



UNIVERSITÀ  
DI TORINO

# Spettroscopia dei mesoni pesanti a Belle II

Incontri di Fisica alle Alte Energie

10 Aprile 2025, Cagliari

Federico Testa  
Università degli Studi di Torino



# Mesoni pesanti: ovvero quarkonio

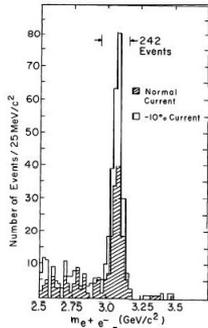
- **Cosa:** Stato legato di una coppia quark antiquark pesanti, per la precisione quark *charm* e *bottom*, poiché si ritiene che il quark *top* decada debolmente prima di formare uno stato legato
- **Come:** L'interazione può essere approssimata con un potenziale non relativistico, ma negli anni si sono aggiunti strumenti e modelli più avanzati (QCD su reticolo, teorie di campo efficaci, pNRQCD).
- **Perché:** Grazie alla presenza di stati molto stretti e di molteplici input sperimentali, la spettroscopia dei mesoni pesanti rappresenta oggi il campo ideale per lo studio della QCD a bassa energia

# Spettroscopia: charmonio

## Scoperta del mesone $J/\psi$ :

Scoperta del quark *charm*

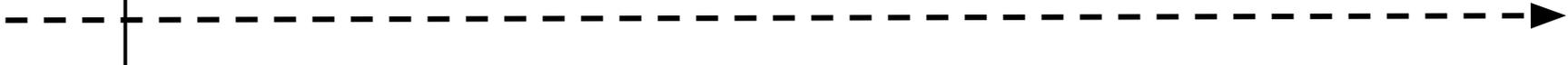
In seguito alla  $J/\psi$ , lo spettro del **charmonio** si è andato ad arricchire di numerosi altri stati



Scoperta del mesone  $J/\psi$   
11/11/1974

S. Navas et al. (Particle Data Group),  
Phys. Rev. D 110, 030001 (2024)

$n^{2s+1}\ell_J$	$J^{PC}$	$I = 0$ $c\bar{c}$	$I = \frac{1}{2}$ $c\bar{u}, c\bar{d};$ $\bar{c}u, \bar{c}d$	$I = 0$ $c\bar{s};$ $\bar{c}s$
$1^1S_0$	$0^{-+}$	$\eta_c(1S)$	$D$	$D_s^\pm$
$1^3S_1$	$1^{--}$	$J/\psi(1S)$	$D^*$	$D_s^{*\pm}$
$1^3P_0$	$0^{++}$	$\chi_{c0}(1P)$	$D_0^*(2300)^a$	$D_{s0}^*(2317)^{\pm b}$
$1^3P_1$	$1^{++}$	$\chi_{c1}(1P)$	$D_1(2430)^c$	$D_{s1}^*(2460)^{\pm b}$
$1^1P_1$	$1^{+-}$	$h_c(1P)$	$D_1(2420)$	$D_{s1}(2536)^\pm$
$1^3P_2$	$2^{++}$	$\chi_{c2}(1P)$	$D_2^*(2460)$	$D_{s2}^*(2573)^\pm$
$2^1S_0$	$0^{-+}$	$\eta_c(2S)$	$D_0(2550)^0$	$D_{s0}(2590)^+$
$2^3S_1$	$1^{--}$	$\psi(2S)$	$D_1^*(2600)^0$	$D_{s1}^*(2700)^{\pm d}$
$1^3D_1$	$1^{--}$	$\psi(3770)$	$D_1^*(2760)^0$	$D_{s1}^*(2860)^{\pm d}$
$1^3D_2$	$2^{--}$	$\psi_2(3823)$	$D_2(2740)^0$	
$2^3P_J$	$0^{++}$	$\chi_{c0}(3860)$		
	$2^{++}$	$\chi_{c2}(3930)$		
$3^3S_1$	$1^{--}$	$\psi(4040)$		
$2^3D_1$	$1^{--}$	$\psi(4160)$		
$4^3S_1$	$1^{--}$	$\psi(4415)$		
$1^3D_3$	$3^{--}$	$\psi_3(3842)$	$D_3^*(2750)$	$D_{s3}^*(2860)^\pm$

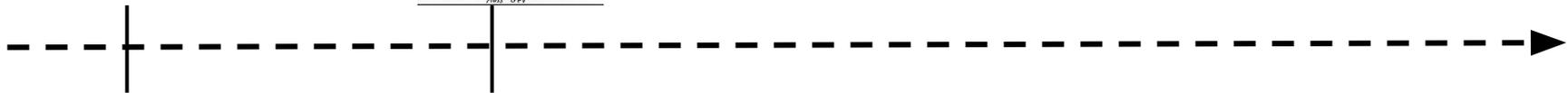
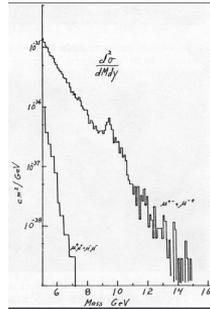
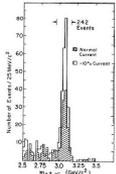


# Spettroscopia: bottomonio

## Scoperta del mesone $\Upsilon(1S)$ :

Scoperta del quark *bottom*, attraverso l'analogo della  $J/\psi$  nel settore del  $b$ .

