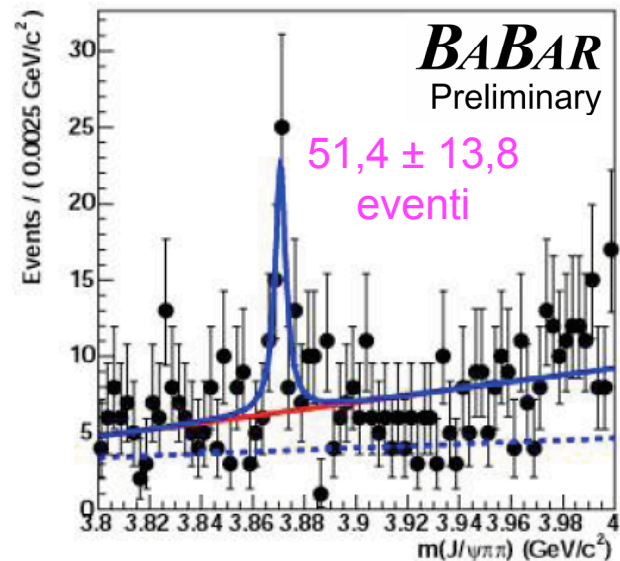
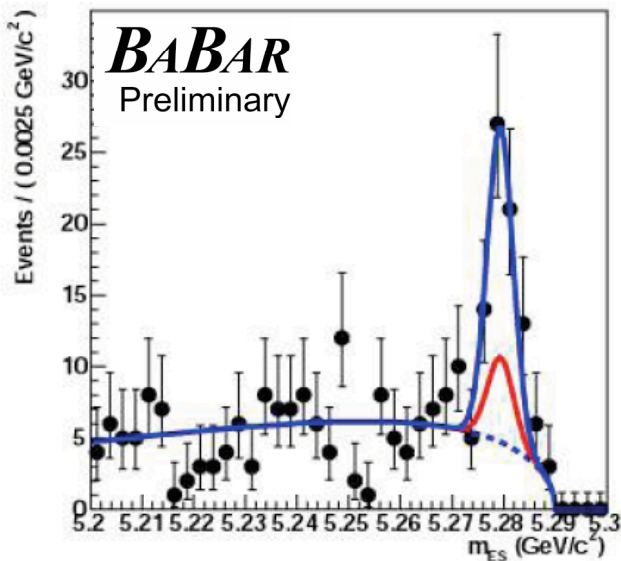
$$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow X^+ K^-) \times \mathcal{B}(X^+ \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^0) < 5,4 \times 10^{-6} \text{ (90\% C.L.)}$$

$$\mathcal{B}(B^+ \rightarrow X^+ K^0) \times \mathcal{B}(X^+ \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^0) < 22 \times 10^{-6} \text{ (90\% C.L.)}$$

\Rightarrow isovettore escluso con likelihood ratio 0,2%, 5,6% risp.

