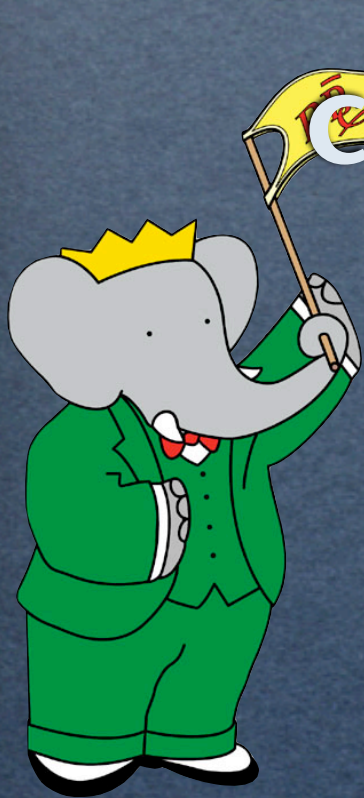


Evidenza di uno stato legato esotico contenente coppie di quark charm-anticharm con l'esperimento BaBar

Esame di Fisica Nucleare e Subnucleare 2



professore:
Riccardo Faccini

studente:
Carlo Mancini

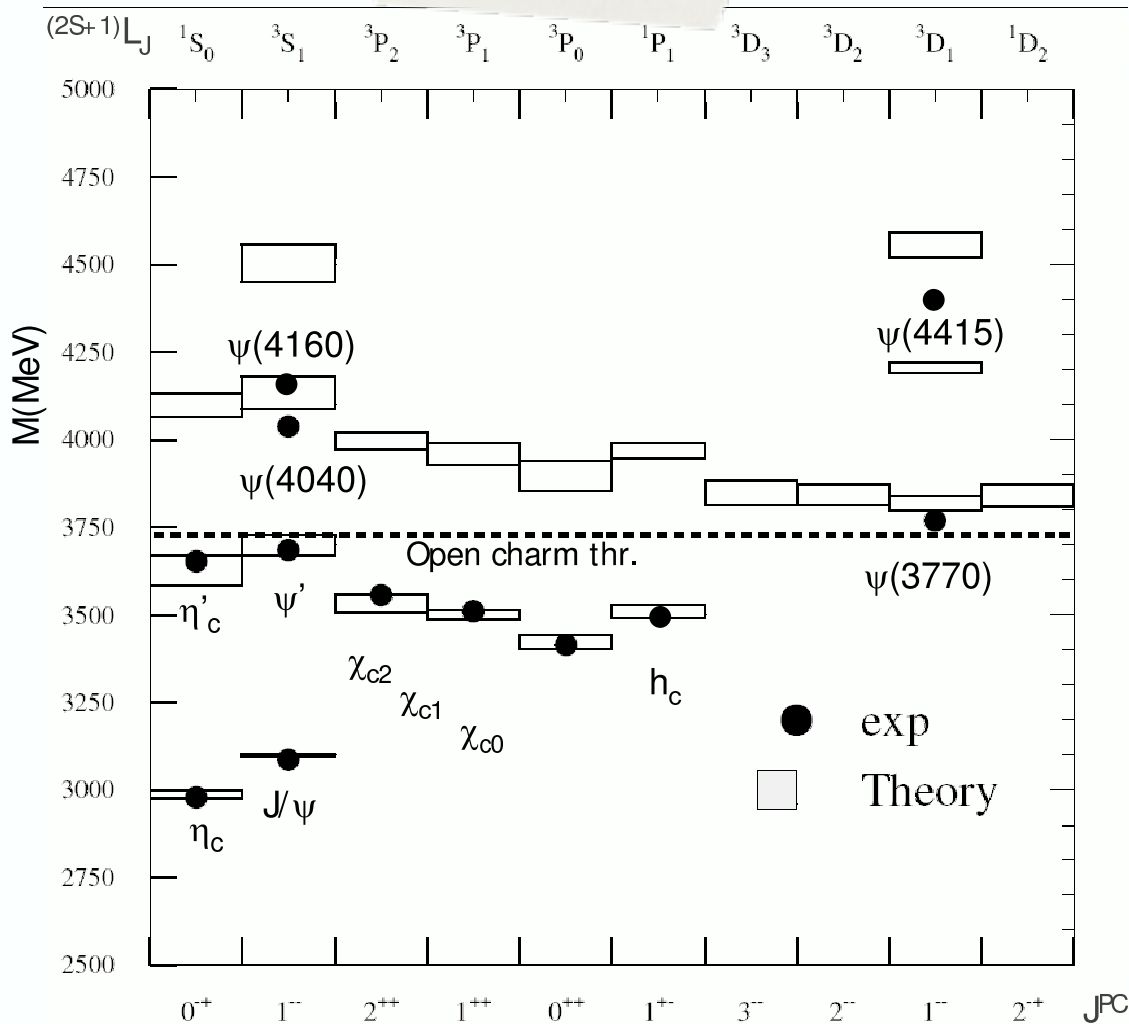
Indice

- Cos'è uno charmonio?
- Il rivelatore BABAR e in particolare come si rivela il passaggio di muoni
- Come vengono ricostruiti i decadimenti
- La $X(3872)$, perché non è uno stato di charmonio e perché è "esotica"
- Come si rivela la $X(3872)$

Il charmonio

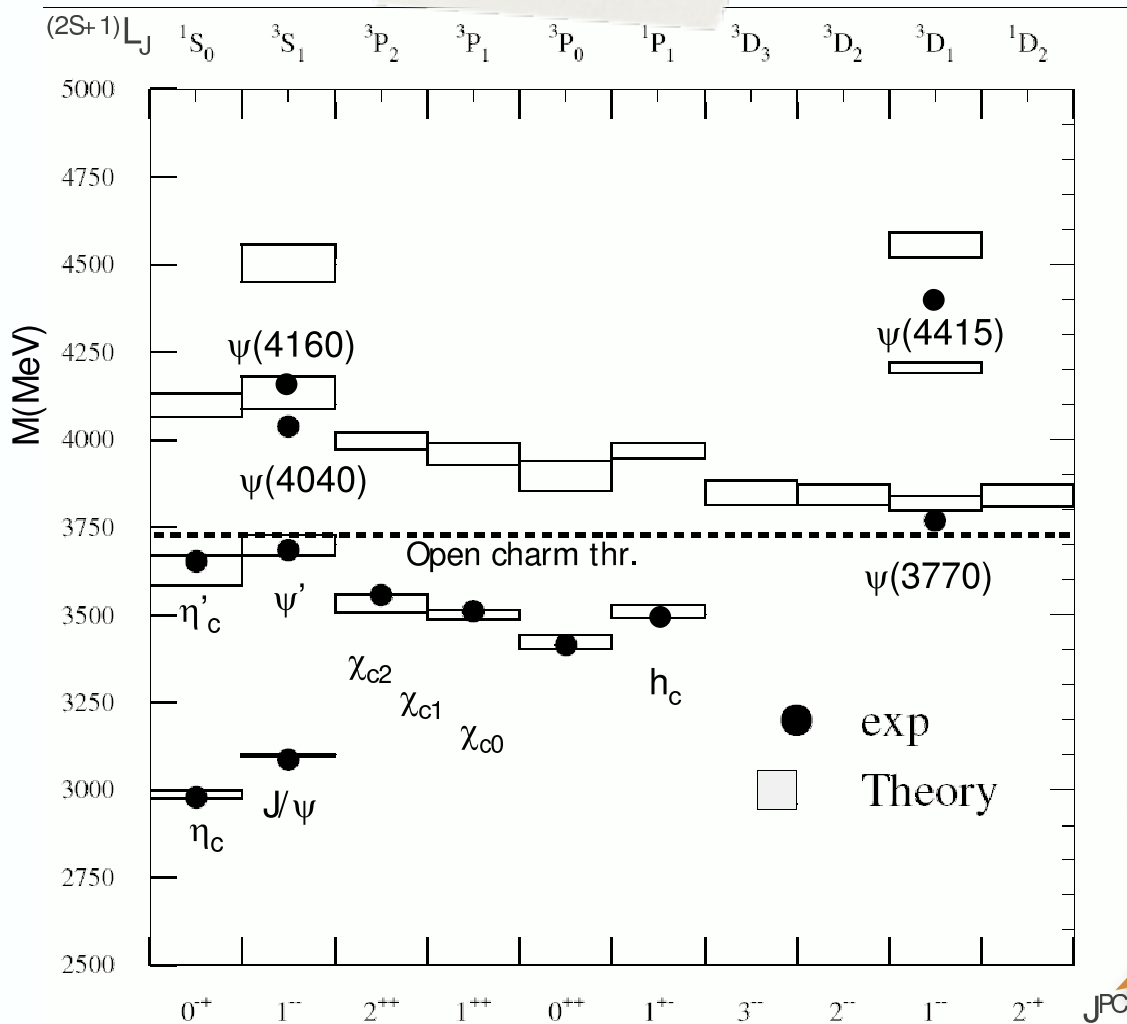
- Lo charmonio è uno stato legato $c\bar{c}$
- La J/Ψ è stato il primo stato dello charmonio scoperto
- Pochi giorni dopo la sua scoperta a **SLAC** si trovò un'altra risonanza: la $\Psi(2S)$
- Gli stati legati con quark pesanti sono un ottimo strumento per studiare l'interazione forte

Lo spettro dello Charmonio



- Tutti gli stati predetti sotto la soglia di produzione del charm aperto (cioè di $D\bar{D}$, dato che D è il mesone con charm più leggero) sono stati osservati.

Lo spettro dello Charmonio



□ Tutti gli stati predetti sotto la soglia di produzione del charm aperto (cioè di $D\bar{D}$, dato che D è il mesone con charm più leggero) sono stati osservati.

$$J^{PC}$$

Dove:

J = momento angolare totale

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

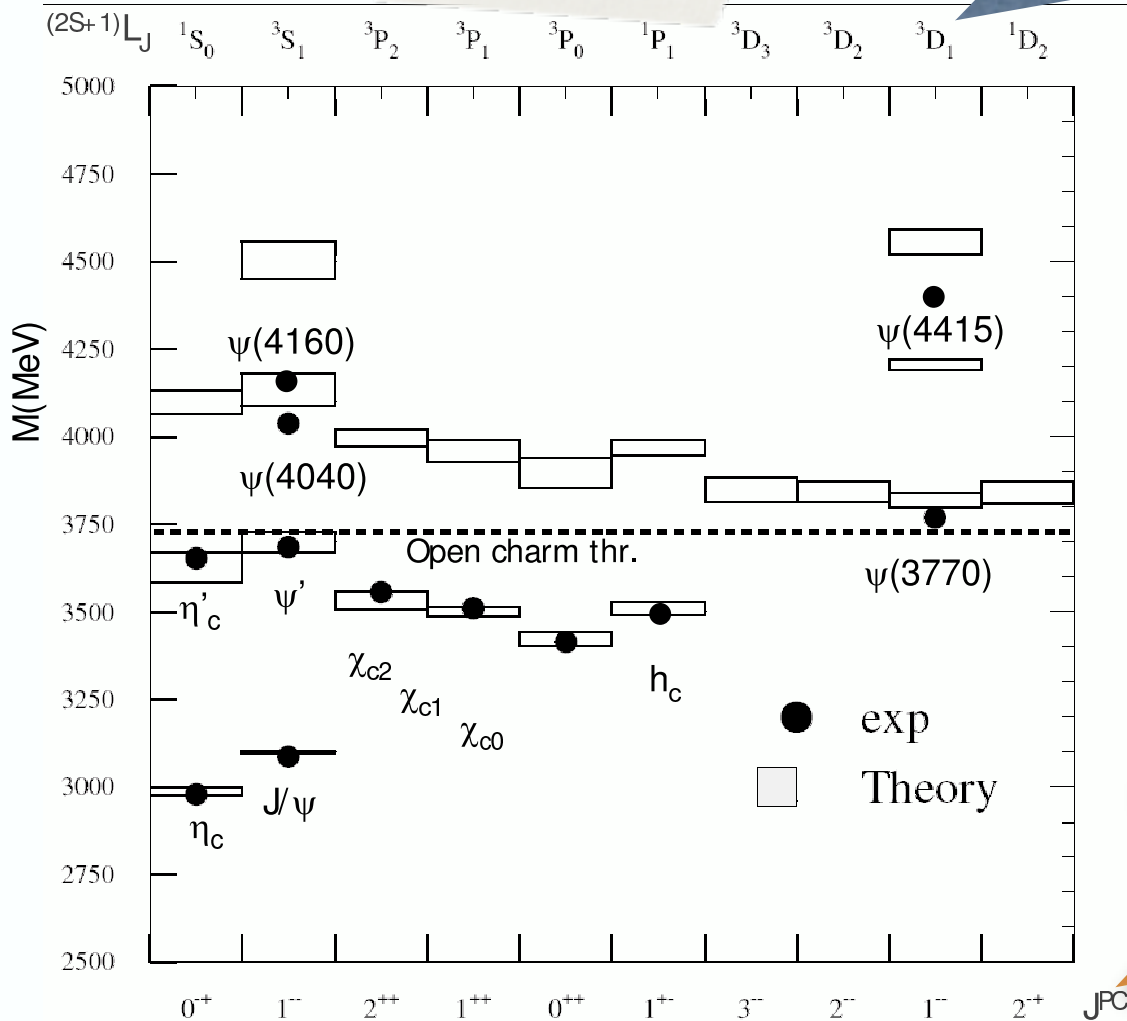
P = autostato di parità

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

C = autostato di carica

Lo spettro dell

Si identifica il momento angolare di ogni stato allo stesso modo della spettroscopia atomica



□ Tutti gli stati predetti sotto la soglia di produzione del charm aperto (cioè di $D\bar{D}$, dato che D è il mesone con charm più leggero) sono stati osservati.

