

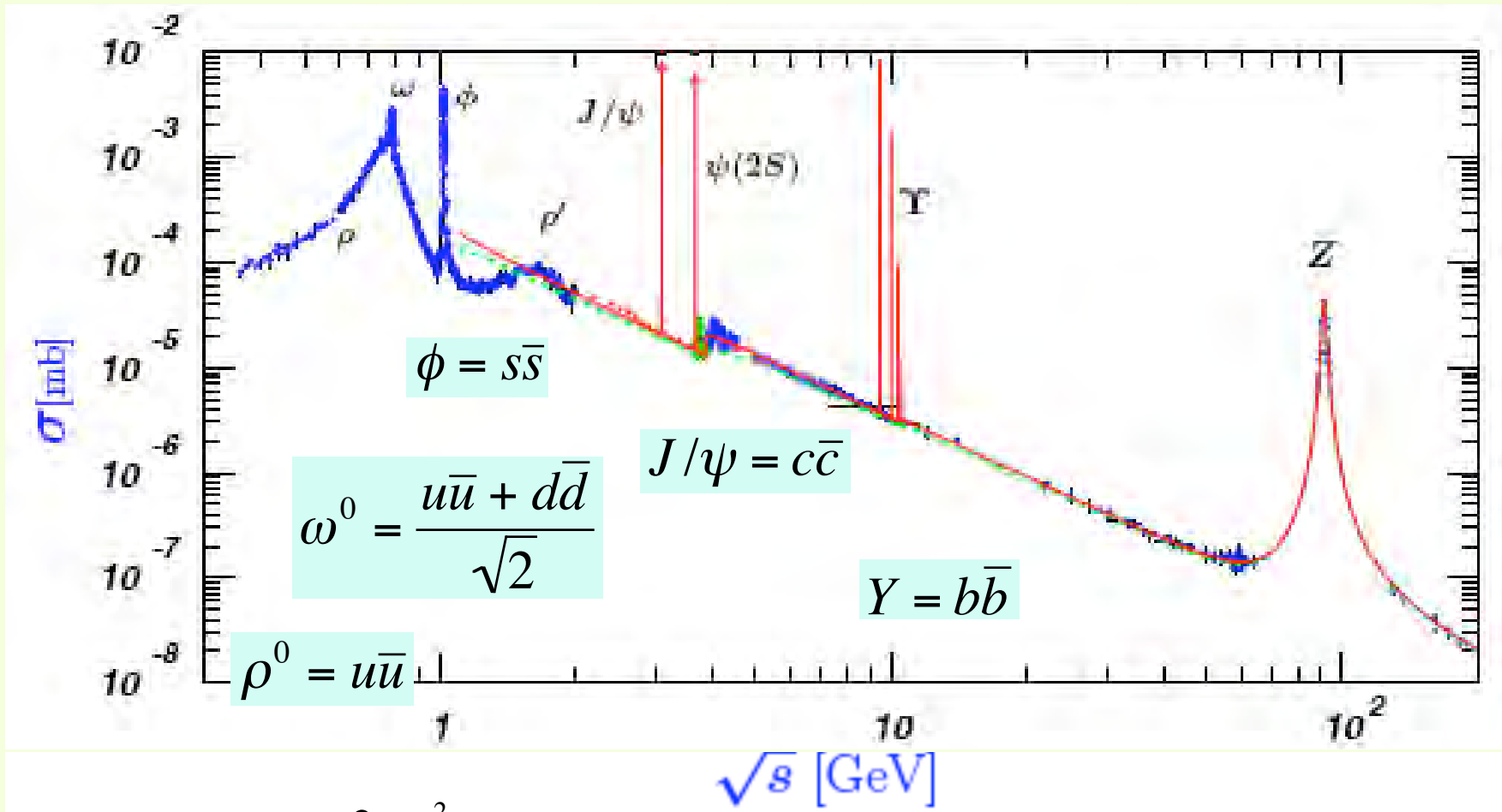
Fisica Nucleare e Subnucleare II

Lezioni n. 33 e 34

- Interazioni $e^+ \rightarrow \leftarrow e^-$ per $\sqrt{s} < 30 \text{ GeV}$:
 - spettroscopia dei mesoni pesanti
 - α_{strong}
 - scoperta del leptone τ
- Interazioni $e^+ \rightarrow \leftarrow e^-$ per $\sqrt{s} > 30 \text{ GeV}$:
 - Esperimenti a LEP

Risultati sperimentali con interazioni $e^+e^- \rightarrow \text{adroni}$ (1)

La sezione d'urto totale $\sigma(e^+e^- \rightarrow q\bar{q} \rightarrow \text{adroni})$ diminuisce all'aumentare di \sqrt{s} ma mostra dei "picchi": produzione di "risonanze"



La $\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma) = \frac{2\pi\alpha_{em}^2}{s} \ln\left(\frac{s}{m_e^2}\right) = \sigma_T$ (solo int. EM) diminuisce continuamente al crescere di \sqrt{s}

Interazioni $e^+ \rightarrow \leftarrow e^-$: spettroscopia dei mesoni pesanti

Dopo la scoperta del mesone con quarks "charm" J/ψ (1974) sono stati studiati altri stati legati della stessa coppia $c\bar{c}$ in diverse configurazioni di spin e di energia. Lo stesso è avvenuto dopo la scoperta del mesone B ($b\bar{b}$). I vari stati, studiati nel loro insieme, sono caratterizzati dal potenziale che tiene unita la coppia quark-antiquark e dalla dipendenza della forza di interazione (dal potenziale della forza "forte", cioè dalla costante di accoppiamento α_{strong} , e quindi dell'energia di legame). Lo stato legato, composto da due particelle di ugual massa, è analogo allo stato legato del "positronio", composto da e^+e^- , in cui il potenziale dell'interazione è $V_{EM} = -\alpha_{EM}/r$

Stati caratterizzati da

$$n^{2S+1}L_S$$

livello più basso:

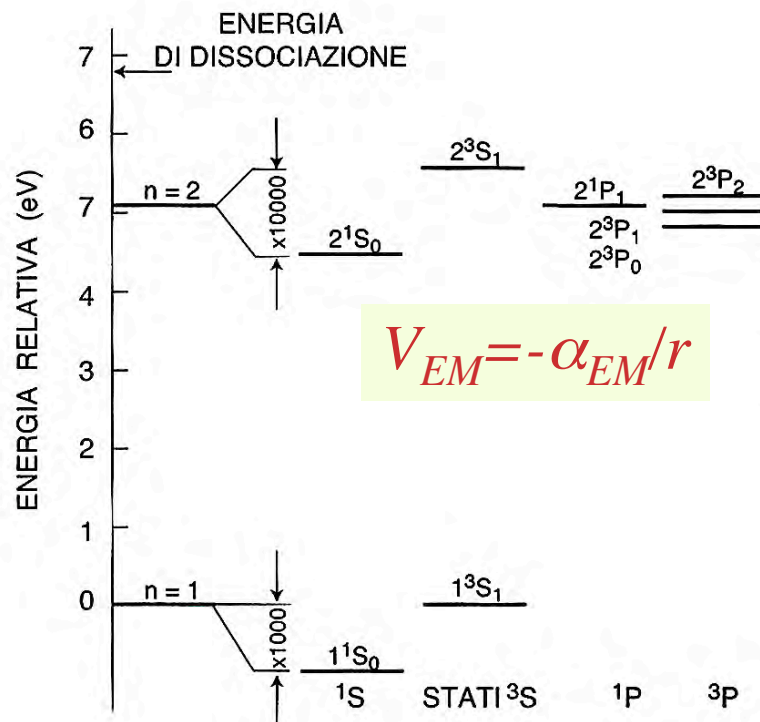
$n=1, \ell=0, J=0, S=0$
(singoletto di spin, orto-positronio)

$$1^1S_0$$

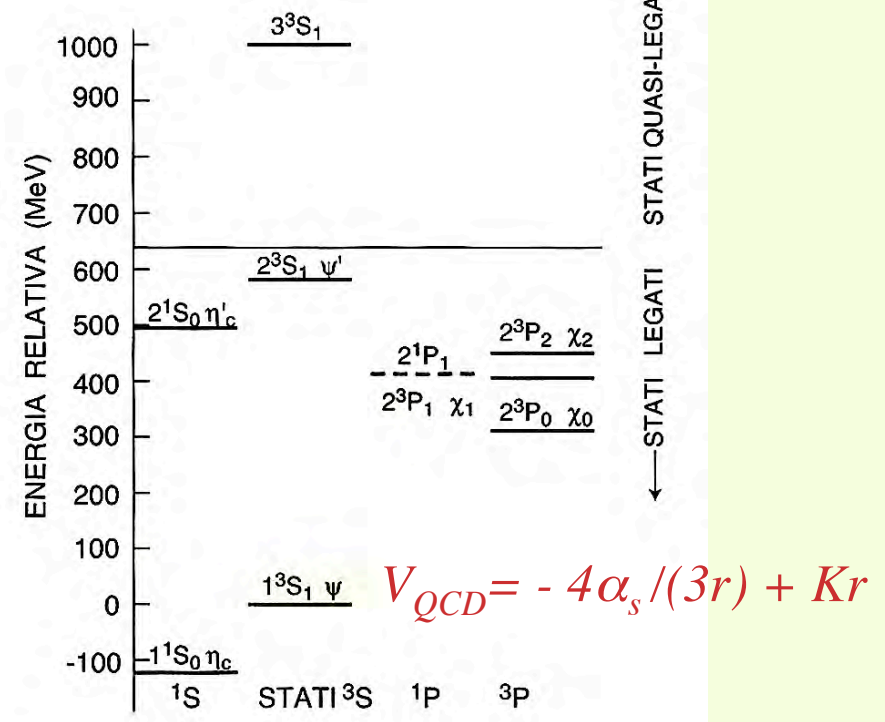
$n=1, \ell=0, J=1, S=1$
(tripletto di spin, para-positronio)

