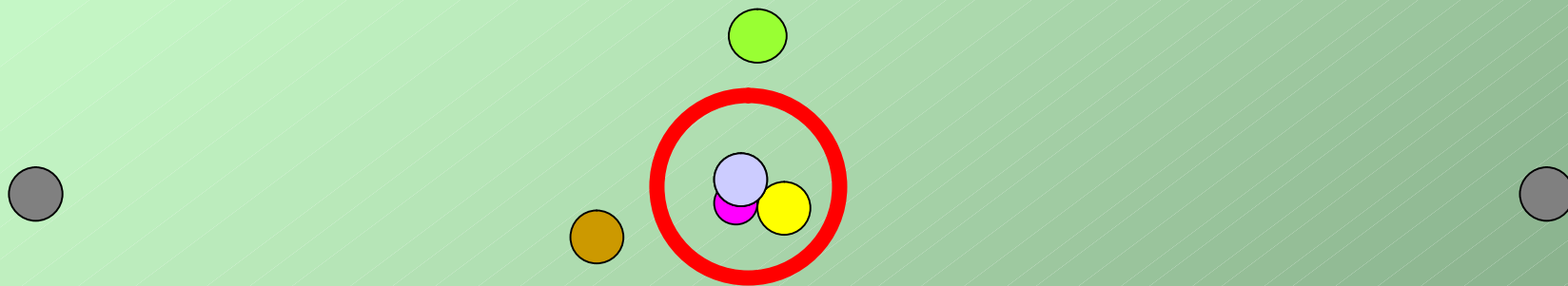


I rivelatori di particelle, ovvero come “vedere” senza vedere

- Che cosa avviene in un urto fra particelle
- Cosa ci interessa osservare
- Come riusciamo a osservare le particelle
- Problematiche di un moderno esperimento di fisica delle particelle

Due elettroni vengono fatti urtare fra loro ad altissima
energia (accelerati da un acceleratore)

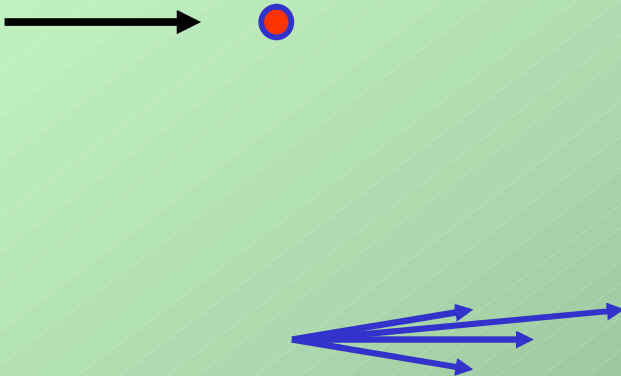
Cosa avviene concettualmente in un urto tra particelle ?



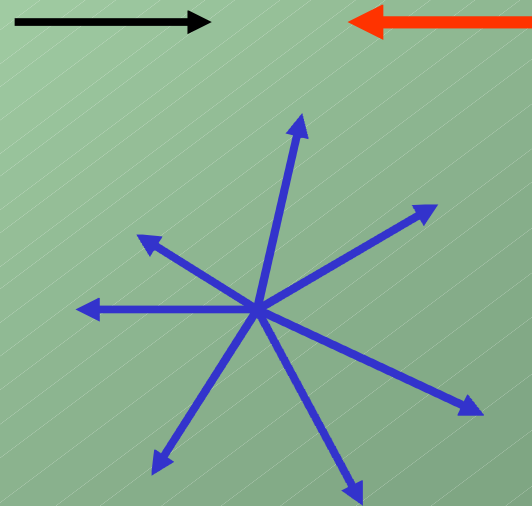
Quello che succede nell'urto, avviene su scale spaziali
piccolissime, però più della collisione siaggliere informazioni
per capire cos'è avvenuto nell'urto

- 1) "Creazione" di particelle nello stato finale
- 2) Topologie che dipendono dallo stato iniziale

Bersaglio fisso



Centro di massa fisso



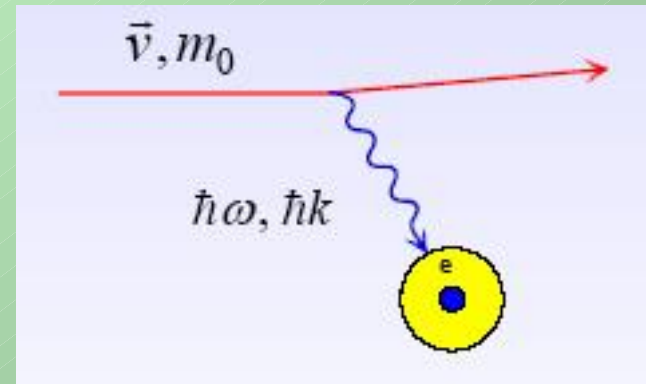
Idealmente di ogni collisione vorremmo conoscere:

- Il tipo di proiettile e di bersaglio
- Il loro impulso
- Il punto esatto della collisione
- Per ogni particella prodotta nello stato finale
 - La direzione
 - l'impulso
 - la sua identità (massa)
 - la sua carica elettrica
 - il punto in cui è stata prodotta

Le particelle possono essere "viste" se rilasciano energia nella materia.

Come perdono energia nella materia ?

Le particelle cariche
(ad esempio elettroni)
interagiscono
con la materia grazie alla
carica elettrica, in collisioni
discrete con gli elettroni o
i nuclei degli atomi

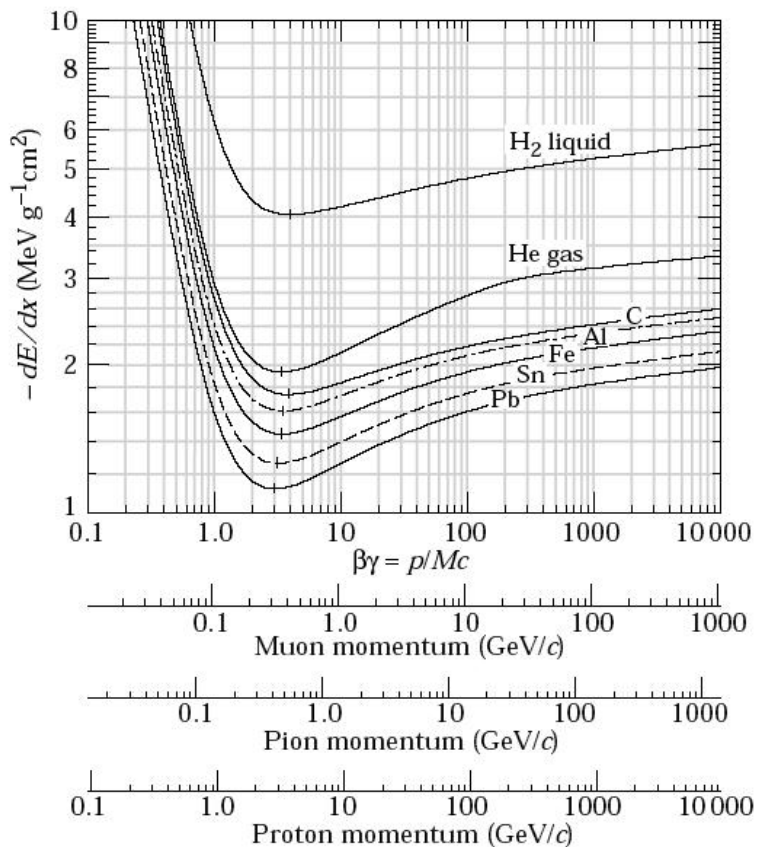


Se $\hbar\omega$ e $\hbar k$ (ovvero l'energia e l'impulso del fotone scambiato tra particella incidente e elettrone dell'atomo), sono nel giusto range, si ha **ionizzazione**

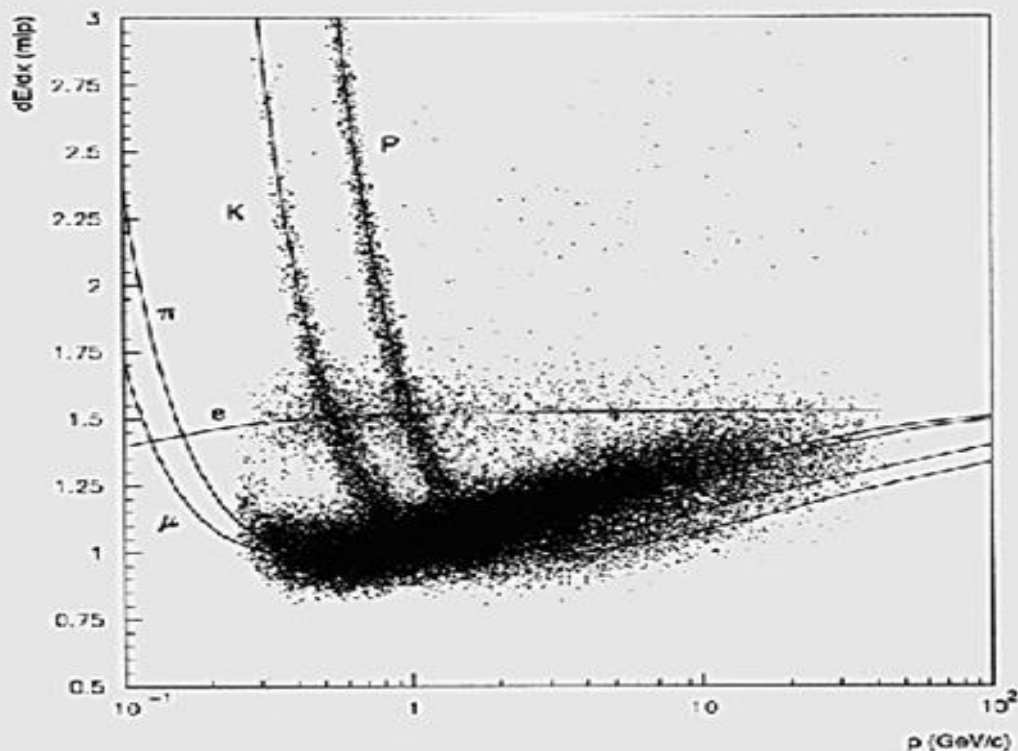
Perdita di energia delle particelle cariche nella materia

Le particelle perdono energia nella materia mediante ionizzazione.