J^{PC}
Dove:

J = momento angolare totale

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

P = autostato di parità

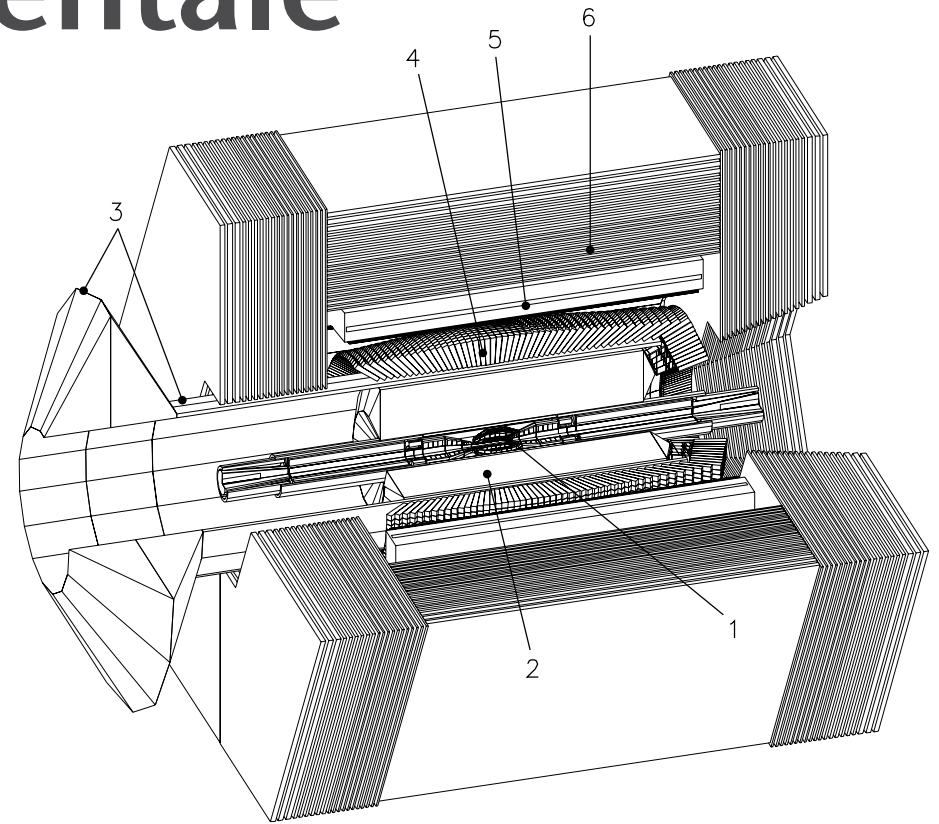
$$C = (-1)^{L+S}$$

C = autostato di carica

BaBar

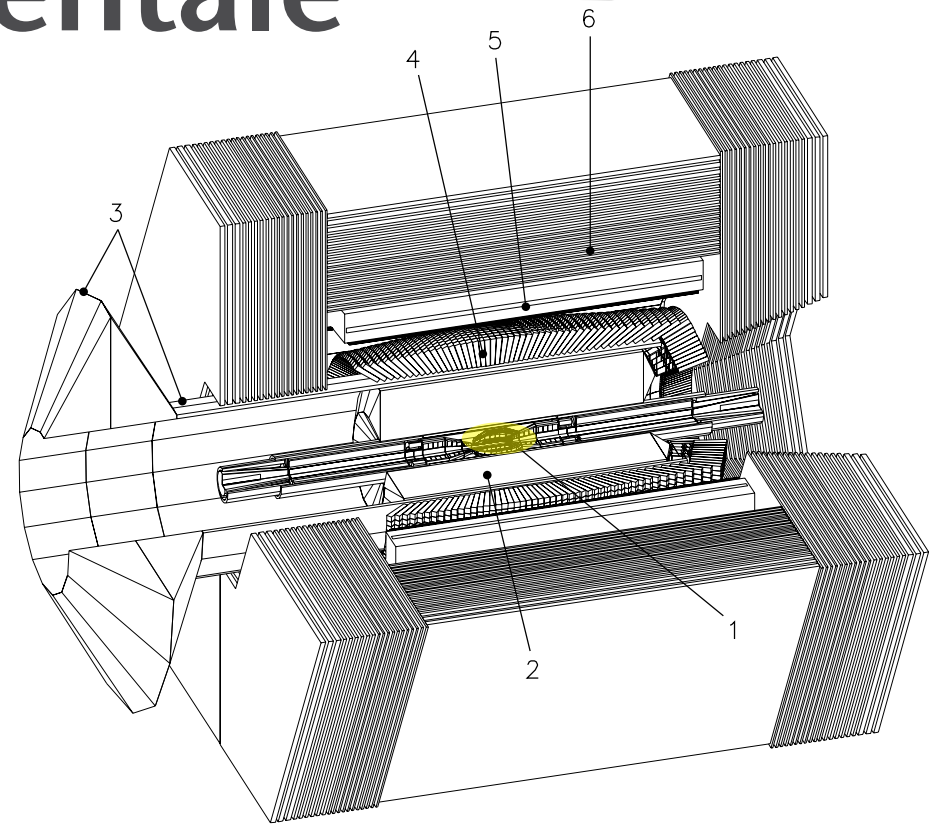
- **BaBar** è un esperimento general purpose realizzato alla **B Factory PEP-II** ed è ottimizzato per la ricerca di decadimenti rari del mesone **B**
- La **B Factory PEP-II** è un **collider e^+e^-** che opera ad una **energia del cm di 10.58 GeV**, valore della massa della risonanza **$\Upsilon(4S)$** , e ha una luminosità di almeno $3 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- **PEP-II** è una macchina **asimmetrica**:
9.0 GeV per gli elettroni, **3.1 GeV** per i positroni

L'apparato sperimentale



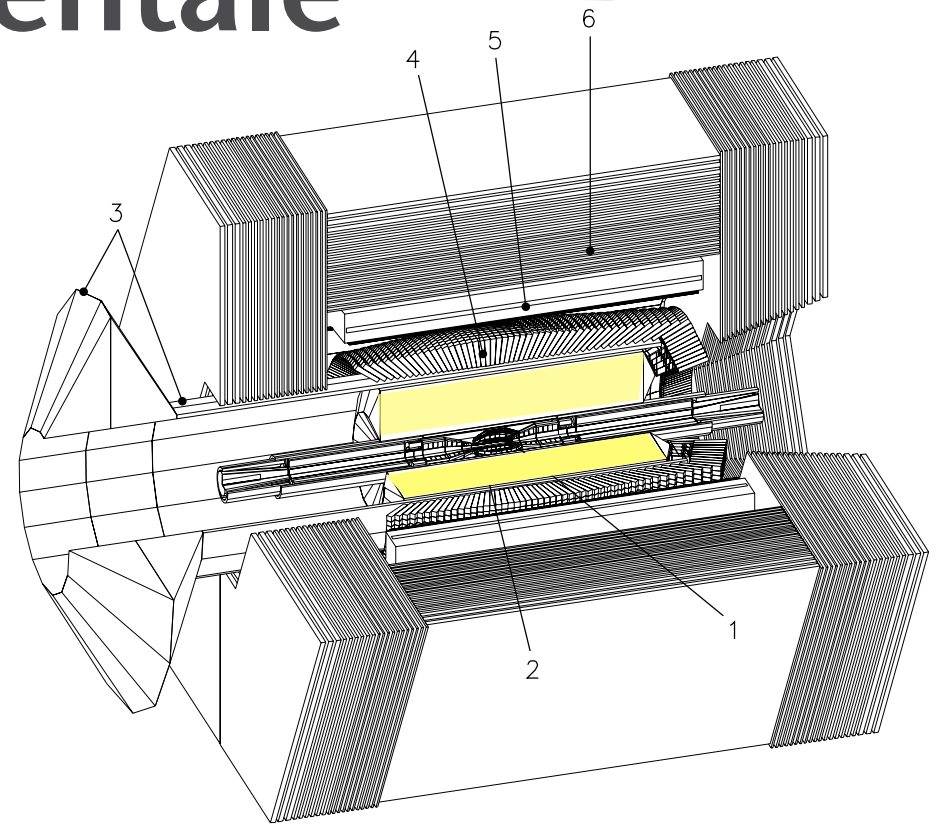
L'apparato sperimentale

1. un rilevatore di vertice al silicio (SVT), che serve a misurare con precisione le tracce vicino all'origine



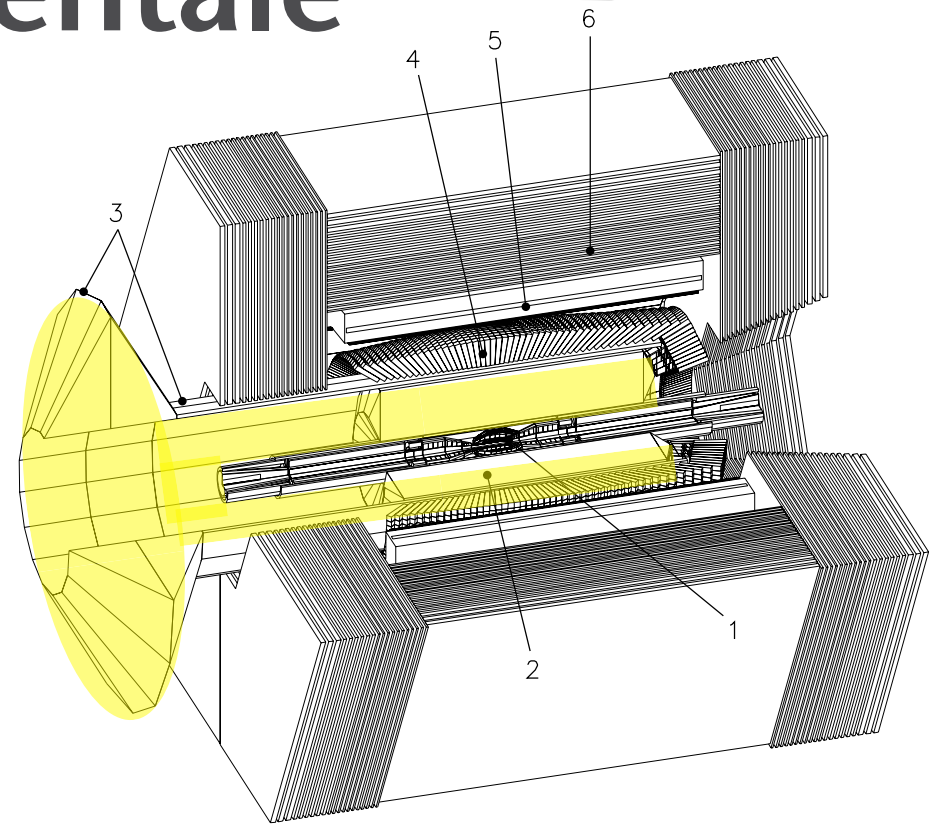
L'apparato sperimentale

1. un rivelatore di vertice al silicio (SVT), che serve a misurare con precisione le tracce vicino all'origine
2. una camera centrale a deriva (DCH) a ioduro di Cesio, per misurare le tracce delle particelle cariche