Negli anni a seguire lo spettro si popola di stati con caratteristiche simili al charmonio



Scoperta del mesone  $J/\psi$   
11/11/1974

Scoperta dell'  $\Upsilon(1S)$  (1977)

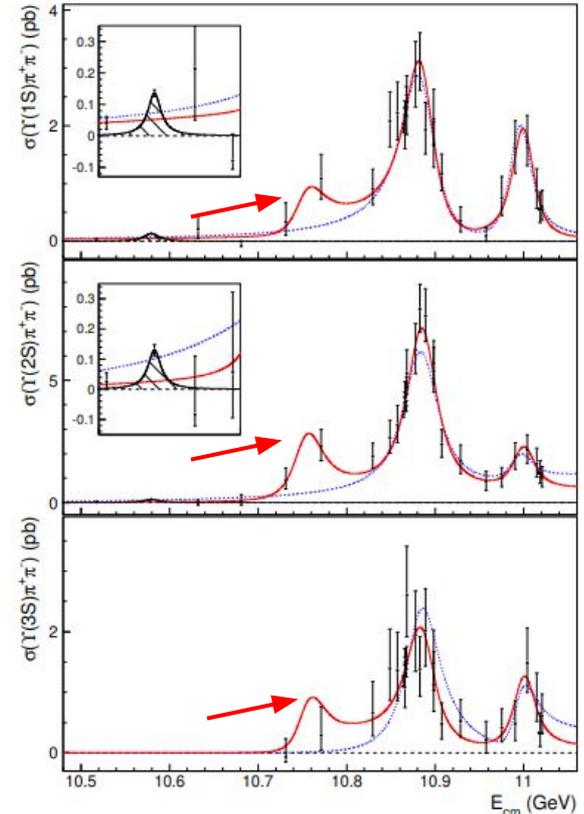
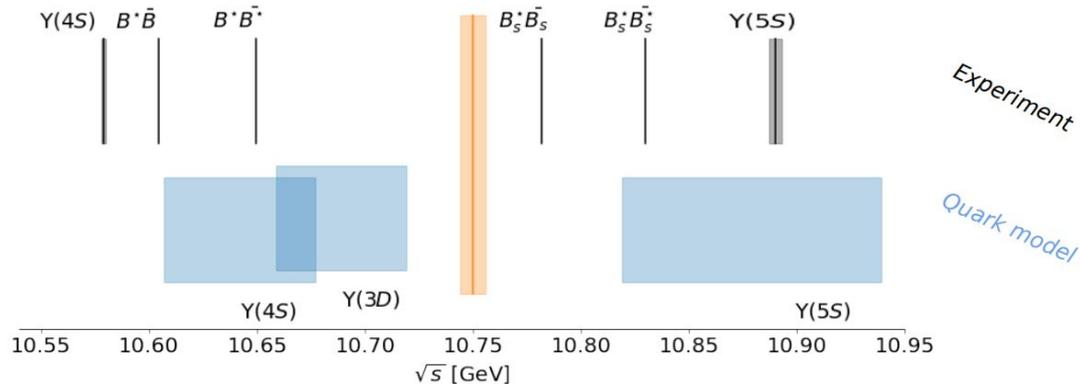
S. Navas et al. (Particle Data Group),  
Phys. Rev. D 110, 030001 (2024)