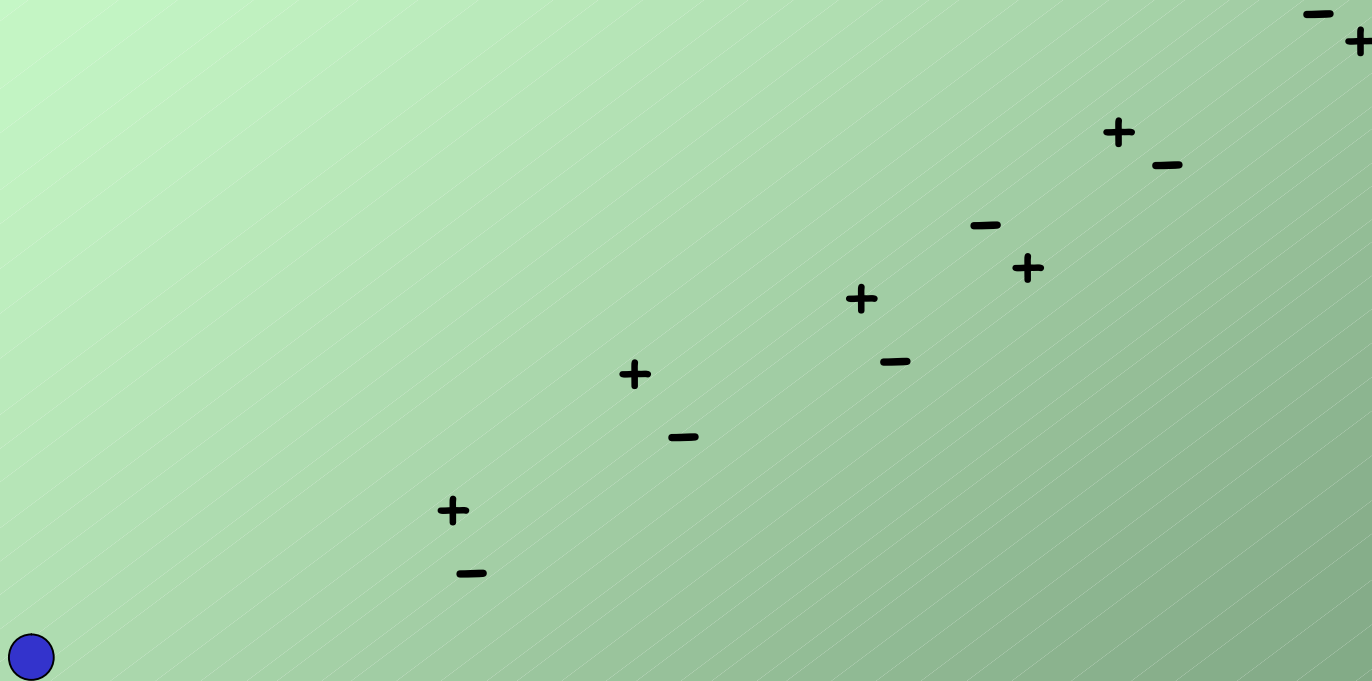
Punto fondamentale: le particelle ad alto impulso perdono energia lentamente nella materia (es. gas) e quindi rilasciano **tracce**



Parametrizzabile con la formula di Bethe-Block



Le particelle cariche elettricamente ionizzano la materia mentre si muovono:

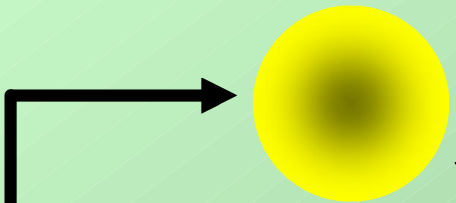


Nei gas circa 30 coppie ione-elettrone per cm



Impulso elettrico sul filo

catodo

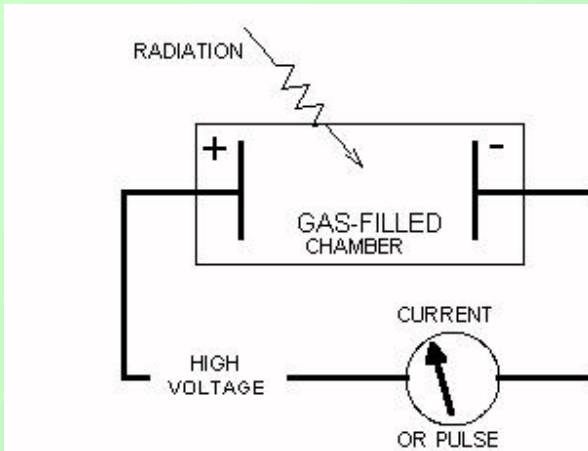


- +

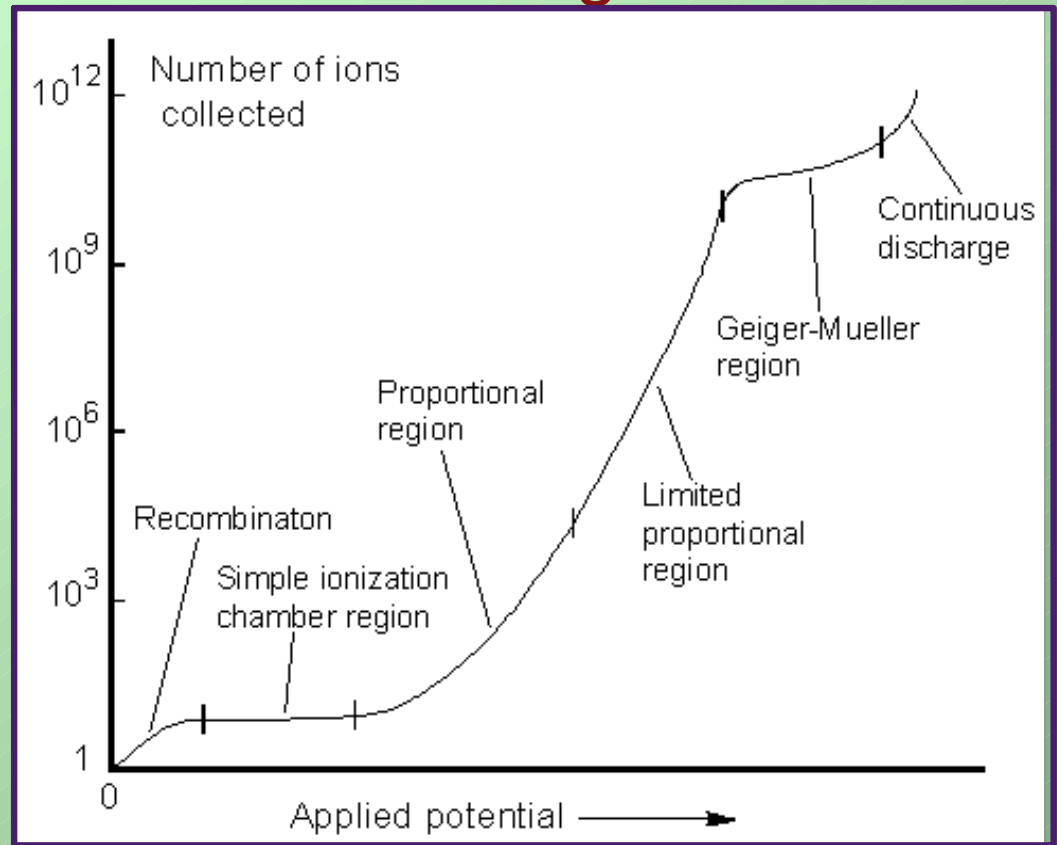
Filo anodico

Grande amplificazione
del numero di coppie
ione-elettrone

Numero di ioni vs. Voltage



**Simplest case:
Parallel plate
capacitor**



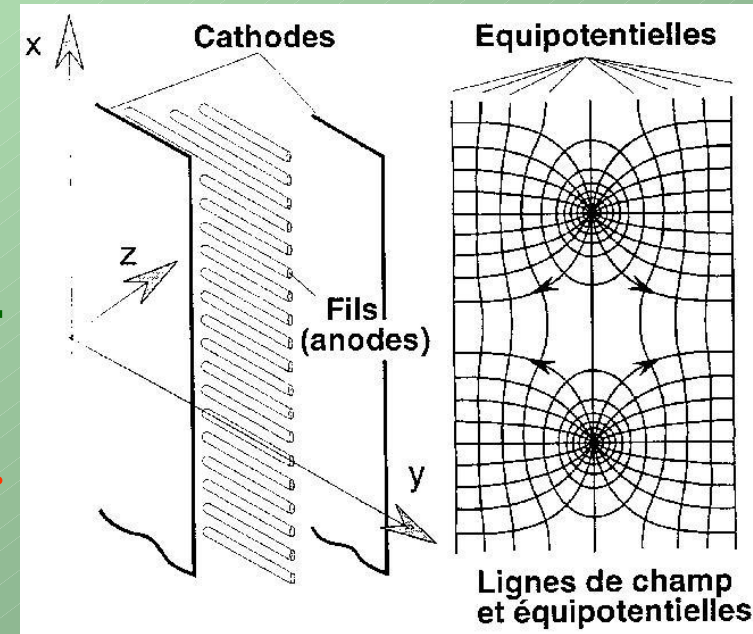
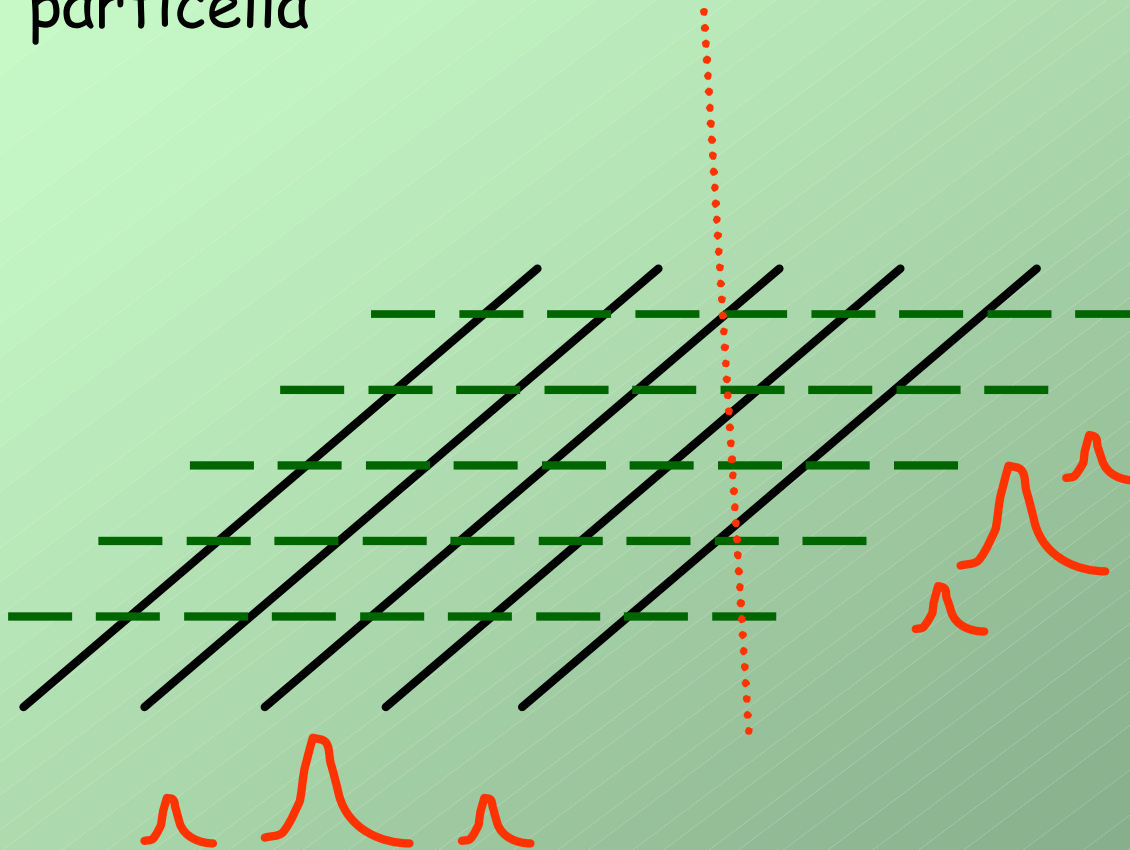
Ionization chamber: la carica sugli elettrodi e' quella della ionizzazione primaria

Proportional region: elettroni iniziali producono ulteriore ionizzazione; segnale elettrico proporzionale alla ionizzazione primaria

Geiger-Muller: segnale grande senza relazione con la ionizzazione primaria

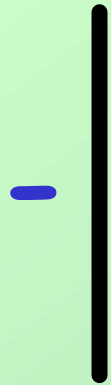
Un insieme di elettrodi puo' essere utilizzato per "visualizzare" il passaggio di una particella carica in un mezzo poco denso (ad esempio un gas)

