Spettroscopia Adronica

Spettroscopia Adronica

- Evoluzione del concetto di Spettroscopia
- Il panorama sperimentale
  - 1974: la November Revolution
  - Le macchine e gli esperimenti:
    - Heavy quarkonium factories
    - Foto- e adroproduzione di heavy flavors
  - La rinascita della spettroscopia QCD
- Multipletti mesonici e barionici con 5 flavors
  - Il potenziale statico quark-antiquark
  - Splitting fine ed iperfine
- Esotici : glueballs, ibridi, tetra- & pentaquarks

Evoluzione del concetto di Spettroscopia

Spettroscopia Atomica: Studio degli stati legati dell'atomo attraverso l'analisi dello spettro in frequenza/energia dei fotoni emessi / assorbiti nelle transizioni tra livelli. Gli atomi sono sistemi non relativistici, le energie di legame vanno da qualche eV, ai keV.Gli spin splitting tra livelli sono dell'ordine dei μeV . Lo stato fondamentale e' (fortunatemente per noi) stabile.

Spettroscopia Nucleare: Studio degli stati legati del nucleo attraverso l'analisi dello spettro in energia della radiazione α,β,γ emessa / assorbita nelle transizioni. I nuclei sono sistemi quasi relativistici, con energie di legame di qualche MeV/nucleone.
Gli spin splitting sono dell'ordine del MeV. Esiste una 'valle di stabilita' nucleare da A=1 a ~90, con Z~N . Il numero barionico e' conservato da tutte le interazioni note. Il neutrone decade β , con una vita media di 886 secondi.

Spettroscopia SubNucleare: Studio degli stati mesonici e barionici attraverso l'analisi dello spettro in energia dei $\gamma,\pi,\pi\pi,...$ emessa nelle transizioni. Gli adroni leggeri sono sistemi relativistici, con spin splitting dell'ordine di ~100 MeV, molto superiori alle masse dei quarks. Gli adroni pesanti sono sistemi quasi relativistici. Non esistono mesoni stabili: il + longevo e' il π carico , che 'vive' 26 nsec. Tutti i barioni eccetto il protone sono instabili. Quindi oltre a studiare transizioni, studiamo 'annichilazioni'.

Prima del 1974: Spettroscopia adronica con 3 flavors

Situazione sperimentale

Mesoni : 2 nonetti completi (0^{-+} e 1^{--}) . Mixing degli Isosingoletti.
Barioni : Decupletto ($3/2^{+}$) e Ottetto($1/2^{+}$).

Molte altre risonanze identificate, con larghezze dell'ordine di 100-200 MeV (tipiche delle transizioni forti). Grandi difficolta' nell'attribuzione dei numeri quantici per via di effetti di interferenza.

Tecniche sperimentali: Camere a bolle, Contatori.
Fasci disponibili: p,$\mathbb{p}$,π,K.

$N\,^{2S+1}L_J$	J^{PC}	$u\overline{d}$, $u\overline{u}$, $d\overline{d}$ $I=1$	$u\overline{u}$, $d\overline{d}$, $s\overline{s}$ $I=0$		$\overline{s}u$, $\overline{s}d$ $I=1/2$	
$1\,^1S_0$	0^{-+}	π	η, η'		K	
$1\,^3S_1$	1^{--}	ρ	ω, ϕ		$K^*(892)$	
$1\,^1P_1$	1^{+-}	$b_1(1235)$	$h_1(1170)$, $h_1(1380)$		$K_{1B}{}^\dagger$	
$1\,^3P_0$	0^{++}	$a_0(1450)^*$	$f_0(1370)^*$, $f_0(1710)^*$		$K_0^*(1430)$	
$1\,^3P_1$	1^{++}	$a_1(1260)$	$f_1(1285)$, $f_1(1420)$		$K_{1A}{}^\dagger$	
$1\,^3P_2$	2^{++}	$a_2(1320)$	$f_2(1270)$, $f_2'(1525)$		$K_2^*(1430)$	
$1\,^1D_2$	2^{-+}	$\pi_2(1670)$	$\eta_2(1645)$, $\eta_2(1870)$		$K_2(1770)$	
$1\,^3D_1$	1^{--}	$\rho(1700)$	$\omega(1650)$		$K^*(1680)^\ddagger$	
$1\,^3D_2$	2^{--}				$K_2(1820)$	
$1\,^3D_3$	3^{--}	$\rho_3(1690)$	$\omega_3(1670)$, $\phi_3(1850)$		$K_3^*(1780)$	
$1\,^3F_4$	4^{++}	$a_4(2040)$	$f_4(2050)$, $f_4(2220)$		$K_4^*(2045)$	
$2\,^1S_0$	0^{-+}	$\pi(1300)$	$\eta(1295)$, $\eta(1440)$		$K(1460)$	
$2\,^3S_1$	1^{--}	$\rho(1450)$	$\omega(1420)$, $\phi(1680)$		$K^*(1410)^\ddagger$	
$2\,^3P_2$	2^{++}	$a_2(1700)$	$f_2(1950)$, $f_2(2010)$		$K_2^*(1980)$	
$3\,^1S_0$	0^{-+}	$\pi(1800)$	$\eta(1760)$		$K(1830)$	

Prima del 1974: Spettroscopia adronica con 3 flavors

Teorie Pre-QCD , oltre la QCD

Generalizzazione relativistica delle traiettorie di Regge (Chew-Frautschi) descrive con discreto successo molte delle risonanze osservate.

$$J(m) = \alpha_0 + \alpha' m^2$$

Veneziano (1968) propone un modello per descrivere sistemi legati relativistici in cui e' la densita' di energia del campo che tiene insieme i costituenti a essere responsabile della massa dell'adrone. La slope della traiettoria sarebbe dunque interpretabile come densita' di energia della stringa: $\alpha' = 1/(2\pi\sigma)$

Questi modelli stanno ritornando di attualita', come teorie efficaci nel limite non perturbativo della QCD.

Il modello di Regge-Chew-Veneziano come limite di bassa energia delle interazioni forti

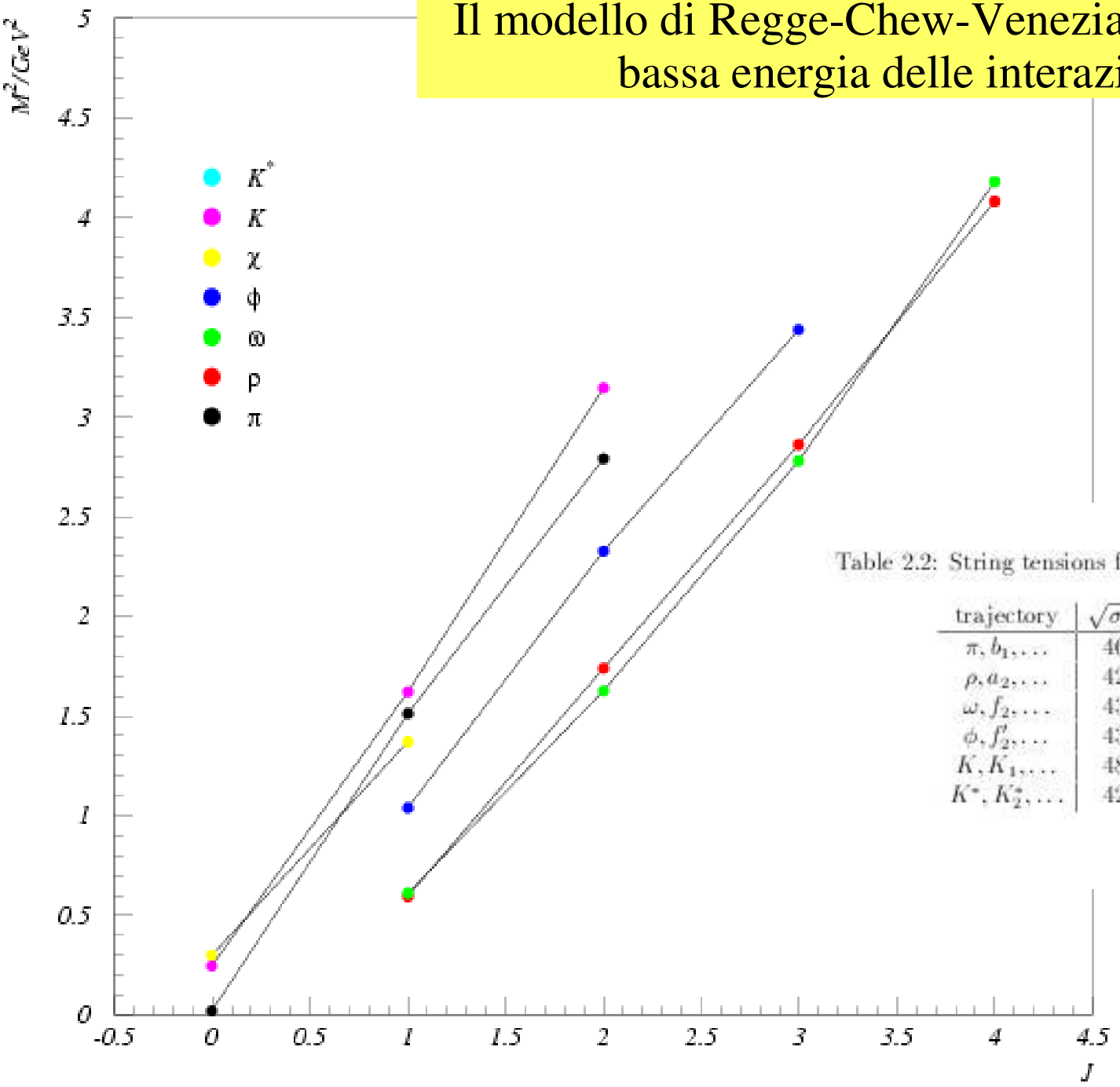


Table 2.2: String tensions from Regge trajectories.

trajectory	$\sqrt{\sigma}$/MeV	ΔJ
$\pi, b_1, \ldots$	469(6)	0.06
$\rho, a_2, \ldots$	429(2)	0.03
$\omega, f_2, \ldots$	436(8)	0.12
$\phi, f_2', \ldots$	437(5)	0.06
$K, K_1, \ldots$	480(4)	0.04
$K^*, K_2^*, \ldots$	424(5)	0.07

La November Revolution

Novembre 1974: scoperta della J/ψ

Ting a Brookhaven [p(30 GeV)+Be → e^+e^- X]:

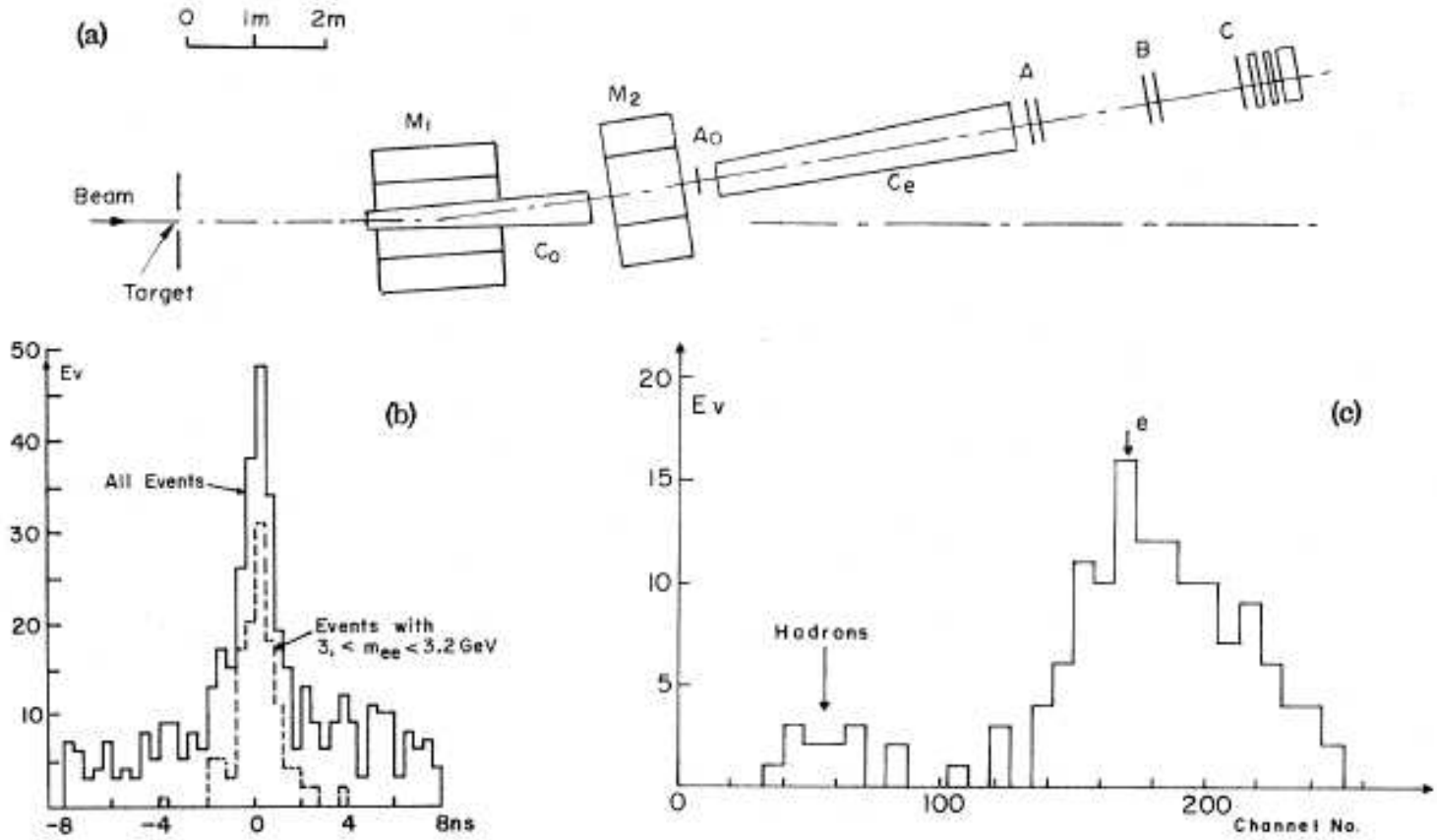


FIG. 1. (a) Simplified side view of one of the spectrometer arms. (b) Time-of-flight spectrum of e^+e^- pairs and of those events with $3.0 < m < 3.2$ GeV. (c) Pulse-height spectrum of e^- (same for e^+) of the e^+e^- pair.

1404

La November Revolution

Novembre 1974: scoperta della J/ψ

Ting a Brookhaven [p(30 GeV)+Be → e^+e^- X]:

produzione inclusiva di coppie e^+e^- (Drell-Yan)

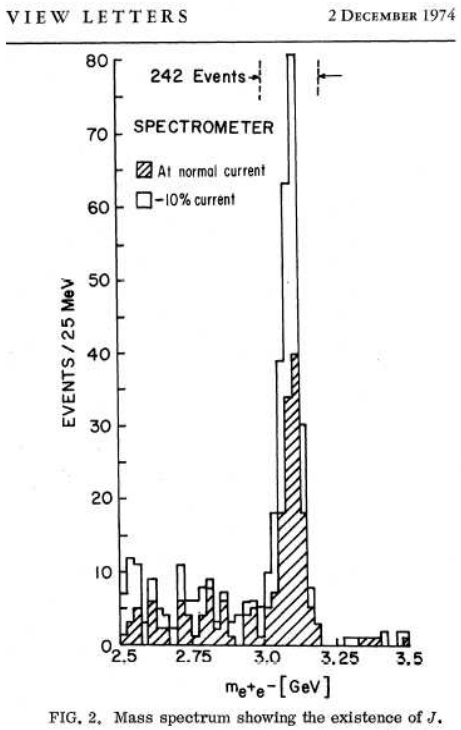


FIG. 2. Mass spectrum showing the existence of *J*.

La November Revolution

Novembre 1974: scoperta della J/ψ

Ting a Brookhaven [p(30 GeV)+Be → e^+e^- X] :
produzione inclusiva di coppie e^+e^- (Drell-Yan)

Richter a SLAC [e^+e^- (3.1GeV) → adroni, $\mu^+\mu^-$, e^+e^-]:
formazione di adroni etc... in annichilazione e^+e^-
in anelli di accumulazione ee.

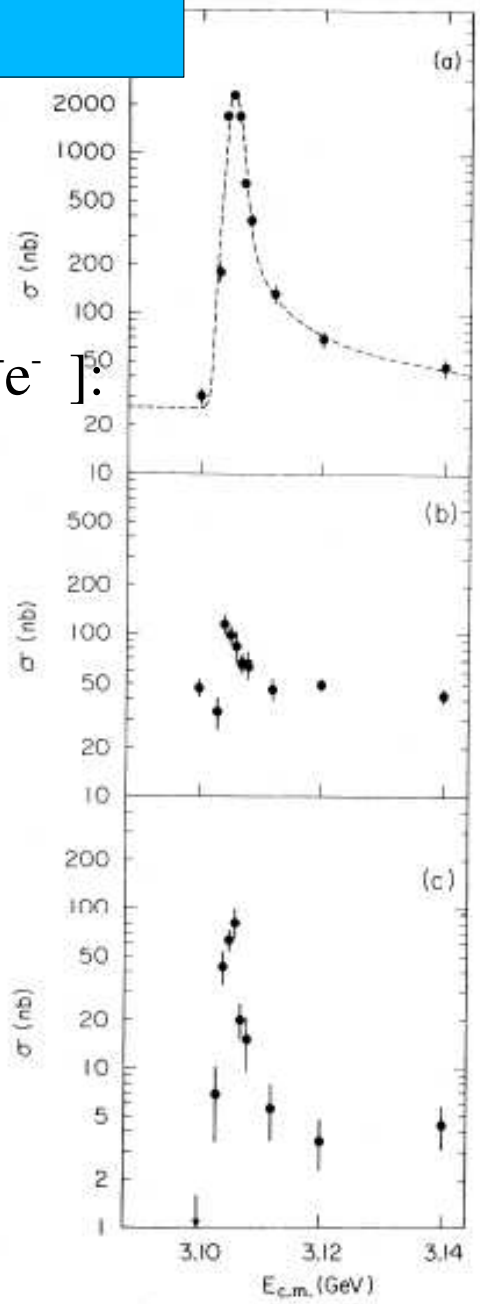


FIG. 1. Cross section versus energy for (a) multihadron final states, (b) e^+e^- final states, and (c) $\mu^+\mu^-$, $\pi^+\pi^-$, and K^+K^- final states. The curve in (a) is the ex-

La November Revolution

Novembre 1974: scoperta della J/ψ

Ting a Brookhaven [p(30 GeV)+Be → e^+e^- X] :

produzione inclusiva di coppie e^+e^- (Drell-Yan

Richter a SLAC [e^+e^- (3.1GeV) → adroni, $\mu^+\mu^-$

formazione di adroni etc... in annichilazione e^+

in anelli di accumulazione ee.

...e immediatamente dopo: ADONE (Frascati)

che aveva E_{max} = 3 GeV (pura sfortuna ...)

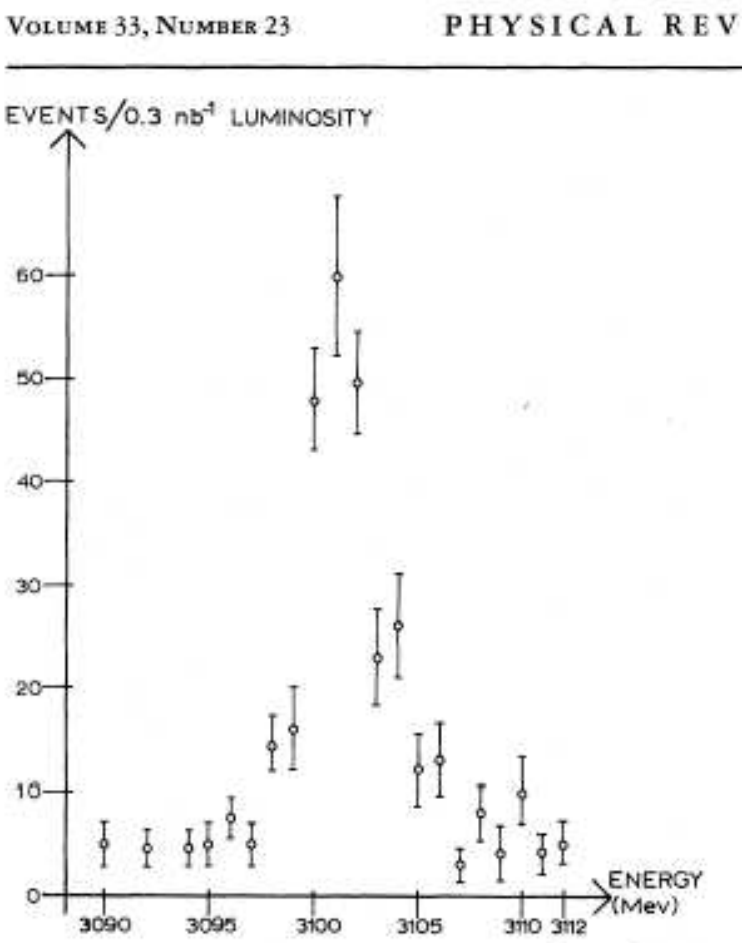


FIG. 1. Result from the Gamma-Gamma Group, total of 446 events. The number of events per 0.3 nb^{-1} luminosity is plotted versus the total c.m. energy of the machine.

La November Revolution

Novembre 1974: scoperta della J/ψ

Ting a Brookhaven [p(30 GeV)+Be → e^+e^- X

produzione inclusiva di coppie e^+e^- (Drell-Y

Richter a SLAC [e^+e^- (3.1GeV) → adroni, μ

formazione di adroni etc... in annichilazione

in anelli di accumulazione ee.

...e immediatamente dopo: ADONE (Frascat

che aveva E_{max} = 3 GeV (pura sfortuna ...)

1974: scoperta della ψ'

Richter,SLAC [e^+e^- (3.69 GeV) → adroni]

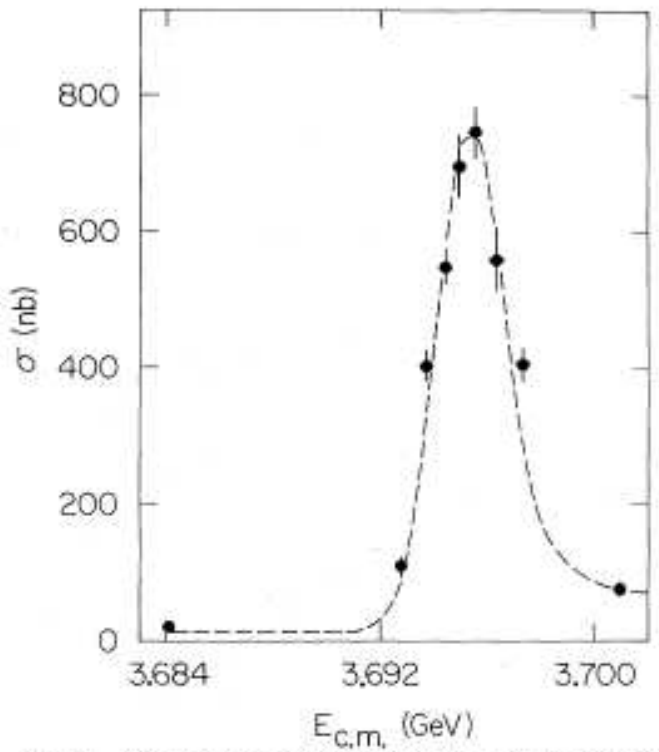


FIG. 2. Total cross section for e^+e^- → hadrons corrected for detection efficiency. The dashed curve is the expected resolution folded with the radiative corrections. The errors shown are statistical only.

La November Revolution

Novembre 1974: scoperta della J/ψ

Ting a Brookhaven [p(30 GeV)+Be → e^+e^- X] :

produzione inclusiva di coppie e^+e^- (Drell-Yan)

Richter a SLAC [e^+e^- (3.1GeV) → adroni, $\mu^+\mu^-$, e^+e^-]:

formazione di adroni etc... in annichilazione e^+e^-

in anelli di accumulazione ee.

...e immediatamente dopo: ADONE (Frascati)

che aveva E_{max} = 3 GeV (pura sfortuna ...)