$$1^3S_0$$

Positronio: e^+e^-



Charmonio: $c\bar{c}$



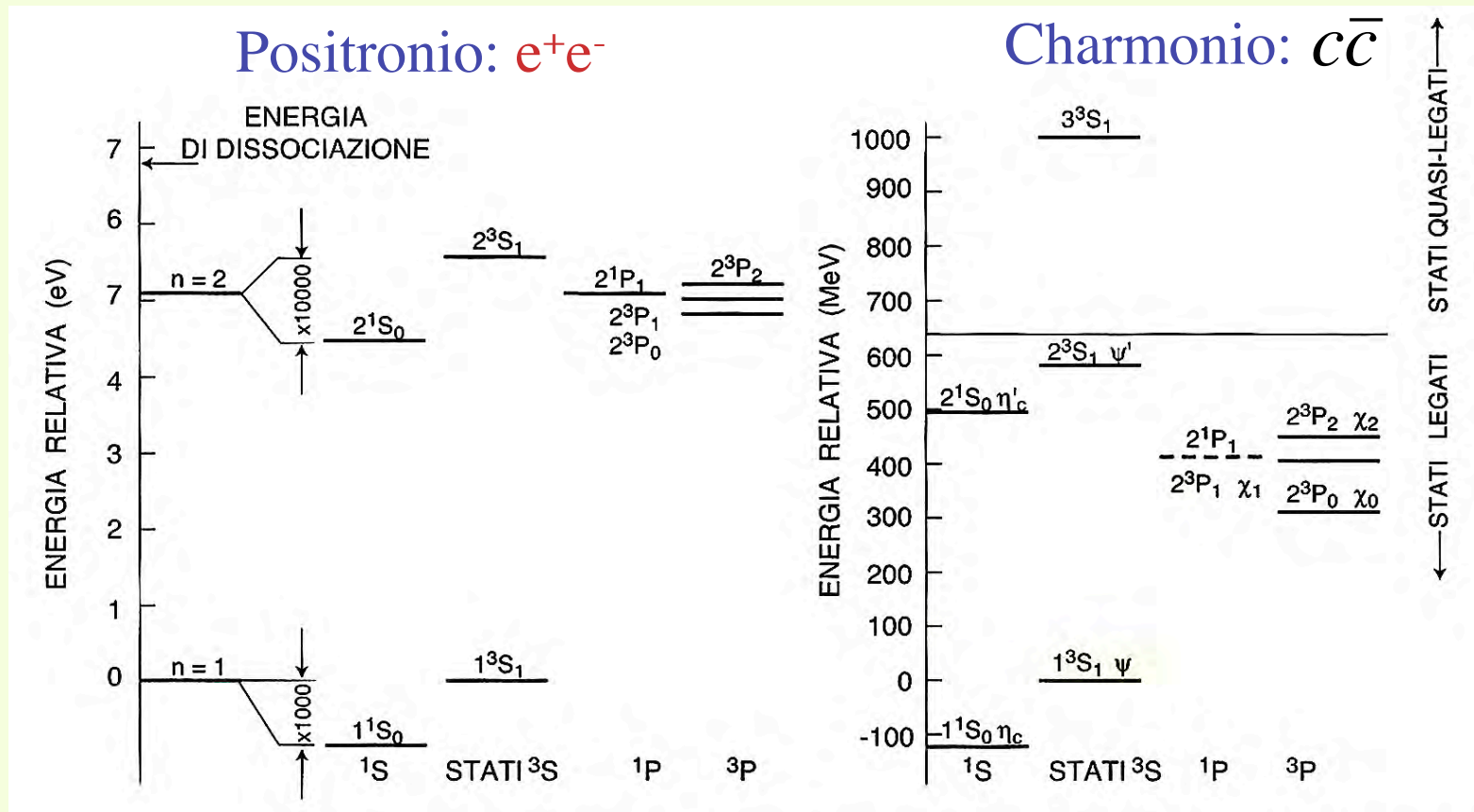
Livelli energetici (a) del *positronio* e (b) del *charmonio* [82B1]. Si noti che la scala in ordinata della figura di sinistra è in eV, mentre in quella di destra è in MeV.

Interazioni $e^+ \rightarrow \leftarrow e^-$: spettroscopia dei mesoni pesanti

Nel "positronio", composto da e^+e^- , il potenziale coulombiano caratterizza i livelli energetici (quantizzaz. alla Bohr)

$$E_n = -\frac{\alpha_{EM}^2 mc^2}{4n^2}$$

dove n è il numero quantico totale. L'int. spin-orbita da la struttura fine, $\ell = 0,1,2,\dots,n-1$, l'interazione spin-spin da la struttura iperfine: due spin concordi $\uparrow\uparrow$ danno un tripletto di stati, due spin $\uparrow\downarrow$ danno un singoletto

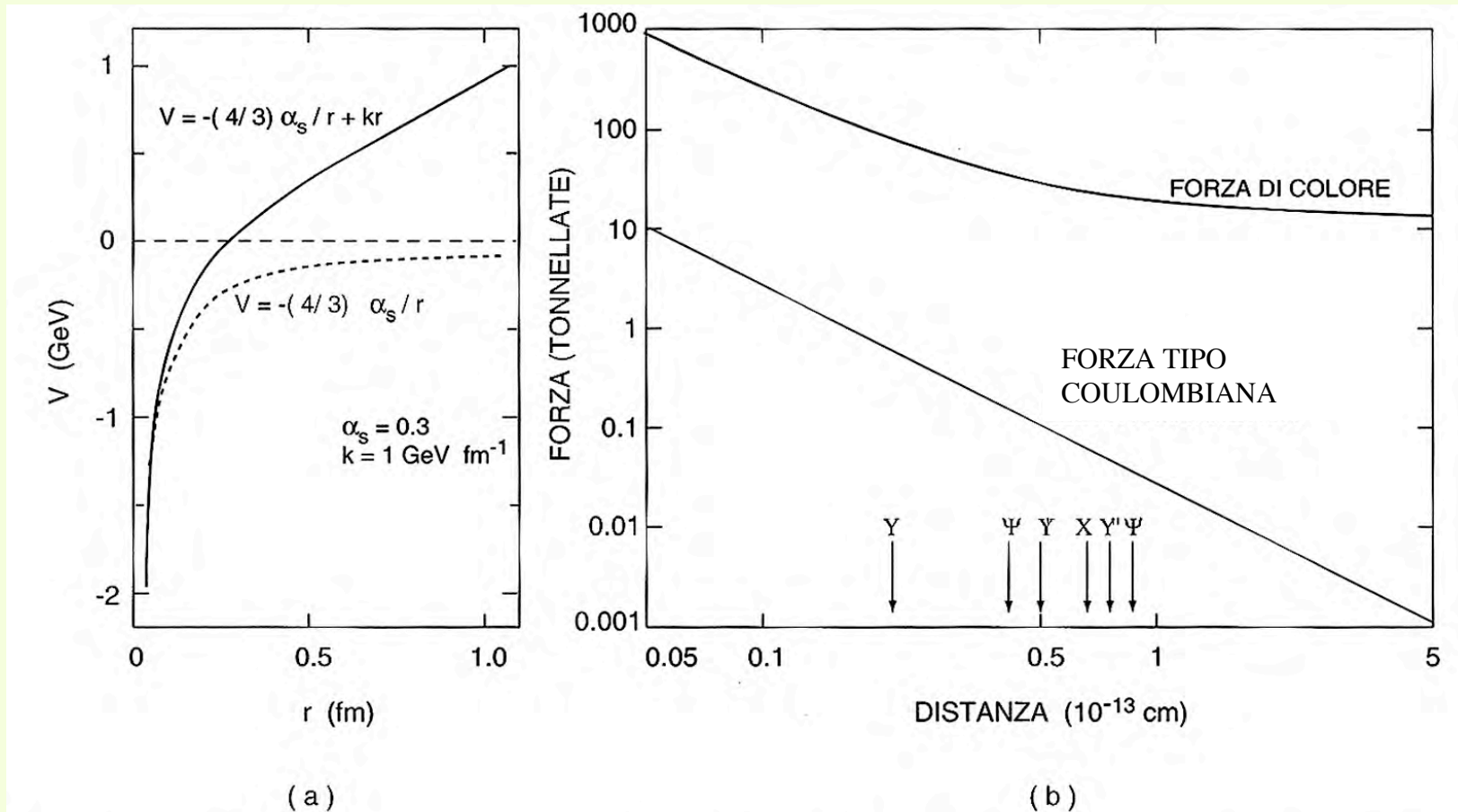


Per il "charmonio", composto dalla coppia quark-antiquark, il potenziale è espresso da $V_{QCD} = -\frac{4\alpha_{strong}}{3r} + Kr$. Per piccoli r ($r < 1\text{fm}$) prevale il potenziale "coulombiano" con α_{strong} determinata sperimentalmente ~ 0.3 .

A grandi distanze prevale Kr con $K \sim 1\text{ GeV/fm}$

Potenziale di stati legati quark-antiquark

$$V_{QCD} = -\frac{4}{3} \alpha_{strong} / r + Kr$$



(a) Potenziale e (b) forza fra quark e antiquark del “charmonio” e di altri stati $q\bar{q}$.

Interazioni $e^+ \rightarrow \leftarrow e^-$: la scoperta del leptone τ

Nel 1975 Martin Perl con una analisi dei dati prodotti nell'anello di collisione di elettrone-positrone di Stanford (SPEAR), e con l'apparato Mark I, riuscì a dimostrare l'esistenza di un altro leptone carico, il tau, che decadeva in una o tre particelle cariche e (almeno) una particella di massa trascurabile non rivelata nell'esperimento, cioè di nuovo un neutrino. Il leptone tau ha massa elevata, 1777.1 MeV pari a circa due volte la massa del protone, e vita media molto breve, ~ 0.3 picosecondi ($2.96 \cdot 10^{-13}$ s).

L'evento è apparso, per $\sqrt{s} > 3700$ MeV come: $e^+ e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \tau^+ \tau^-$ con una sezione d'urto simile a quella di $e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-$: test della universalità leptonica.

Del leptone tau si sa che è una particella di Dirac con spin 1/2, e che decade

$$\tau^- \rightarrow e^- \nu_\tau \bar{\nu}_e \quad (18\%), \quad \tau^- \rightarrow \mu^- \nu_\tau \bar{\nu}_\mu \quad (18\%)$$

Sperimentalmente si poteva quindi cercare nello stato finale una coppia $e^+ e^-$ o una coppia $\mu^+ \mu^-$ ma in tal caso il fondo delle interazioni con produzione diretta di coppie $e^+ e^-$ o $\mu^+ \mu^-$ sarebbe stato molto elevato. Sicuramente il fondo si riduce se si richiede:

$$e^+ e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \tau^+ \tau^- \quad \Rightarrow \quad \text{con } \tau^- \rightarrow e^- \nu_\tau \bar{\nu}_e \quad \text{e } \tau^+ \rightarrow \mu^+ \bar{\nu}_\tau \nu_\mu$$

cercando quindi un evento con una apparente violazione della conservazione separata del numero leptonic.

In effetti l'evento deve presentare anche i due leptoni non coplanari vista la presenza dei due neutrini.

Martin Perl per tale scoperta è stato insignito del Premio Nobel nel 1995.