La posizione dei segnali raccolti indica il passaggio della particella

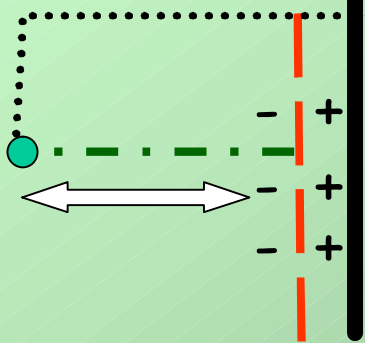


1992 Nobel Prize

Camera a drift



+

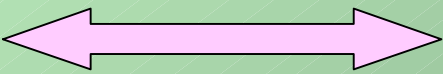


- +
- +
- +

STOP

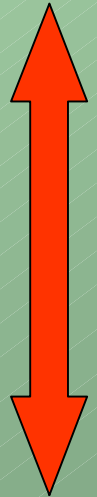


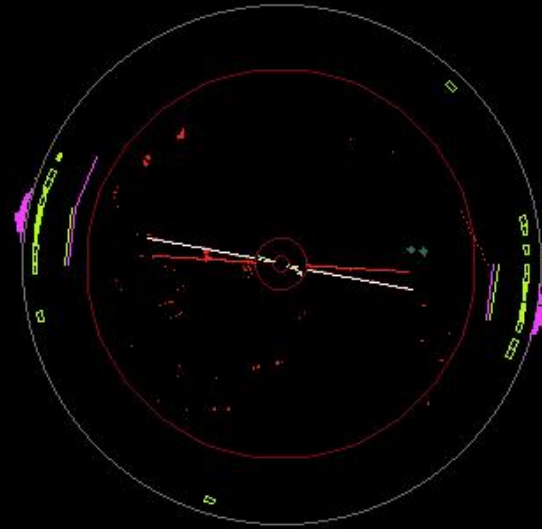
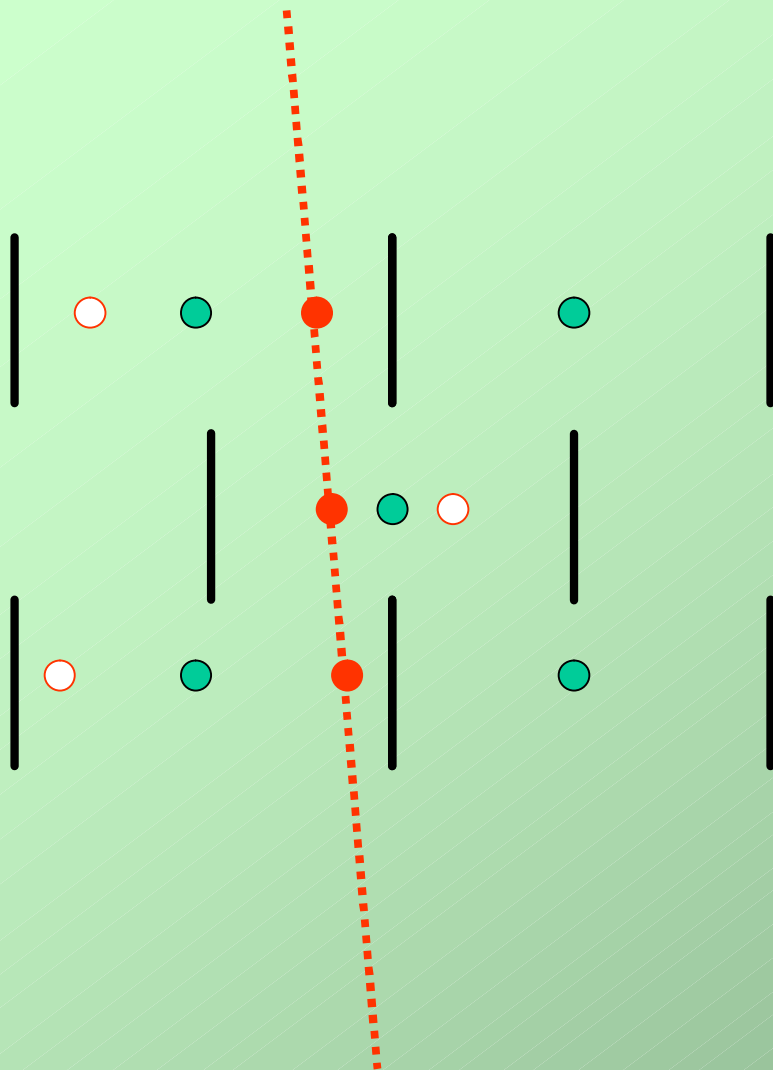
Δt



Quale delle due
e' quella vera ?

START

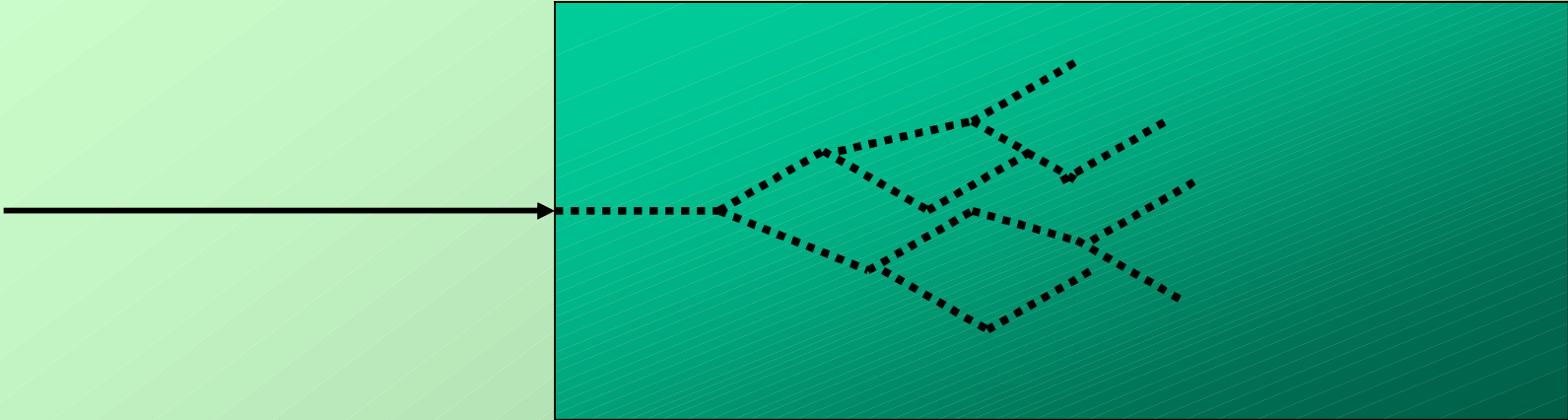




Centre-of-Mass Energy 205 GeV

L'ambiguita' destra-sinistra e'
risolta con una opportuna scelta
nel posizionamento dei fili

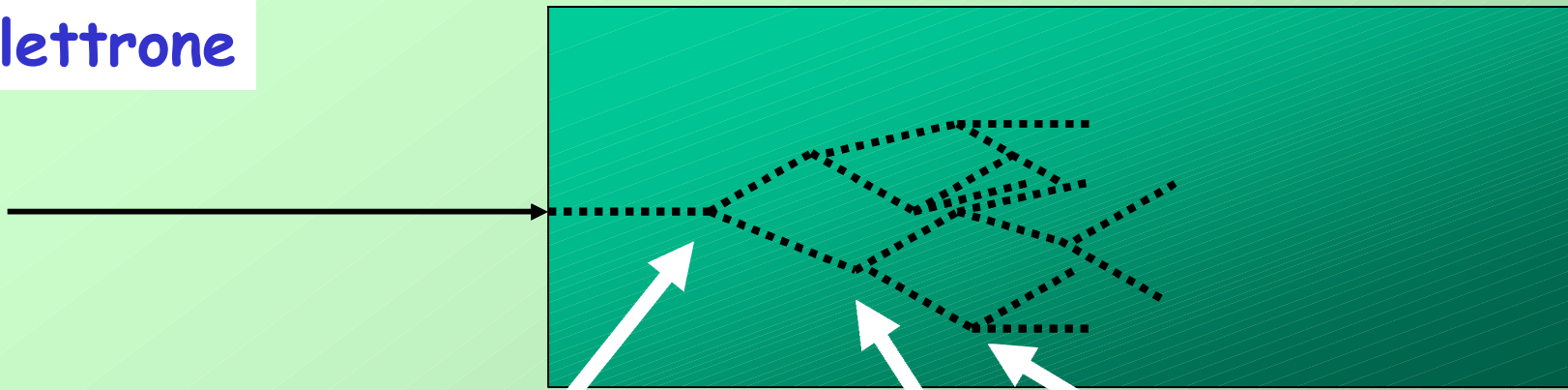
CALORIMETRI



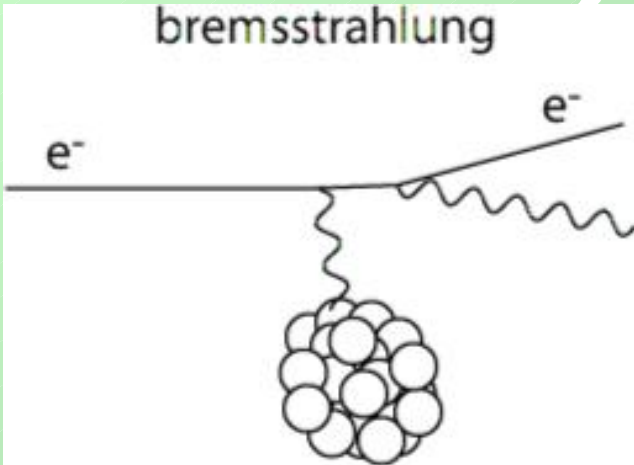
La particella viene distrutta, ma i segnali raccolti corrispondono alla sua energia totale