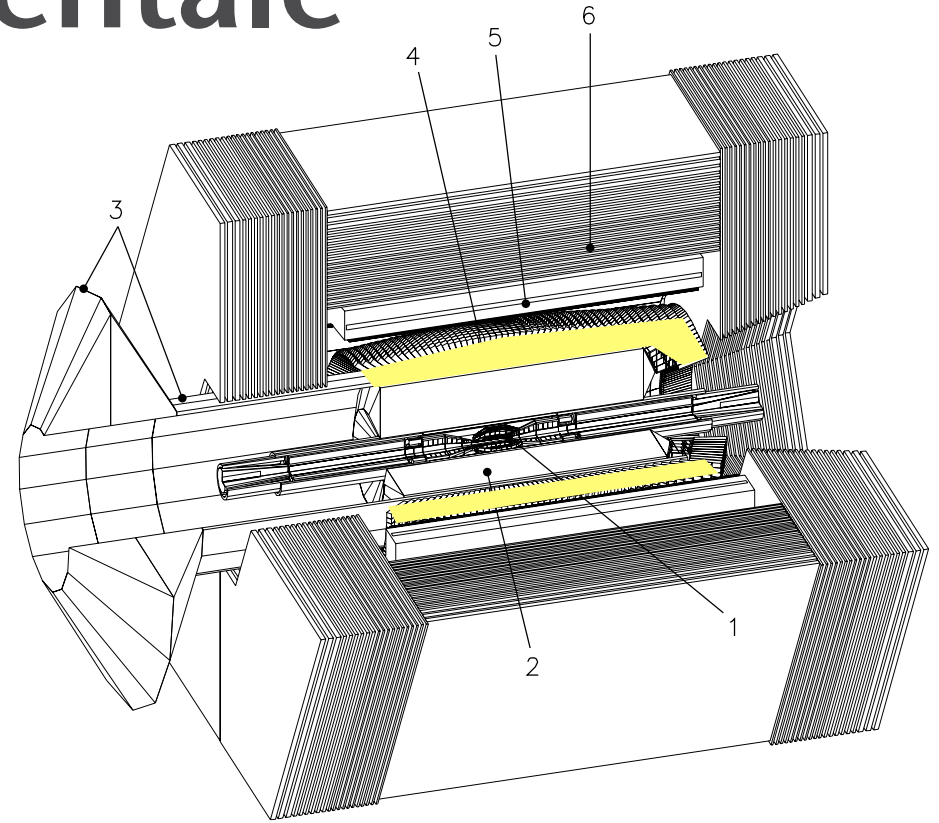
L'apparato sperimentale

1. un rivelatore di vertice al silicio (**SVT**), che serve a misurare con precisione le tracce vicino all'origine
2. una camera centrale a deriva (**DCH**) a ioduro di Cesio, per misurare le tracce delle particelle cariche
3. un rivelatore Cerenkov, a barre di quarzo (**DIRC**), per misurare la massa delle particelle cariche



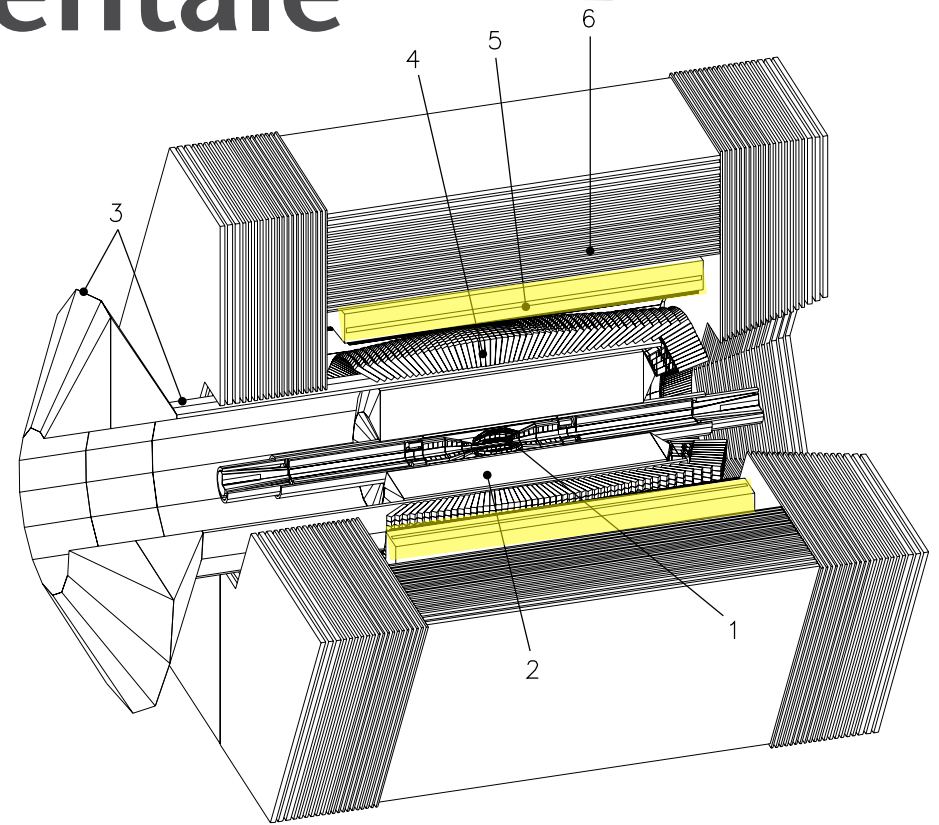
L'apparato sperimentale

1. un rivelatore di vertice al silicio (**SVT**), che serve a misurare con precisione le tracce vicino all'origine
2. una camera centrale a deriva (**DCH**) a ioduro di Cesio, per misurare le tracce delle particelle cariche
3. un rivelatore Cerenkov, a barre di quarzo (**DIRC**), per misurare la massa delle particelle cariche
4. un calorimetro elettromagnetico (**EMC**), per l'identificazione di fotoni ed elettroni



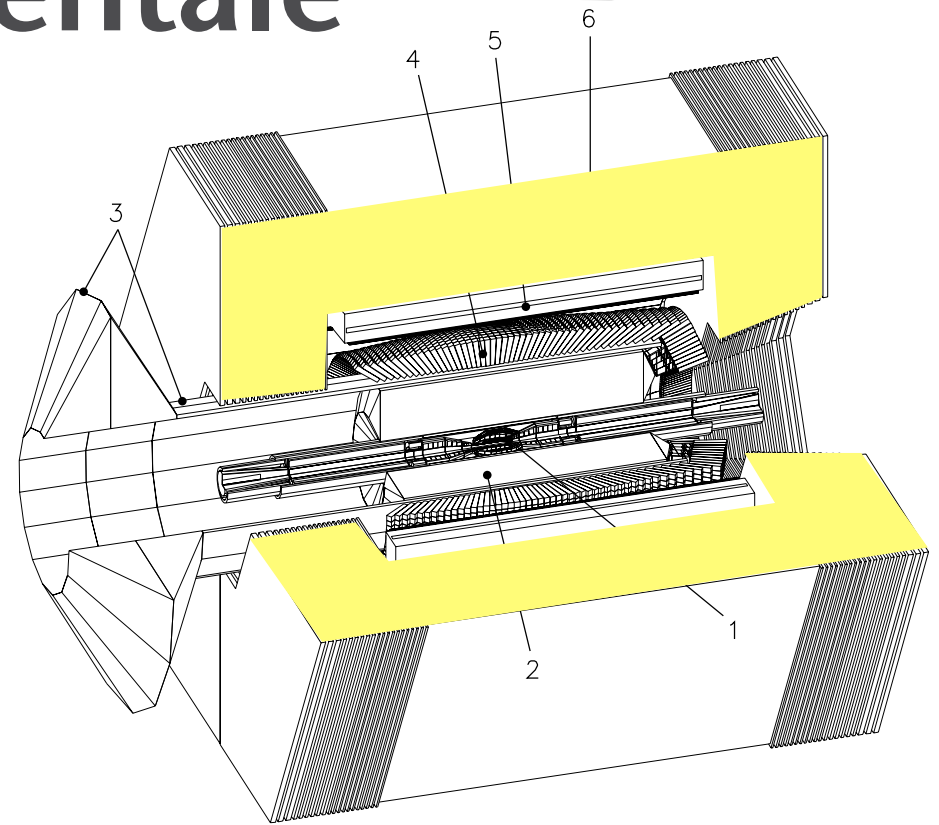
L'apparato sperimentale

1. un rivelatore di vertice al silicio (**SVT**), che serve a misurare con precisione le tracce vicino all'origine
2. una camera centrale a deriva (**DCH**) a ioduro di Cesio, per misurare le tracce delle particelle cariche
3. un rivelatore Cerenkov, a barre di quarzo (**DIRC**), per misurare la massa delle particelle cariche
4. un calorimetro elettromagnetico (**EMC**), per l'identificazione di fotoni ed elettroni
5. un solenoide superconduttore da 1.5T



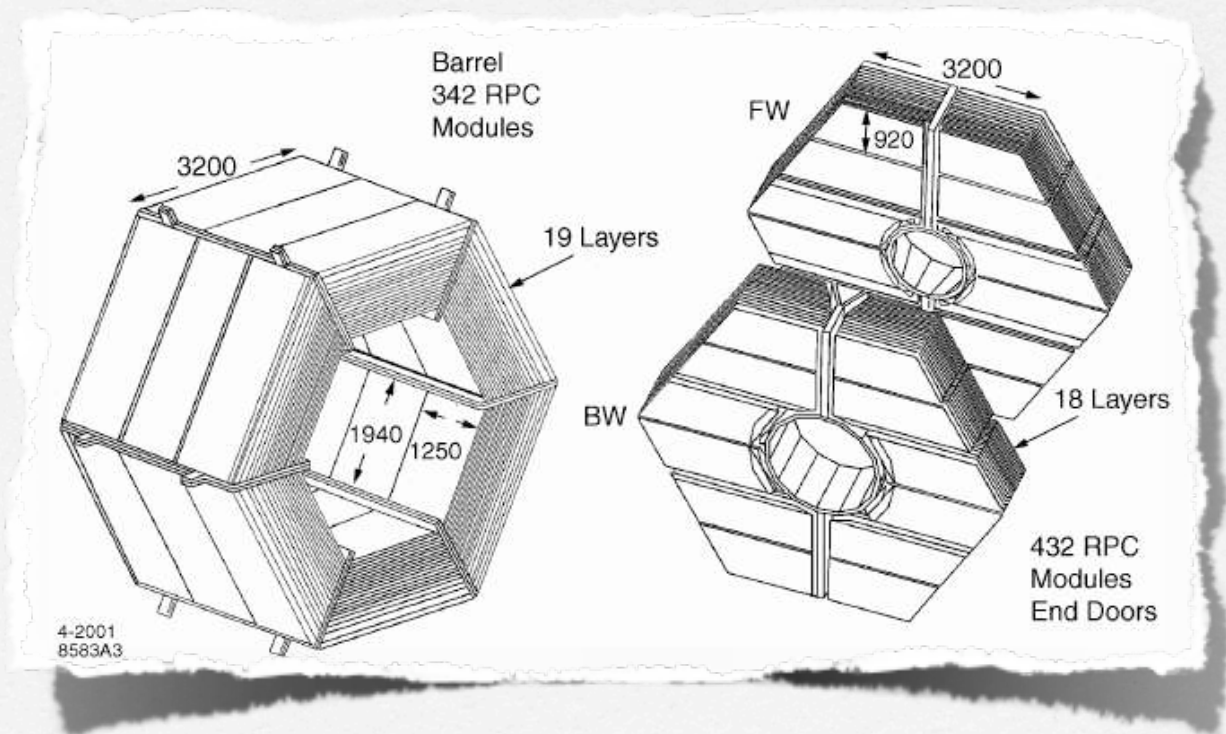
L'apparato sperimentale

1. un rivelatore di vertice al silicio (**SVT**), che serve a misurare con precisione le tracce vicino all'origine
2. una camera centrale a deriva (**DCH**) a ioduro di Cesio, per misurare le tracce delle particelle cariche
3. un rivelatore Cerenkov, a barre di quarzo (**DIRC**), per misurare la massa delle particelle cariche
4. un calorimetro elettromagnetico (**EMC**), per l'identificazione di fotoni ed elettroni
5. un solenoide superconduttore da 1.5T
6. L'IFR, realizzato all'interno del ferro per il ritorno del campo magnetico, serve principalmente ad identificare i μ