1974: scoperta della ψ'

Richter,SLAC [e^+e^- (3.69 GeV) → adroni]

1975: scoperta delle χ

Richter,SLAC [e^+e^- (3.69 GeV) →ψ'→ KK, $\pi^+\pi^-$, KπKπ + X]

1975: scoperta dei mesoni D

Richter,SLAC [e^+e^- (3.9-4.3 GeV) → Kπ, Kπππ + X]

La November Revolution

Novembre 1974: scoperta della J/ψ

Ting a Brookhaven [p(30 GeV)+Be → e^+e^- X] :

produzione inclusiva di coppie e^+e^- (Drell-Yan)

Richter a SLAC [e^+e^- (3.1GeV) → adroni, $\mu^+\mu^-$, e^+e^-]:

formazione di adroni etc... in annichilazione e^+e^-

in anelli di accumulazione ee.

...e immediatamente dopo: ADONE (Frascati)

che aveva E_{max} = 3 GeV (pura sfortuna ...)

1974: scoperta della ψ'

Richter,SLAC [e^+e^- (3.69 GeV) → adroni]

1975: scoperta delle χ

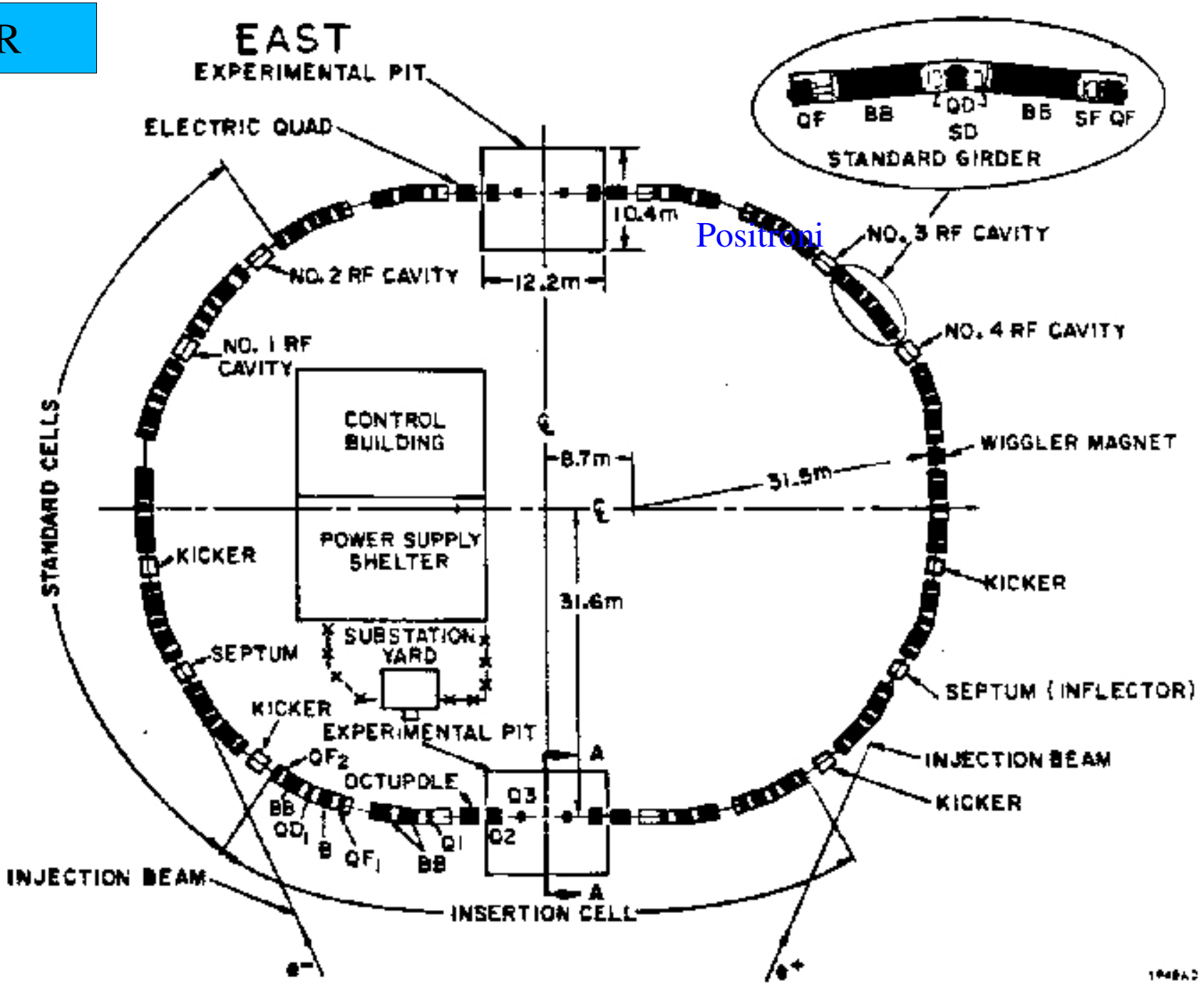
Richter,SLAC [e^+e^- (3.69 GeV) →ψ'→ KK, $\pi^+\pi^-$, Kπ Kπ + X]

1975: scoperta dei mesoni D

Richter,SLAC [e^+e^- (3.9-4.3 GeV) → Kπ, Kπππ + X]

1976: scoperta dei barioni charmati

SPEAR


EAST
EXPERIMENTAL PIT
ELECTRIC QUAD
QF
BB
QD
SD
BB
SF QF
STANDARD GIRDER
10.4m
Positroni
NO. 3 RF CAVITY
12.2m
NO. 2 RF CAVITY
NO. 4 RF CAVITY
NO. 1 RF CAVITY
CONTROL BUILDING
WIGGLER MAGNET
8.7m
31.5m
STANDARD CELLS
KICKER
POWER SUPPLY SHELTER
KICKER
31.6m
SUBSTATION YARD
SEPTUM
SEPTUM (INFLECTOR)
KICKER
EXPERIMENTAL PIT
A
QF_2
OCTUPOLE
Q3
INJECTION BEAM
BB
QD_1
B
QF_1
Q1
BB
Q2
KICKER
INJECTION BEAM
INSERTION CELL
A
e^-
e^+

Mark-I a SPEAR

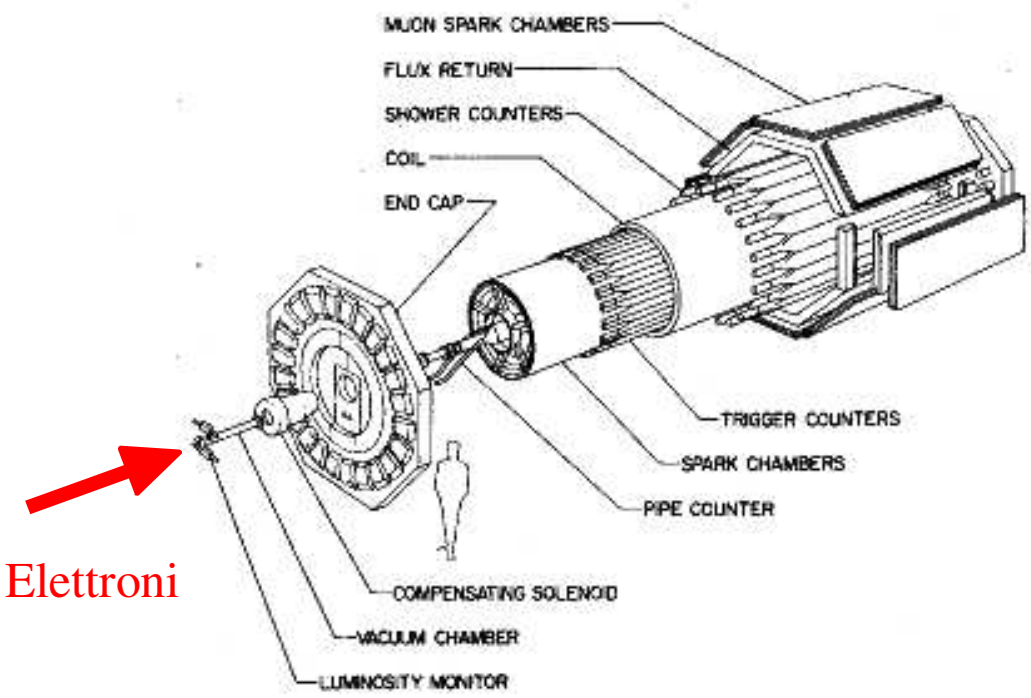


FIG. 2. An exploded view of the SLAC–LBL magnetic detector.

Positroni

Elettroni

Struttura a strati cilindrici di uno dei primi collider detectors:

- Pipe counters : scintillatori vicino al tubo di fascio
- Rivelatori di tracking: camere a scintilla
- Contatori di Trigger: di nuovo scintillatori
- Magnete Solenoidale
- Shower Counters: Calorimetro
- Flux Return: ferro per contenere le linee di campo magnetico, e bloccare gli adroni
- Rivelatori di muoni: di nuovo spark chambers

La firma della ψ'

Event display di uno dei primi eventi di decadimento della ψ' in

ψππ → e+e- ππ

Il nome della risonanza e' dato dalla forma degli eventi...

(Ting la chiama J, perche' J assomiglia all'ideogramma cinese del suo nome)