BABAR: update di $B^+ \rightarrow X(3872) K^+$

$$\mathcal{L} = 210 \text{ fb}^{-1}$$

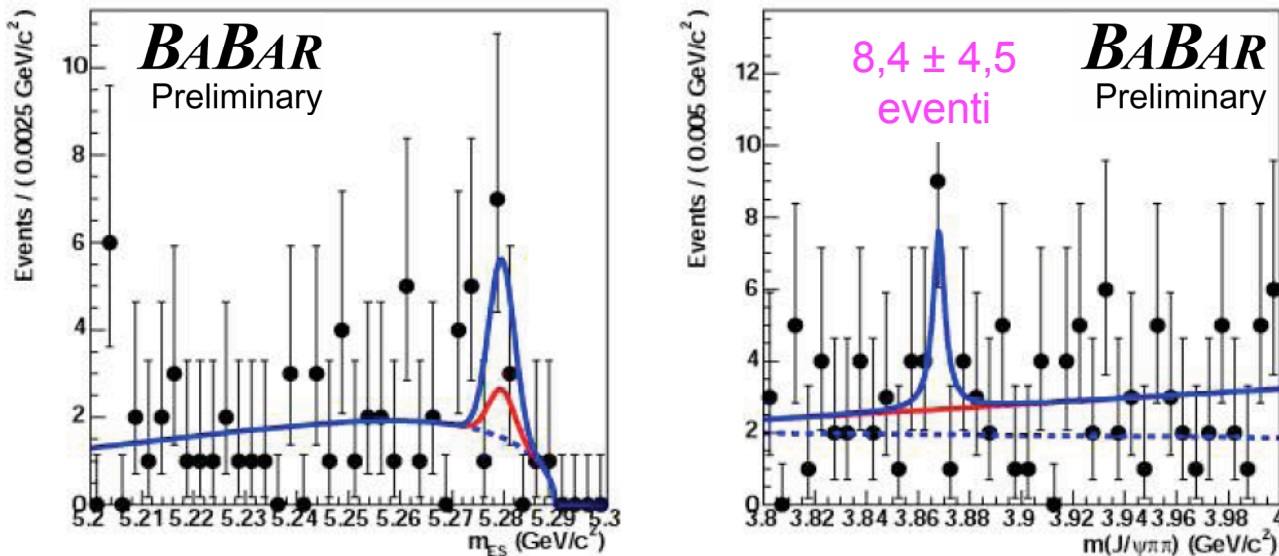


$$m = (3871,3 \pm 0,6 \pm 0,1) \text{ MeV}/c^2$$

$$\text{sign.: } 6,9 \sigma$$

BABAR: $B^0 \rightarrow X(3872) K_S$

$\mathcal{L} = 210 \text{ fb}^{-1}$



$$m = (3868,6 \pm 1,2 \pm 0,2) \text{ MeV}/c^2$$

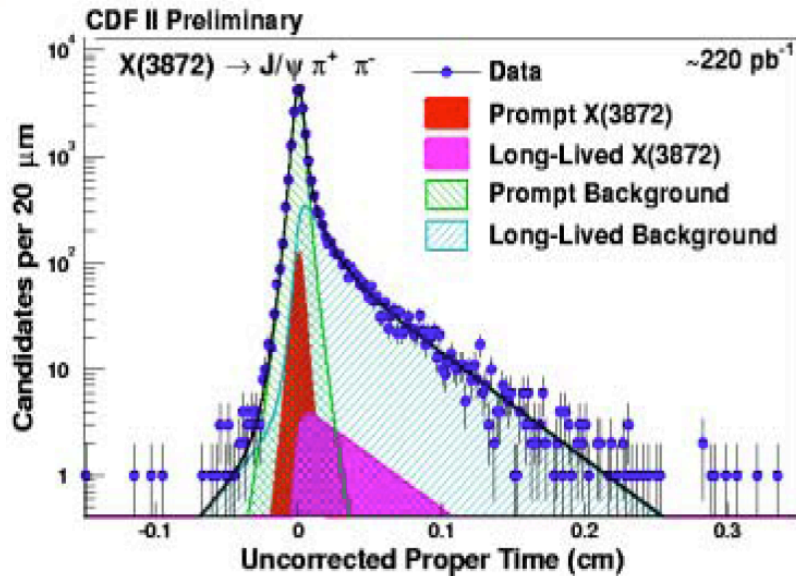
$$\Rightarrow \Delta m = (2,7 \pm 1,3 \pm 0,2) \text{ MeV}/c^2$$

$$\text{sign.: } 2,7 \sigma$$

$$\frac{\mathcal{B}(B^0 \rightarrow XK^0)}{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow XK^+)} = 0,61 \pm 0,36 \pm 0,07$$

\Rightarrow sfavoriti sia il modello a “molecola” che quello a tetraquark

Produzione $X(3872)$ in $p\bar{p}$

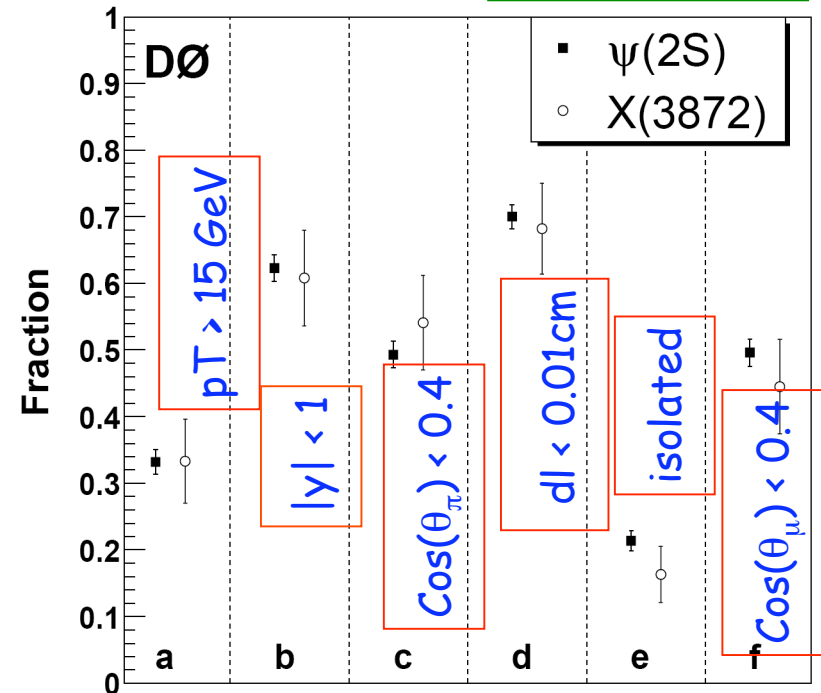


□ **CDF**: fit alla distribuzione del tempo di volo per candidati $X(3872)$: frazione di candidati a vita lunga (da decadimenti B)
 $f = (16,1 \pm 4,9 \pm 2,0)\%$
 (cfr. $\sim 28\%$ per $\psi(2S)$)