Interazioni $e^+ \rightarrow \leftarrow e^-$: la scoperta del leptone τ

Esperimento Mark I

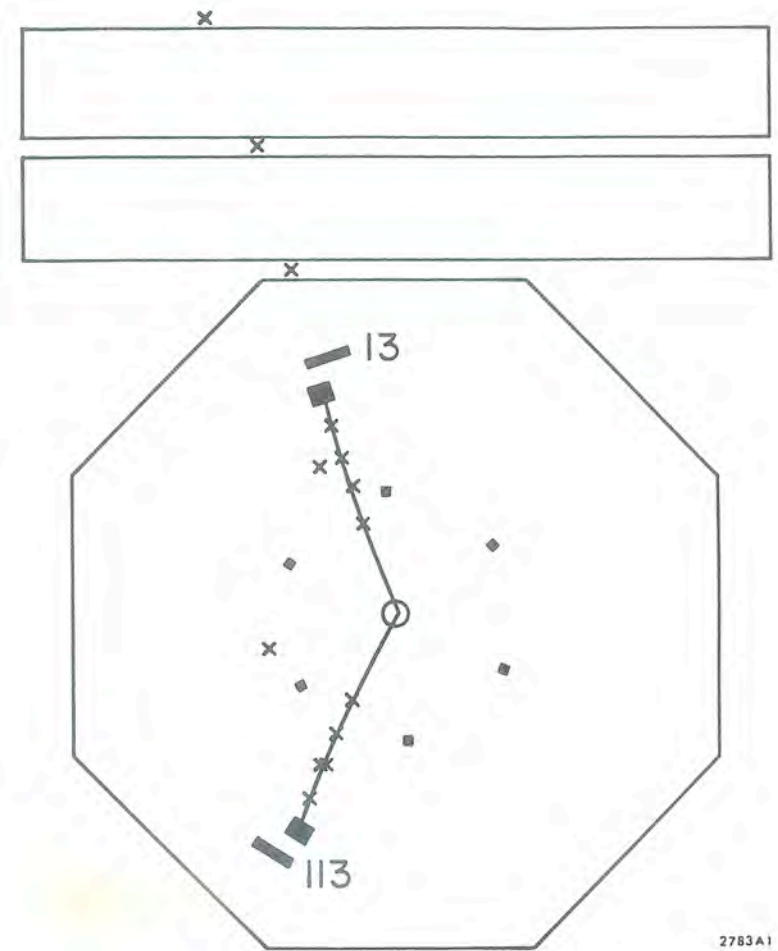
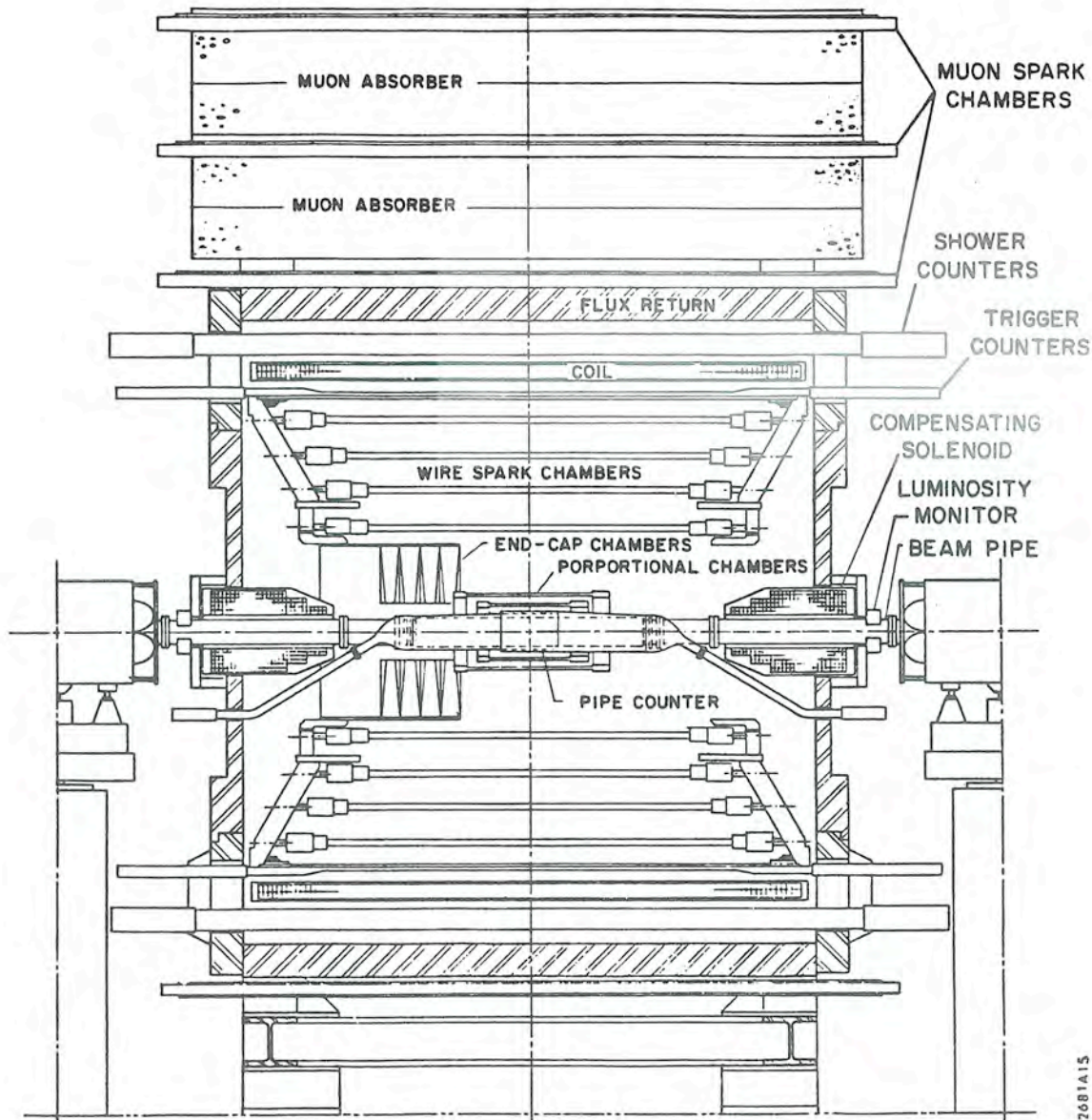
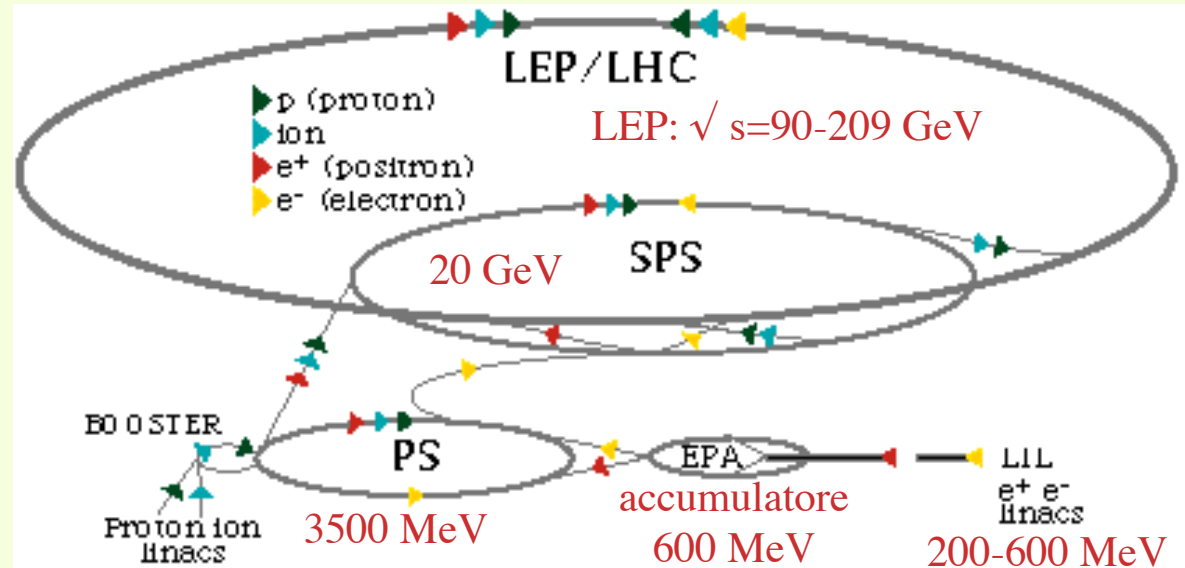


FIGURE 6. One of the first $e\mu$ events. The μ moves upward through the muon detector tower and the e moves downward. The numbers 13 and 113 give the relative amounts of electromagnetic shower energy deposited by the μ and e . The six square dots show the positions of longitudinal support posts of the magnetostrictive spark chamber used for tracking.

Interazioni $e^+ \rightarrow \leftarrow e^-$ a LEP

Large Electron Positron collider ha permesso di studiare le interazioni e^+e^- fino ad energie nel c.d.m. pari (e superiori) alla massa dello Z^0 .



CERN's first operating accelerator, the Synchro-Cyclotron, was built in 1954, in parallel with the Proton Synchrotron (PS). The PS is today the backbone of CERN's particle beam factory, feeding other accelerators with different types of particles. The 1970s saw the construction of the SPS, at which Nobel-prize winning work was done in the 1980s. The SPS continues to provide beams for experiments and is also the final link in the chain of accelerators that was providing beams for the 27 kilometre LEP machine. CERN's present big machine, started in 2009, is the Large Hadron Collider (LHC).

Large Electron Positron Collider (LEP)

LEP I (1989-1993) : Z physics. *18 million Z bosons produced*

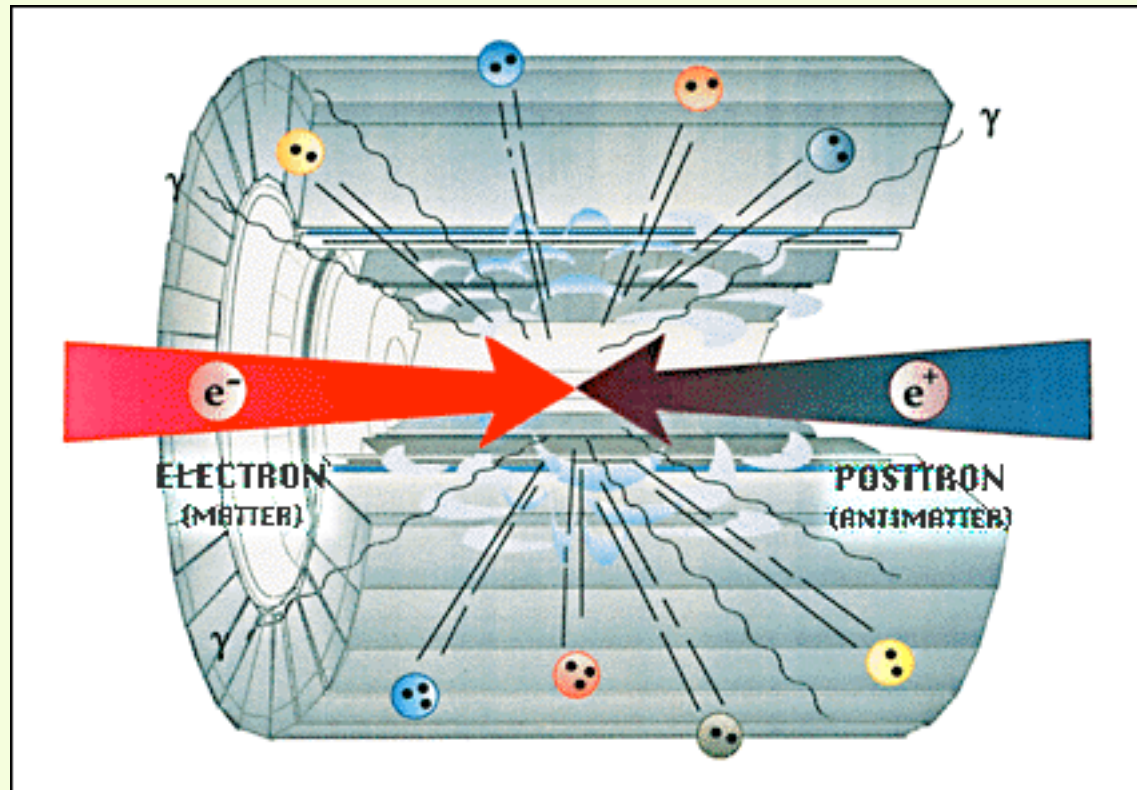
LEP II (1996-2000) : W physics. *80,000 W's produced. (Energies from 161 GeV – 209 GeV) W's produced in pairs.*



Interazioni $e^+ \rightarrow \leftarrow e^-$ a LEP

At four symmetric points around the ring, the bunches of particles are focused down to the thickness of a hair and made to collide at the heart of the four LEP experiments. Each bunch contains more than a hundred thousand million particles (10^{11}), but on average only one in about 40 000 collisions between the bunches produces the desired effect - a head-on electron-positron collision. For this reason, the bunches are made to circulate for hours, each bunch travelling round the ring more than 10 000 times a second.