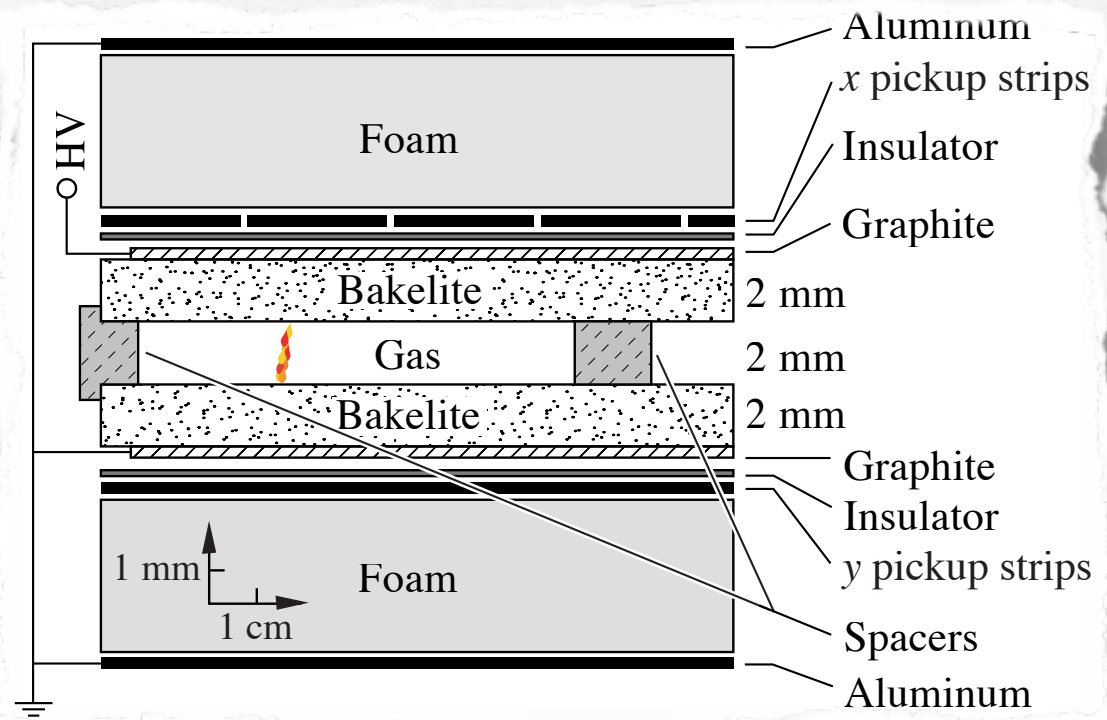
L'IFR

- L'IFR consiste di 19 piani **Resistive Plate Chambers** nella regione del barrel e 18 piani nella regione anteriore e posteriore.
- I piani RPC sono alternati con le piastre di ferro che chiudono il ritorno del campo magnetico



Le Resistive Plate Chambers

- Le RPC sono costituite di due piani paralleli con grande resistività ($\sim 10^9 - 10^{13} \Omega/\text{cm}$) mantenuti ad una grande differenza di potenziale ($\sim 7-12 \text{ kV}$).
- Nell'interstizio fra i due è inserito un gas a pressione atmosferica
- Uno strato di grafite aderente alle facce esterne della bakelite serve a mantenere la differenza di potenziale

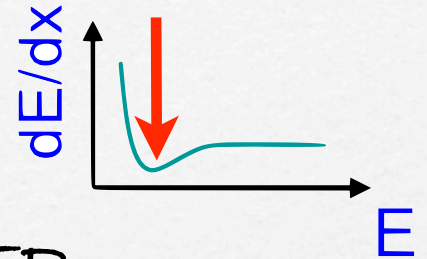


Le Resistive Plate Chambers

- Il passaggio di una particella carica da luogo ad uno genera una valanga di elettroni e fotoni le cui dimensioni e durata sono limitate dalla riduzione locale del campo elettrico che la cascata stessa produce
- La lettura del segnale avviene misurando la carica indotta su delle strip poste (su entrambe le facce) dietro un materiale che le isola dalla grafite
- La ricostruzione bidimensionale è realizzata posizionando le strip ortogonali fra loro

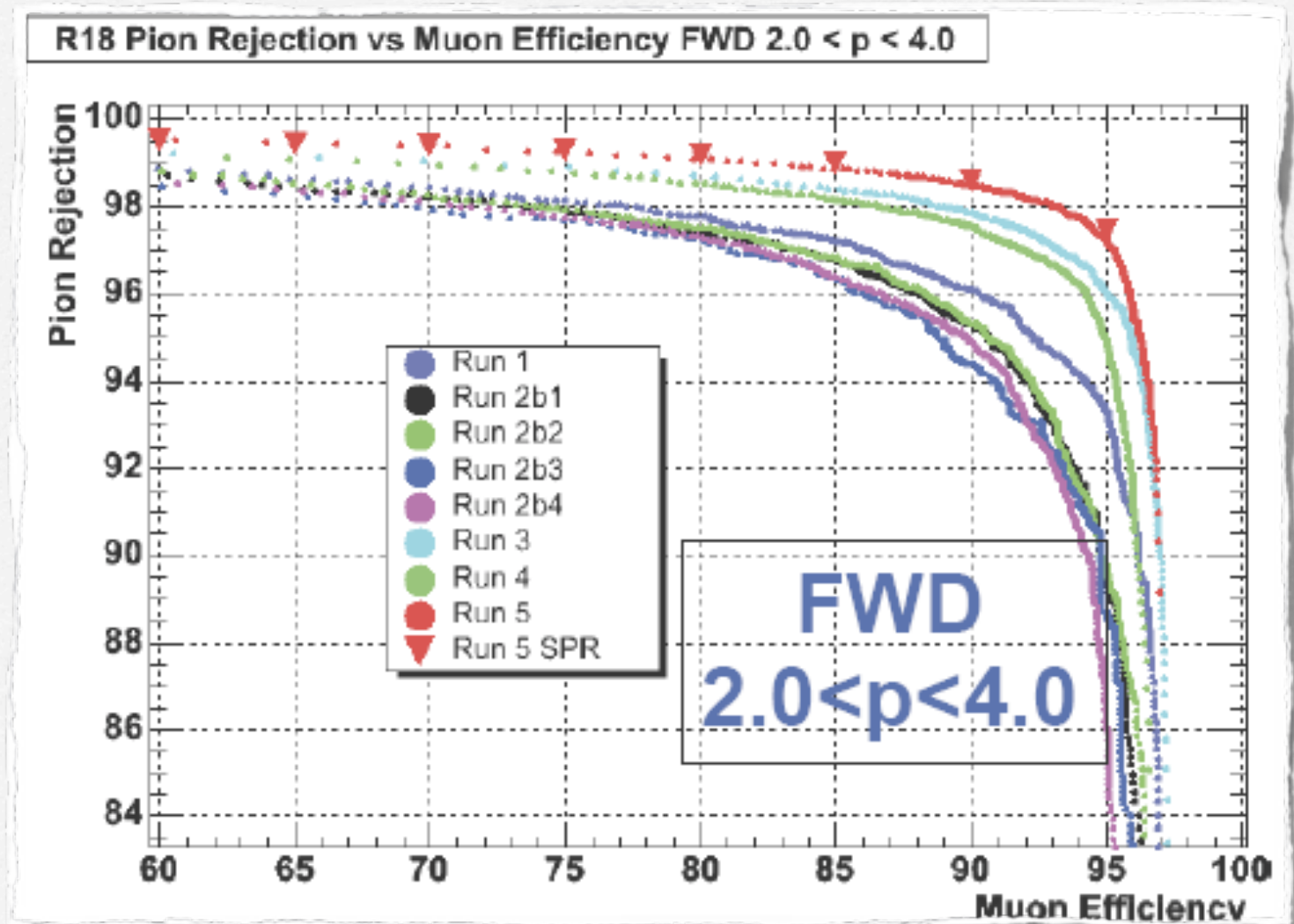
Come si identificano i μ

- I μ perdono energia solo per ionizzazione
- sono MIP
- passano tutti i rilevatori interni e il ferro dell'IFR
- I π , invece hanno una probabilità di interagire forte nel ferro dell'IFR e produrre uno sciame adronico
- è possibile che un π venga scambiato per un μ e riesce ad attraversare tutti gli strati di ferro (**punchthrough**), quindi se gli ultimi layer sono inefficienti la probabilità di sbagliare aumenta sensibilmente
- un m non viene identificato invece se la sua energia non è sufficiente ad attraversare il ferro o addirittura potrebbe rimanere intrappolato nel campo magnetico senza arrivare all'IFR



La capacità di rigetto dei π

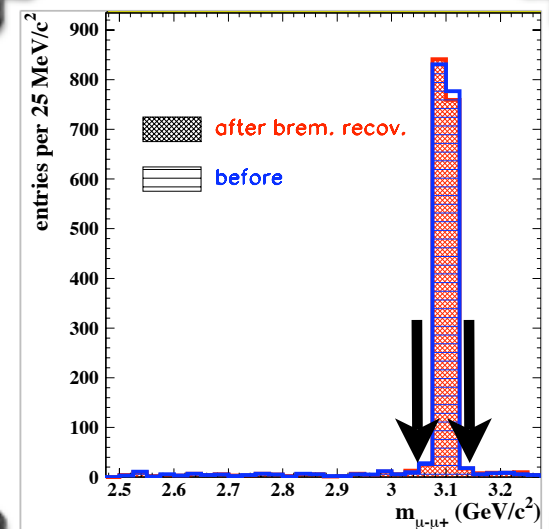
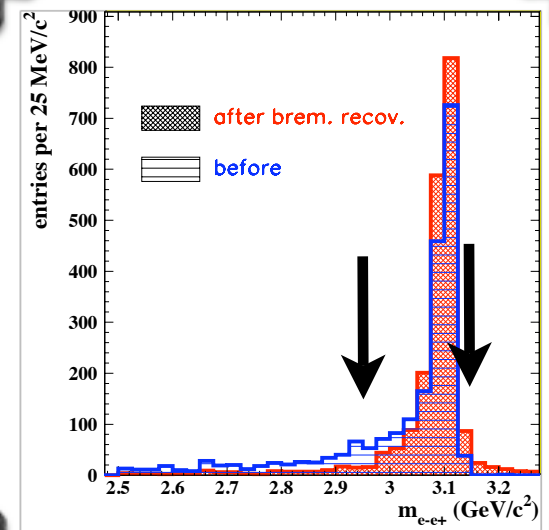
In questo grafico è riportata la capacità di distinguere un π in funzione dell'efficienza di rivelare un μ



- Le traiettorie delle particelle cariche sono misurate combinando le misure del rivelatore di vertice al silicio e della camera a deriva
- Le informazioni sono poi combinate con quelle del rivelatore Cerenkov
- fotoni ed elettroni sono rivelati nel calorimetro elettromagnetico
- i muoni penetranti sono identificati dall'IFR

Come vengono ricostruiti i decadimenti?