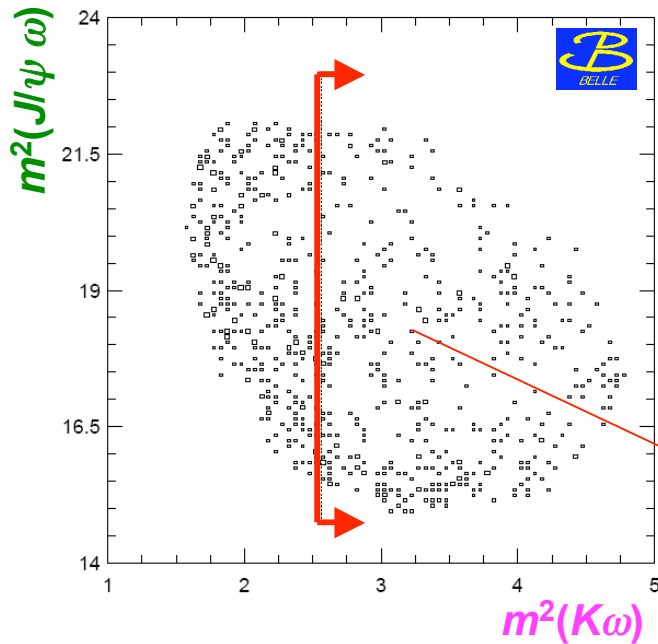
$\mathcal{L} = 230 \text{ pb}^{-1}$

□ **D0**: selezione candidati con diverse suddivisioni del campione (vertice di produzione, impulso trasverso, distribuzioni angolari, isolamento,...) e confronto con $\psi(2S)$

□ \Rightarrow proprietà di produzione molto simili a quelle della $\psi(2S)$



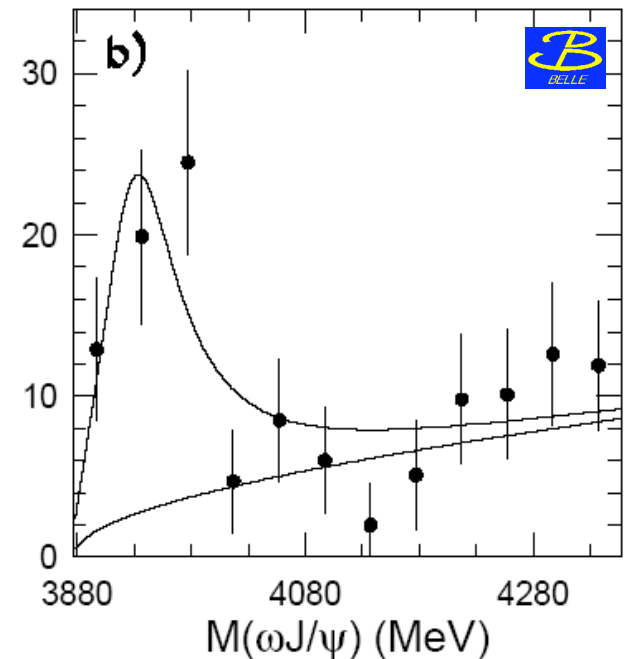
Belle: un nuovo stato che decade in $J/\psi \omega$?



- Ricostruzione $B \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^- \pi^0 K$
- Eventi selezionati nella regione $m(\pi^+ \pi^- \pi^0) \sim m(\omega)$
- Dalitz plot $m^2(J/\psi \omega)$ vs. $m^2(K\omega)$:
 - concentrazione a bassi $m^2(K\omega)$;
 - taglio $m(K\omega) > 1,6$ GeV per escludere $B \rightarrow J/\psi K^{**}$

□ Distribuzione $m(J/\psi \omega)$ dopo sottrazione fondo combinatorio:

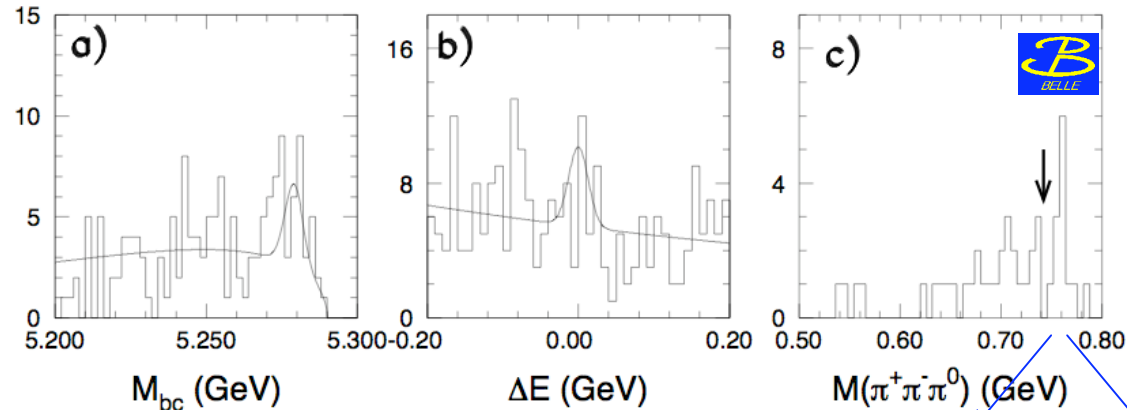
- eccesso di eventi in soglia, non compatibile con $B \rightarrow J/\psi \omega K$ “phase-space”;
- fit con B-W onda S: $N = 61 \pm 11$ (sign. $>8\sigma$);
 $m = (3941 \pm 11) \text{ MeV}/c^2$; $\Gamma_\gamma = (92 \pm 24) \text{ MeV}$



Belle: $X(3872) \rightarrow J/\psi \omega$?

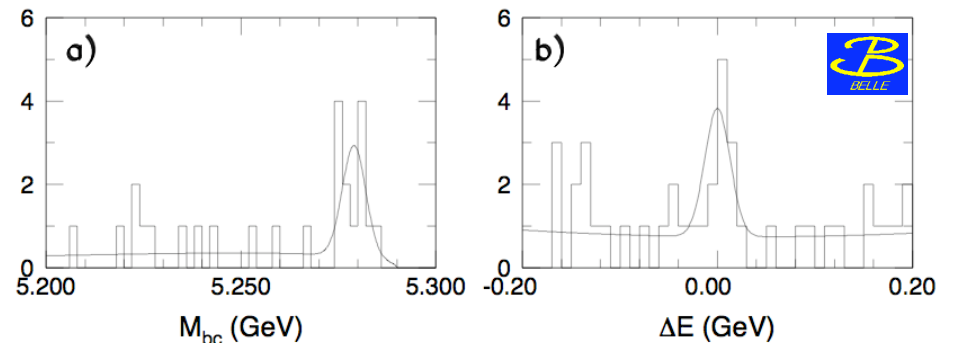
□ Eventi selezionati entro 2σ ($12 \text{ MeV}/c^2$) da $3872 \text{ MeV}/c^2$ suggeriscono un segnale di B :

– taglio a $m(\pi^+\pi^-\pi^0) > 750 \text{ MeV}/c^2 \Rightarrow$ segnale più pulito: il fit dà 10.0 ± 3.6 eventi (5.8σ)



□ Assumendo che tutto il segnale sia ω (e $X(3872)$):

$$\frac{\Gamma(X \rightarrow J/\psi \omega)}{\Gamma(X \rightarrow J/\psi \pi^+\pi^-)} = 0,8 \pm 0,3 \pm 0,1$$



Belle: $e^+e^- \rightarrow J/\psi c\bar{c}$

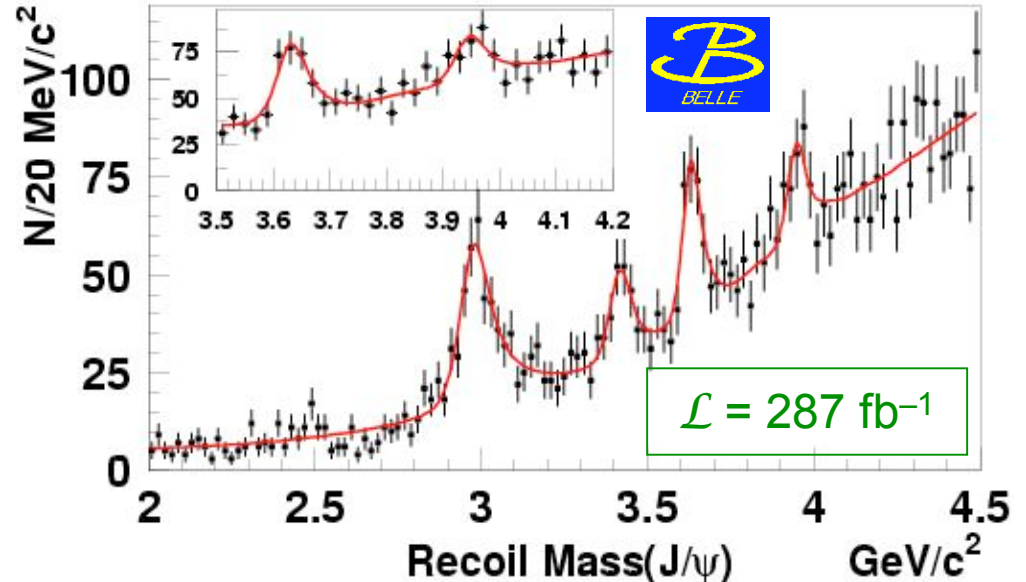
- Studio della massa mancante in eventi $e^+e^- \rightarrow J/\psi X$ con la J/ψ ricostruita in l^+l^- :

$$m_{\text{recoil}} = \sqrt{(\sqrt{s} - E_{J/\psi}^*)^2 - p_{J/\psi}^{*2}}$$

- Picchi osservati in corrispondenza di η_c , χ_{c0} , $\eta_c(2S)$, con sezioni d'urto sorprendentemente grandi ($\sim 5 - 25 \text{ fb}$)
 - solo stati $C = +1 \Rightarrow$ produzione esclusivamente via $e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow J/\psi X$?