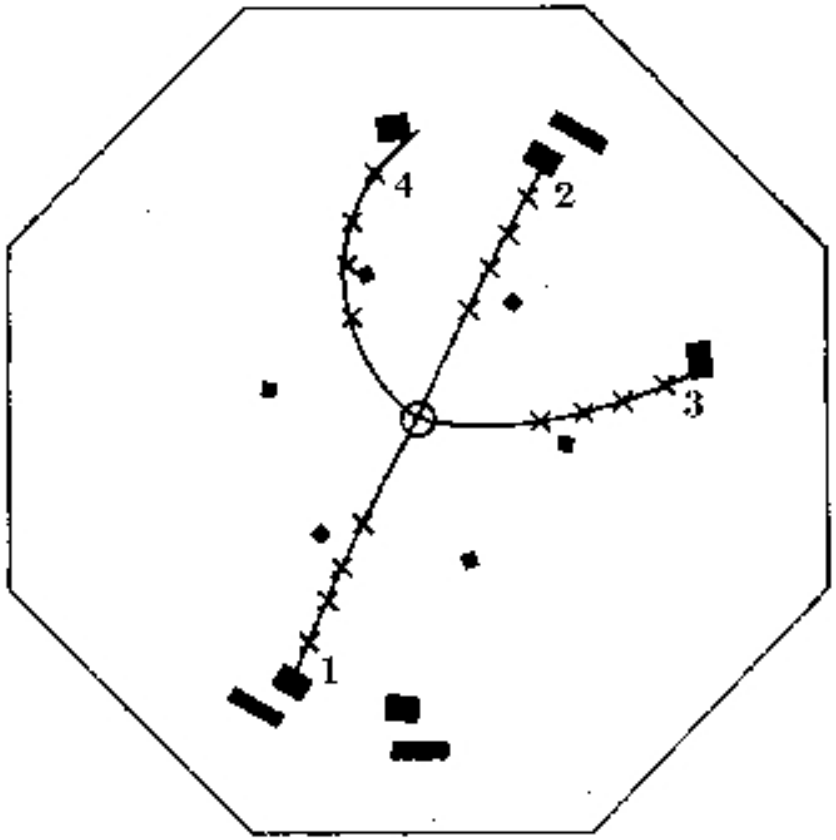


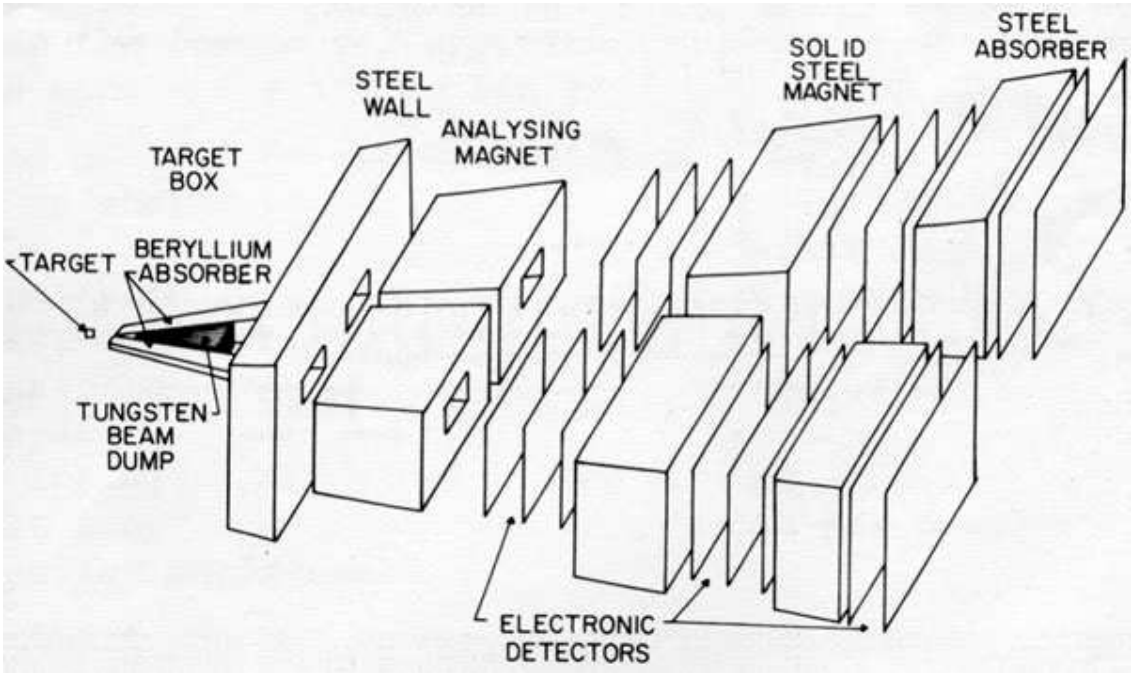
FIG. 3. An example of the decay $\psi(3684) \to \pi^+ + \pi^- + \psi(3095)$, where $\psi(3095) \to e^+ + e^-$, from an off-line reconstruction of the data. The event is seen in the x-y projection where z is the beam (and magnetic field) direction. Also shown are the trigger and shower counters which detected the tracks. Tracks 3 and 4 are the slow pions and tracks 1 and 2 are the two leptons from $\psi(3095)$ decay.

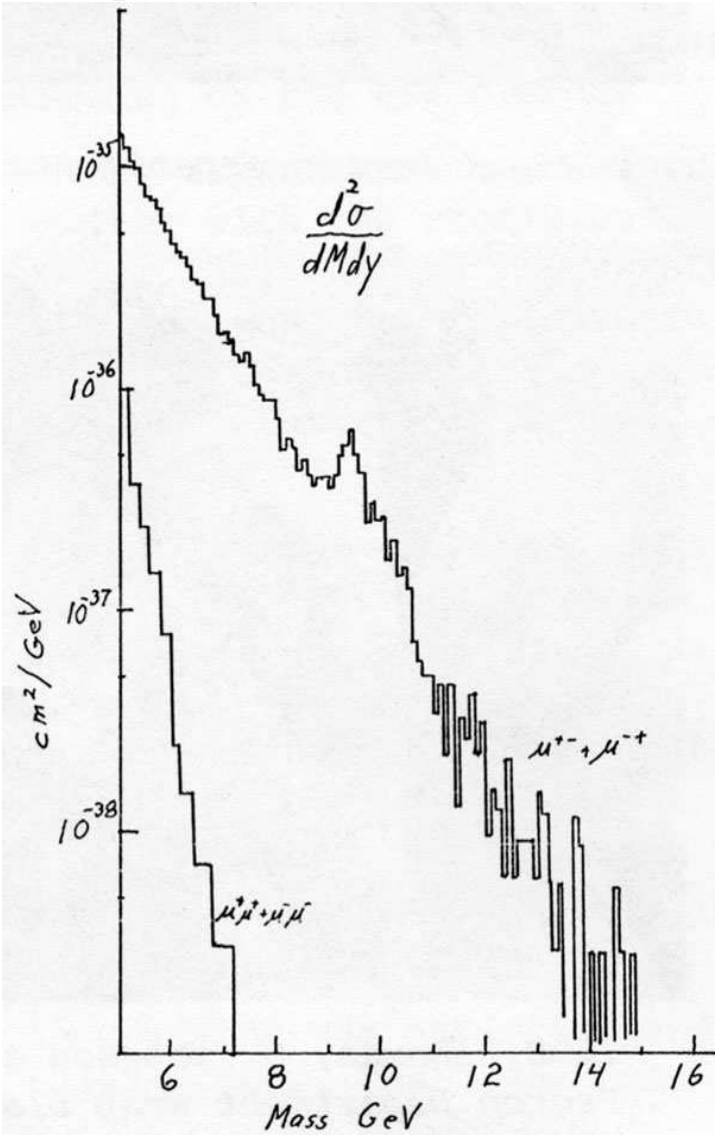
La November Revolution, atto II: il Bottomonio

Novembre 1977: scoperta delle Y

Lederman a Fermilab [p(400 GeV)+Cu,Pt → $\mu^+\mu^-$ X] :

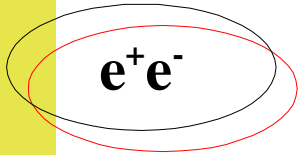
produzione inclusiva di coppie $\mu^+\mu^-$ (Drell-Yan)





Fabbriche di Charm

SPEAR , SLAC (Stanford) : Mark I,II,III
SPEAR , SLAC (Stanford) : Crystal Ball
DORIS I , DESY (Hamburg) : DASP
DCI, Orsay : DM2
VEPP, Novosibirsk



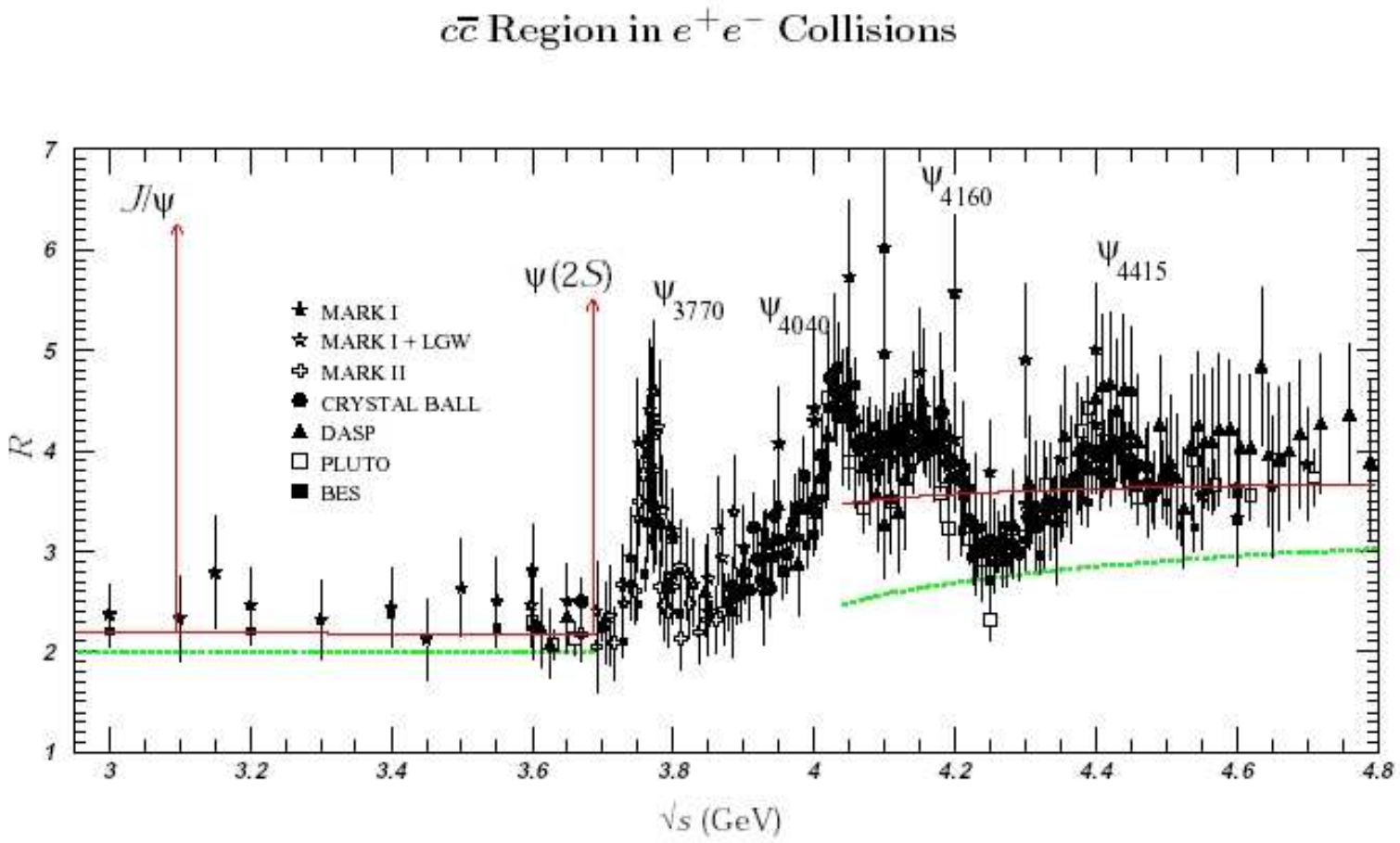
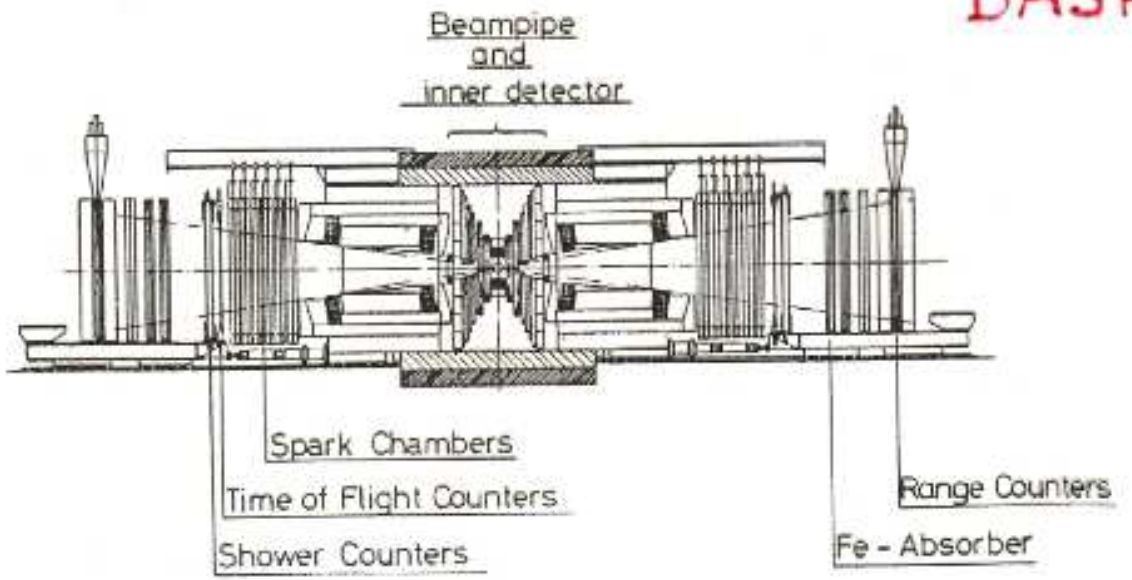