$n^2s+1\ell_J$	$J^{PC}$	$l = 0$ $b\bar{b}$	$l = \frac{1}{2}$ $b\bar{u}, b\bar{d};$ $\bar{b}u, \bar{b}d$	$l = 0$ $b\bar{s};$ $\bar{b}s$	$l = 0$ $b\bar{c};$ $\bar{b}c$
$1^1S_0$	$0^{-+}$	$\eta_b(1S)$	$B$	$B_s^0$	$B_c^\pm$
$1^3S_1$	$1^{--}$	$\Upsilon(1S)$	$B^*$	$B_s^*$	
$1^3P_0$	$0^{++}$	$\chi_{b0}(1P)$			
$1^3P_1$	$1^{++}$	$\chi_{b1}(1P)$			
$1^1P_1$	$1^{+-}$	$h_b(1P)$	$B_1(5721)$	$B_{s1}(5830)^0$	
$1^3P_2$	$2^{++}$	$\chi_{b2}(1P)$	$B_2^*(5747)$	$B_{s2}^*(5840)^0$	
$2^1S_0$	$0^{-+}$	$\eta_b(2S)$			$B_c(2S)^\pm$
$2^3S_1$	$1^{--}$	$\Upsilon(2S)$			
$1^3D_2$	$2^{--}$	$\Upsilon_2(1D)$			
$2^3P_J$	$0, 1, 2^{++}$	$\chi_{b0,1,2}(2P)$			
$2^1P_1$	$1^{+-}$	$h_b(2P)$			
$3^3S_1$	$1^{--}$	$\Upsilon(3S)$			
$3^3P_J$	$0, 1, 2^{++}$	$\chi_{b1,2}(3P)$			
$4^3S_1$	$1^{--}$	$\Upsilon(4S)$			

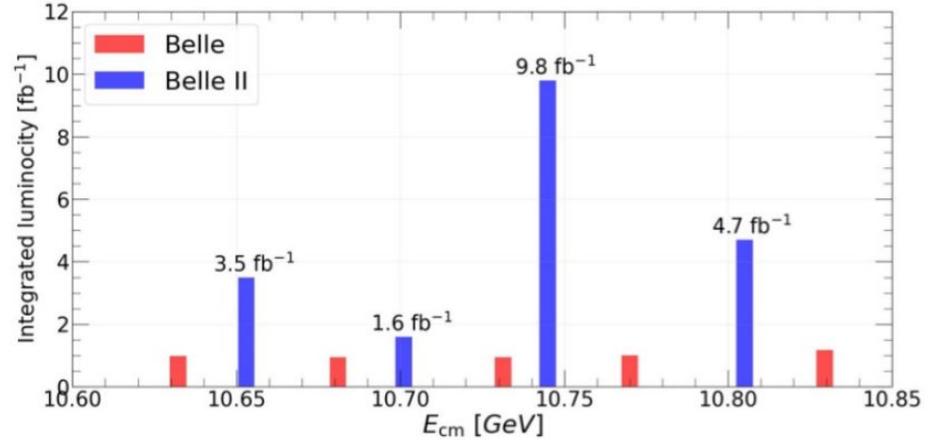
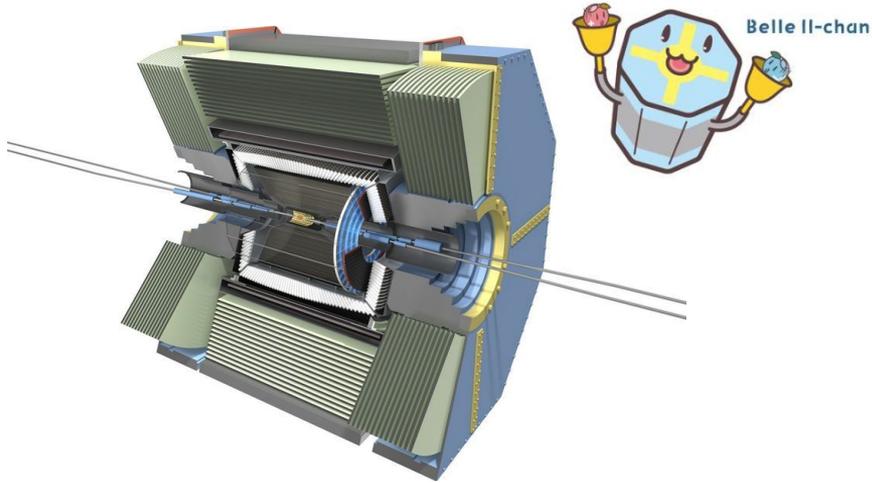


# Scoperta dell' $\Upsilon(10753)$ a Belle

- Misura della sezione d'urto  $e^+e^- \rightarrow \pi\pi \Upsilon(1,2,3 S)$ :
  - Risonanza intorno a 10.75 GeV
- Prodotto in collisione  $e^+e^-$ : numeri quantici  $J^{PC} 1^{--}$
- Nessun quarkonio convenzionale a questa massa