Quattro apparati "ermetici" ($\sim 4\pi$) posti attorno ad ognuna delle 4 zone di interazione progettati per identificare le particelle prodotte e misurare l'energia nello stato finale



LEP began operation in the summer of 1989 and for six years the collision energy of its electrons and positrons was tuned exactly to the value needed to produce the neutral carrier of the weak force, the Z^0 (LEP1, 91 GeV). Since the autumn of 1995, the energy has been increased to almost double its earlier value (LEP2, 209 GeV). In the summer of 1996, LEP ran at the exact value needed to produce pairs of the charged carriers of the weak force, the W^+ and W^- particles. Detection of millions of Z^0 s and hundreds of W s has allowed the LEP experiments to make extremely precise tests of the Standard Model of particles and their interactions. LEP was stopped in 2000 to allow for the construction of LHC.

The LEP Experiments

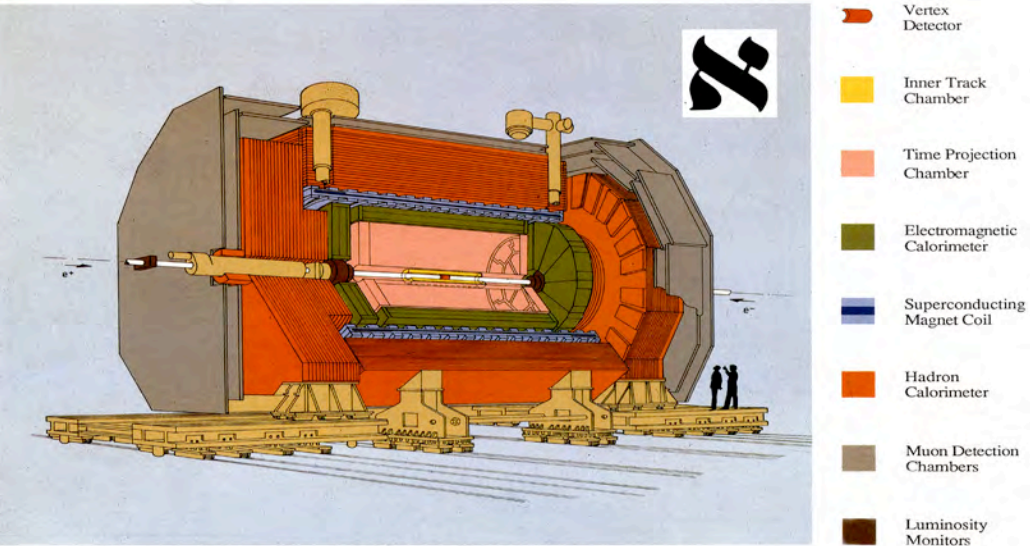
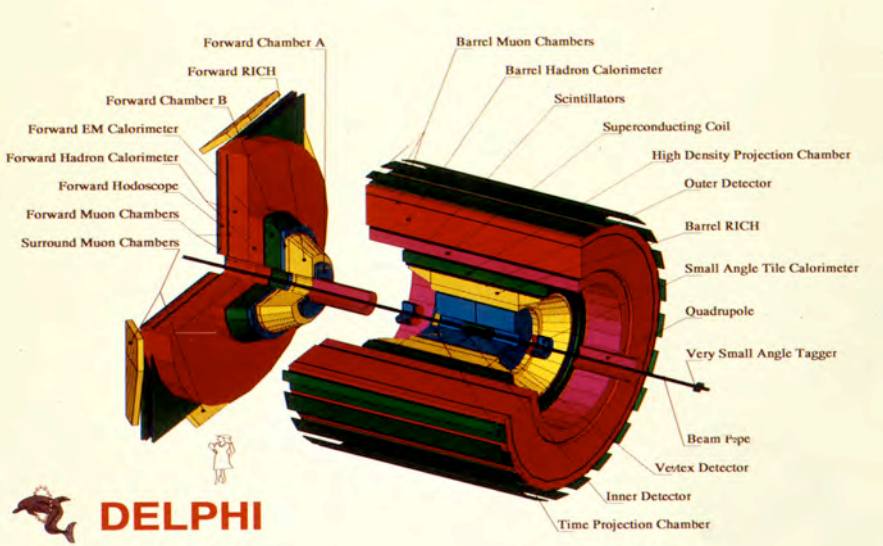
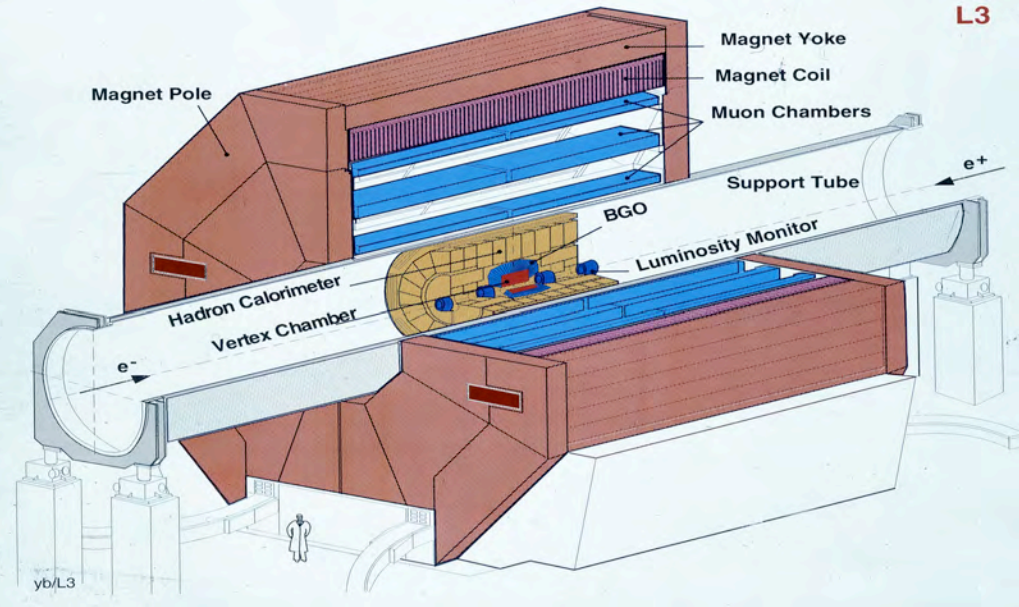


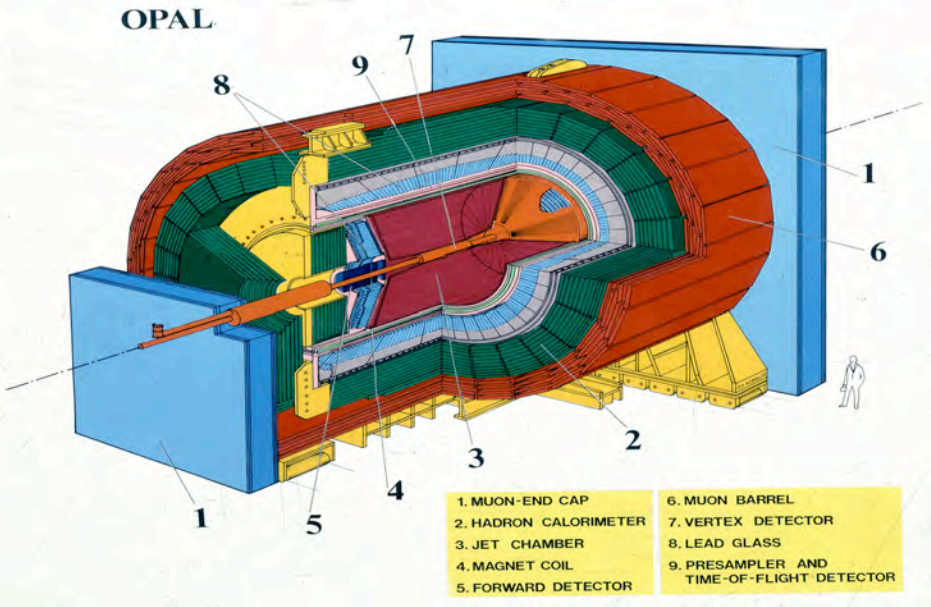
Fig. 1 - The ALEPH Detector



DELPHI



yb/L3



Misura delle sezioni d'urto in un collider: luminosità

In un collider tipo LEP gli apparati, ermetici, posti a 4π attorno alla zona di interazione, permettono di rivelare ogni evento originato dalla collisione delle particelle accelerate. Come calcolare le "probabilità di interazione" (le sezioni d'urto) relative agli eventi osservati? Il numero di eventi dipende dalla σ e dal numero di "collisioni". Il numero di collisioni dipende dal num. di particelle circolante negli anelli. Si definisce "**luminosità di un collider** \mathcal{L} " quel numero che, moltiplicato per la σ dà il numero di eventi osservati

$$N_{\text{eventi}} = \mathcal{L} \sigma$$

A LEP la misura della luminosità era ottenuta dalla frequenza delle collisioni elastiche $e^+ e^- \rightarrow e^+ e^-$ "in avanti" cioè con i due leptoni nello stato finale prodotti a piccolo angolo rispetto ai fasci incidenti, dove la σ è ben nota e calcolabile: i rivelatori dedicati a tale misura (calorimetri elettromagnetici montati direttamente attorno ai "beam pipes").

La Luminosità è quindi espressa in unità di $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$.

La Luminosità integrata viene espressa in cm^{-2} (o barn^{-1} , nbarn^{-1} , pbarn^{-1} ,...)

La luminosità ai collider - 1

- N_1 particelle in ogni pacchetto di p . “orarie”;
- N_2 (...) “antiorarie”;
- supponiamo i pacchetti cilindrici $S \times \ell$, ρ costante;
- supponiamo che le N_1 particelle compiano un piccolo tratto x all’interno del pacchetto con N_2 ; la probabilità di interazione per ogni particella è:

$$p_1(x) = 1 - \exp(-\rho \sigma_T x) \cong \rho \sigma_T x = N_2 \sigma_T x / (S \ell);$$

- il numero totale di interazioni / incrocio è :

$$\langle n_I \rangle = N_1 p_1(\ell) = N_1 N_2 \sigma_T / S;$$

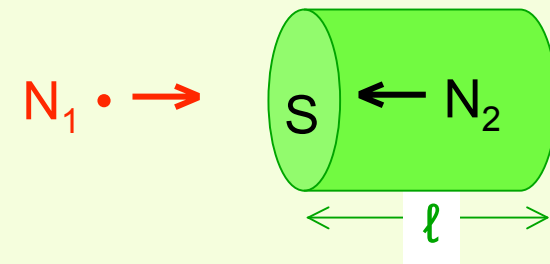
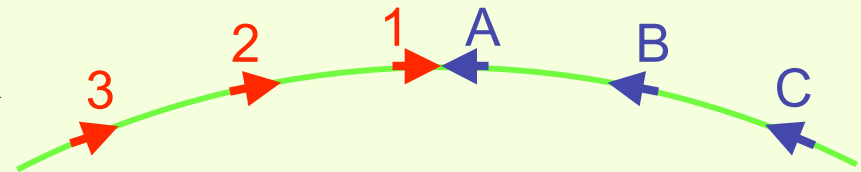
[NB non dipende da ℓ]

- il numero di incroci/s è [k = numero di pacchetti, f = frequenza di rivoluzione]

$$n_c = k \times f$$

- pertanto, la frequenza totale di interazione è :

$$F = \mathcal{L} \sigma_T = \langle n_I \rangle \times n_c = N_1 N_2 k f \sigma_T / S$$