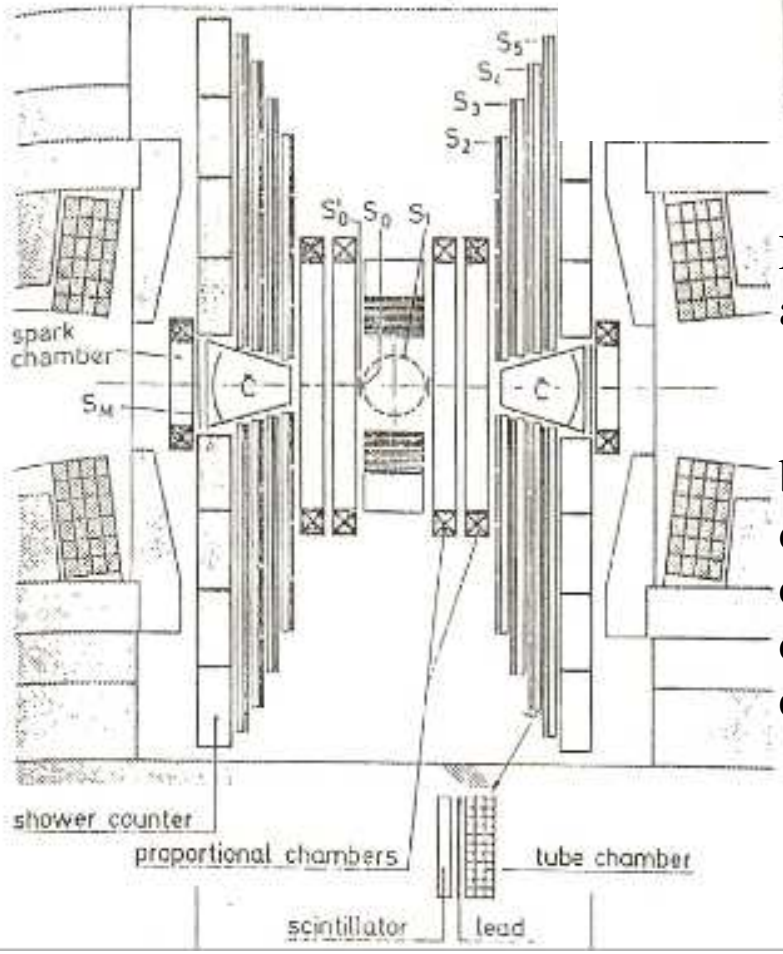
Figure 39.8: The ratio $R = \sigma(e^+e^- \to hadrons)/\sigma(e^+e^- \to \mu^+\mu^-, \text{QED-simple pole})$ in the $c\bar{c}$ region. (See the caption for Figs. [39.6–39.7]). Note: The experimental shapes of J/ψ and $\psi(2S)$ resonances are dominated by machine energy spread and are not shown.

MARK I: J.E. Augustin *et al.*, Phys. Rev. Lett. 34, 764 (1975); and J.L. Siegrist *et al.*, Phys. Rev. D26, 969 (1982).
MARK I + Lead Glass Wall: P.A. Rapidis *et al.*, Phys. Rev. Lett. 39, 526 (1977).
MARK II: R.H. Schindler, SLAC-Report-219 (1979).
CRYSTAL BALL: A. Osterheld *et al.*, SLAC-Pub-4160 (1986).
DASP: R. Brandelik *et al.*, Phys. Lett. 76B, 361 (1978).
PLUTO: L. Criegee and G. Knies, Phys. Reports 83, 151 (1982).
BES: J.Z. Bai *et al.*, Phys. Rev. Lett. 84, 594 (2000); and J.Z. Bai *et al.*, Phys. Rev. Lett. 88, 101802 (2002).

DASP a DESY

DASP





Limiti delle geometrie planari nei colliders:

a) Minore accettanza:

57% di 4π

b) Selezione di eventi a piccoli angoli, di tipo diffrattivo.

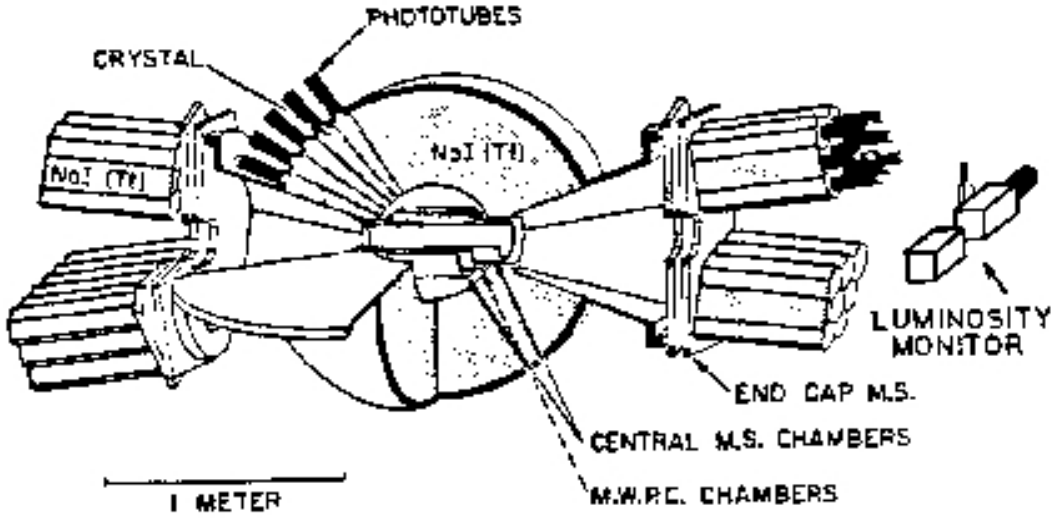
c) Resta comunque una buona tecnica per costruire i cosiddetti endcap di un rivelatore ermetico

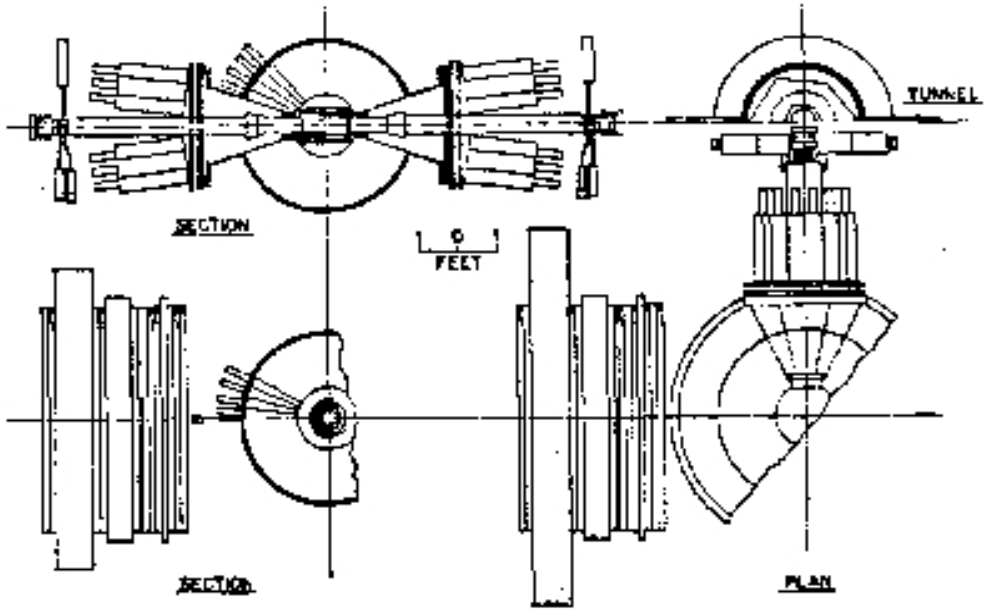
Crystal Ball(1980)

Anticipando molti moderni calorimetri, utilizza cristalli di Ioduro di Sodio (NaI).

Lo Ioduro di Cesio (CsI) sara' usato da CLEO, Belle, BaBar, BESIII.

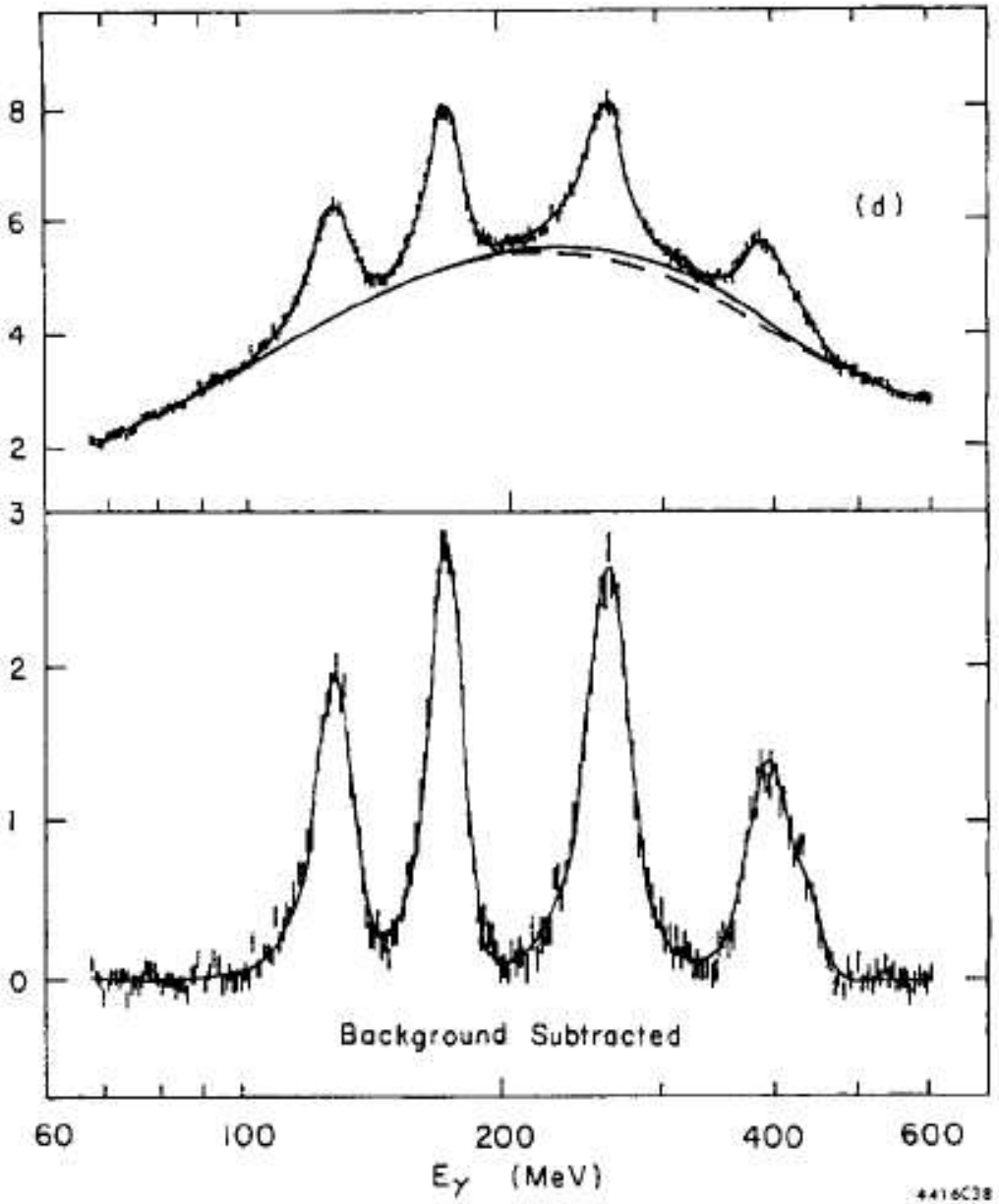
Crystal Ball attraverso' pure l'oceano: da SPEAR (dove studio' il charmonio), fu portata a DESY, per studiare il bottomonio.