# $\Upsilon(10753)$ a Belle II



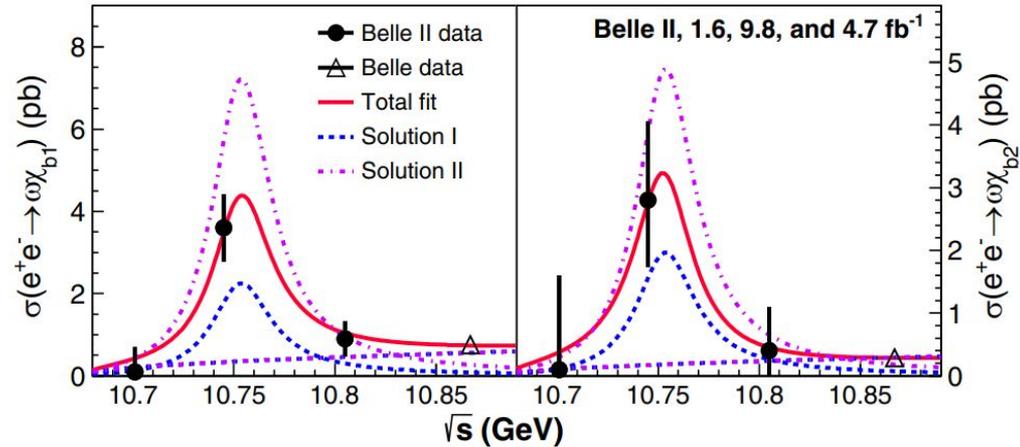
- Installato a **SuperKEKB**, in Tsukuba (JP)
  - Collisore  $e^+e^-$  all'energia dell'  $\Upsilon(4S)$
- Spettrometro a  $4\pi$

Presi dati nel 2021 per studiare la regione intorno all' $\Upsilon(10753)$ , con l'obiettivo di comprendere la natura di questo stato

[PRL 130, 091902 (2023)]

## $Y(10753) \rightarrow \omega \chi_{bj}(1P)$

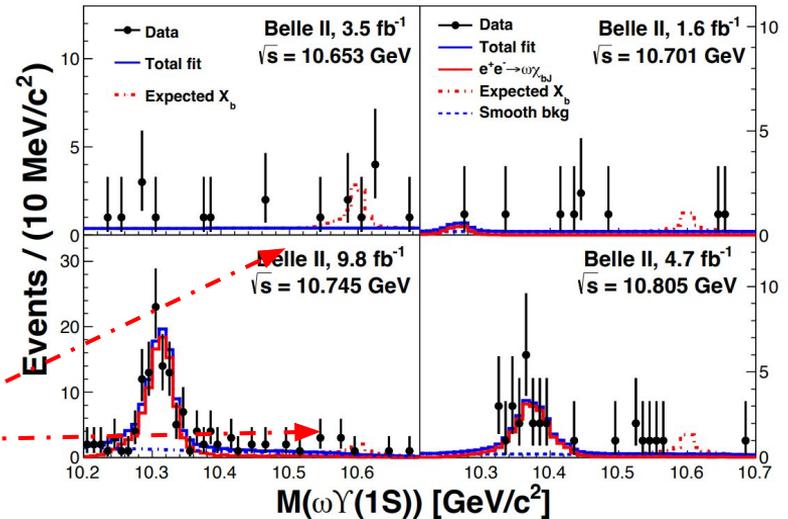
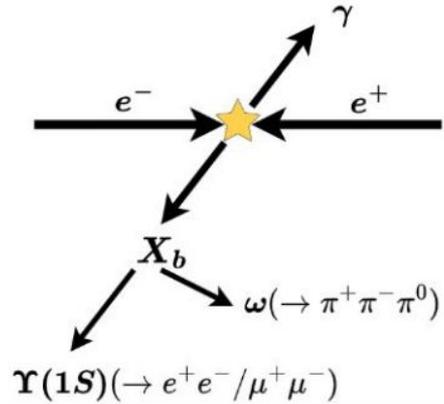
- Ricostruzione esclusiva degli stati finali
- $\sigma(\omega\chi_{b1})/\sigma(\omega\chi_{b2}) = 1.3 \pm 0.6$ :  
lieve tensione con l'ipotesi di una miscela 4S-3D ( $1.8\sigma$ )  
[\[PRD 104 034036 \(2021\)\]](#)
- Rapporto tra il rateo di produzione di  $\omega\chi_{b1}$  e  $\pi^+\pi^-Y(nS)$  significativamente maggiore rispetto alla  $Y(5S)$