Possono "vedere" anche le particelle neutre

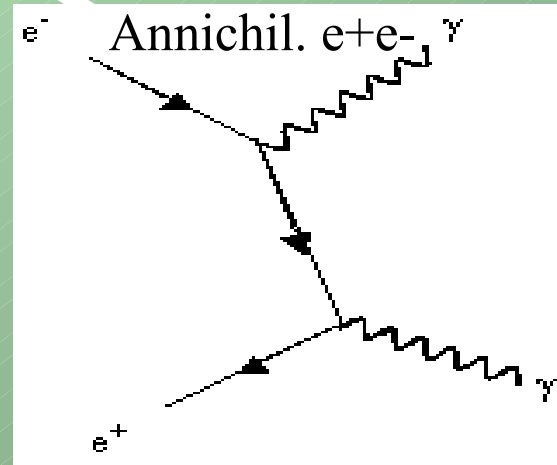
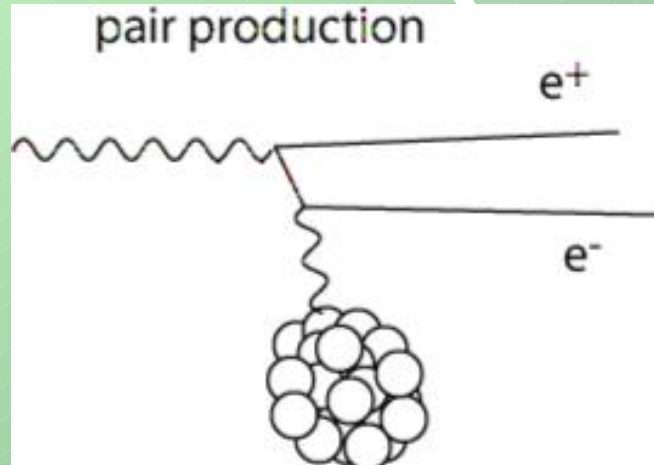
elettrone



bremstrahlung

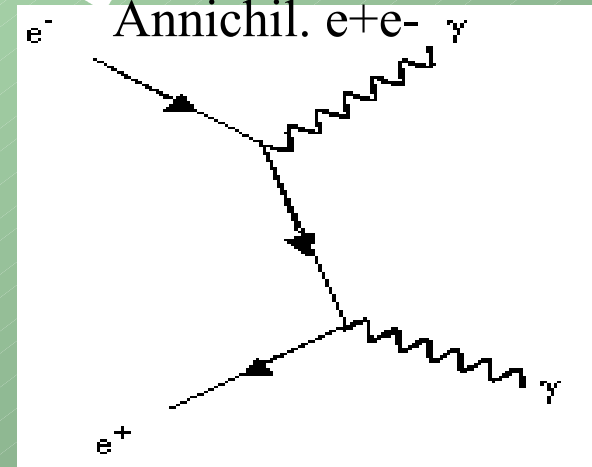
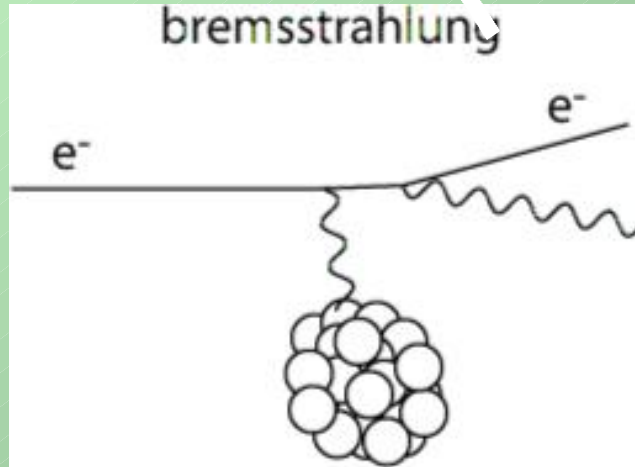
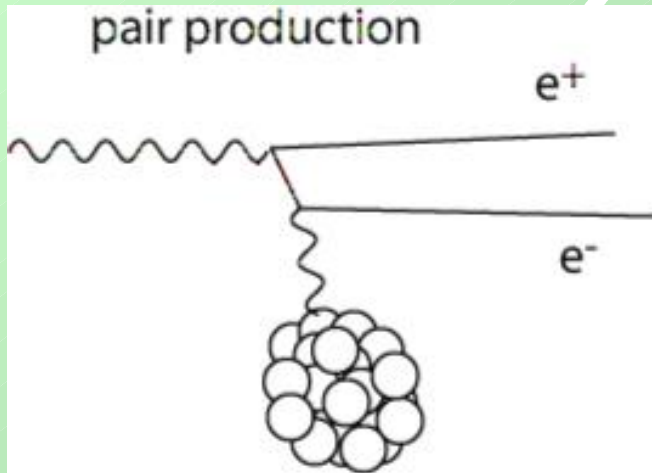
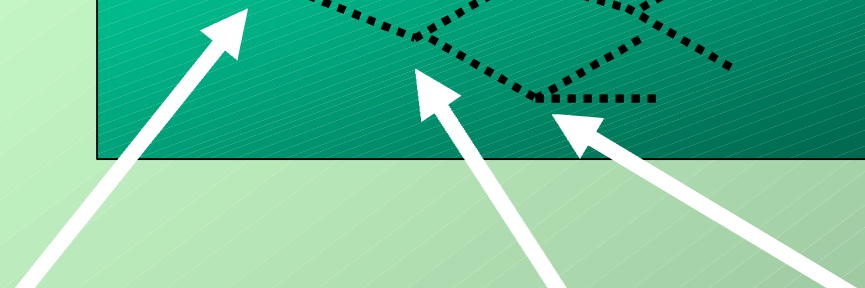
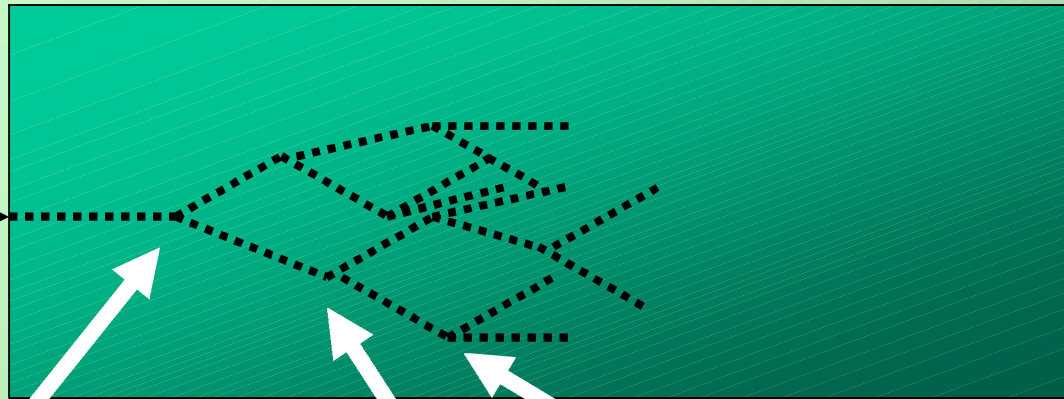


pair production



Sciame elettromagnetici: processo elettromagnetico. Lo sciame contiene elettroni, positroni, e fotoni, e si interrompe quando l'energia delle singole particelle e' tale da rendere la ionizzazione equiprobabile alla bremstrahlung

fotone

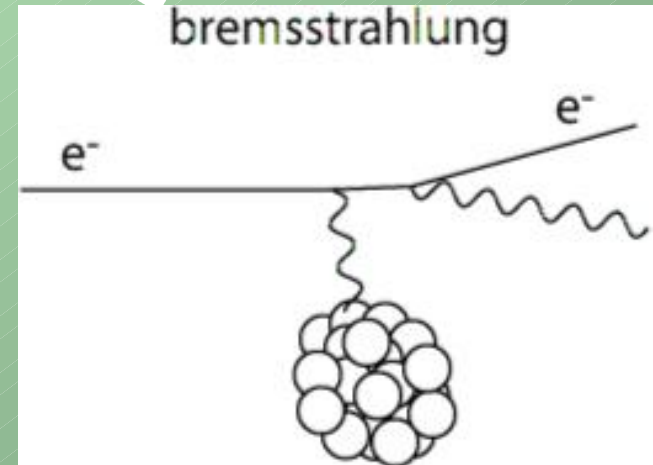
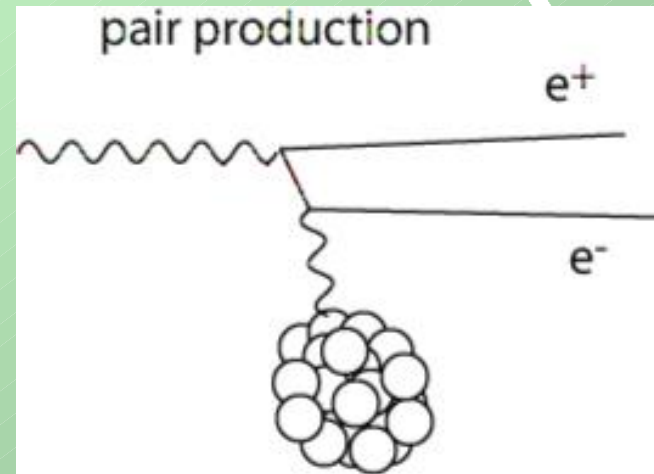
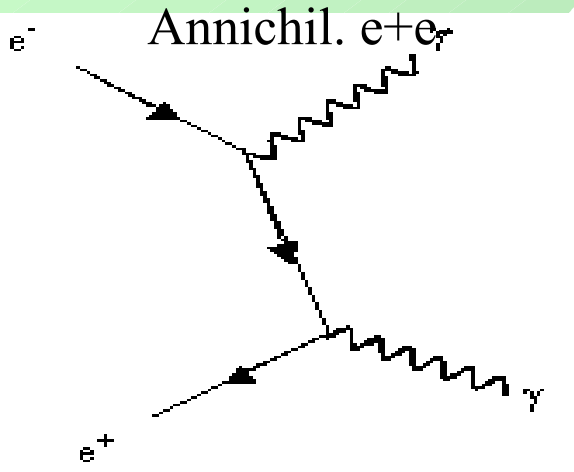
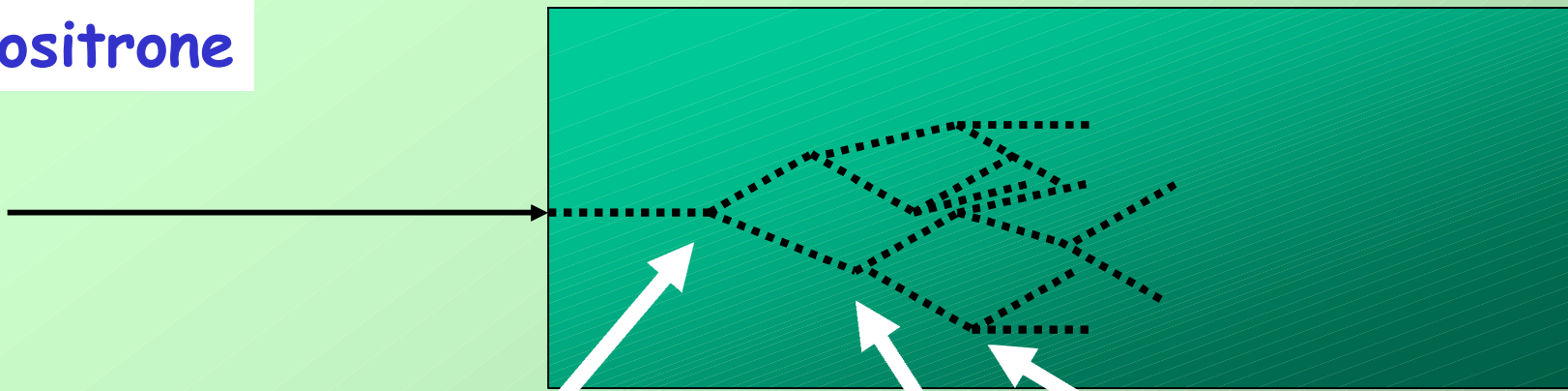


Sciame elettromagnetici: processo elettromagnetico.

Lo sciame contiene elettroni, positroni, e fotoni

Il primo processo e' invertito rispetto all'elettrone, ma poi lo sciame si sviluppa identico

positrone



Sciame elettromagnetici: processo elettromagnetico.