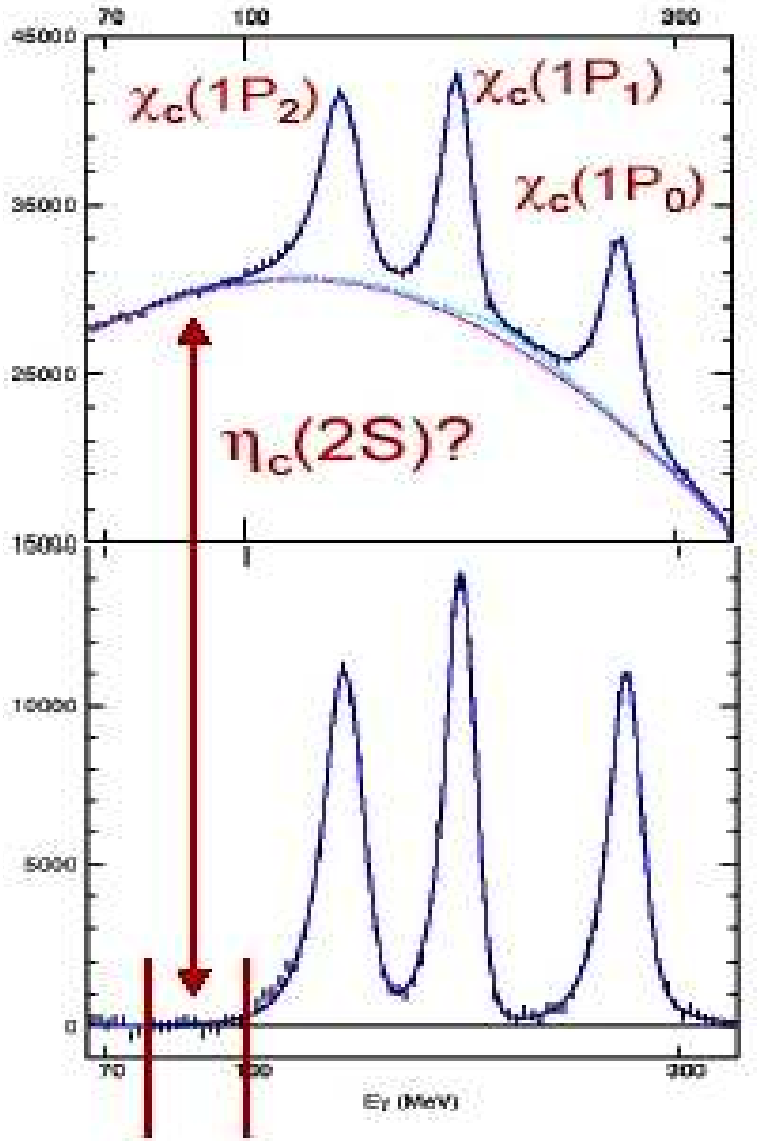


THE CRYSTAL BALL EXPERIMENT

Inclusive photon data spectrum : E1 peaks



Crystal Ball 1982 : 1.8 M ψ(2s)



CLEO-c 2002 : 1.5 M ψ(2s)

Fabbriche di Charm

SPEAR , SLAC (Stanford) : Mark I,II,III
SPEAR , SLAC (Stanford) : Crystal Ball
DORIS I , DESY (Hamburg) : DASP
DCI, Orsay : DM2
VEPP, Novosibirsk

e^+e^-

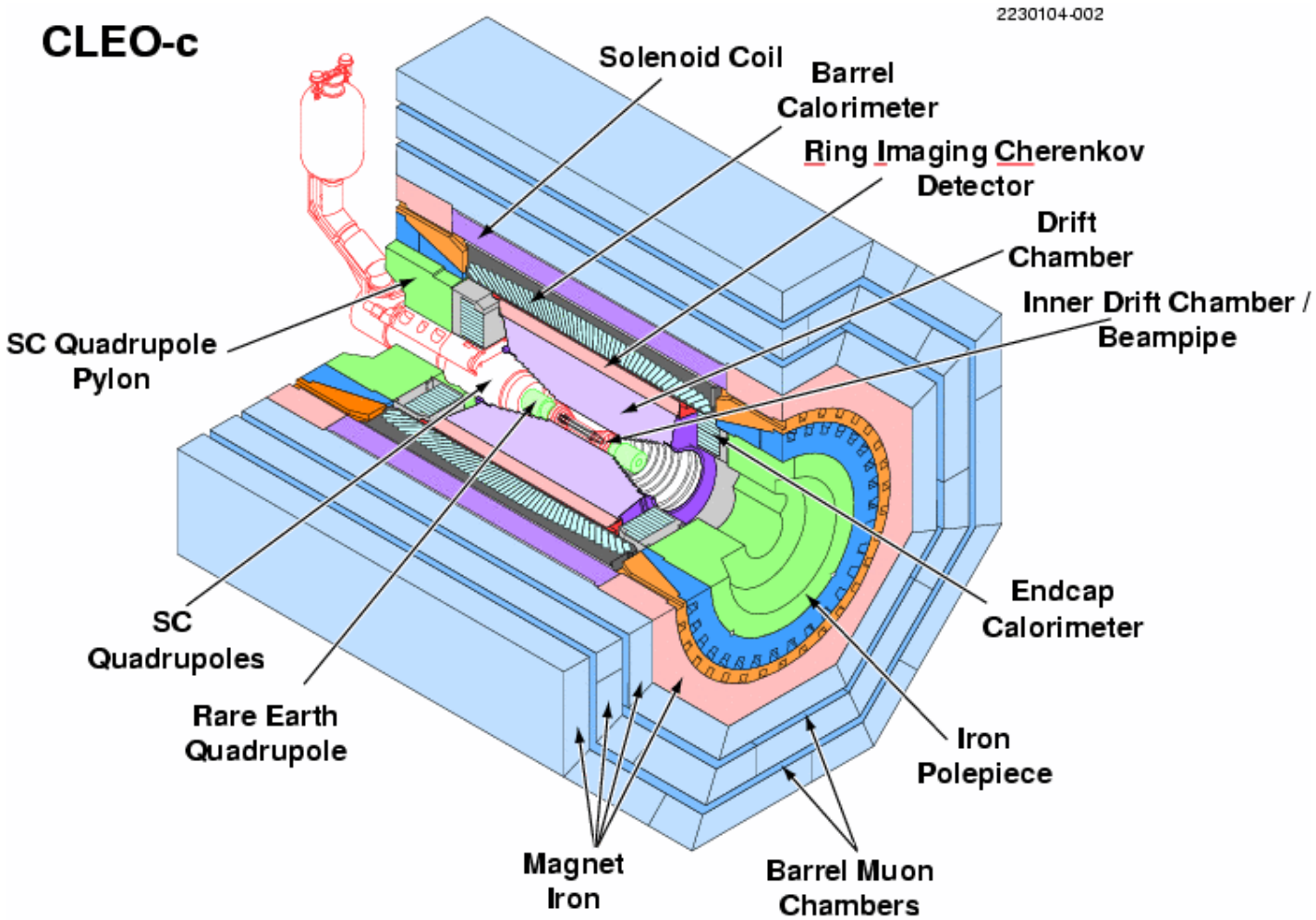
... e di Beauty

DORIS II, DESY (Hamburg) : Crystal Ball, Argus
PETRA, DESY (Hamburg): PLUTO (1979,81-82)
CESR, Cornell : CUSB (1985-1991)

CESR, Cornell: CLEO I,II,III(1980-2003)

e^+e^-

CLEO-c a CESR (Cornell)



Rispetto ai suoi antenati, CLEO ha:

- Accettanza 96%
- Calorimetria a CsI
- Particle ID con un Ring Imaging Cerenkov
- Camere multifilo per il tracciamento

$D^{*\pm}$-meson width

CLEO : first measurement of the narrow width of the $D^{*\pm}$ meson, from the exact determination of the Q of the reaction:

$$D^{*\pm} \rightarrow \pi^{\pm} D^0$$

hep-ex/0108043 , to be published on Phys.Rev.D

Key factor:10μm transverse size of interaction region.

$\Gamma(D^{*\pm}) = 96 \pm 4(stat) \pm 22(syst)$ keV

PDG(2000): > 132 keV(90% CL)

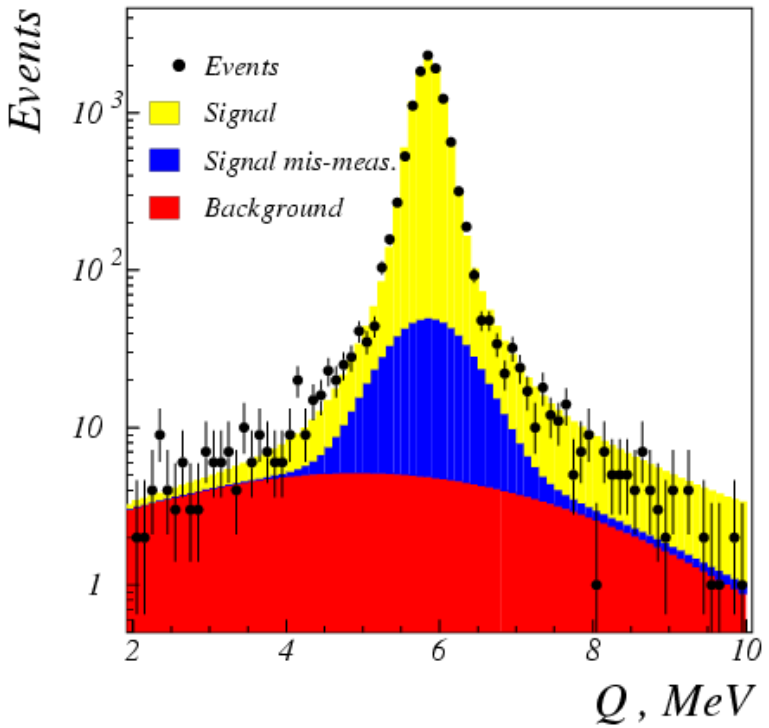
Mass splitting, from the Q value:

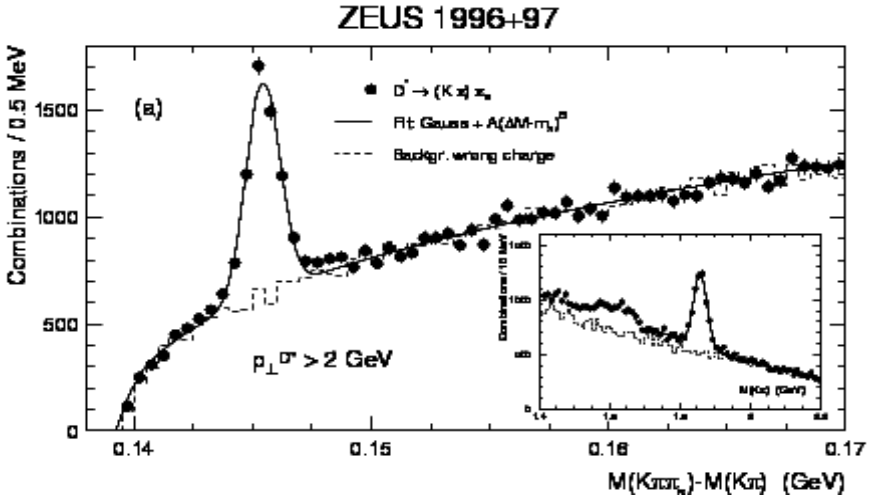
$M(D^{*\pm})-M(D^0) = 145.412 \pm 0.002 \pm 0.012(syst)$ MeV/c^2

to be compared with the ZEUS result(1999):