**Ulteriore conferma di uno stato legato a 10.75 GeV, con struttura significativamente diversa rispetto all' $Y(5S)$**

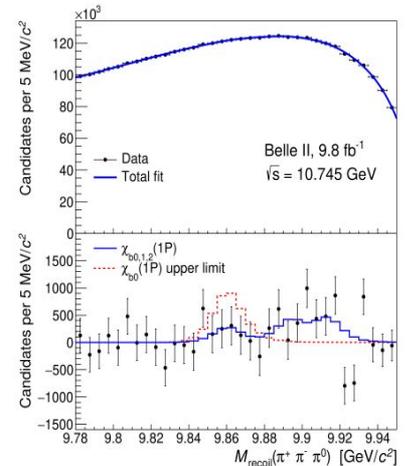
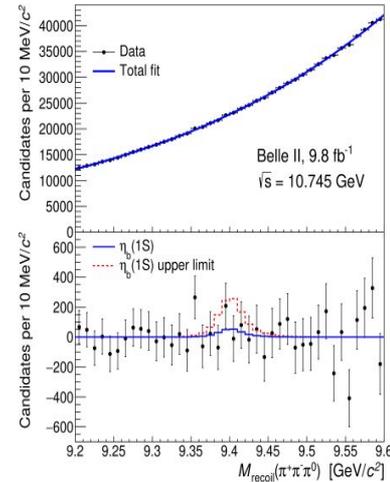
# Ricerca della $X_b$ [PRL 130, 091902 (2023)]

- Ricerca dell'analogo della X(3872) nel bottomonio
- Stesso stato finale di  $Y(10753) \rightarrow \omega \chi_{bj}(1P)$
- Diverse predizioni di massa a seconda del modello:
  - $10 < M(X_b) < 11 \text{ GeV}/c^2$  (**Tetraquark**)
  - $M(X_b)$  vicino a soglia  $B\bar{B}^*$  (**Molecola**)
- Segnale cercato intorno a 10.6 GeV:  
**nessuna evidenza**



# $Y(10753) \rightarrow \omega \chi_{b0}(1P), \omega \eta_b(1S)$ [PRD 109, 072013 (2024)]

- Verificare un modello a tetraquark\* come interpretazione dell'  $Y(10753)$
- Nessun segnale nella distribuzione della massa di rinculo dei pioni dell'omega:
  - Limiti superiori alla sezione d'urto

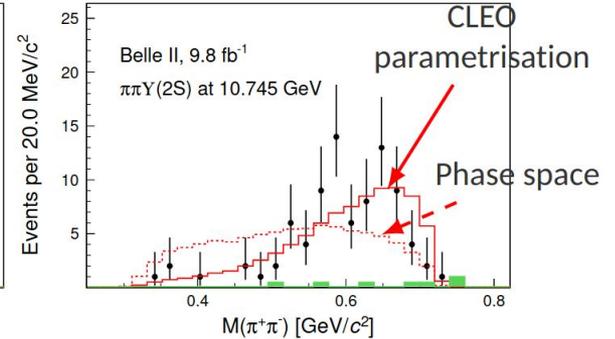
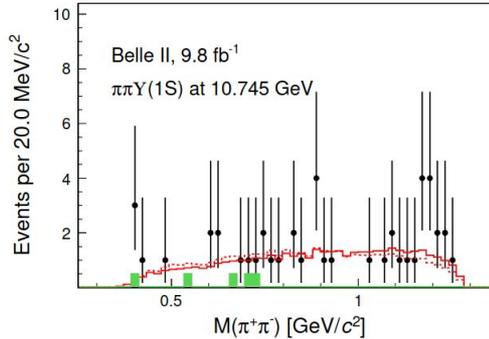
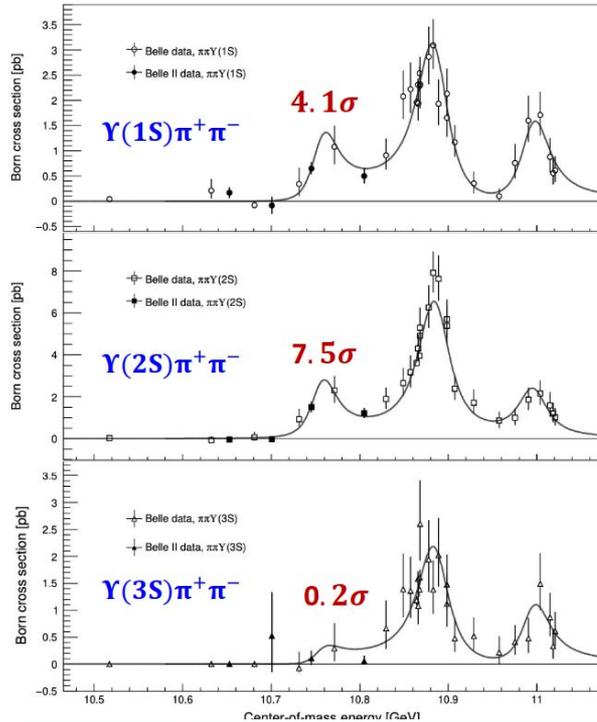