Lo sciame contiene elettroni, positroni, e fotoni

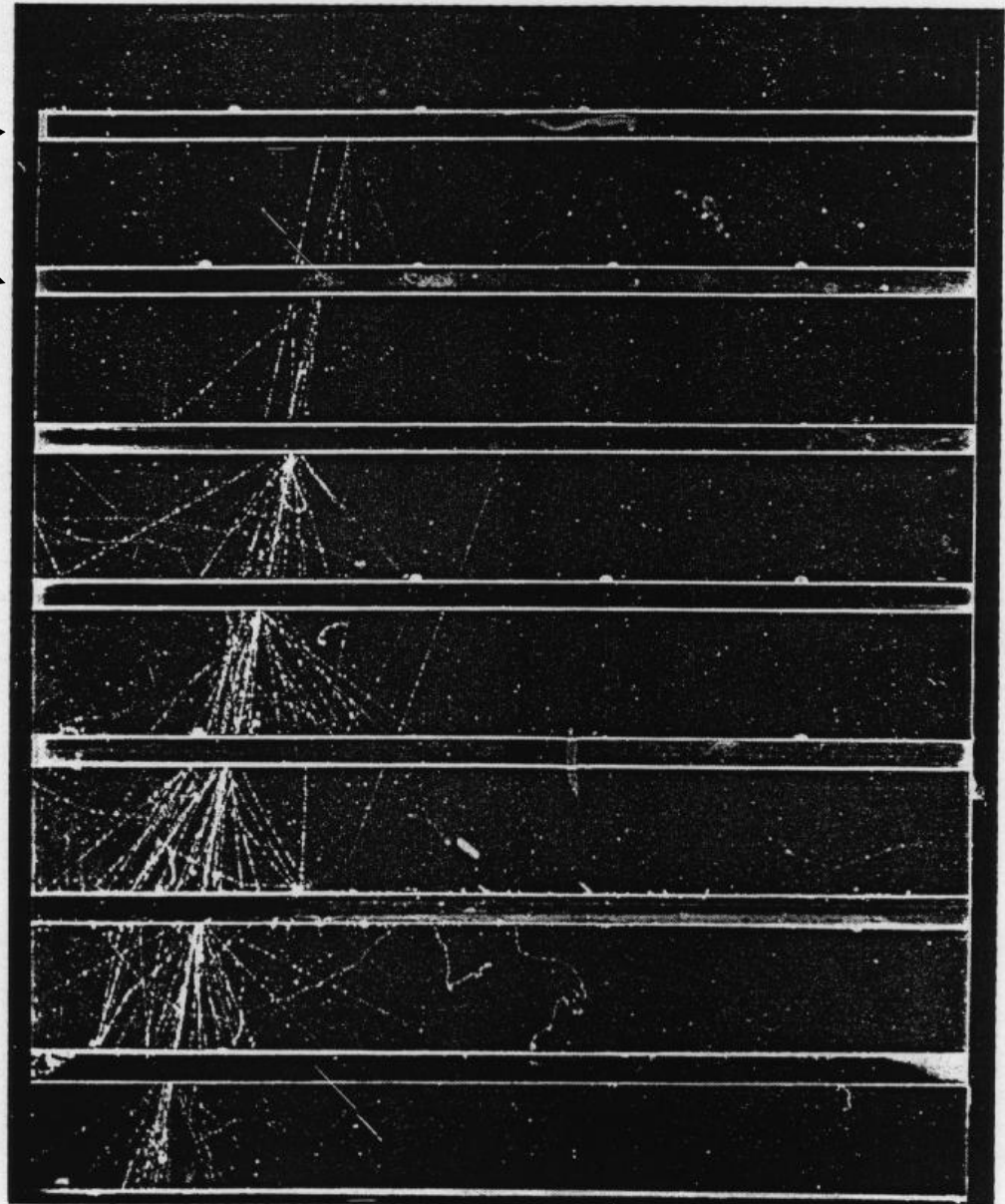
Il primo processo e' una annichilazione, ma poi lo sciame e' identico

Un esempio di calorimetro: calorimetro a campionamento

Strati di piombo

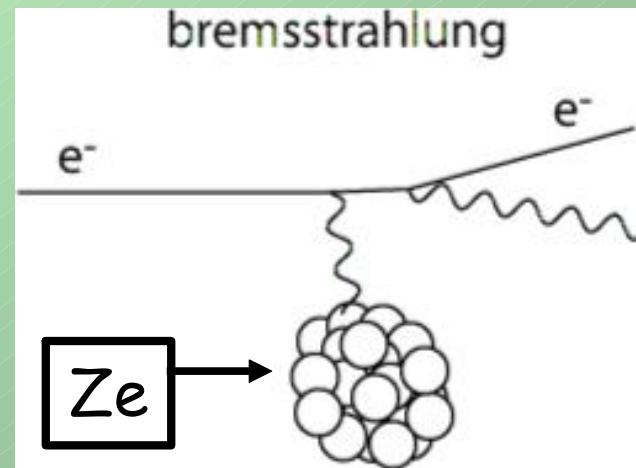
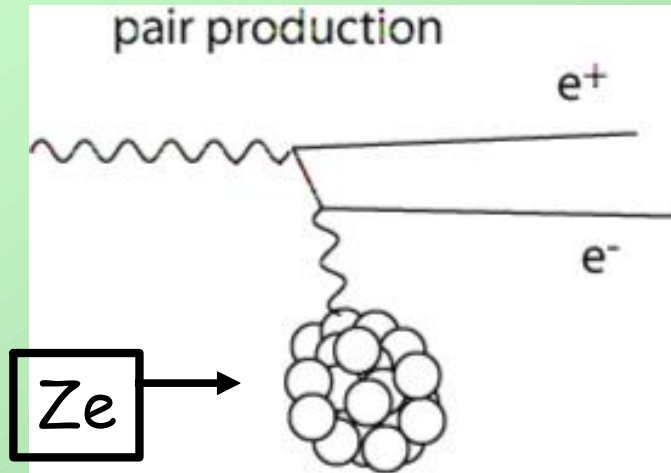
Strati di rivelatore
sensibile

La risoluzione della misura dell' energia dipende dalle fluttuazioni statistiche dello sciame



Risultato: elettroni, positroni e fotoni di alta energia ($> 1 \text{ GeV}$) possono essere "visti" allo stesso modo dai calorimetri elettromagnetici

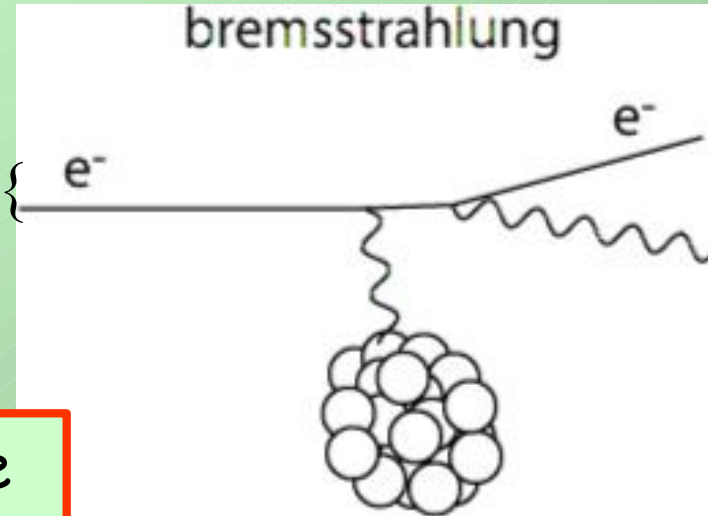
Nella scelta del materiale per costruire il calorimetro em il parametro fondamentale e' il numero atomico Z dell'elemento.



Alto Z (es. Piombo) \rightarrow sciame "compatti".

E il muone ? E' del tutto identico all'elettrone, ma ha una massa circa 200 volte maggiore.

$$\frac{d\sigma}{dk} \approx 5 \frac{e^2}{\hbar c} Z_1^4 Z_2^2 \left[\frac{m_e c}{M v_1} \right]^2 \frac{r_e^2}{k} \ln \frac{M v_1^2 \gamma^2}{k}$$



La massa del muone sopprime la probabilita' del processo di $200^2 = 400000$ volte rispetto all'elettrone.

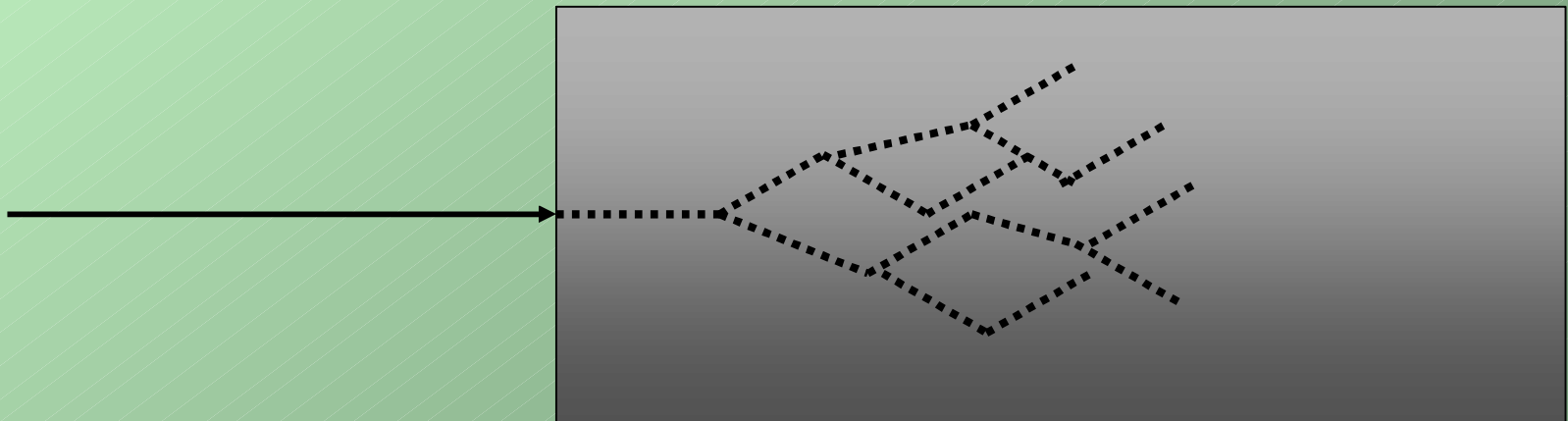
A parita' di energia il muone ionizza senza produrre sciami

Sciame adronici: i calorimetri adronici

Gli **adroni** sono le particelle composte da quark (protone, neutrone, pione, kaone etc) e che quindi sentono l'interazione nucleare.

Un protone di impulso $> 1 \text{ GeV}$ sparato su un blocco di materiale "denso", oltre a perdere energia per ionizzazione, dà luogo a interazioni nucleari con i nuclei del materiale stesso.