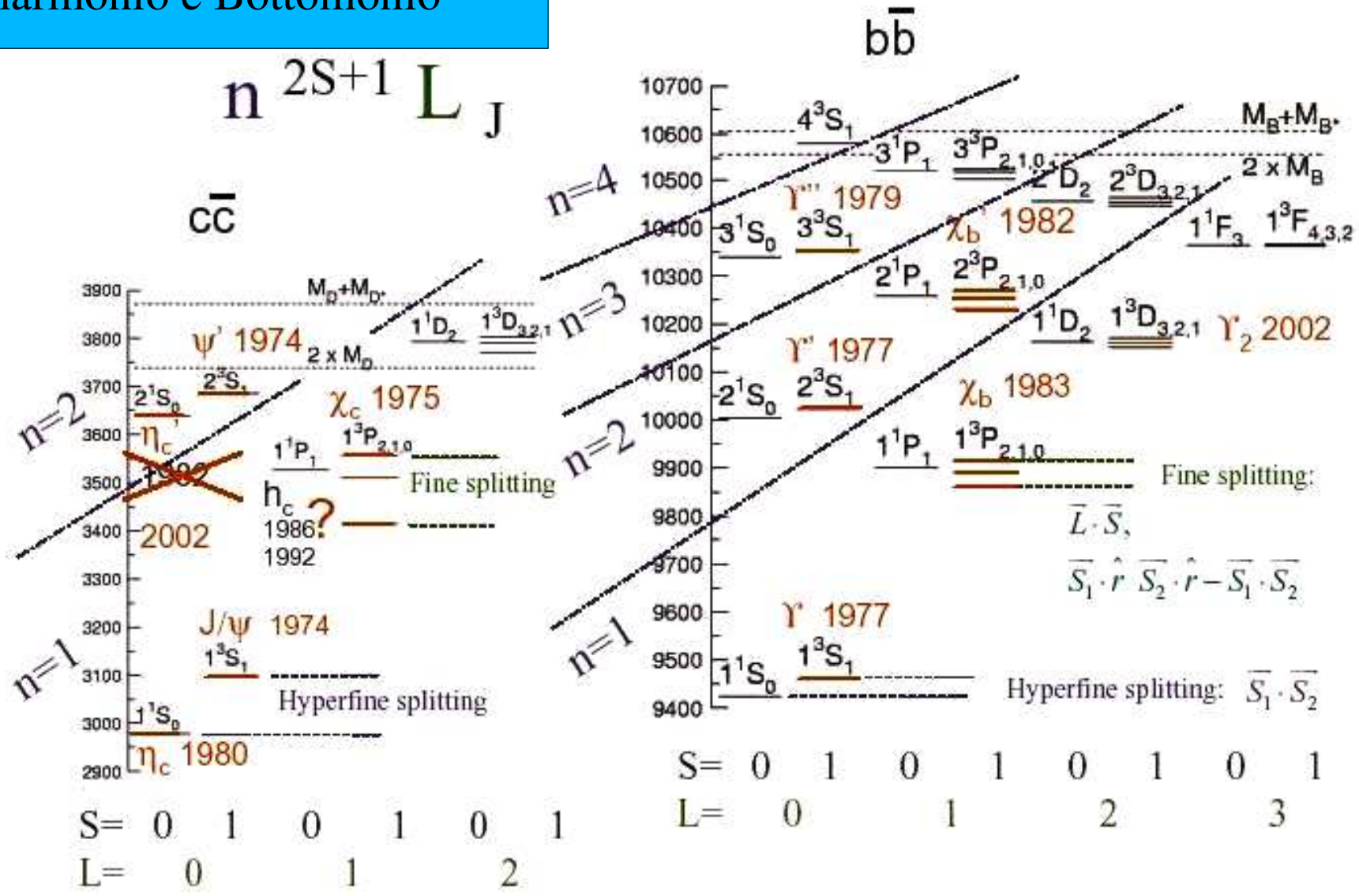
$M(D^{*\pm})-M(D^0) = 145.45 \pm 0.02$ MeV/c^2

Breitweg et al., Eur.Phys.J.C6(1999),67-83





Charmonio e Bottomonio

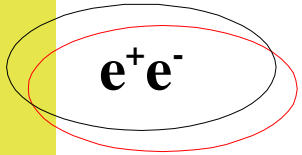


In meno di 10 anni si scoprono dunque 2 stati ψ sotto soglia (e 4 sopra),4 Y,3χ_c,6χ_b,2η_c (di cui uno sbagliato). Gli heavy quarkonia sono estensivamente studiati teoricamente: dalla spettroscopia si passa allo studio sistematico delle loro caratteristiche.

Fabbriche di Charm

SPEAR , SLAC (Stanford) : Mark I,II,III
SPEAR , SLAC (Stanford) : Crystal Ball
DORIS I , DESY (Hamburg) : DASP
DCI, Orsay : DM2
VEPP, Novosibirsk

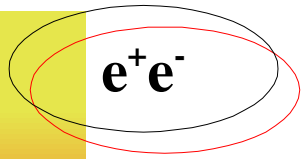
BEPC I, Pechino : BES I,II
VEPP-4M, Novosibirsk: KEDR (presente)
CESR-c, Cornell : CLEO-c (2004-2006)
BEPC II, Pechino: BES III (2007-?)



... e di Beauty

DORIS II, DESY (Hamburg) : Crystal Ball, Argus
PETRA, DESY (Hamburg): PLUTO (1979,81-82)
CESR, Cornell : CUSB (1985-1991)

CESR, Cornell: CLEO I,II,III(1980-2003)



Fabbriche di Charm

SPEAR , SLAC (Stanford) : Mark I,II,III
SPEAR , SLAC (Stanford) : Crystal Ball
DORIS I , DESY (Hamburg) : DASP
DCI, Orsay : DM2
VEPP, Novosibirsk

BEPC I, Pechino : BES I,II
VEPP-4M, Novosibirsk: KEDR (presente)
CESR-c, Cornell : CLEO-c (2004-2006)
BEPC II, Pechino: BES III (2007-?)

e^+e^-

$p\bar{p}$

ISR, CERN: R704 (1984)
AA, Fermilab: E760 (1989-90)
AA, Fermilab: E835 (1996,2000)

... e di Beauty

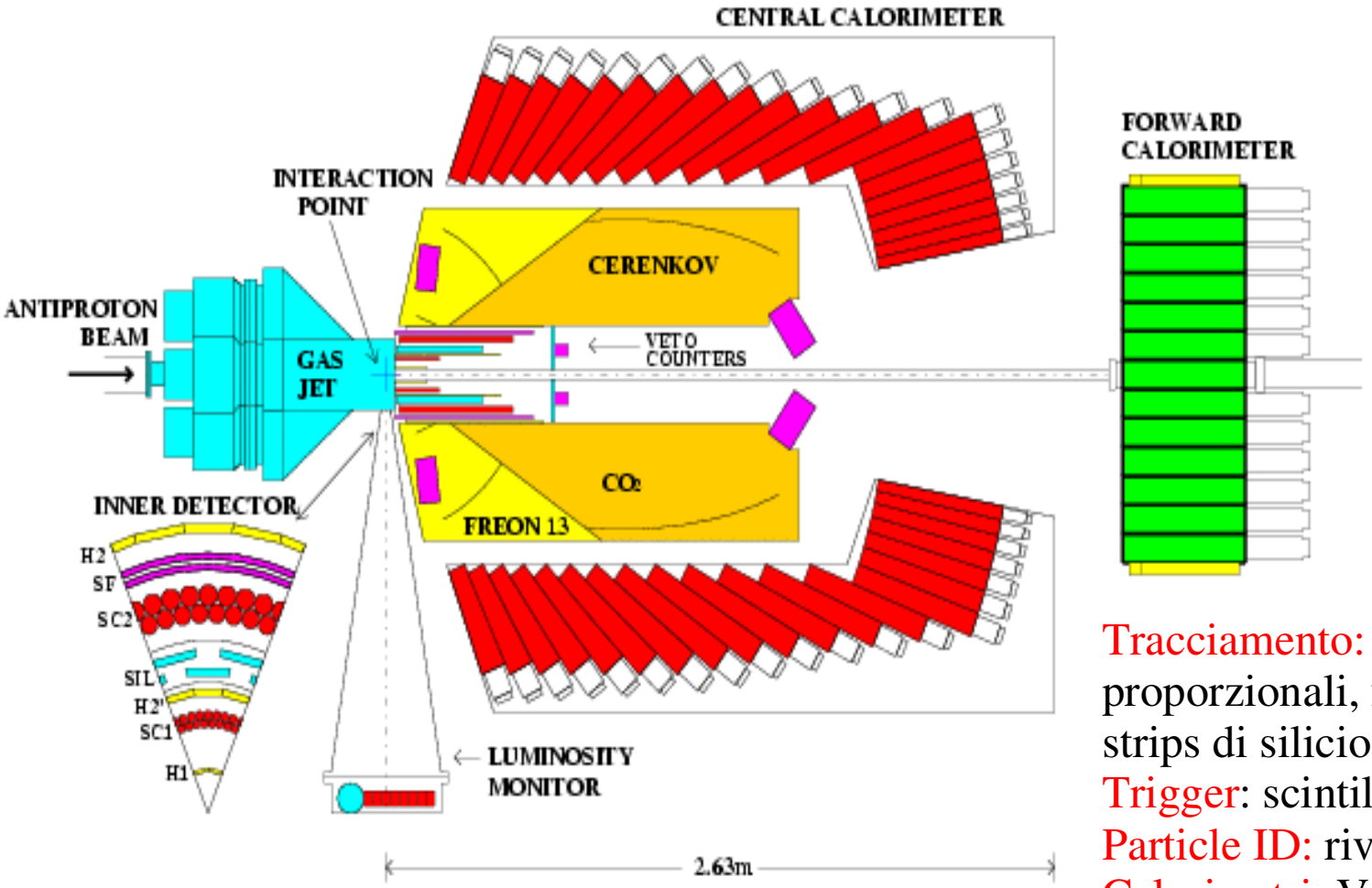
DORIS II, DESY (Hamburg) : Crystal Ball, Argus
PETRA, DESY (Hamburg): PLUTO (1979,81-82)
CESR, Cornell : CUSB (1985-1991)

CESR, Cornell: CLEO I,II,III(1980-2003)

e^+e^-

E835 a Fermilab: charmonio in annichilazioni protone-antiprotone

Bersaglio: un getto di idrogeno gassoso che interseca l'anello di accumulazione di antiprotoni.
Regione di interazione: meno di 0.5cm^3 (Geometria puntante)
Senza campo magnetico: non si misura il momento , ma solo l'energia elettromagnetica



Tracciamento: camere a drift proporzionali, fibre scintillanti, strips di silicio
Trigger: scintillatori
Particle ID: riv.Cerenkov a gas
Calorimetri: Vetro Piombo

Produzione di heavy flavors in altri esperimenti

Negli anni 80 e 90, lo studio dei mesoni e barioni charmati e' effettuato anche con una grande varieta' di tecniche a bersaglio fisso.

Per quanto riguarda le macchine elettrone-positrone, l'attenzione si sposta ad energie + elevate, per lo studio dell'unificazione elettrodebole, con la realizzazione del LEP al CERN e di SLC a Stanford.
Gli esperimenti di LEP (Aleph, Opal, Delphi, L3) danno comunque contributi anche allo studio degli heavy flavors.

Produzione in scattering νN:

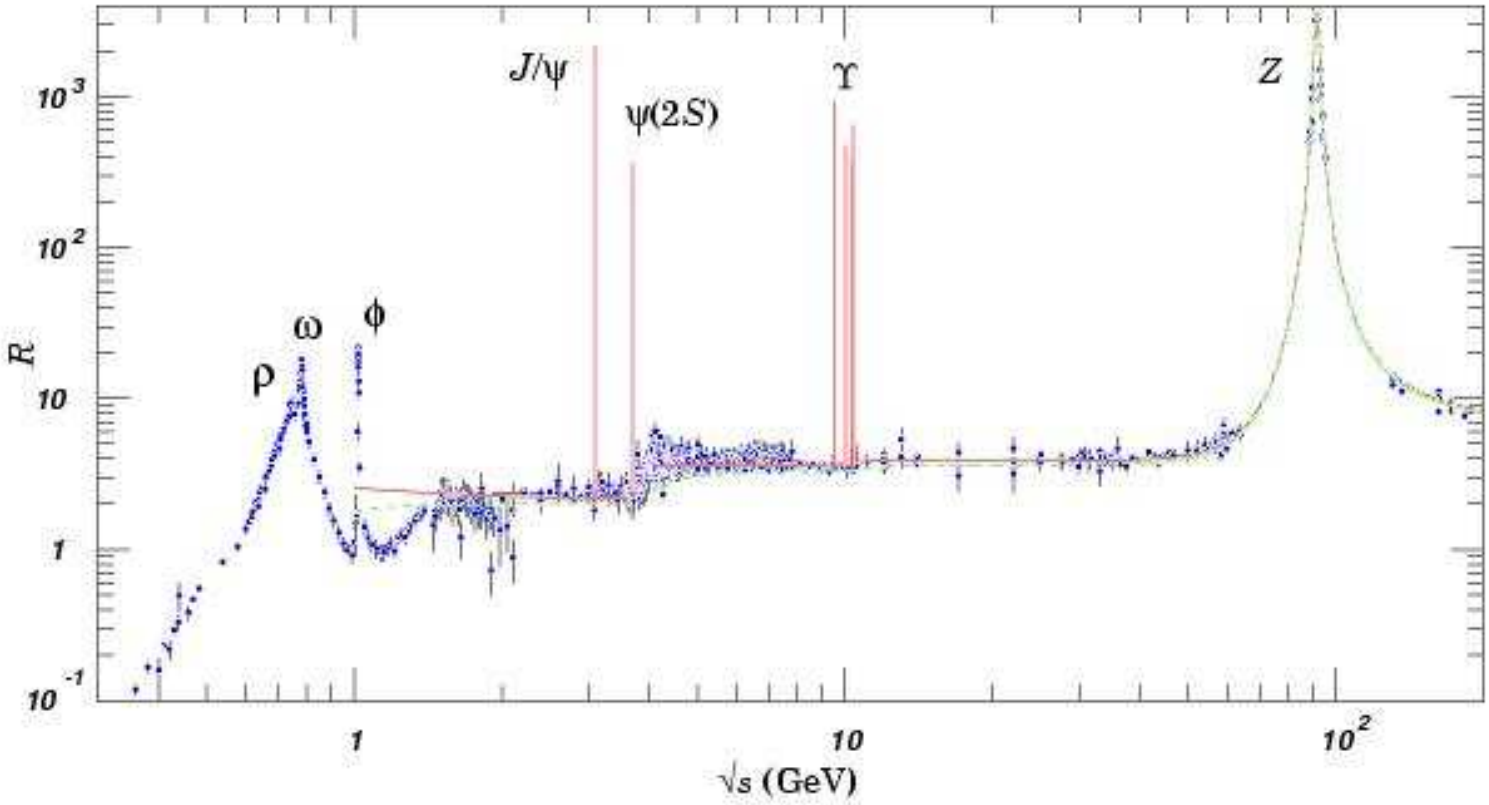
- WA21 (CERN)