**Limite superiore sul rapporto  $\sigma(\omega\eta_b(1S))/\sigma(\pi\pi Y(1S))$  favorisce una miscela S-D\*\* rispetto al modello a tetraquark\***

\* [CPC 43 (2019) 12, 123102]

\*\* [PRD 104 034036 (2021)]

# $\Upsilon(10753) \rightarrow \pi\pi\Upsilon(nS)$ a Belle II [JHEP 07, (2024)116]



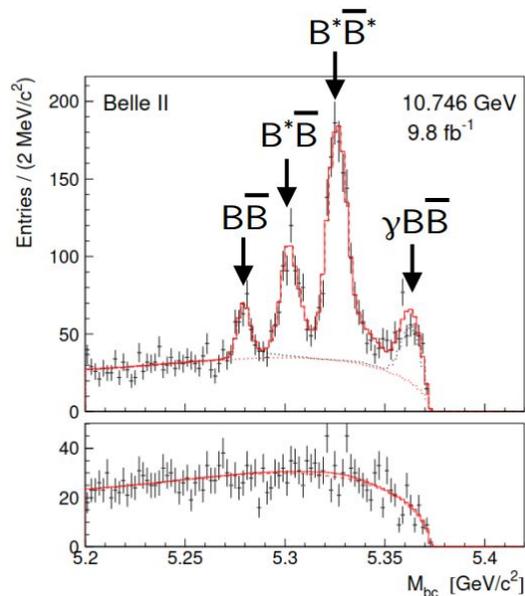
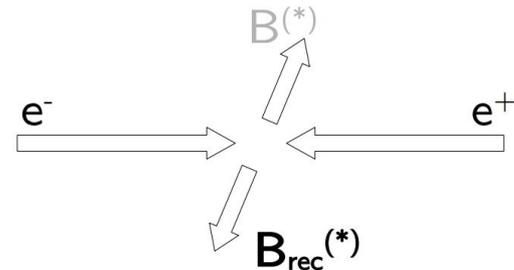
$\Upsilon(1S)$ : distribuzione di  $M(\pi\pi)$  consistente con phase space  
 $\Upsilon(2S)$ : alti valori di  $M(\pi\pi)$  più probabili (come in  $\Upsilon(2S) \rightarrow \pi\pi\Upsilon(1S)$ )  
 Nessun segnale di risonanze  $Z_b$  intermedie

Mass	$(10756.6 \pm 2.7 \pm 0.9) \text{ MeV}/c^2$
Width	$(29.0 \pm 8.8 \pm 1.2) \text{ MeV}$

$$e^+e^- \rightarrow B\bar{B} + B\bar{B}^* + B^*\bar{B}^* \quad [\text{JHEP } 10, (2024)114]$$

- Studio del bottomonio intorno alle soglie open flavour
- Ricostruzione inclusiva di uno dei due candidati B per evento
- Estrazione del segnale tramite un fit alla  $M_{bc}$

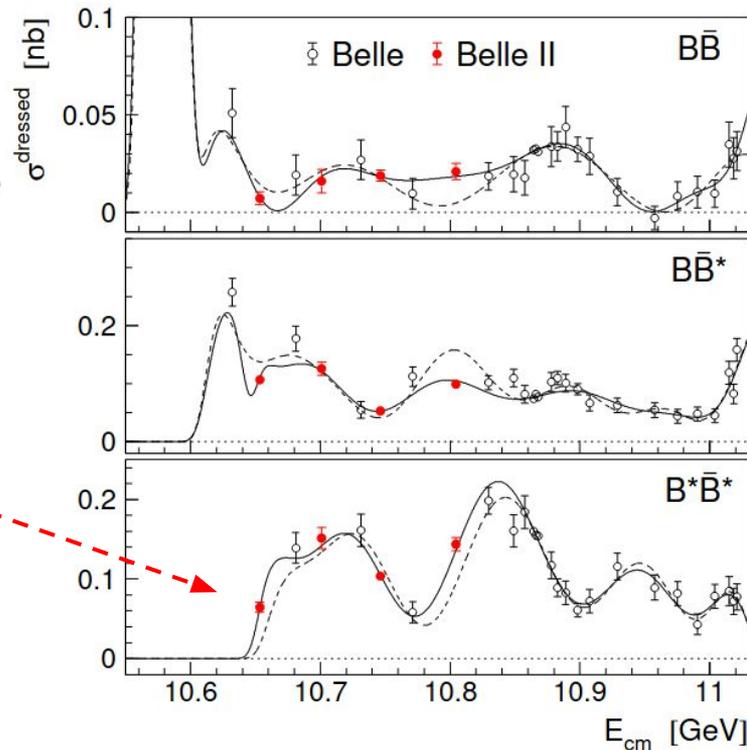
$$M_{bc} = \sqrt{(E_{cm}/2)^2 - (p_B)^2}$$



$$e^+e^- \rightarrow B\bar{B} + B\bar{B}^* + B^*\bar{B}^* \quad [\text{JHEP } 10, (2024)114]$$