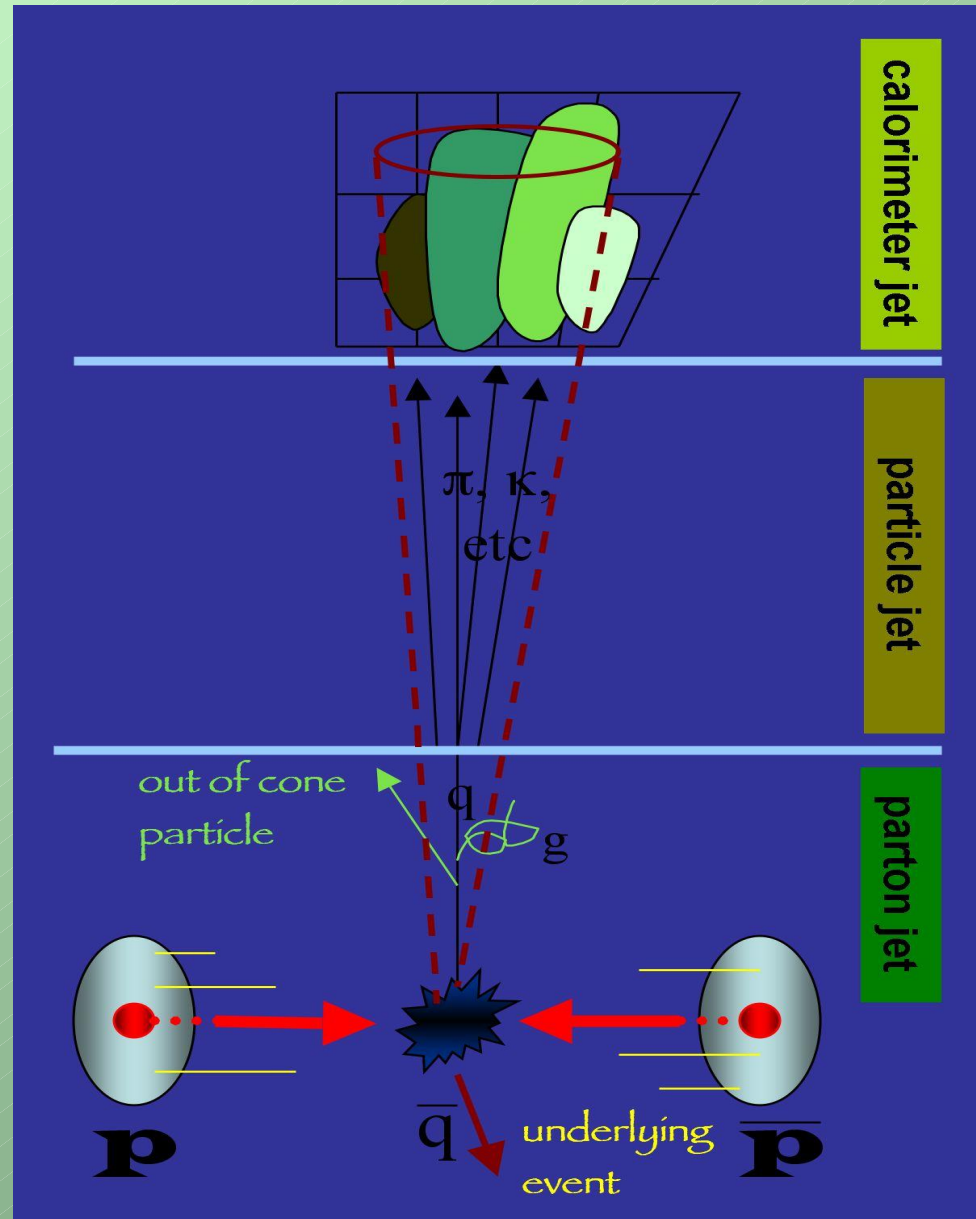
Nell'interazione sono prodotte altre particelle, tipicamente adroni, che a loro volta possono interagire con i nuclei del materiale, fino a che l'energia delle singole particelle diventa troppo bassa, e lo sciame si arresta.



Partoni \rightarrow Particelle \rightarrow Jets

Spesso non e' necessario ricostruire l'energia della singola particella, ma e' piu' interessante ricostruire l'energia dei "jet", che sono insiemi di particelle emesse in modo correlato.

I calorimetri sono gli strumenti adatti per questi

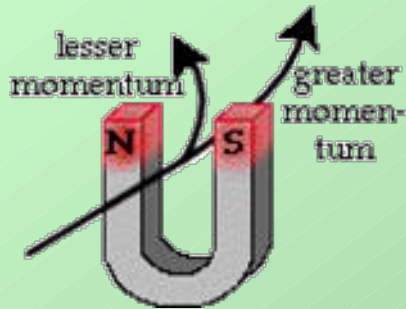


Misura dell'impulso delle particelle

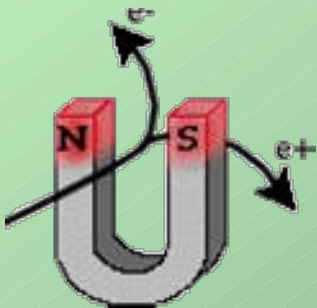
$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \frac{q}{c} \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

← Forza di Lorentz

Effetto: curva la traiettoria di una particella carica in un campo magnetico



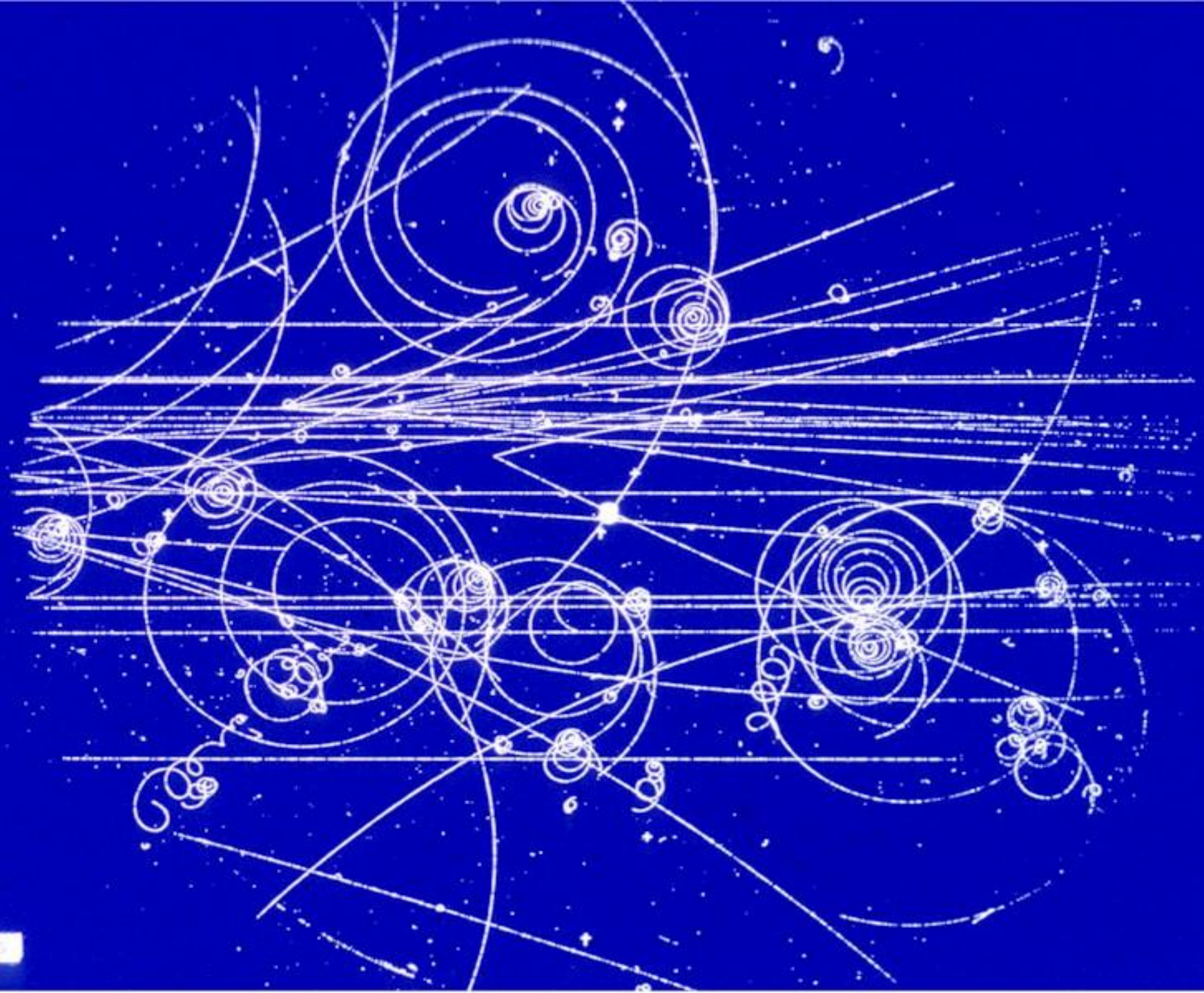
Approssimativamente $p = 0.3 B \cdot r$ (Tesla \cdot m)
dove r = raggio di curvatura



Cariche elettriche opposte curvano in direzione opposta !

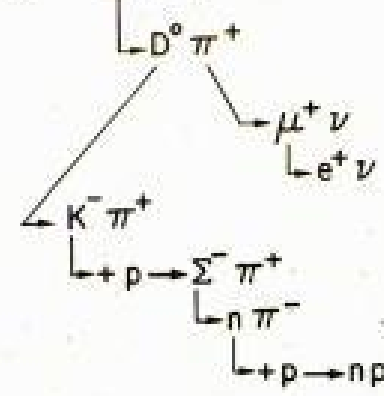
**La camera a bolle, ovvero,
le particelle elementari
esistono realmente**





WA 21
EVENT 294/0995

$\nu p \rightarrow D^* p \mu^-$



μ^- 42.5
 π^+ 3.6

p 1.71

π^+ 0.23
KINK
 μ^+ 0.14

K^- 0.32

e^+

π^-

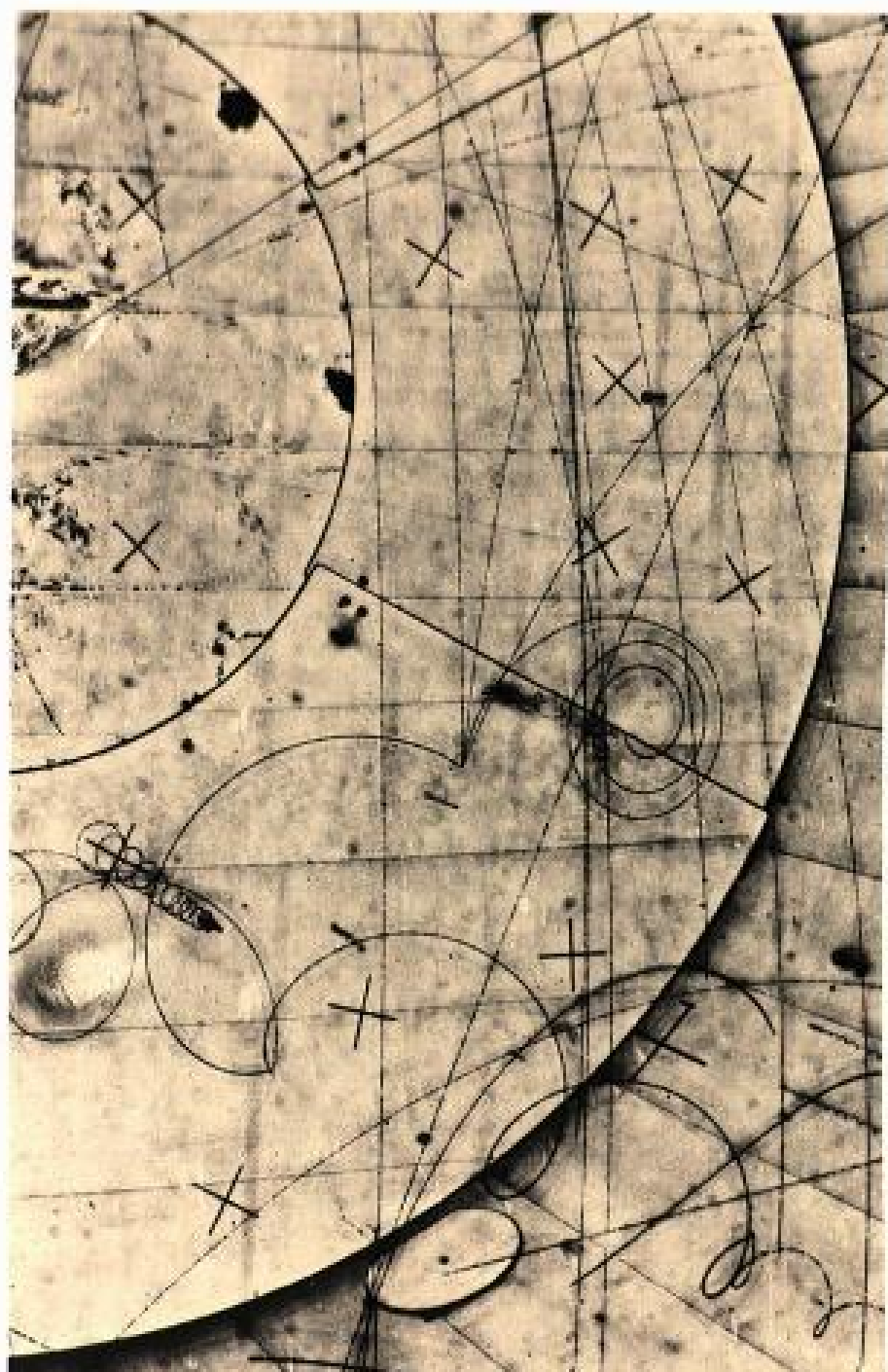
π^+

Σ^-

n

p

NEUTRINO BEAM





Esperimenti "a bersaglio fisso"