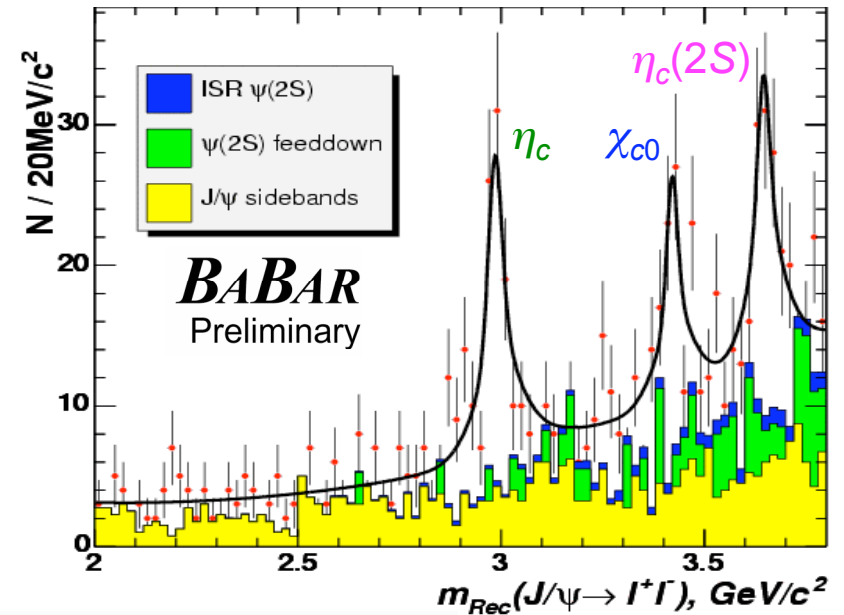
- Aggiornamento con parte alta dello spettro (3,8 - 4,5 GeV/c^2):

- nessuna evidenza della $X(3872)$ sul rinculo;
- nuovo picco:
 - $m_\gamma = (3940 \pm 11) \text{ MeV}/c^2$;
 - $N_\gamma = 148 \pm 33$ (sign. $4,5 \sigma$);
 - larghezza compatibile con risoluzione sperimentale



BABAR: $e^+e^- \rightarrow J/\psi c\bar{c}$

- Analisi analoga a quella di Belle
 - evidenti picchi di η_c , χ_{c0} , $\eta_c(2S)$
- Confronto con Belle e previsioni teoriche:
 - buon accordo con Belle tranne per η_c ;
 - previsioni teoriche troppo basse



$\mathcal{L} = 124 \text{ fb}^{-1}$

$J/\psi c\bar{c}$	η_c	χ_{c0}	$\eta_c(2S)$
Nevt, BaBar (124.4 fb^{-1})	127 ± 20	81 ± 16	121 ± 20
Nevt, Belle (155 fb^{-1})	235 ± 26	89 ± 24	164 ± 30
$\sigma_{Born} \times \mathcal{B}_{>2}$, BaBar	$17.6 \pm 2.8 \pm 2.1$	$10.3 \pm 2.5 \pm 1.8$	$16.4 \pm 3.7 \pm 3.0$
$\sigma_{Born} \times \mathcal{B}_{>2}$, Belle	$25.6 \pm 2.8 \pm 3.4$	$6.4 \pm 1.7 \pm 1.0$	$16.5 \pm 3.0 \pm 2.4$
NRQCD by Braaten and Lee [5]	2.31 ± 1.09	2.28 ± 1.03	0.96 ± 0.45
NRQCD by Liu, He and Chao [6]	5.5	6.9	3.7