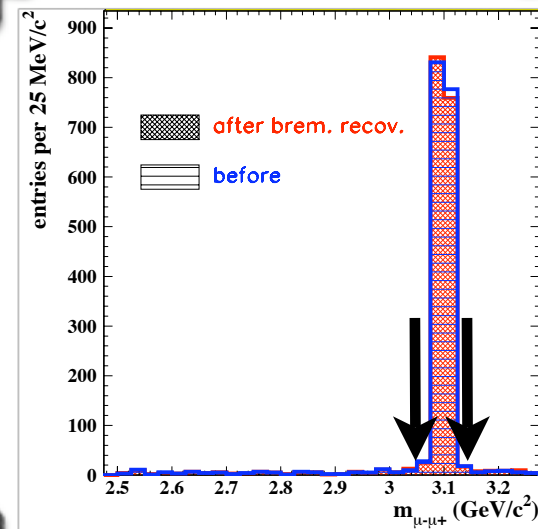
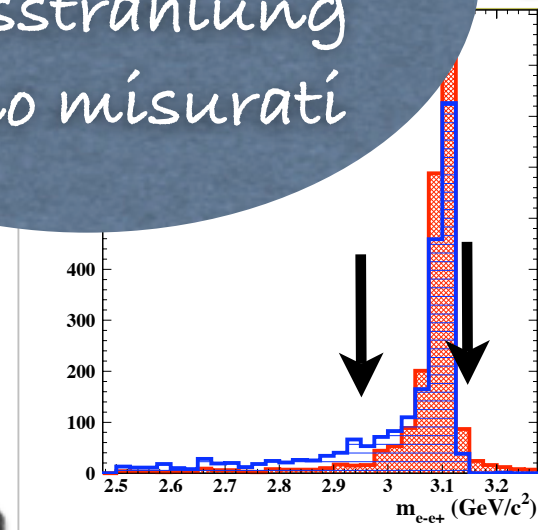
- La massa invariante di elettroni, positroni e fotoni bremsstrahlung deve essere compresa fra **2.95** e **3.14** GeV/c^2
- se invece i leptoni prodotti sono una coppia di μ si chiede che la massa sia compresa fra **3.06** e **3.14** GeV/c^2
- Nel fare il fit è imposto un mass constraint pari alla massa della J/ψ alla coppia di leptoni



Come vengono ricorretti i decadimenti?

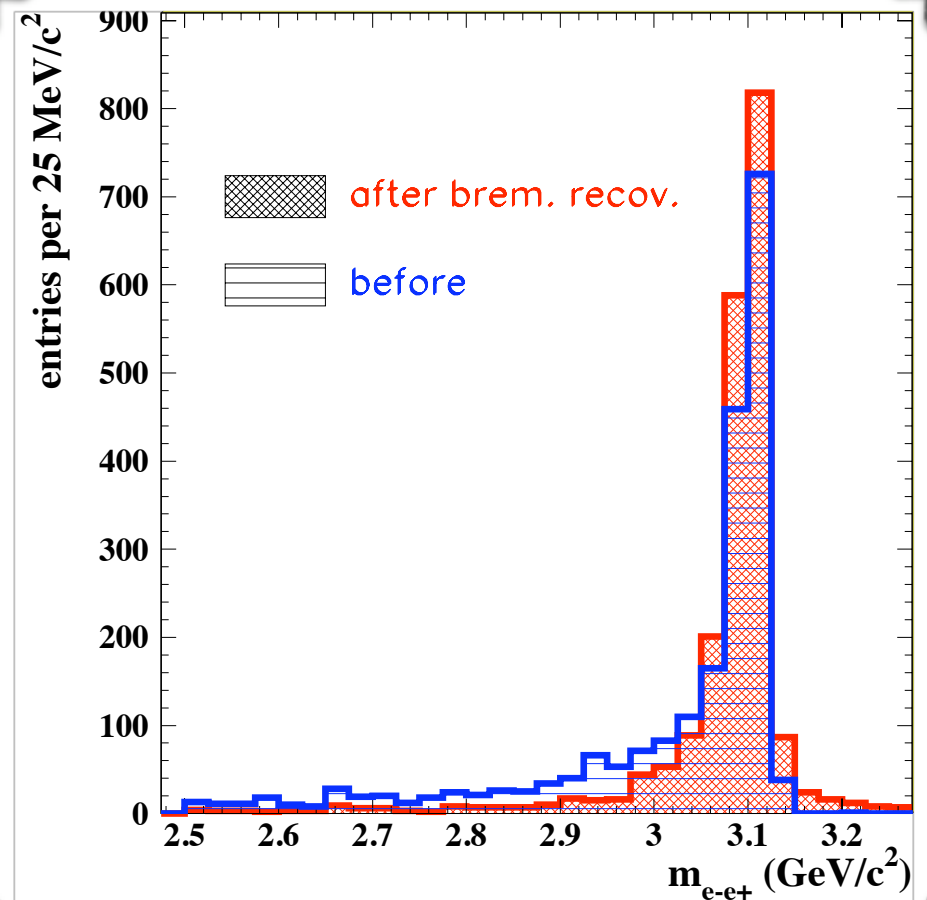
Perché non tutti i fotoni bremsstrahlung vengono misurati

- La massa invariante di elettroni positroni e fotoni bremsstrahlung deve essere compresa fra **2.95** e $3.14 \text{ GeV}/c^2$
- se invece i leptoni prodotti sono una coppia di μ si chiede che la massa sia compresa fra **3.06** e $3.14 \text{ GeV}/c^2$
- Nel fare il fit è imposto un mass constraint pari alla massa della J/ψ alla coppia di leptoni



Come vengono ricostruiti i decadimenti?

- Nella ricostruzione del decadimento della J/Ψ in e^+e^- viene corretto il quadrimpulso con un algoritmo che aggiunge il quadrimpulso di fotoni consistenti con l'essere stati emessi tangenti alla traiettoria dell'elettrone

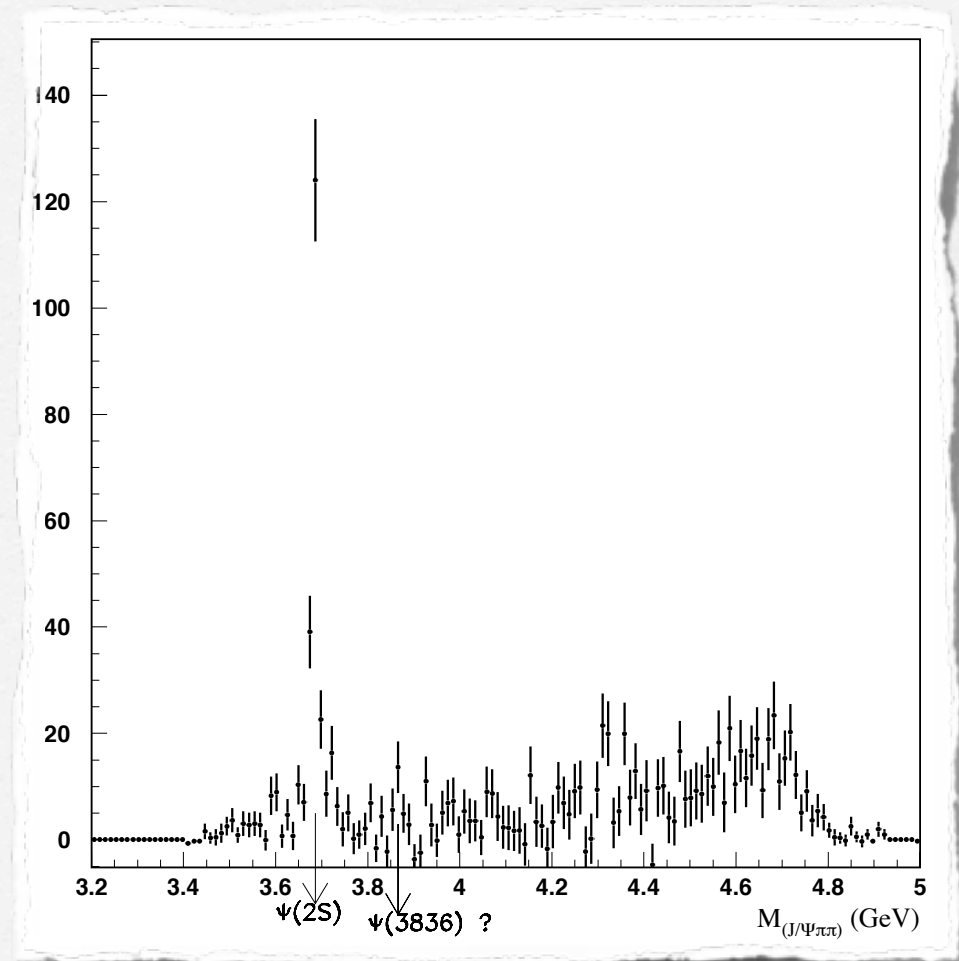


Come è stata scoperta la $X(3872)$?

- Studiando lo spettro di massa invariante del sistema $J/\psi \pi \pi$ nel decadimento



- è stata vista una risonanza a 3.9 GeV difficilmente riconducibile alle particelle note

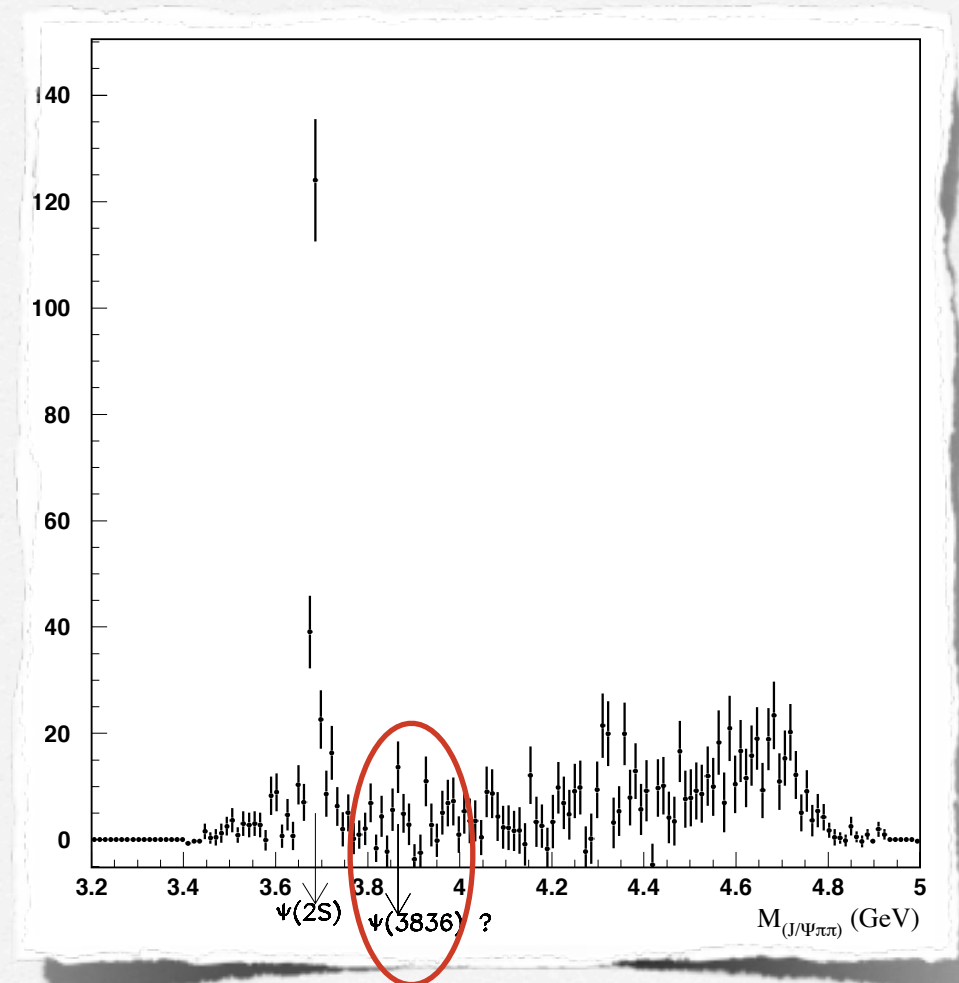


Come è stata scoperta la $X(3872)$?

- Studiando lo spettro di massa invariante del sistema $J/\psi \pi \pi$ nel decadimento



- è stata vista una risonanza a 3.9 GeV difficilmente riconducibile alle particelle note



Come si identificano i segnali?