- Risultati in accordo con Belle
- Nuovi input per fit simultanei della sezione d'urto molteplici canali

**Ripida salita alla soglia  $B^*\bar{B}^*$ :  
possibile stato legato molecolare**



# Per riassumere...

- $Y(10753) \rightarrow \omega \chi_{bj}(1P)$  :
  - Differenza nella struttura interna tra 10.750 e  $Y(5S)$
- $Y(10753) \rightarrow \omega \chi_{b0}(1P), \omega \eta_b(1S)$ :
  - Interpretazione tetraquark sfavorita
- $Y(10753) \rightarrow \pi\pi Y(nS)$ :
  - La distribuzione di  $M(\pi\pi)$  può essere usata per testare vari modelli
- $e^+e^- \rightarrow B\bar{B} + B\bar{B}^* + B^*\bar{B}^*$ :
  - Possibili segnali di uno stato legato alla soglia  $B^*\bar{B}^*$

# Backup

# Belle II

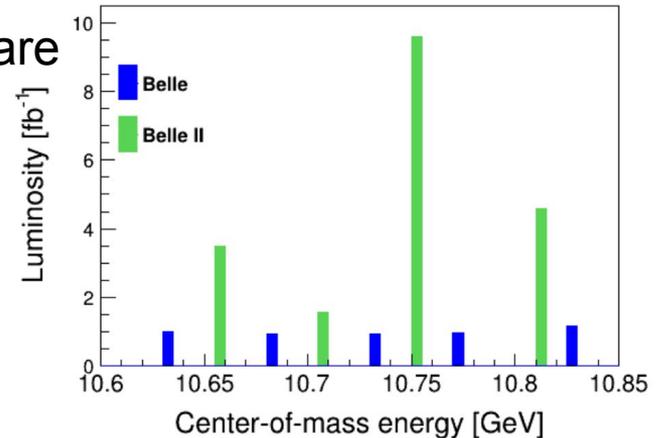
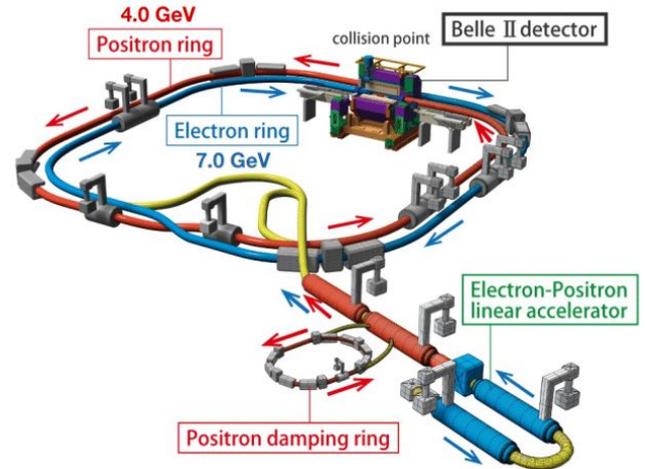
## Belle II:

B-factory Installato a SuperKEKB (Tsukuba, JP):  
Collisore asimmetrico  $e^+e^- \sqrt{s} \sim 10.6$  GeV, regione ideale per studiare lo spettro del bottomonio  
Spettrometro a  $4\pi$ : tracciamento, PID, calorimetria

## Novembre 2021:

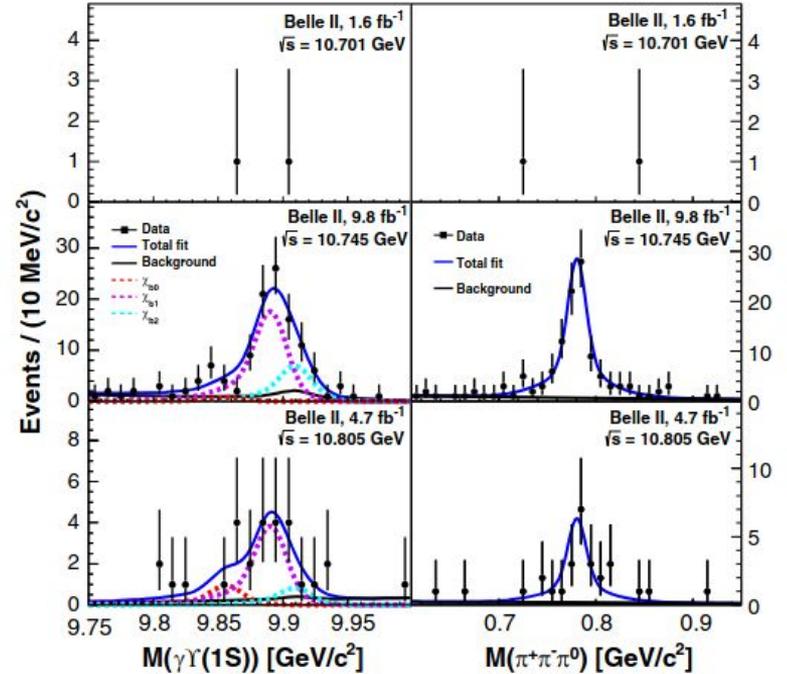
viene raccolto un nuovo dataset in grado di esplorare la regione di massa attorno alla  $Y(10753)$