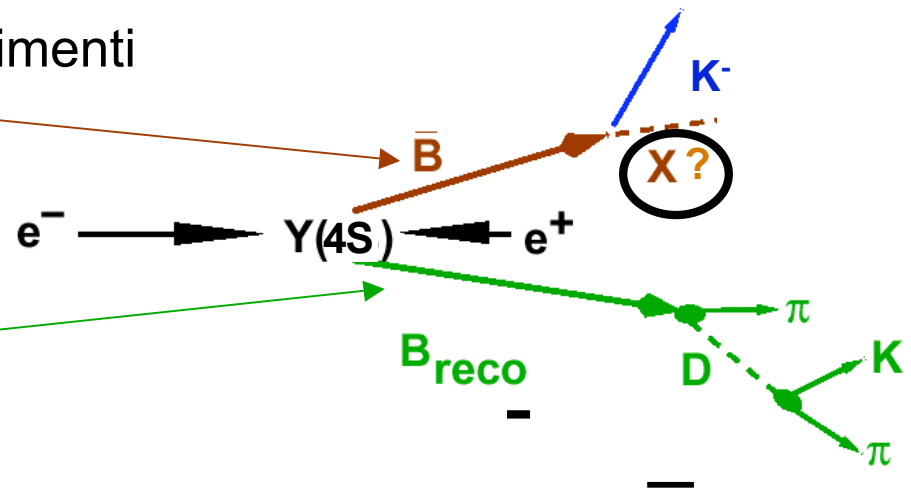
Produzione di charmonio in $B \rightarrow (c\bar{c}) K$

□ La produzione di charmonio in decadimenti $B \rightarrow (c\bar{c}) K$ può essere studiata inclusivamente sul rinculo di B completamente ricostruiti a una B -factory:

- spettro di impulso del $K \Leftrightarrow$ spettro di massa del sistema adronico che rincula

□ Opportunità per effettuare diverse misure interessanti:

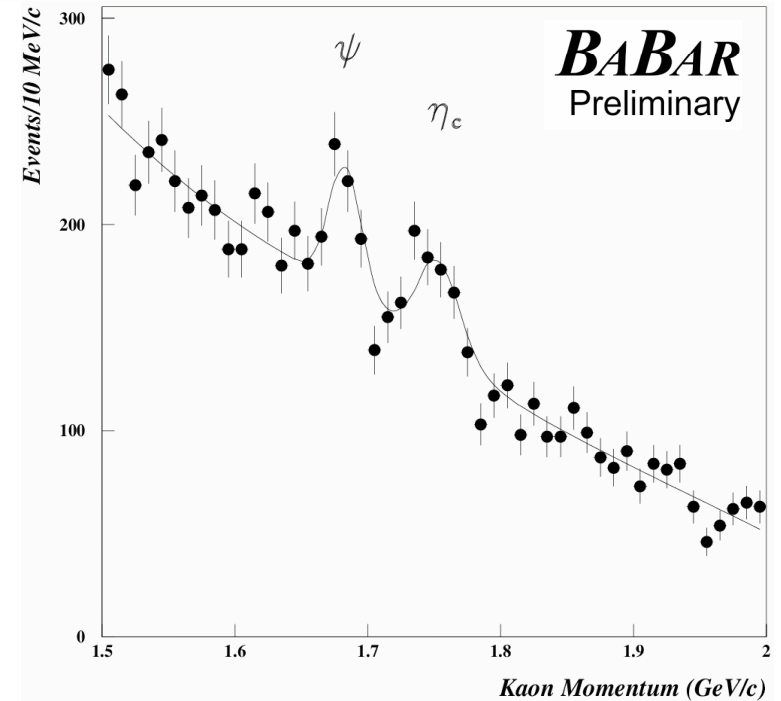
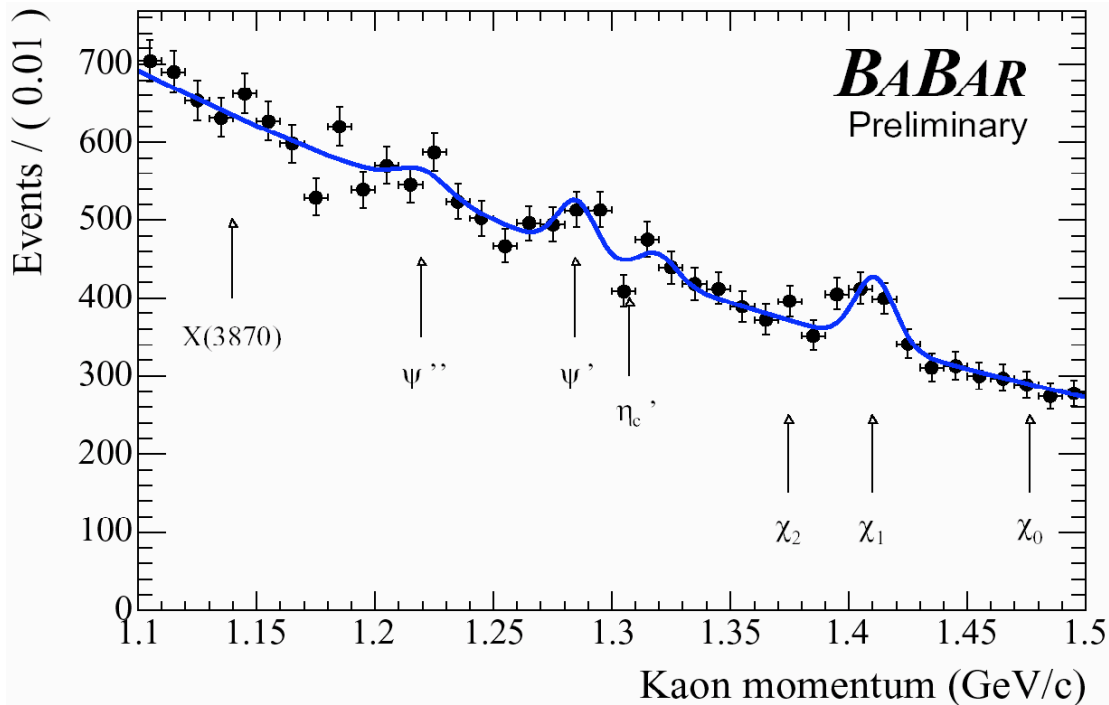
- rapporti di decadimento assoluti (indipendenti dai BR secondari);
- ricerca di decadimenti rari o di nuovi stati;
- misura di BR secondari attraverso la conoscenza di prodotti di BR