Fascio di particelle su un bersaglio

Densità dei corpi solidi
→ alte probabilità di interazione
Adatti per ricerca di eventi rari



Energia di collisione 29 GeV

Esperimenti "con collisionatori"

Collisioni frontali tra due fasci di
particelle

Energie (di collisione) molto elevate
Ma i fasci hanno bassa densità

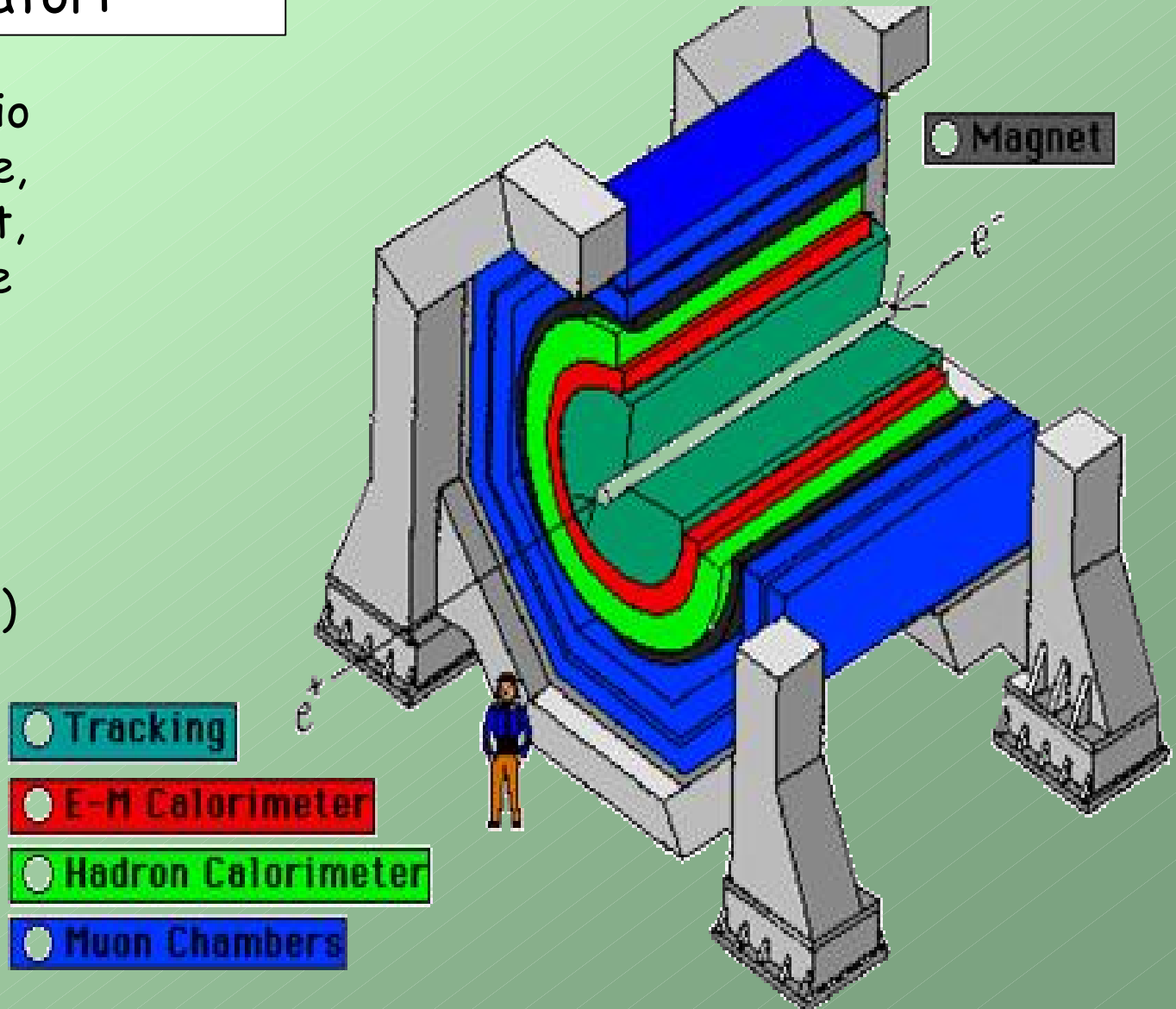


Energia di collisione 900 GeV

La tipica struttura di un rivelatore ai collisionatori

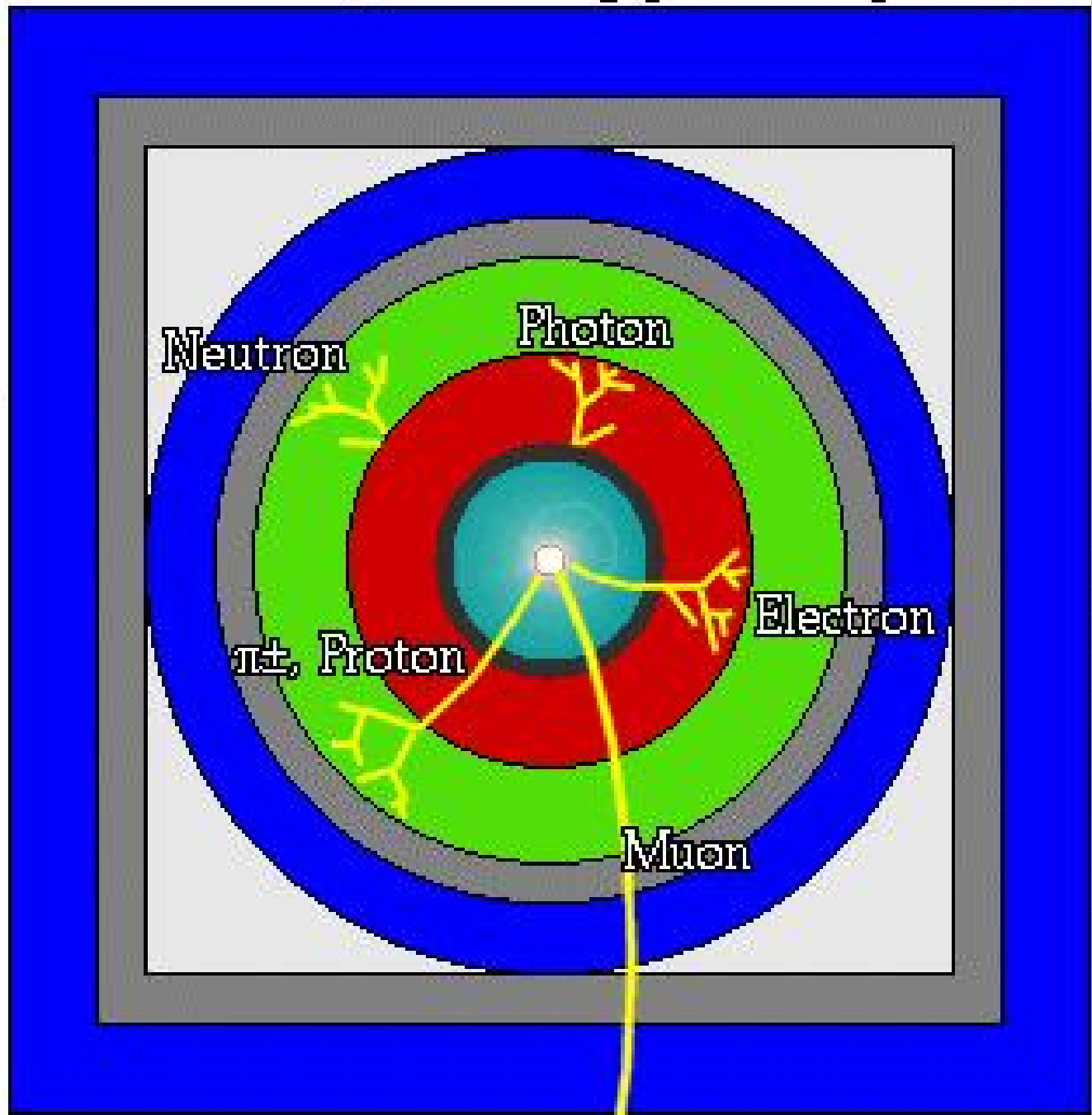
Misurare al meglio particelle cariche, Fotoni, muoni, jet, energia mancante (neutrini)

Copertura piu' ampia possibile dell'angolo solido (rivelatori a "4 π ")