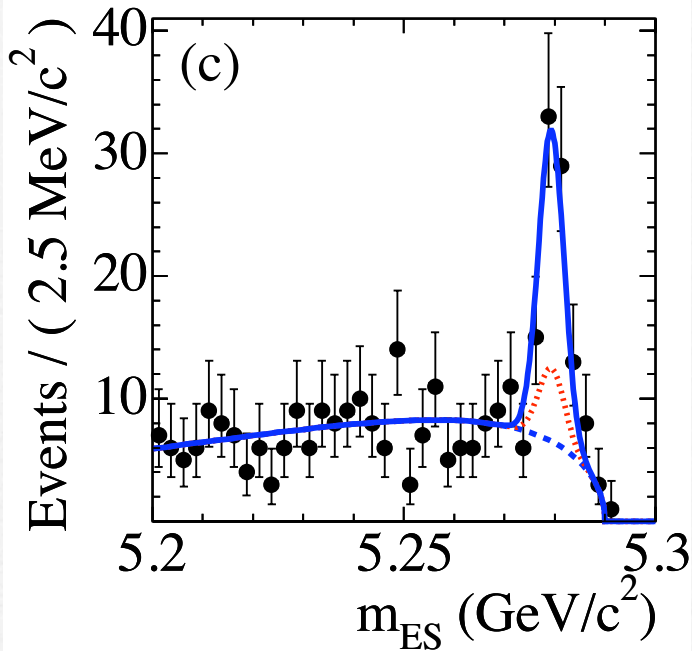
- Per meglio identificare i segnali vengono introdotte due quantità:

$$\Delta E \equiv E_B - \sqrt{s}/2$$

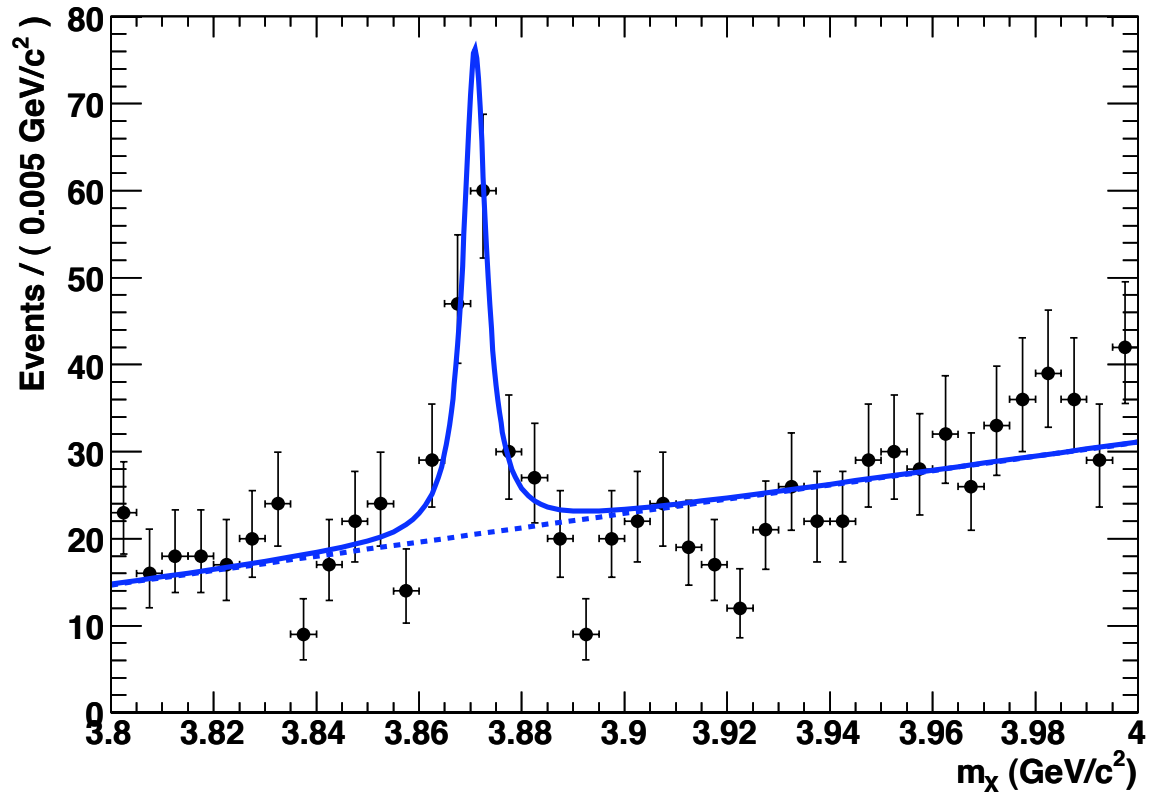
$$m_{ES} \equiv \sqrt{s/2 + \vec{p}_B^2}$$

- ΔE serve a discriminare gli eventi imponendola circa uguale a 0
- m_{ES} è il modulo quadro del quadrimpulso della B imponendo che abbia una energia uguale a quella del sistema nel centro di massa di e^+e^-
- m_{ES} e ΔE sono scorrelate

La m_{es} nella regione della X



- si fa un taglio sulla m_{ES} intorno al valore della X



- si guarda lo spettro di massa invariante dopo aver sottratto il fondo combinatorio

La $X(3872)$

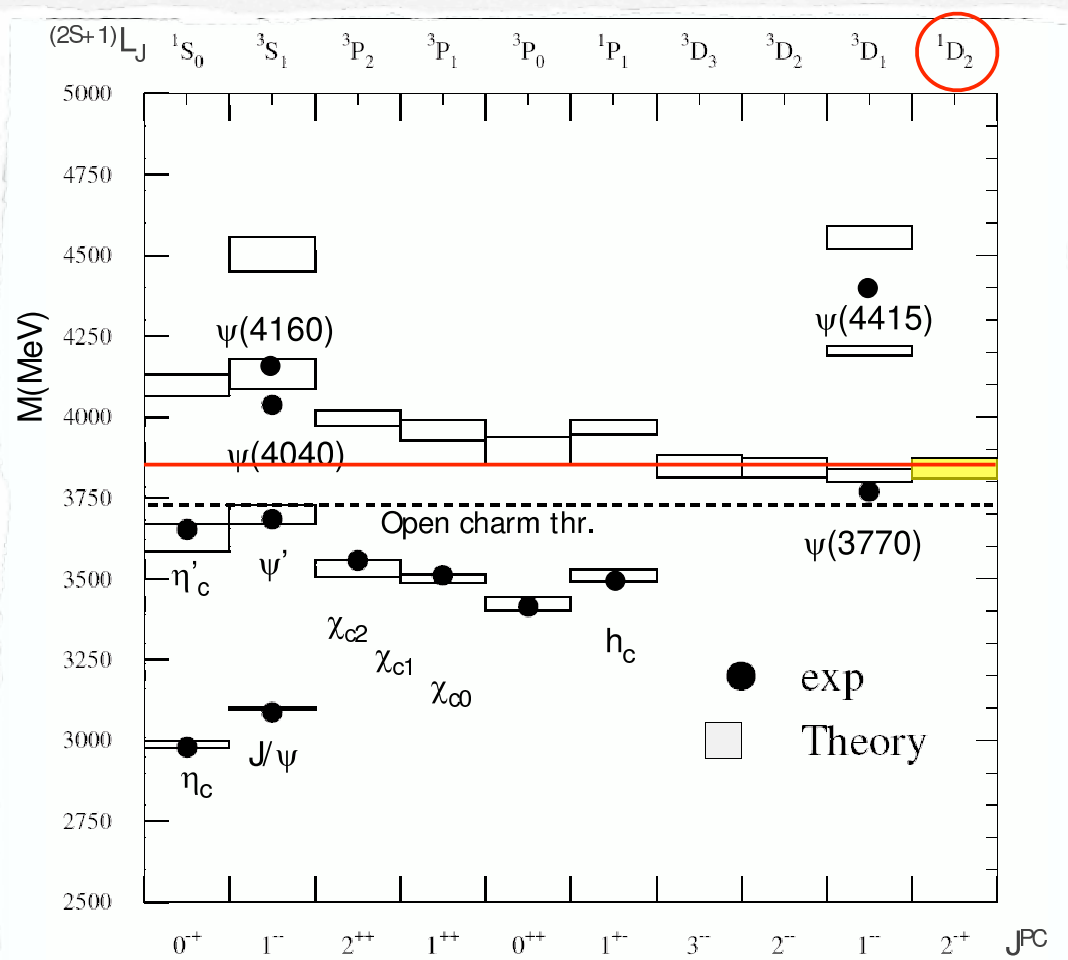
- La $X(3872)$ è il primo stato che è stato scoperto non facilmente riconducibile allo spettro dello charmonio
- Ha una massa appena al di sopra della soglia di produzione del charm aperto
- è stato osservato per la prima volta da Belle, confermato da BABAR e studiato in dettaglio anche da CDF
- è stato osservato decadere in:

$$J/\psi \pi^+ \pi^- \quad J/\psi \gamma \quad D^0 D^{*0} \quad J/\psi \pi^+ \pi^- \pi^0$$

La $X(3872)$

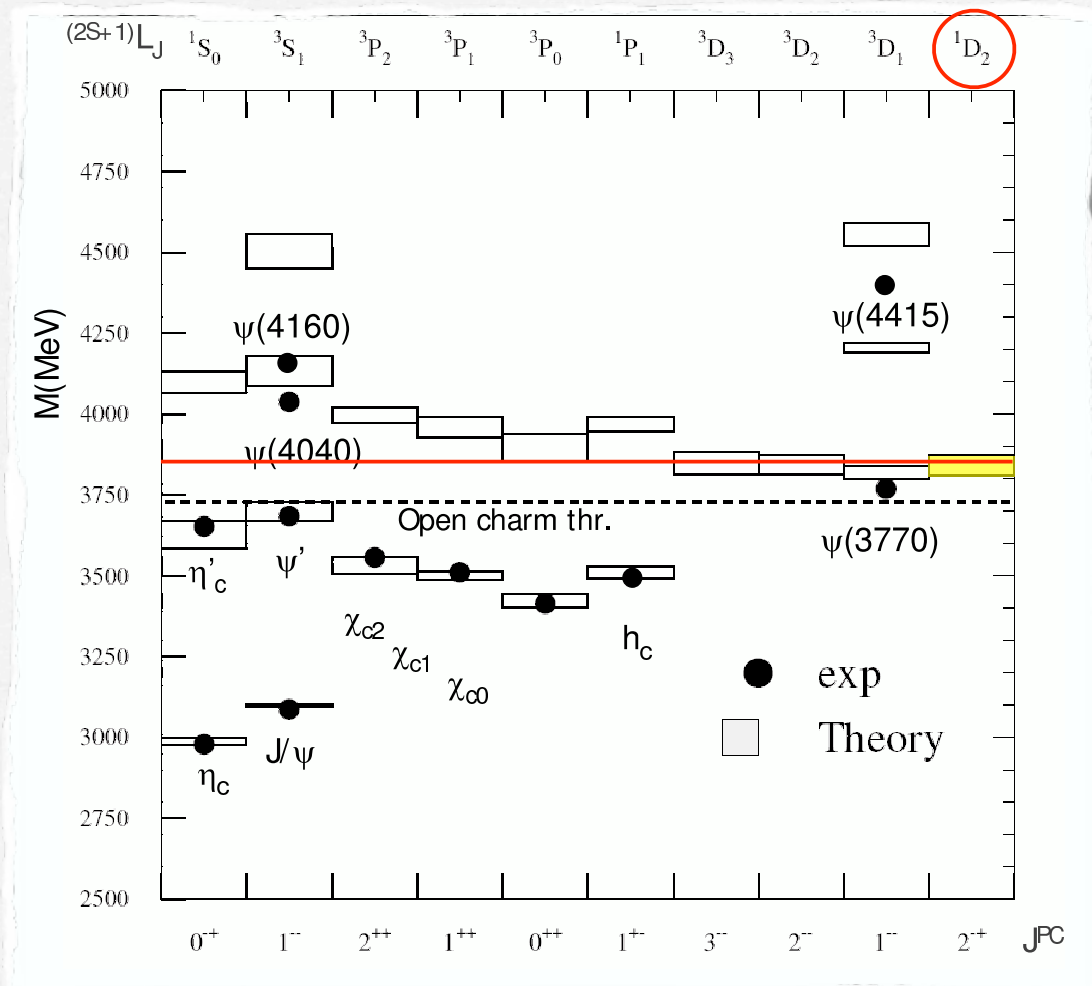
- La X deve avere $C=+1$ poiché è stato osservato il decadimento in $J/\psi \gamma$
- La collaborazione CDF, con uno studio angolare del decadimento $X \rightarrow J/\psi \pi \pi$ ha concluso che gli unici stati consistenti con i dati sono: $J^{PC} = 2^{-+}, 1^{++}$
- Lo spettro di massa invariante di $\pi^+ \pi^-$ indica un decadimento in $J/\psi \rho$

è la $\Psi(3836)$?