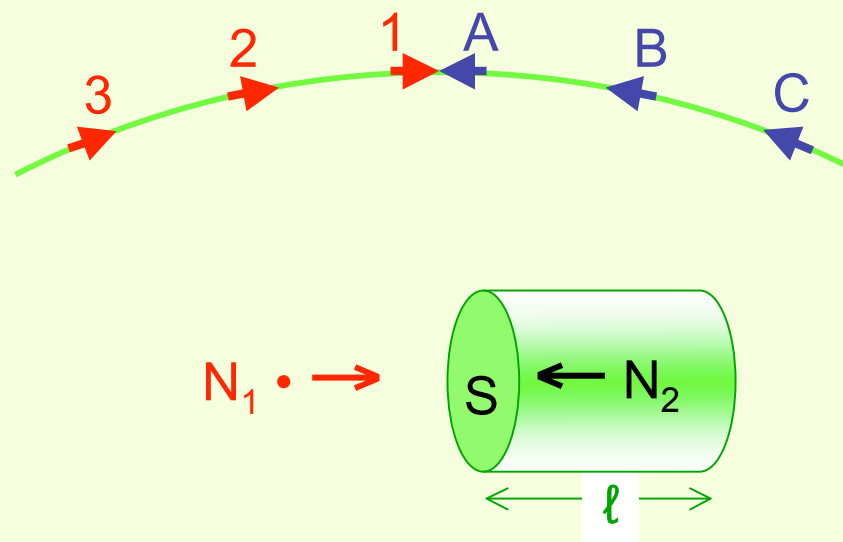
$$\mathcal{L} = N_1 N_2 k f / S$$

La luminosità ai collider - 2

il modellino sviluppato non è realistico, però alcuni punti sono corretti :

- la luminosità (in collisioni ad angolo 0) non dipende da l ed è inversamente proporzionale alla sezione trasversa “efficace” dei pacchetti ($4\pi\sigma_x\sigma_y$) ;
- è direttamente proporzionale al numero di particelle / pacchetto, al numero dei pacchetti ed alla frequenza di rivoluzione (supponiamo $k_1=k_2\equiv k$);

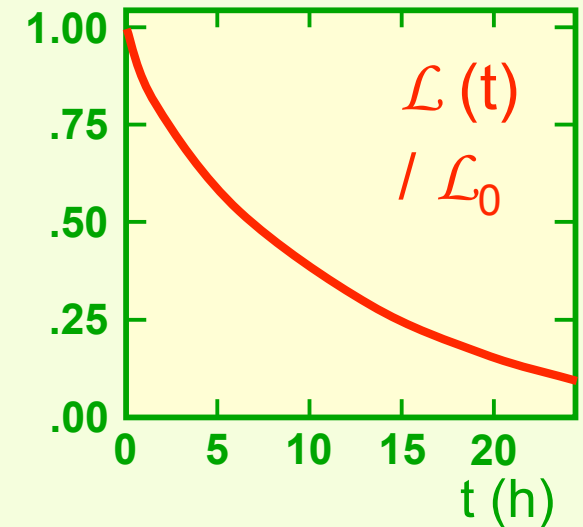
[NB in un punto di interazione dato, il numero di collisioni aumenta $\propto k$; anche il numero di punti di interazione aumenta $\propto k$; ciò crea collisioni “inutili” \rightarrow tenere i pacchetti separati fuori dalle zone di interazione equipaggiate con rivelatori, ex. con uno schema “a pretzel”].



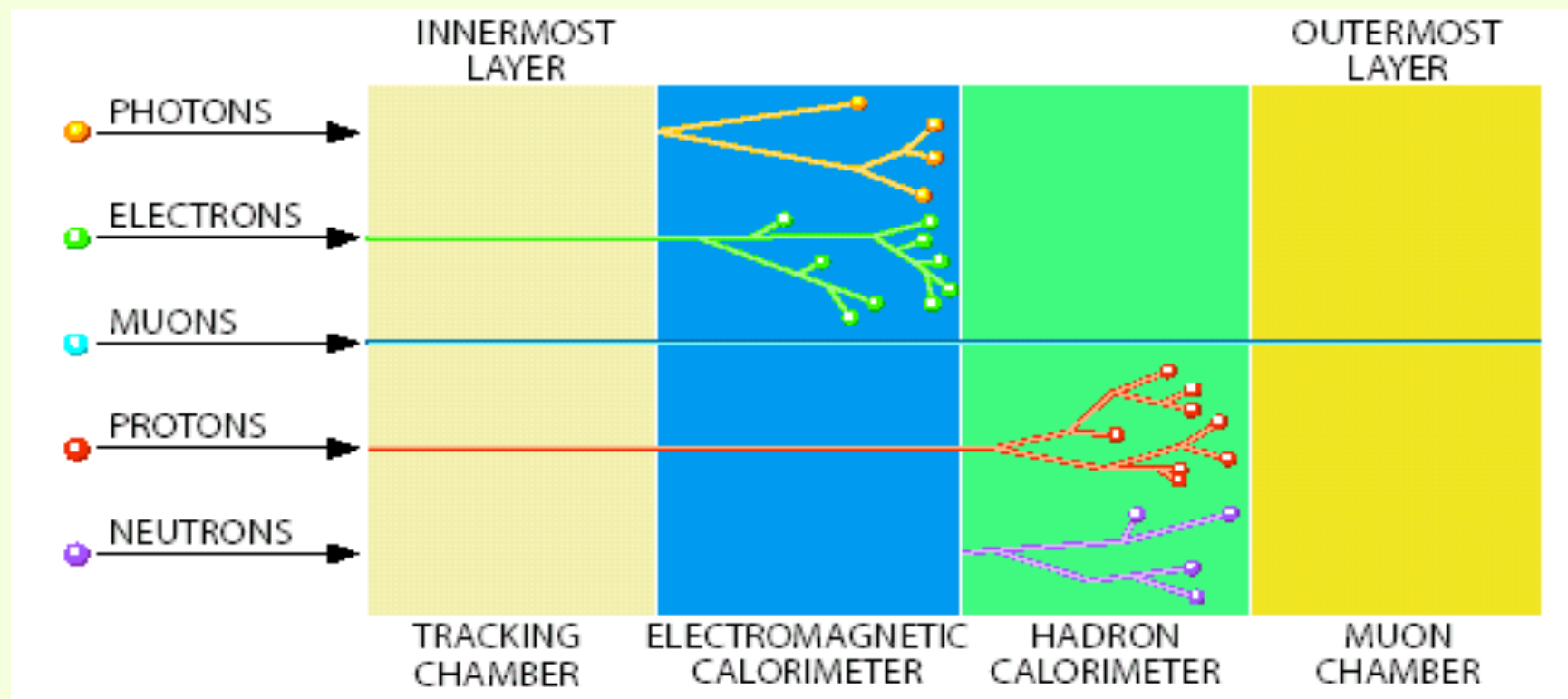
$$\mathcal{L} = \frac{N_1 N_2 k f}{4 \pi \sigma_x \sigma_y}$$

frequenza di eventi a LEP

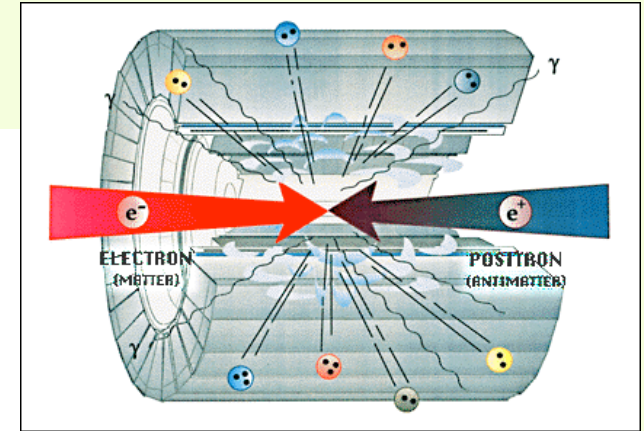
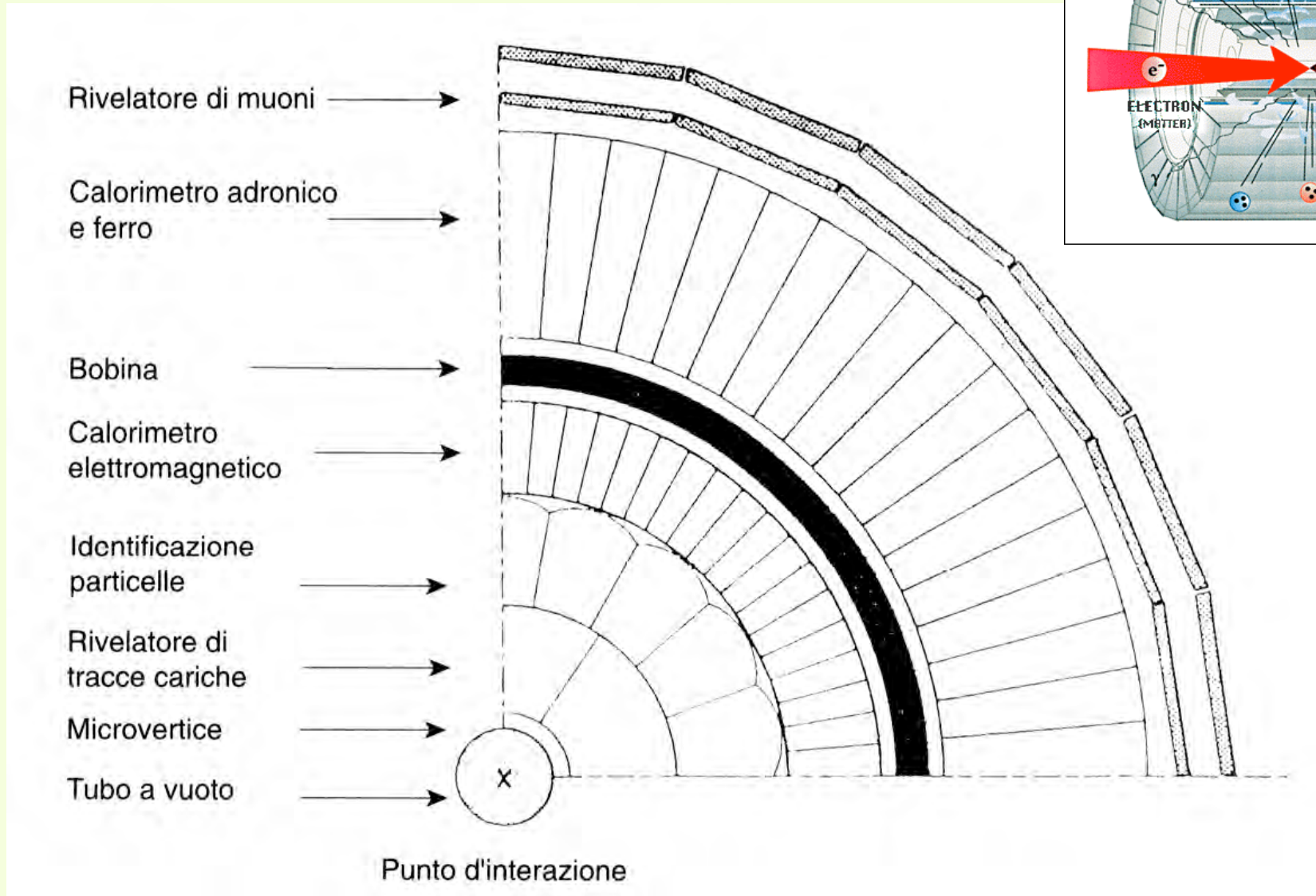
- la luminosità scritta sui libri è quella “di picco”, raggiunta nei primi minuti dopo l’accelerazione;
- poniamo $\mathcal{L} = 2 \times 10^{31} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$;
- $\sigma_{\text{tot}}(e^+e^- \rightarrow Z, \sqrt{s}=m_Z) \approx 40 \text{ nb}$;
- $r(e^+e^- \rightarrow Z, \sqrt{s}=m_Z) = \mathcal{L} \times \sigma_{\text{tot}} = 0.8 \text{ Hz}$;