BABAR: studio inclusivo di $B^\pm \rightarrow (c\bar{c}) K^\pm$ (I)

- Discriminazione fondo continuo con variabili di forma dell'evento
- Selezione K "isolati"

$\mathcal{L} = 244 \text{ fb}^{-1}$



- Segnali evidenti per η_c , J/ψ , χ_{c1} , $\psi(2S)$

BABAR: studio inclusivo di $B^\pm \rightarrow (c\bar{c}) K^\pm$ (II)

Risultati fit (preliminari)

Particle	BR (10^{-4})	BR(PDG2004)	BR(BABAR)
η_c	8.9 ± 1.5	9.0 ± 2.7	13.4 ± 4.4
J/ψ	8.1 ± 1.6	10.0 ± 0.4	10.6 ± 0.5
χ_{c0}	< 1.8	$6 \pm 2.4 \pm 2.1$	2.7 ± 0.7
χ_{c1}	7.0 ± 1.6	6.8 ± 1.2	5.8 ± 0.7
χ_{c2}	< 2	No entry	< 0.3
$\eta_c(2S)$	3.1 ± 1.5	No entry	
ψ'	4.2 ± 1.4	6.8 ± 0.4	6.2 ± 0.5
ψ''	3.2 ± 2.3	No entry	
X(3872)	< 3.2	No entry	

□ Limite superiore per $B^\pm \rightarrow X(3872) K^\pm \Rightarrow$ limite inferiore per $X(3872) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$:

$$\mathcal{B}(X(3872) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-) > 4,3\% \text{ (90\% C.L.)}$$

□ Possibile migliorare precisione su $\mathcal{B}(\eta_c \rightarrow K K \pi)$, $\mathcal{B}(J/\psi \rightarrow \eta_c \gamma)$,...

Conclusioni

- Lo studio della spettroscopia del charmomio è stato rivitalizzato in questi ultimi anni da una serie di risultati recenti:
 - nuove osservazioni di stati dello spettro in attesa di conferma: $\eta_c(2S)$, h_c ;
 - scoperta di nuovi stati: X(3872), Y(3940);
 - nuove misure dei parametri delle risonanze: η_c , $\eta_c(2S)$
- Nuove interessanti misure anche in produzione:
 - produzione in decadimenti dei B ;
 - produzione in e^+e^- (doppio $c\bar{c}$), $\gamma\gamma$;
 - produzione in $p\bar{p}$
- Lo spettro sotto soglia di produzione charm aperto dovrebbe ora essere completo, ma:
 - proprietà di h_c , $\eta_c(2S)$ ($\eta_c\dots$) ancora poco note;
 - pochissime informazioni su stati sopra soglia (stati D stretti?)

Conclusioni (cont.)

□ Nuovi stati:

- cosa sono $X(3872)$, $Y(3940)$?
- ci sono ibridi $c\bar{c}g$?