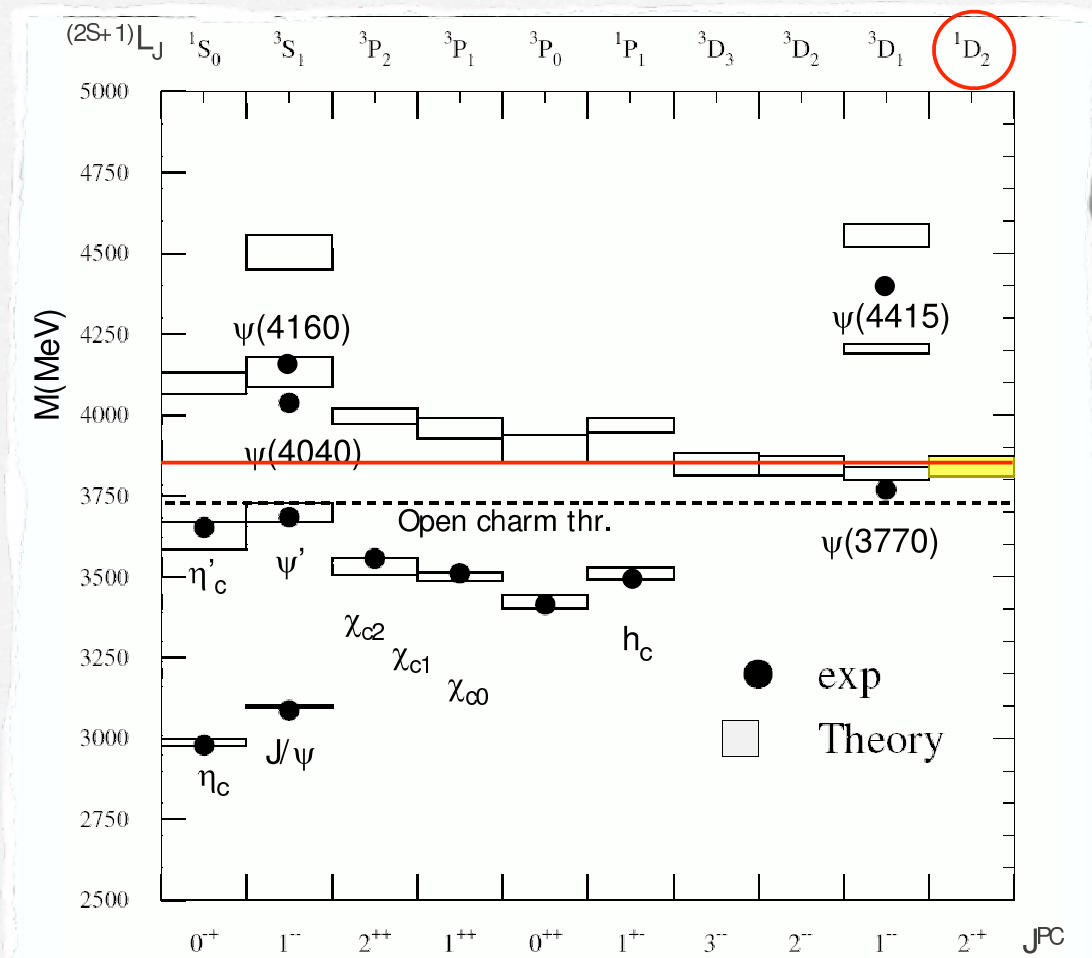
è la $\Psi(3836)$?

- Sarebbe plausibile identificarlo come uno stato 1D_2 dello charmonio, la $\Psi(3836)$



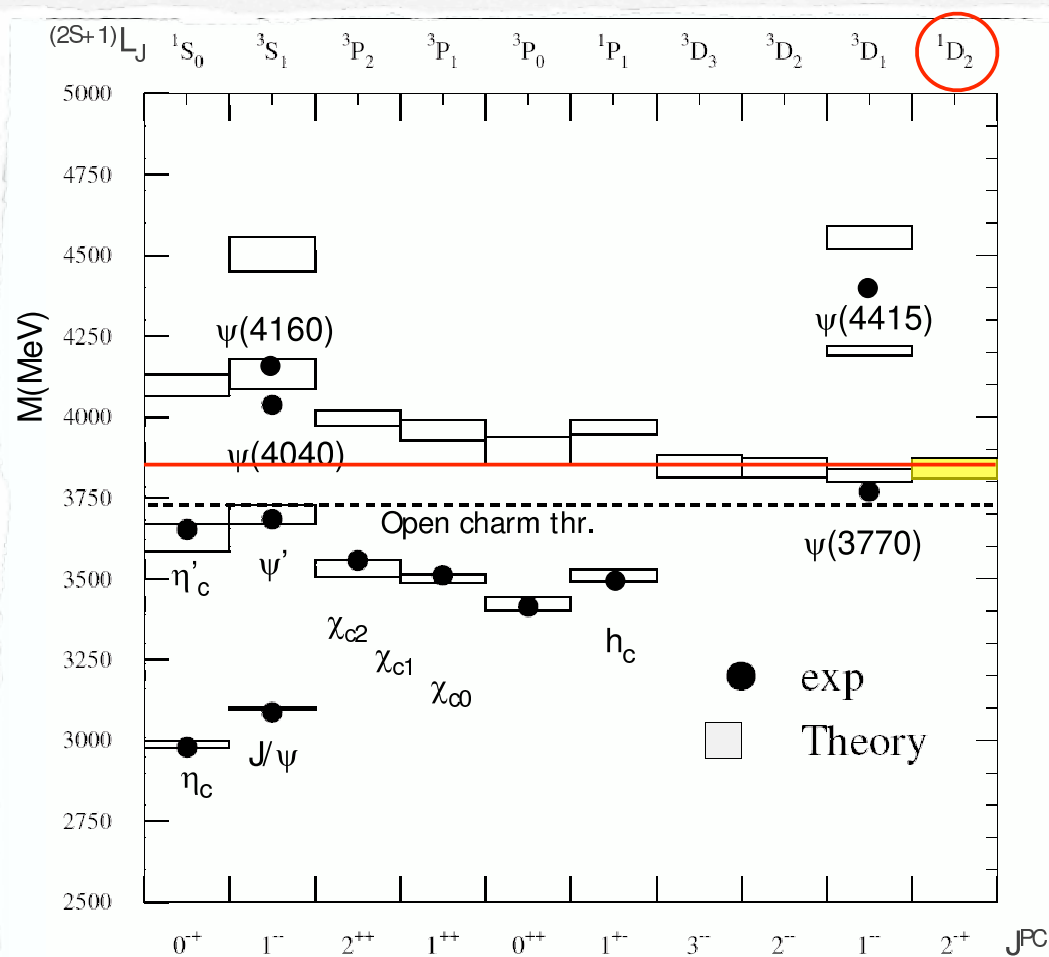
è la $\Psi(3836)$?

- Sarebbe plausibile identificarlo come uno stato 1D_2 dello charmonio, la $\Psi(3836)$
- ma il decadimento $\Psi(3836) \rightarrow J/\psi \rho$ violerebbe l'isospin



è la $\Psi(3836)$?

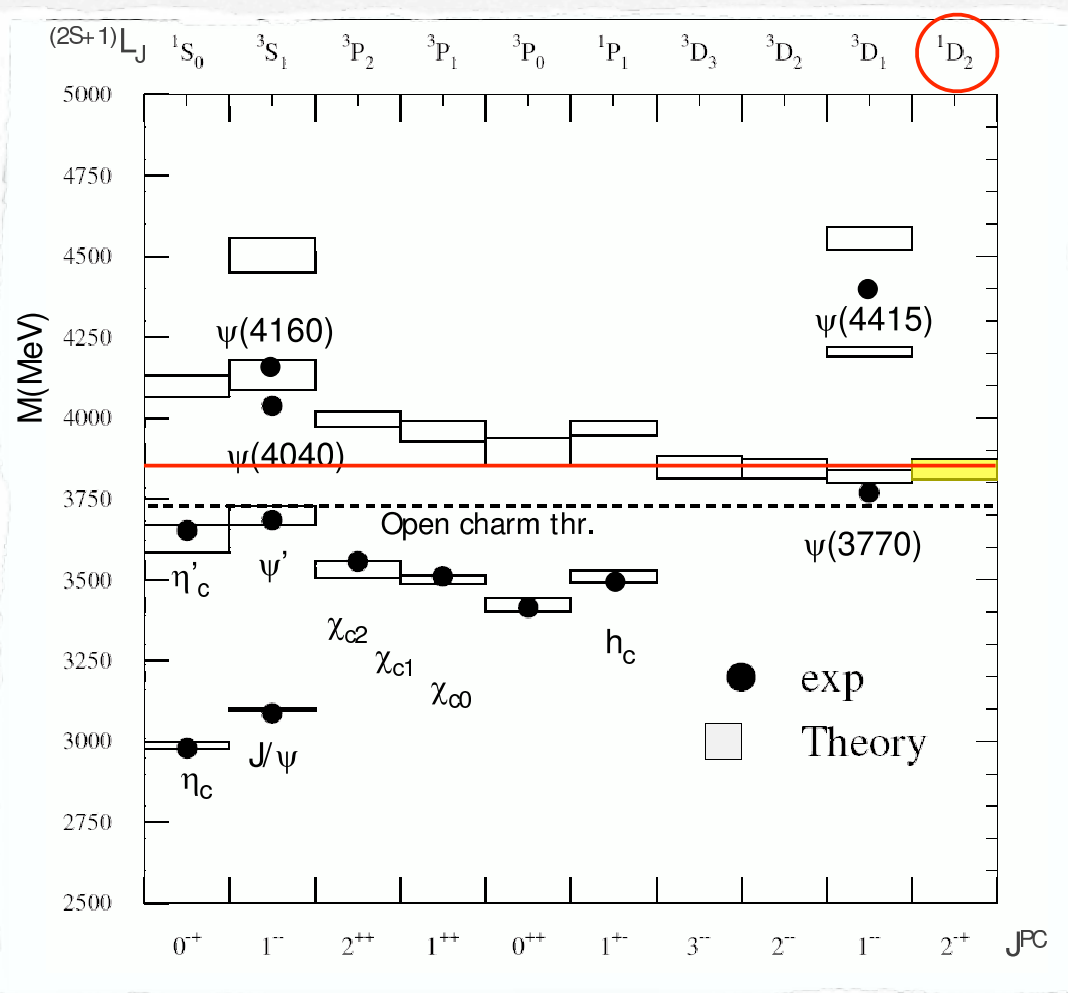
- Sarebbe plausibile identificarlo come uno stato 1D_2 dello charmonio, la $\Psi(3836)$
- ma il decadimento $\Psi(3836) \rightarrow J/\psi \rho$ violerebbe l'isospin
- Essendo sopra la soglia di charm aperto il canale di decadimento $J/\psi \rho$ dovrebbe essere soppresso di circa 4 ordini di grandezza rispetto a $D\bar{D}$



è la $\Psi(3836)$?

No!

- Sarebbe plausibile identificarlo come uno stato 1D_2 dello charmonio, la $\Psi(3836)$
- ma il decadimento $\Psi(3836) \rightarrow J/\psi \rho$ violerebbe l'isospin
- Essendo sopra la soglia di charm aperto il canale di decadimento $J/\psi \rho$ dovrebbe essere soppresso di circa 4 ordini di grandezza rispetto a $D\bar{D}$



Particella esotica?