Molteplici canali studiati per indagare la natura dell' $Y(1053)$  ed esplorare lo spettro di esotici nel bottomonio

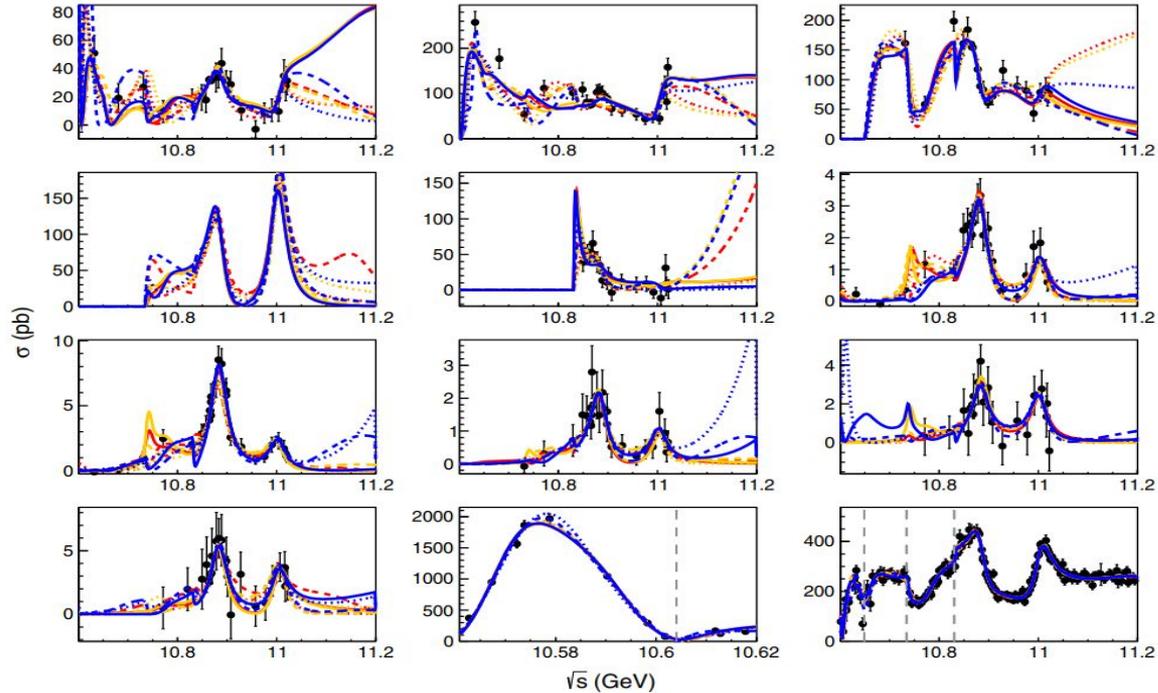


# $Y(10753) \rightarrow \omega \chi_{bj}(1P)$

- Verificare l'interpretazione della  $Y(10753)$  come una miscela 4S-3D [*PRD 104 034036 (2021)*]
- Ricostruzione esclusiva degli stati finali:
  - $\omega \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^0$
  - $\chi_{bj} \rightarrow \gamma Y(1S) (\rightarrow e^+ e^- / \mu^+ \mu^-)$



# Coupled channel analysis [Hüsken et al. PRD 106 094013 (2022)]



# Conclusioni

La presa dati di Belle II oltre la  $Y(4S)$  ha già mostrato i suoi frutti, grazie ad analisi che hanno esplorato svariati canali di decadimento dell'  $Y(10753)$ ...

... ma ci sono ancora diversi canali che possono essere esplorati in questa regione di energia, come ad esempio  $\pi\pi h_b(1P)$ ,  $\eta h_b(1P)$ ,  $\eta Y(1D)$ !