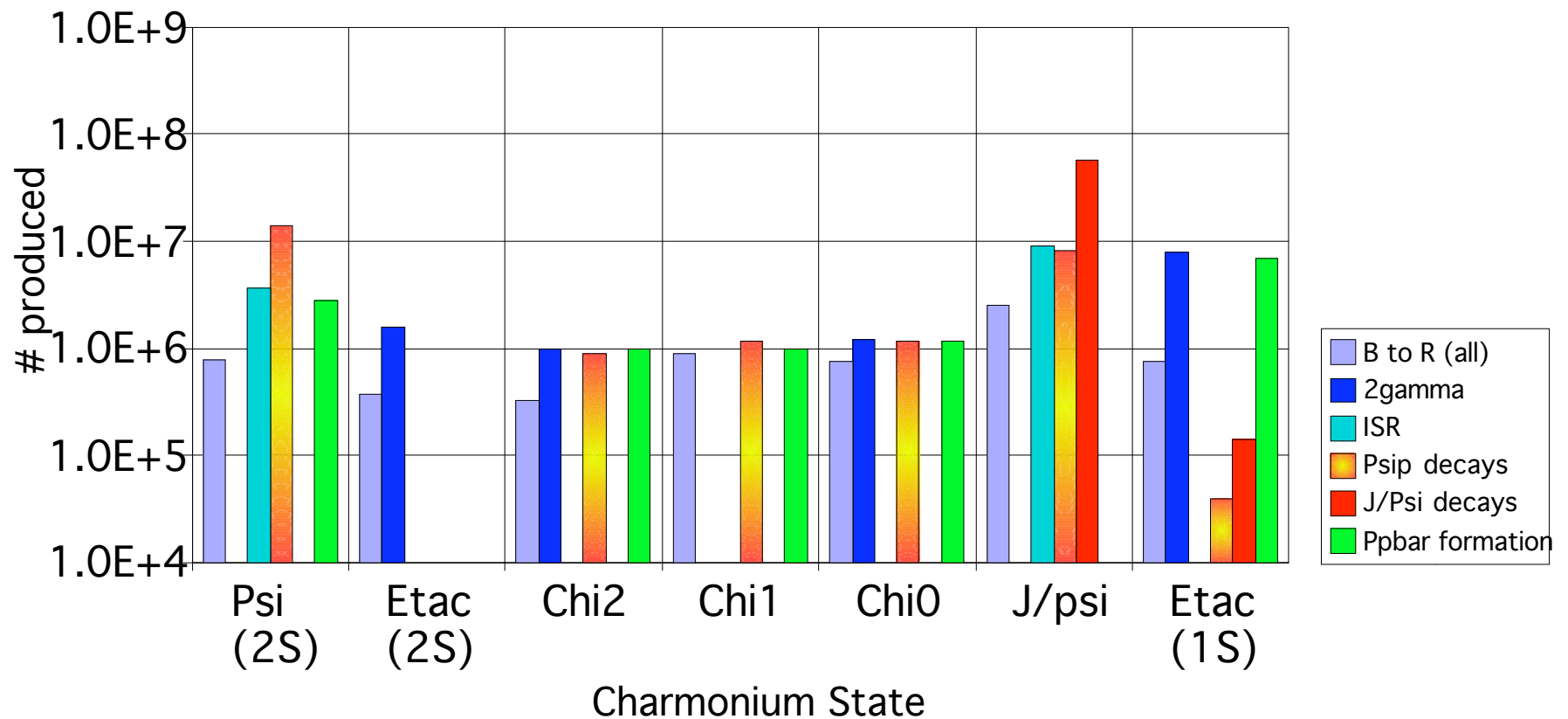
□ In prospettiva:

- futuro prossimo: ancora B -factories, CLEO-c, BES, Tevatron;
- più avanti: LHC, Panda, nuove τ -charm factories?

Back-up slides

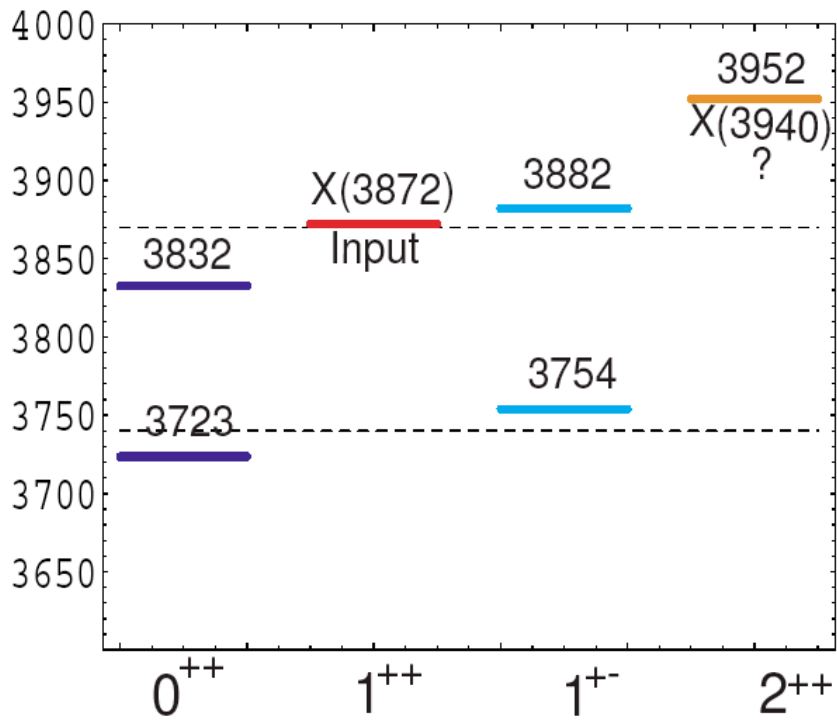
Campioni di dati

Charmonia record samples (2004)



Modello a tetraquark

Charmonio



D_s