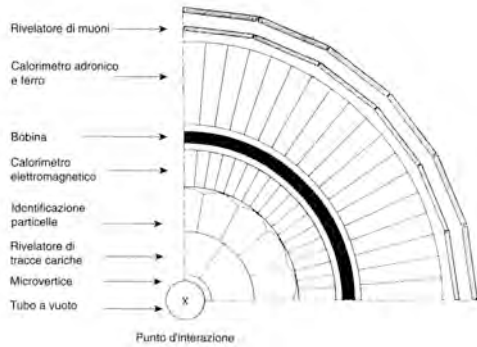
Schema di un tipico rivelatore per un Collider



Interazioni $e^+ \rightarrow \leftarrow e^-$ a LEP

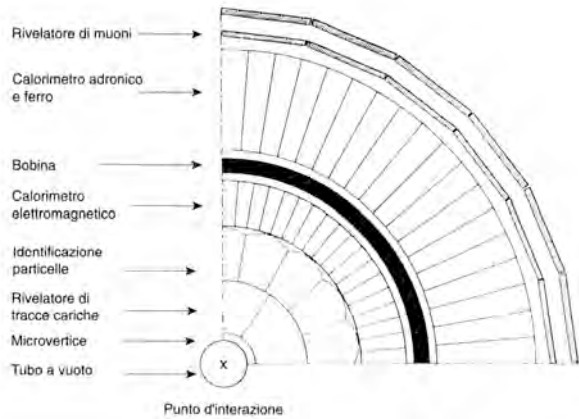


I quattro apparati a LEP



↓ Sottorivelatore	Rivelatore ⇒	OPAL	L3	ALEPH	DELPHI
Tracciamento					
micro-vertice					
risoluzioni [μm]		5	7	12	8
$\sigma_{(r,\varphi)}$					
σ_z		15	14	10	
(per incidenza normale)					
camere di vertice					
diametro esterno [mm]		$\varnothing = 235$	$\varnothing = 180$	$\varnothing = 288$	
lunghezza L [m]		1	1	2	
risoluzioni $\sigma_{(r,\varphi)}$ [μm]		50	45	150	< 150
camere centrali					
diametro esterno [m]		JET $\varnothing = 3.8$	TEC $\varnothing = 0.9$	TPC $\varnothing = 3.6$	TPC $\varnothing = 1.2$
lunghezza [m]		$L = 4.5$	$L = 1$	$L = 4.8$	$L = 2.8$
risoluzioni [μm]		$\sigma_{(r,\varphi)} = 135$	$\sigma_{(r,\varphi)} = 45$	$\sigma_{(r,\varphi)} = 150$	$\sigma_{(r,\varphi)} = 250$
risoluzione impulso tracce					
$\left[\frac{\Delta p}{p^2} \cdot 10^3 (\text{GeV}/c)^{-1} \right]$		1.1		0.6	0.7
ottenuta con		JET		TPC +VTX	TPC +VTX
camere-z [μm]		$\sigma_z = 300$			
dE/dx (π di 0.5 GeV/c)		3.2%			
rivelazione di μ (barrel)					
risoluzione impulso muoni					
$\left[\left(\frac{\Delta p}{p} \right)_{\mu\mu} \% \right]_{45\text{GeV}}$		5.5	2.5	3.0	3.5
$\sigma_{r\varphi}$ [mm] ; σ_θ [mr]		1.5 ; 5			

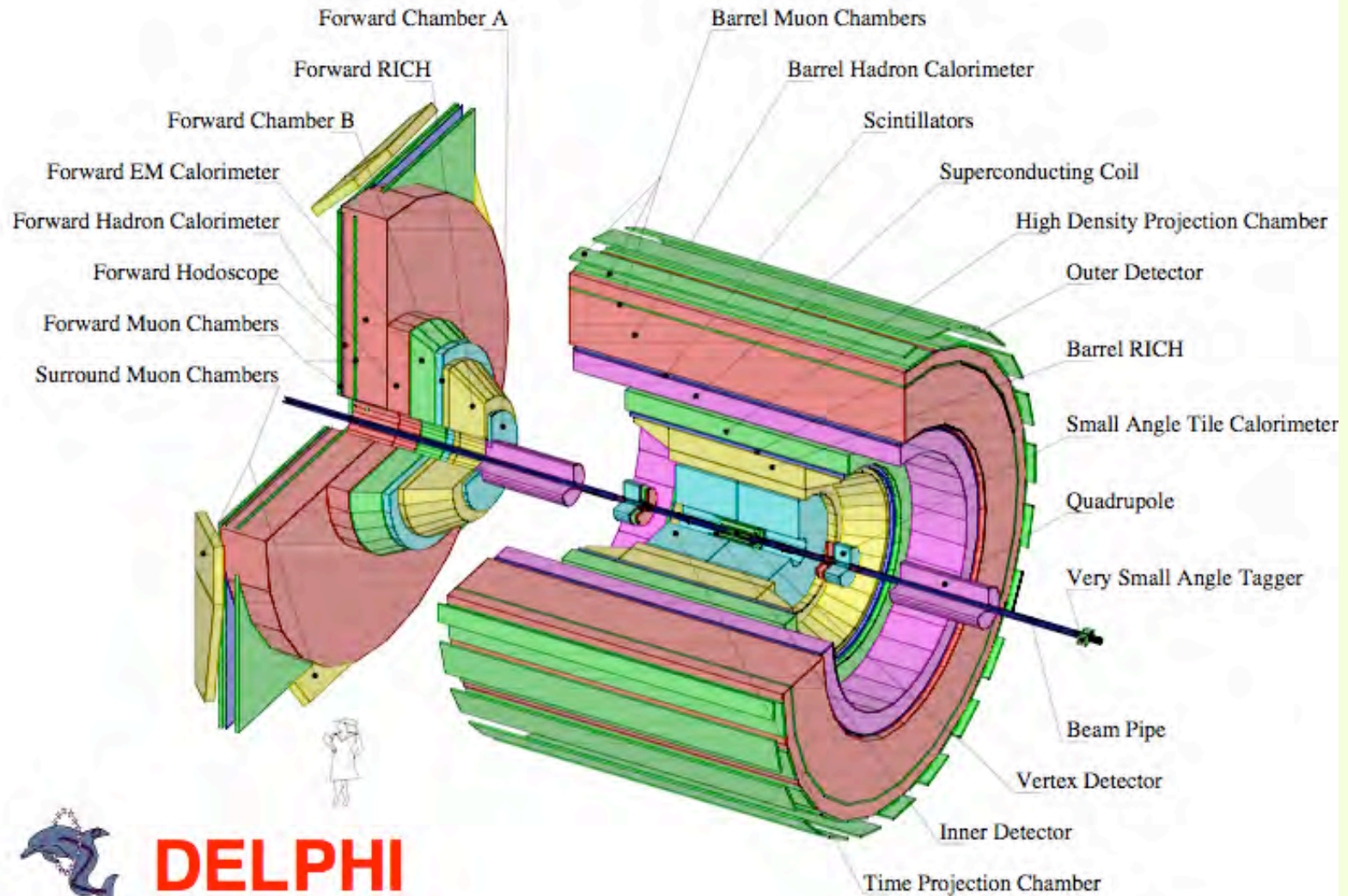
I quattro apparati a LEP



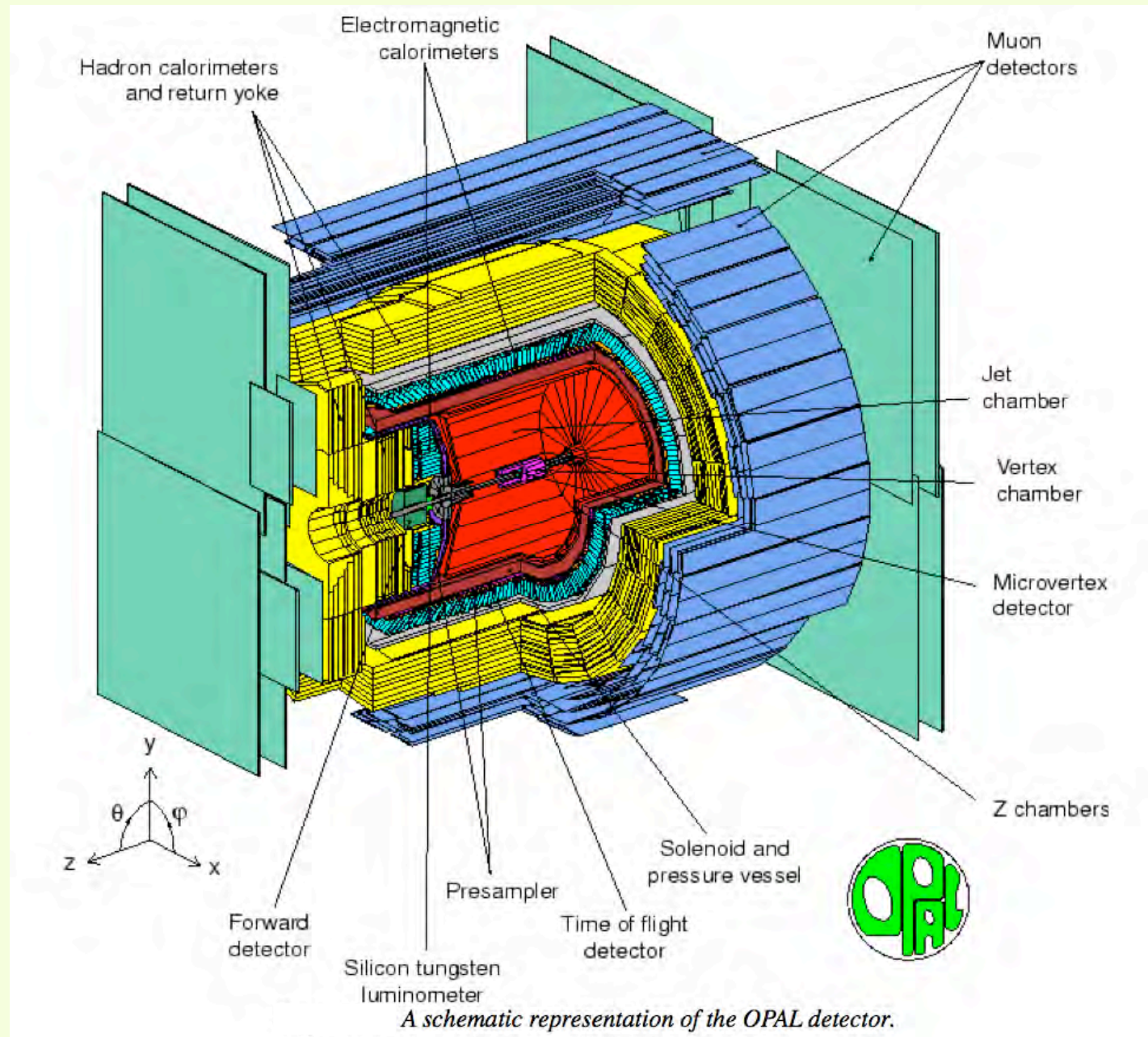
↓Sottorivelatore	Rivelatore⇒	OPAL	L3	ALEPH	DELPHI
Calorimetri					
elettromagnetici		LGB 11704 blocchi	BGO 7680 blocchi	PWT	HPC
<i>risoluzione in energia</i> $\left[\frac{\Delta E}{E} \% \right]_{45\text{GeV}}$		$\frac{6.3}{\sqrt{E}} \oplus 0.2$	$\frac{2}{\sqrt{E}} \oplus 0.9$	$\frac{19.5}{\sqrt{E}} \oplus 1$	$\frac{26}{\sqrt{E}} \oplus 4$
<i>risoluzione spaziale</i> $[\Delta(r, \varphi); \Delta\vartheta]$		2.3°; 2.3°	2.3°; 2, 3°	1°; 1°	1°; 0.1°
σ [cm]		1	1	3	9
adronici					
$\left[\frac{\Delta E}{E} \% \right]_{45\text{GeV}}$		$\frac{120}{\sqrt{E}}$	$\frac{55}{\sqrt{E}} \oplus 5$	$\frac{100}{\sqrt{E}}$	$\frac{120}{\sqrt{E}}$
<i>risoluzione spaziale</i> $[\Delta(r, \varphi); \Delta\vartheta]$		7°; 7°	2.5°; 2.5°	3.7°; 3.7°	3°; 4°
Diametro del barrel[m]		≈10	16	≈10	≈10
Lunghezza del barrel[m]		10	10	12	10
Campo magnetico [T]		0.43	0.4	2	1
Tempo di volo [ns]		0.2			