Foto produzione:

- E691 (Fermilab)
- E687 (Fermilab)
- E831/FOCUS (Fermilab)

Adroproduzione:

- WA62 (CERN)
- WA89 (CERN)
- E791 (Fermilab)
- E781/SELEX (Fermilab)
- HeraB (DESY)


J/ψ
ψ(2S)
ϒ
Z
ρ
ω
ϕ
R
10^3
10^2
10
1
10^-1
1
10
10^2
√s (GeV)

Fabbriche di Charm

SPEAR , SLAC (Stanford) : Mark I,II,III
SPEAR , SLAC (Stanford) : Crystal Ball
DORIS I , DESY (Hamburg) : DASP
DCI, Orsay : DM2
VEPP, Novosibirsk

BEPC I, Pechino : BES I,II
VEPP-4M, Novosibirsk: KEDR (presente)
CESR-c, Cornell : CLEO-c (2004-2006)
BEPC II, Pechino: BES III (2007-?)

e^+e^-

$p\bar{p}$

ISR, CERN: R704 (1984)
AA, Fermilab: E760 (1989-90)
AA, Fermilab: E835 (1996,2000)

HESR, GSI (Darmstadt): Panda (2010?)

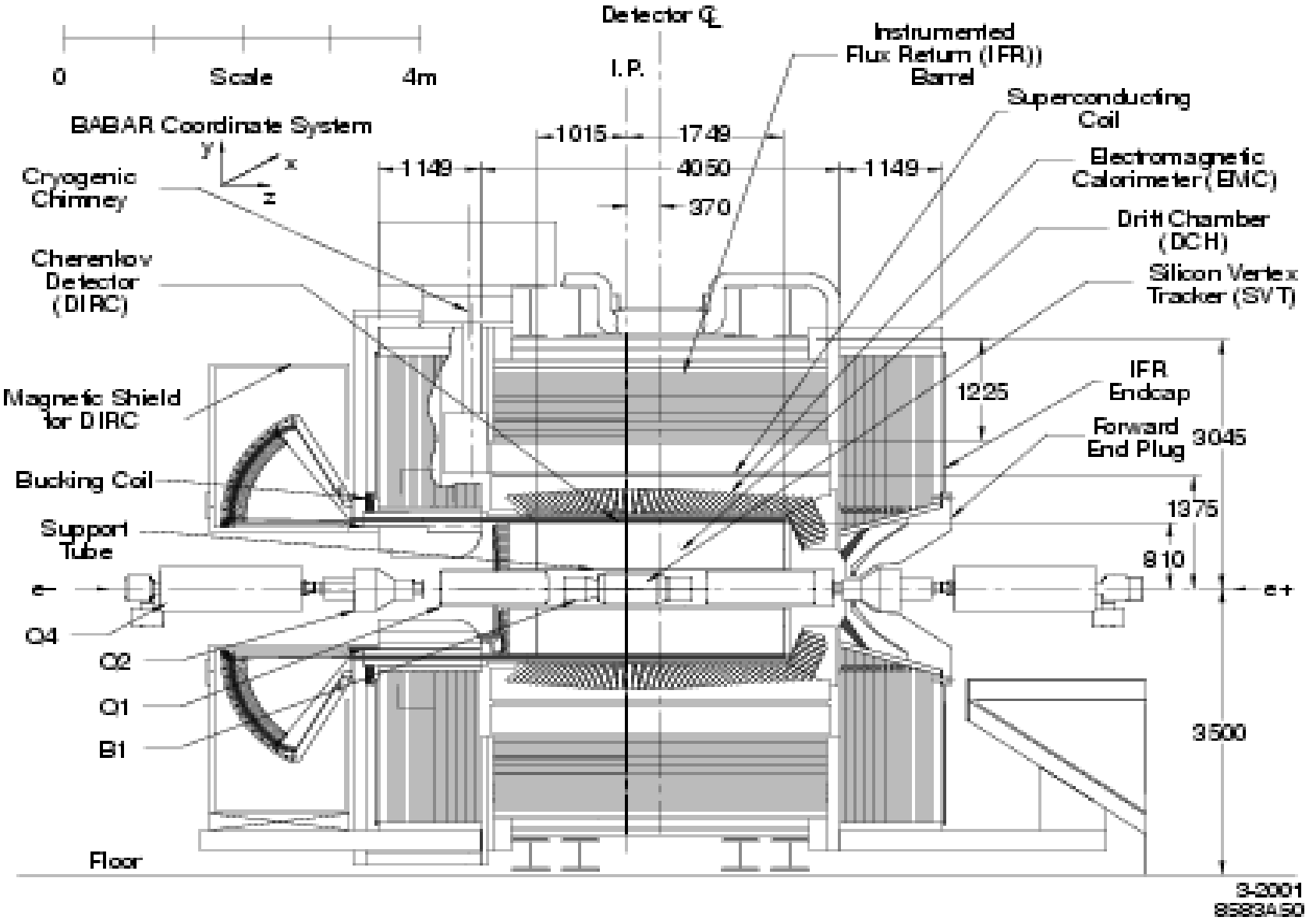
... e di Beauty

DORIS II, DESY (Hamburg) : Crystal Ball, Argus
PETRA, DESY (Hamburg): PLUTO (1979,81-82)
CESR, Cornell : CUSB (1985-1991)

CESR, Cornell: CLEO I,II,III(1980-2003)
PEP2, SLAC (Stanford): BaBar (1999-2006?)
KEKB, KEK: Belle (1999-2006?)

e^+e^-

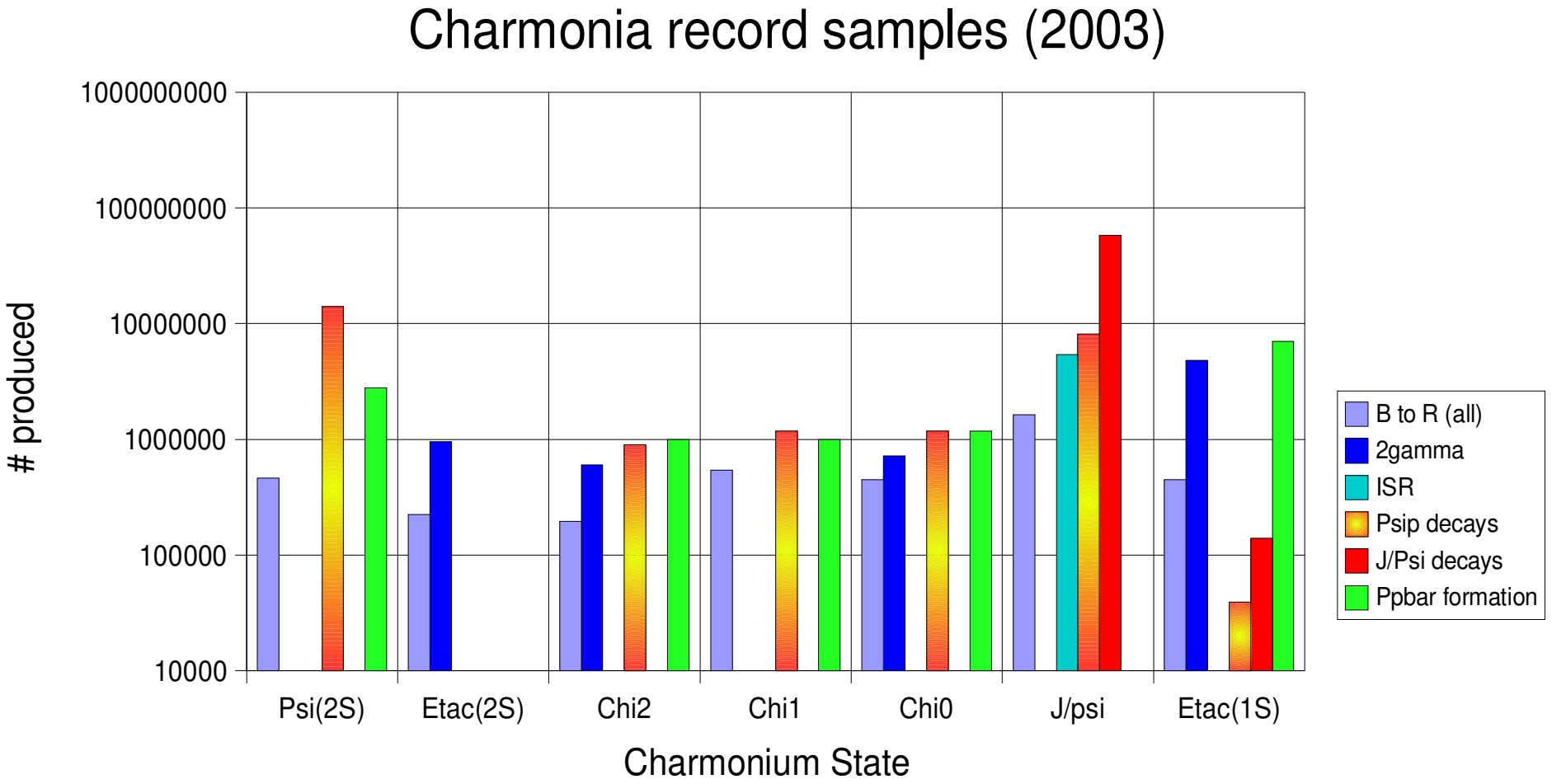
BaBar a PEP-II



Il Charm delle Fabbriche di Beauty-I

Data l'altissima luminosita' , le Beauty Factories sono anche delle Charm Factories:

- 1) per l'alta sezione d'urto e+e- --> cc, si possono produrre in abbondanza mesoni e barioni charmati anche nel continuo
- 2) i mesoni B decadono frequentemente in mesoni D
- 3) i decadimenti B to charmonio sono i maggiormente puliti per lo studio della CP violation
- 4) l'altissima luminosita consente di osservare il charmonio in $\gamma\gamma$
- 5) l'accettanza del rivelatore asimmetrico e' molto buona per osservare la produzione radiativa di charmonio (ISR)
- 6) l'inaspettatamente alta sezione d'urto di doppio charmonio puo' rivelarsi come un nuovo strumento di ricerca.



Questi sono i numeri di charmonia prodotti in:

- B-factories asimmetriche: Babar o Belle, con 150 fb^{-1}
- Charm factories : BES, con 58 M J/ψ e 14 M ψ(2s)
- $p\bar{p}$ charmonium factory: E835 .

Il Charm delle Fabbriche di Beauty-II

Le Beauty Factories hanno quindi avuto larga parte del merito nella rinascita dell'interesse nella spettroscopia mesonica, scoprendo:

- BaBar: 1 stato eccitato 0+ del mesone Ds
- CLEO: conferma dello 0+ e scoperta dello 1+
- Belle: scoperta di entrambi in decadimenti del B

- Belle: la lungamente cercata $\eta_c(2S)$, erroneamente osservata 20 anni prima a 3594 MeV. La scoperta viene immediatamente confermata da BaBar e CLEO.

- Belle: uno stato $c\bar{c}$ inaspettatamente stretto a 3872, i cui numeri quantici sono ancora da determinare.
E' il primo tetra-quark con charm nascosto?
La prima molecola DD?
O invece uno stato D del charmonio, anomalo?