- Sono state formulate molte ipotesi sulla natura della $X(3872)$, le più accreditate sono:
 - che si tratti di una particella formata da 4 quark
 - che si tratti di una "molecola"

tetraquark

- L'ipotesi è che si tratti di una particella formata da due quark e due antiquark
- dovrebbero esistere due stati: $X_u = [cu][\bar{c}\bar{u}]$ e $X_d = [cd][\bar{c}\bar{d}]$
- la differenza di massa dovrebbe essere $7 \pm 2 \text{ MeV}/c^2$
- ci potrebbe essere mixing fra i due stati

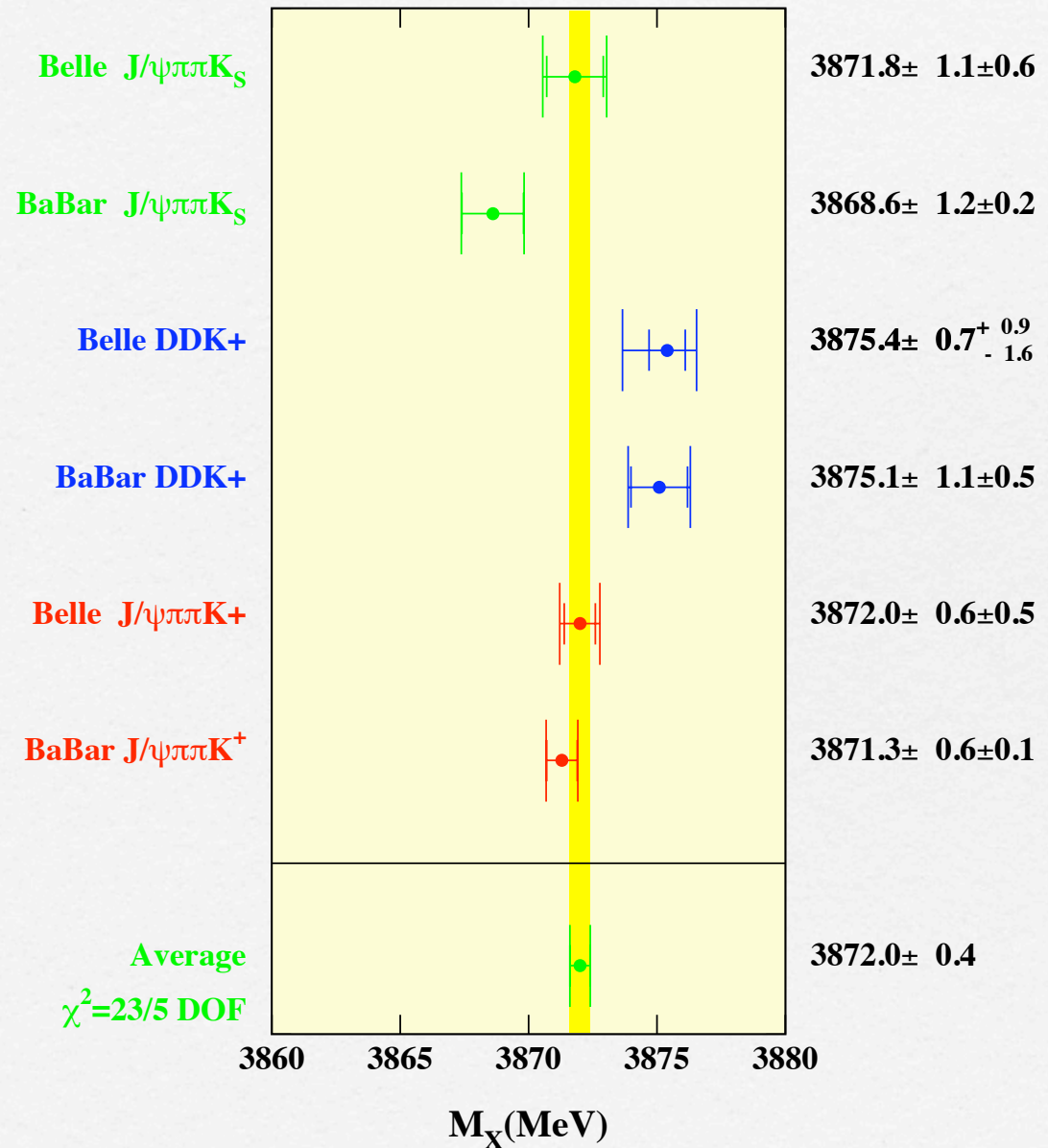
Molecola

non stretto =
brutta traduzione
di loosely

- Questa ipotesi inquadra la $X(3872)$ come uno stato legato largo $D^0 \bar{D}^{*0}$
- Sarebbe uno stato S con $J^P = 1^+$

Due stati?

- Misurando la massa della X nei due canali di decadimento $X \rightarrow J/\psi \rho$ e $X \rightarrow D^{*0} D^0$ si è misurata una differenza di 4 deviazioni standard, cosa che farebbe pensare che esistano due stati diversi e farebbe tendere per l'ipotesi 4quark



Per il futuro?

Per verificare le ipotesi del 4quark si procederà alla ricerca di un partner carico della $X(3872)$

Oltre a riempire gli spazi ancora vuoti di questa tabella...

	$J/\psi\pi^+\pi^-$	$D^{(*)}D^{(*)}$	$J/\psi\omega$	$J/\psi\pi^+\pi^0$	$\psi(2S)\pi$	$J/\psi K_s\pi$	$\Psi(2S)\pi\pi$	$J/\psi\phi,\eta$	$J/\psi\gamma$
Notes	Mass range for B	Low stat	Only B dec	Mass range! No ISR	No ISR No π^0	No Search	No B-dec	Only B dec	Mass window
$X(3872)$	Seen	Seen	Not seen	Not seen	Not seen	No search	N/A	Not seen	Seen
$Y(3940)$	No search	$X(3940)$?	Seen	No search	Not seen	No search	No search	No Fit	No fit
$Y(4260)$	Seen	No fit	No fit	No search	No search	No search	Not seen	No fit	N/A
$Y(4350)$	Not seen	No fit	No fit	No search	No search	No search	Seen	No fit	N/A
$Z(4430)$	No search	No search	No fit	No search	Seen	No search	No search	No Fit	No search
$Y(4660)$	Not seen	No fit	No fit	No search	No search	No search	Seen	No Fit	N/A

Bibliografia

□ Heavy Quarkonium Spectroscopy.

Riccardo Faccini (Rome U. & INFN, Rome) . SLAC-PUB-13080, BABAR-CONF-07-35, Jan 2008.

Prepared for 23rd International Symposium on Lepton-Photon Interactions at High Energy (LP07), Daegu, Korea, 13-18 Aug 2007. e-Print: [arXiv:0801.2679](https://arxiv.org/abs/0801.2679) [hep-ex]

□ Study of $J/\psi \pi^+ \pi^-$ states produced in $B^0 \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^- K^0$ and $B^- \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^- K^-$.

By BABAR Collaboration (B. Aubert et al.). BABAR-PUB-05-038, SLAC-PUB-11370, Jul 2005.

Published in Phys.Rev.D73:011101,2006. e-Print: [hep-ex/0507090](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0507090)

□ La documentazione pubblica dell'esperimento BaBar reperibile su:

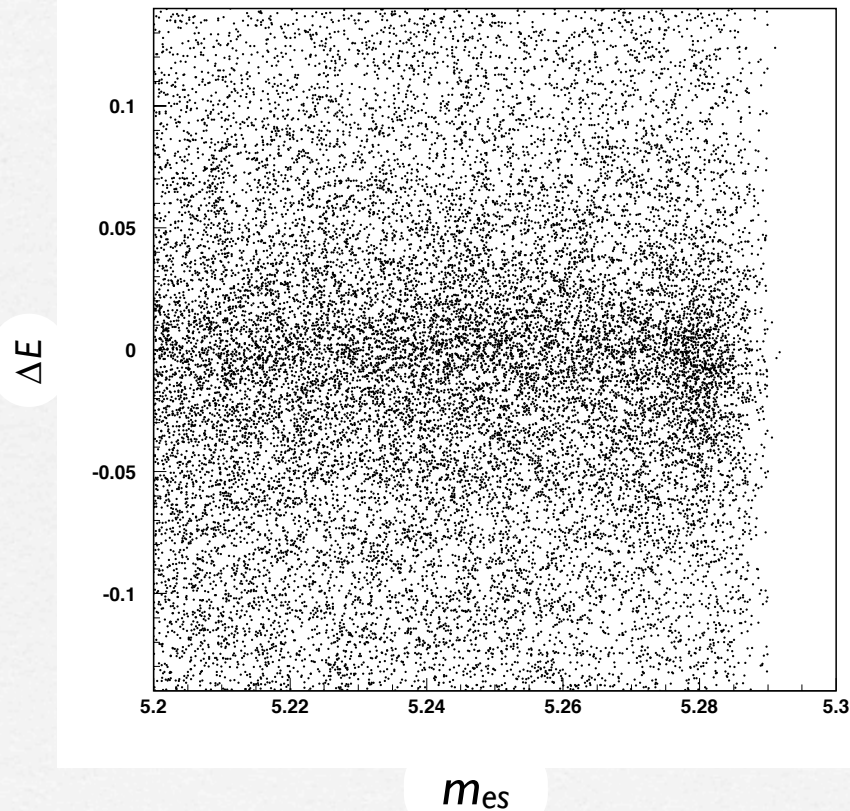
<http://www-public.slac.stanford.edu/babar/>



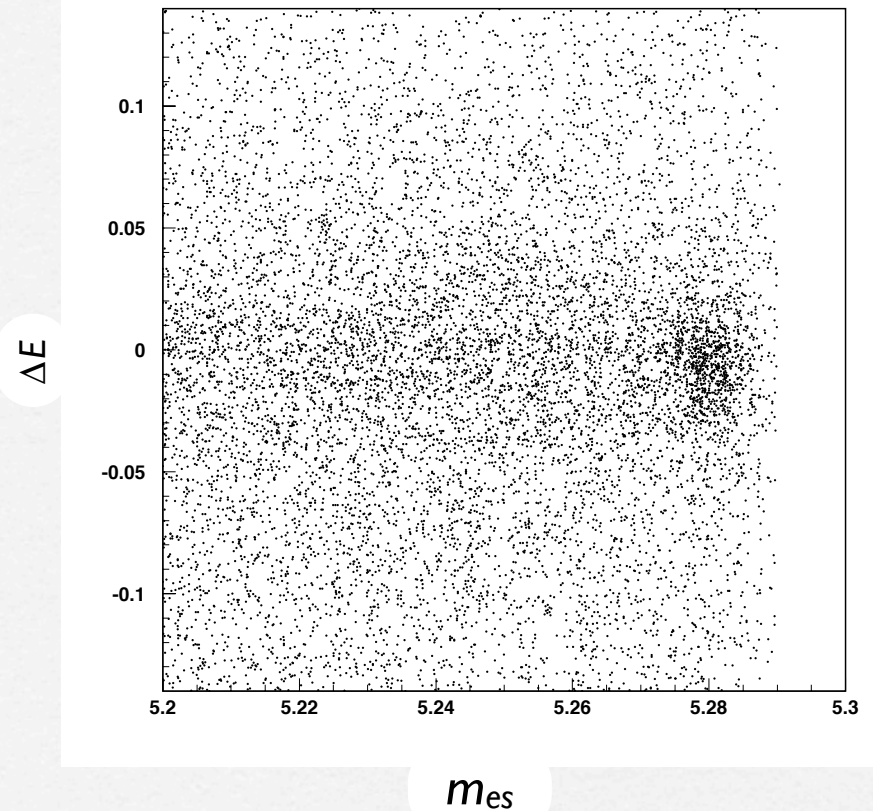
Appendice

m_{es} e ΔE sono scorrelate

$J/\Psi \rightarrow e^+e^-$



$J/\Psi \rightarrow \mu^+\mu^-$



- Le due variabili ΔE e m_{es} sono in buona approssimazione scorrelate



Le incertezze su m_{es} e ΔE

$$\delta(\Delta E) = \sqrt{(\delta E_B)^2 + (\delta E_S)^2}$$

- L'incertezza su ΔE è dominata dall'errore sull'energia ricostruita E_B

- L'incertezza su m_{es} è dominata dall'incertezza sull'energia del fascio s
- questo implica che essa **non** dipende dal modo di decadimento di B

$$\delta(m_{ES}) = \frac{1}{m_{ES}} \sqrt{(E_S \delta E_S)^2 + (p_B \delta p_B)^2}$$