Tabella 9.3. Tabella di confronto delle principali caratteristiche di alcuni sottorivelatori degli esperimenti al LEP. **Legenda** : TEC ≡ Time Expansion Chamber; TPC ≡ Time Projection Chamber; LGB ≡ Lead Glass Blok; BGO ≡ Bismuth Germanium Oxide; PWT ≡ Proportional Wire Tube; HPC ≡ High density Projection Chamber; RICH ≡ Ring Imaging CHerenkov; JET ≡ JET-CHamber; VTX ≡ VerTeX (dispositivi di vertice); PRES ≡ PRE-Sampler. [Precisioni allineamento radiale degli elementi del luminometro di OPAL: $(\sigma_r)_{assoluta} \simeq 200\mu\text{m}$, $(\sigma_r)_{relativa} \simeq 10\mu\text{m}$].

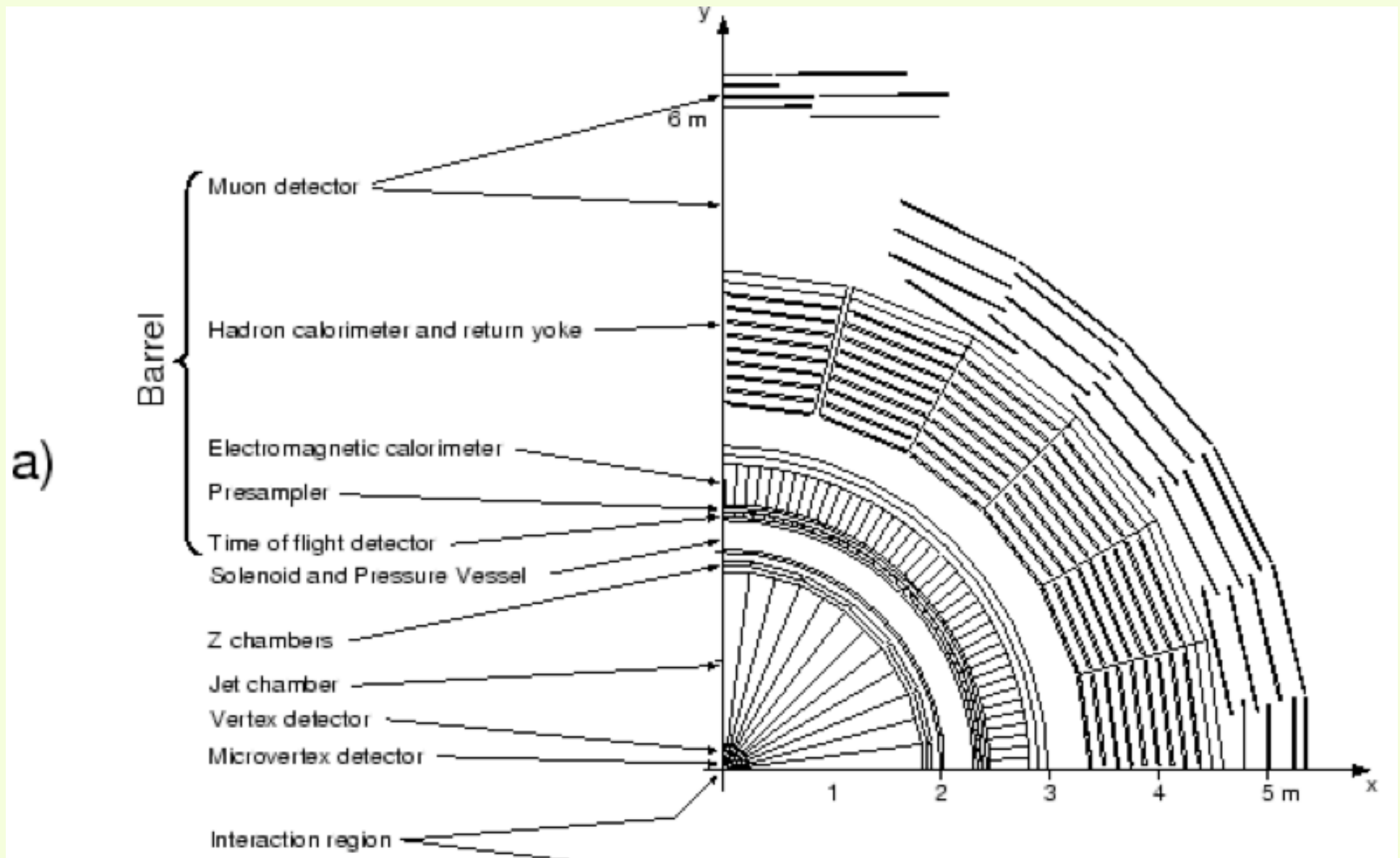
Il rivelatore DELPHI al LEP-CERN



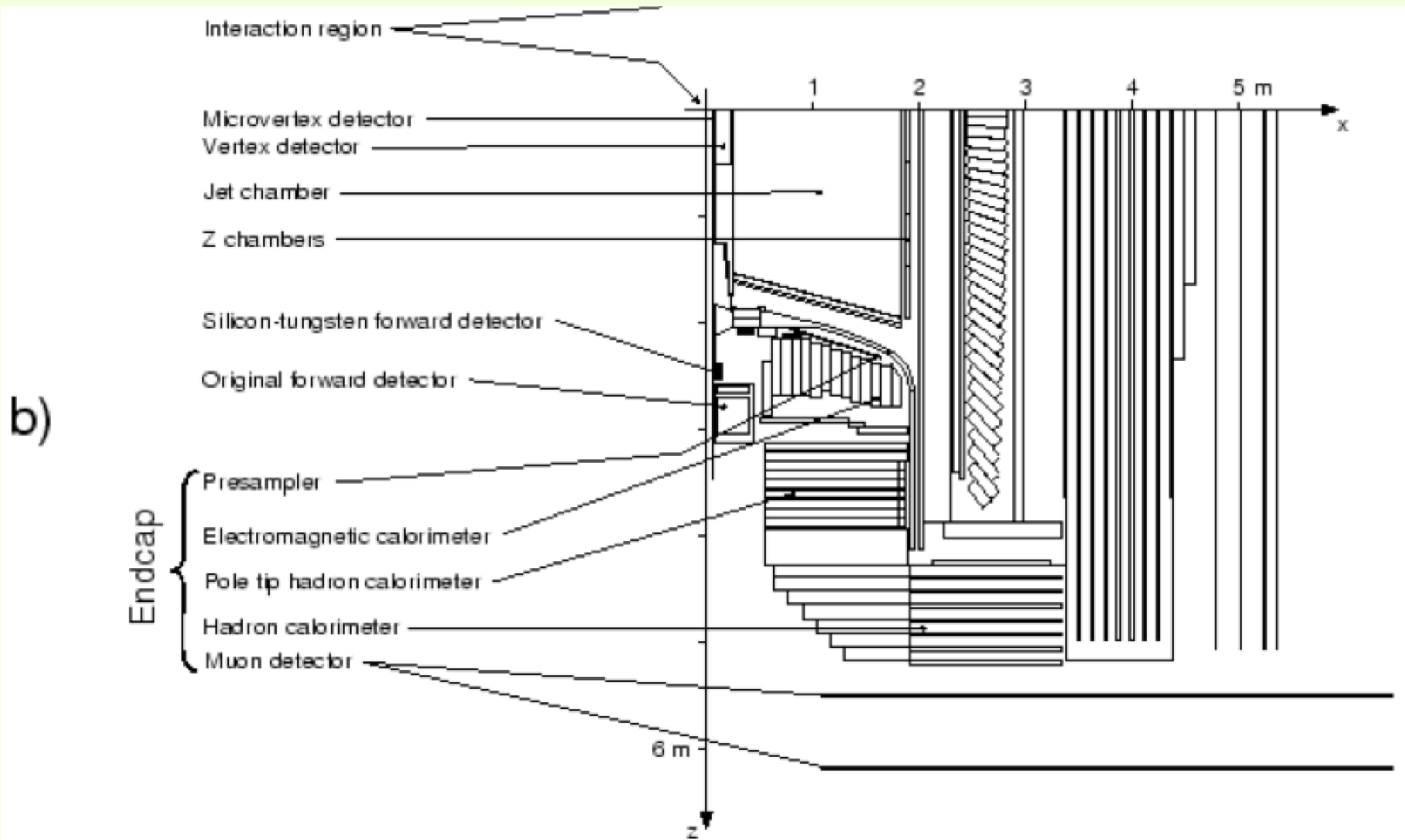
The OPAL detector at LEP-CERN



The OPAL detector at LEP-CERN

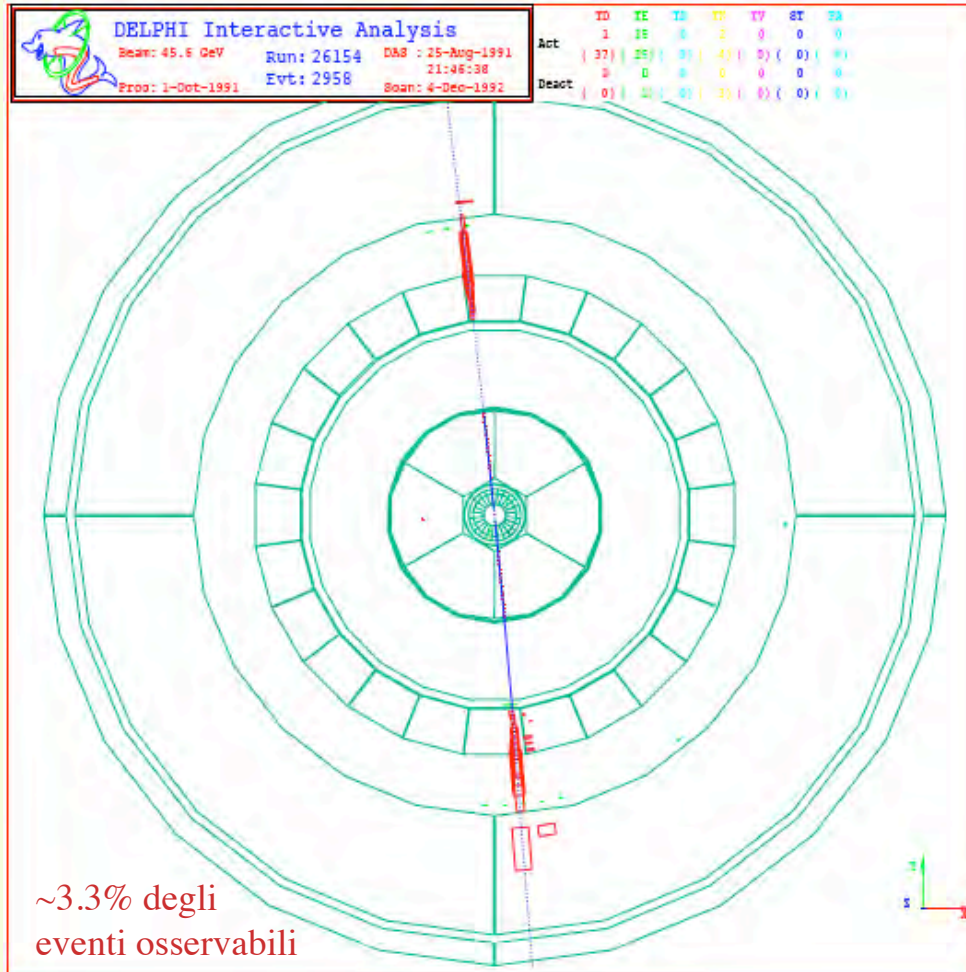


The OPAL detector at LEP-CERN



DELPHI: eventi Z^0 in due elettroni / muoni

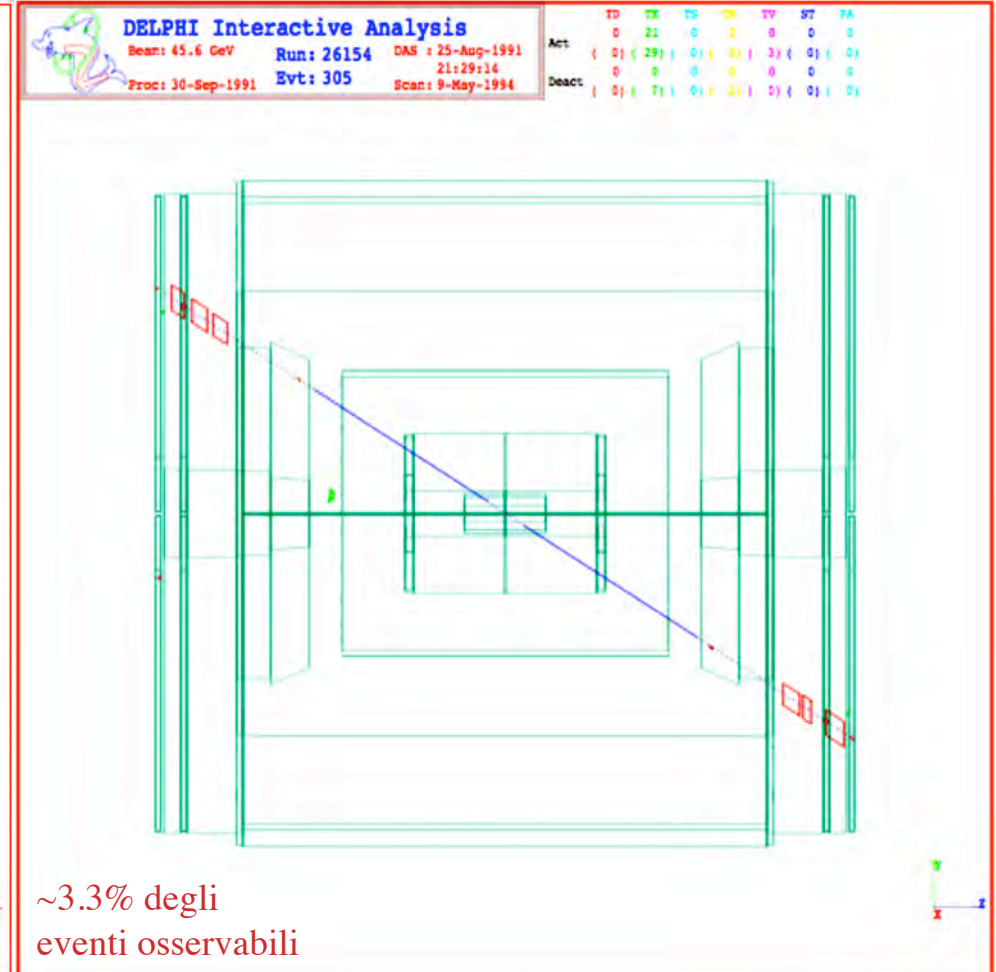
Elettroni identificati dagli sciami nell'HPC.
Un evento "elastico" con gli elettroni nello stato finale identificati dal calorimetro elettromagnetico.



Non ci sono segnali nel calorimetro adronico.

$$e^+ e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow e^+ e^-$$

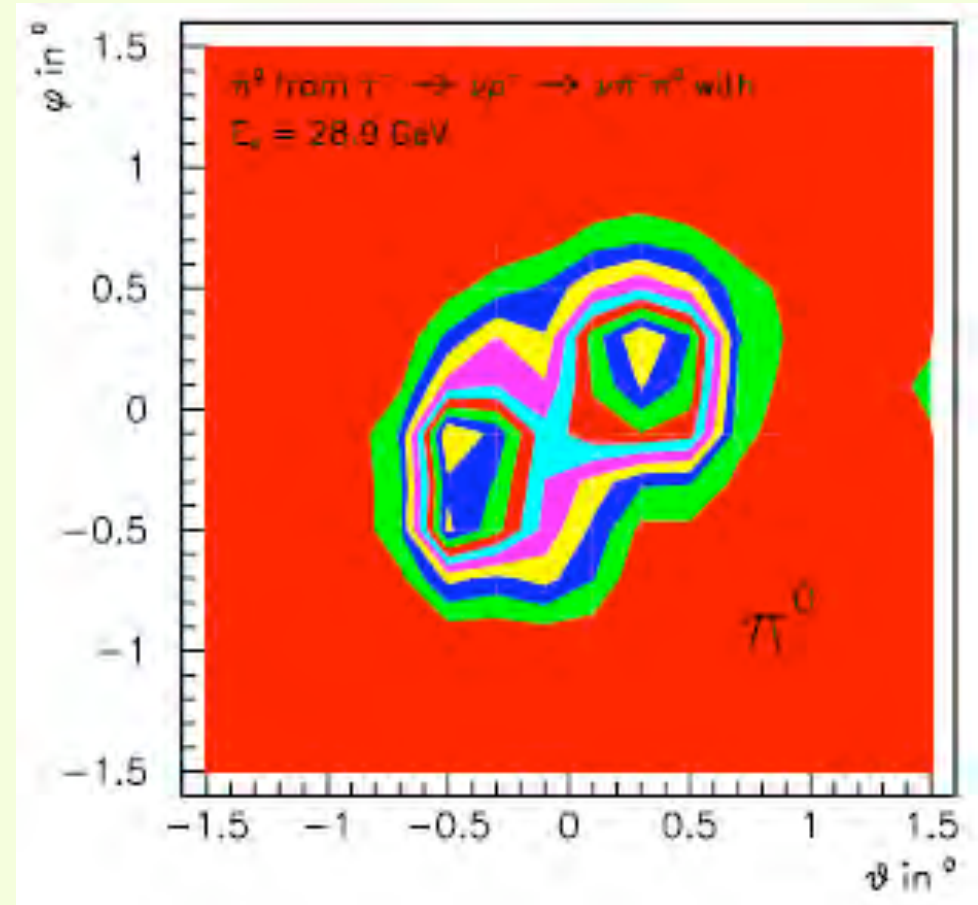
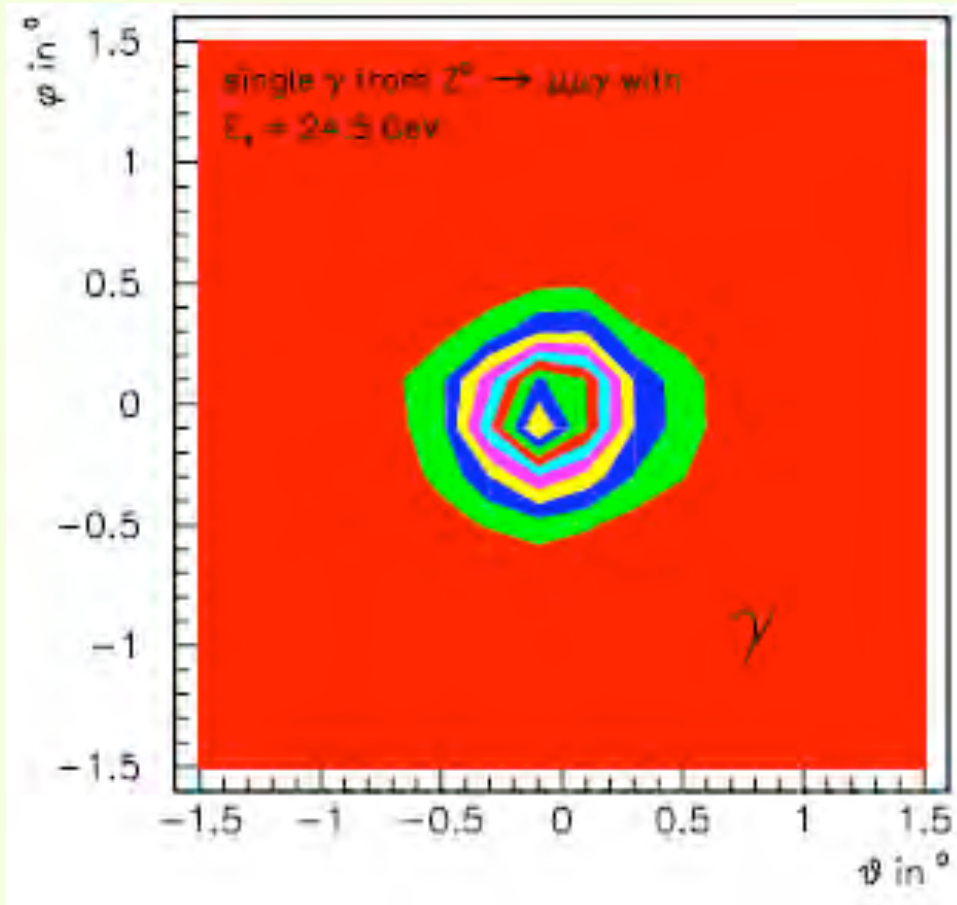
Muoni identificati dai segnali compatibili con una particella al "minimo di ionizzazione" nel calorimetro adronico e da hits nelle muon chambers.



Le tracce dei muoni sono diametralmente opposte.

$$e^+ e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$$

Il calorimetro elettromagnetico di DELPHI



L'eccellente granularità del calorimetro e.m. nel "barrel" permette una buona identificazione degli eventi. In questi esempi si vede come, osservando la dimensione "trasversale" della deposizione dell'energia nel calorimetro, è possibile distinguere un π^0 da un γ con energia ~ 30 GeV