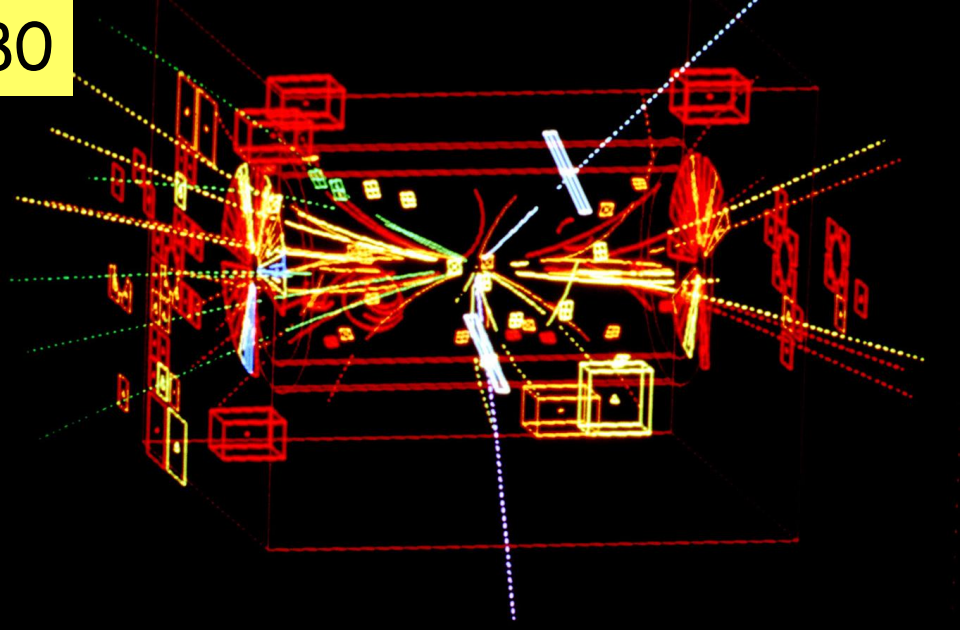
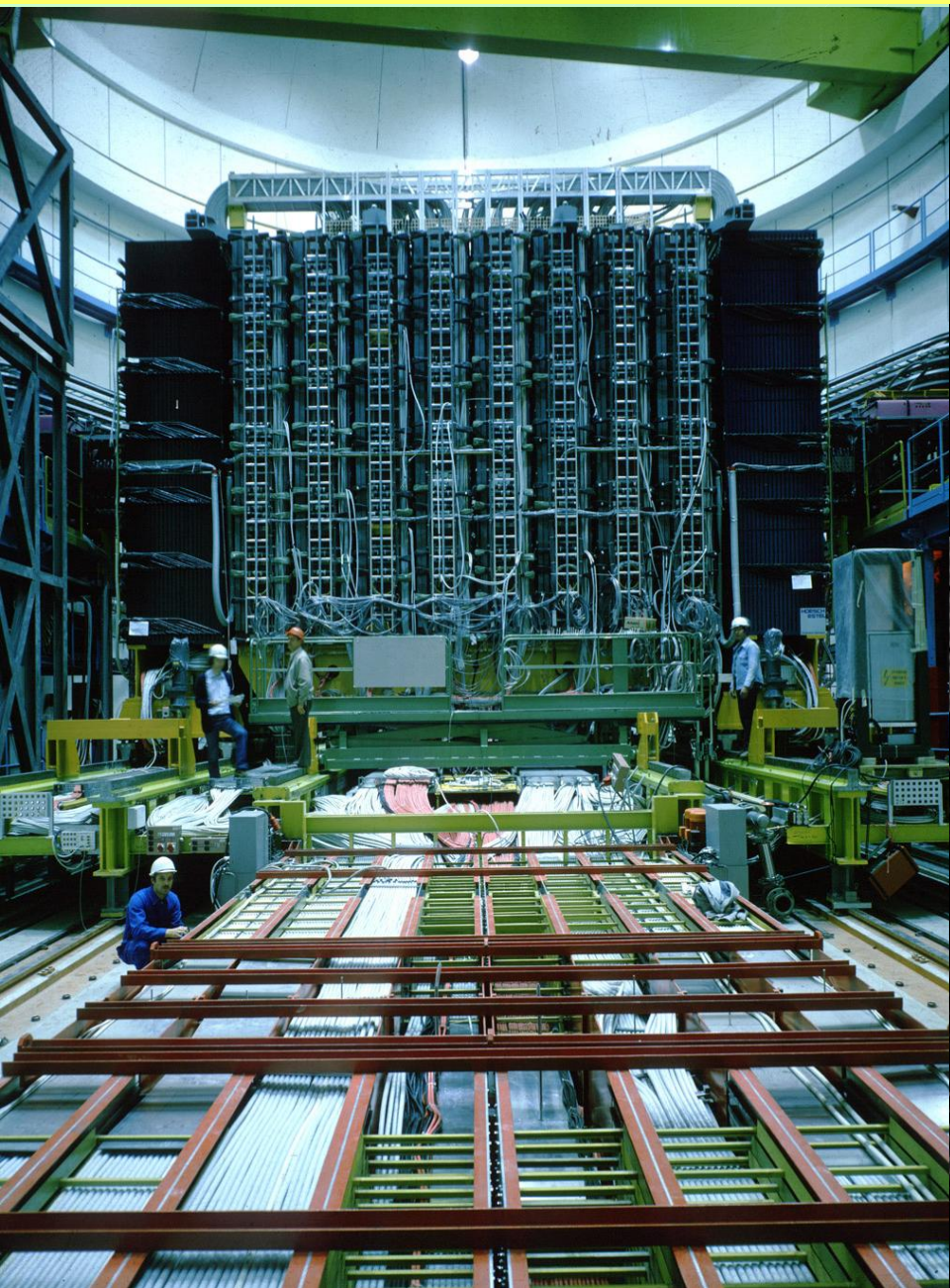


A detector cross-section, showing particle paths

- Beam Pipe (center)
- Tracking Chamber
- Magnet Coil
- E-M Calorimeter
- Hadron Calorimeter
- Magnetized Iron
- Muon Chambers



Il primo: esperimento UA1 - 1980

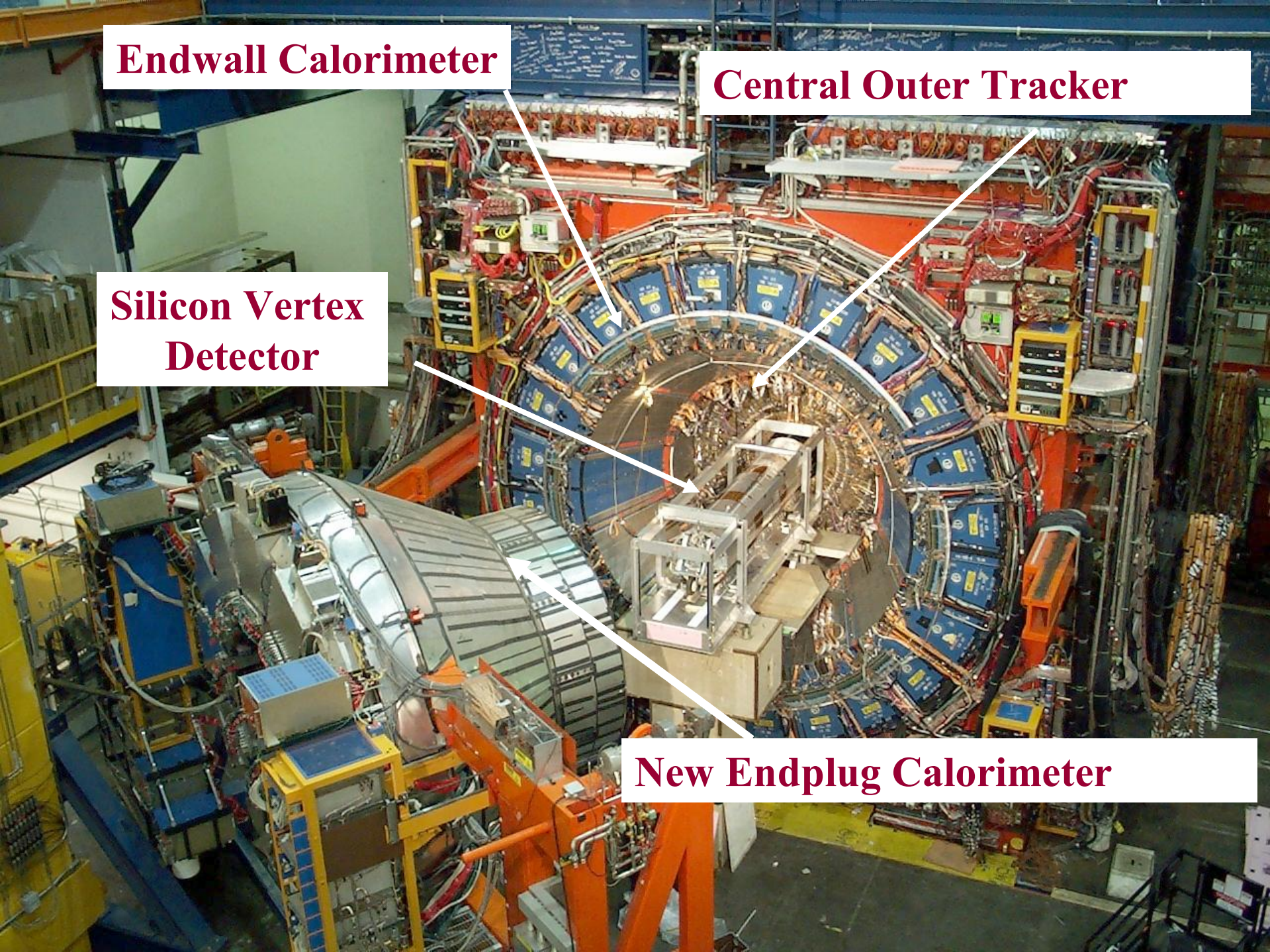


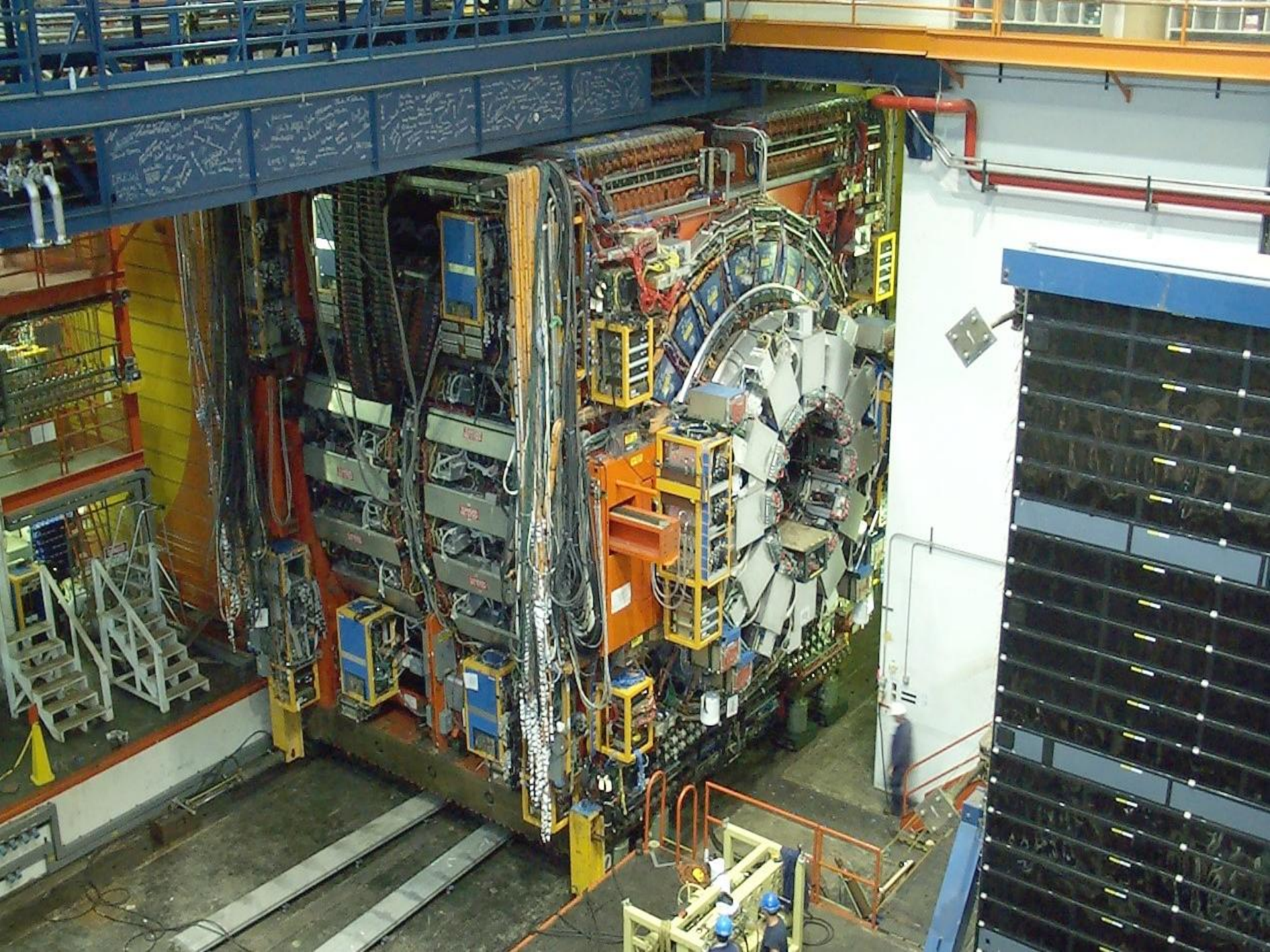
Endwall Calorimeter

Central Outer Tracker

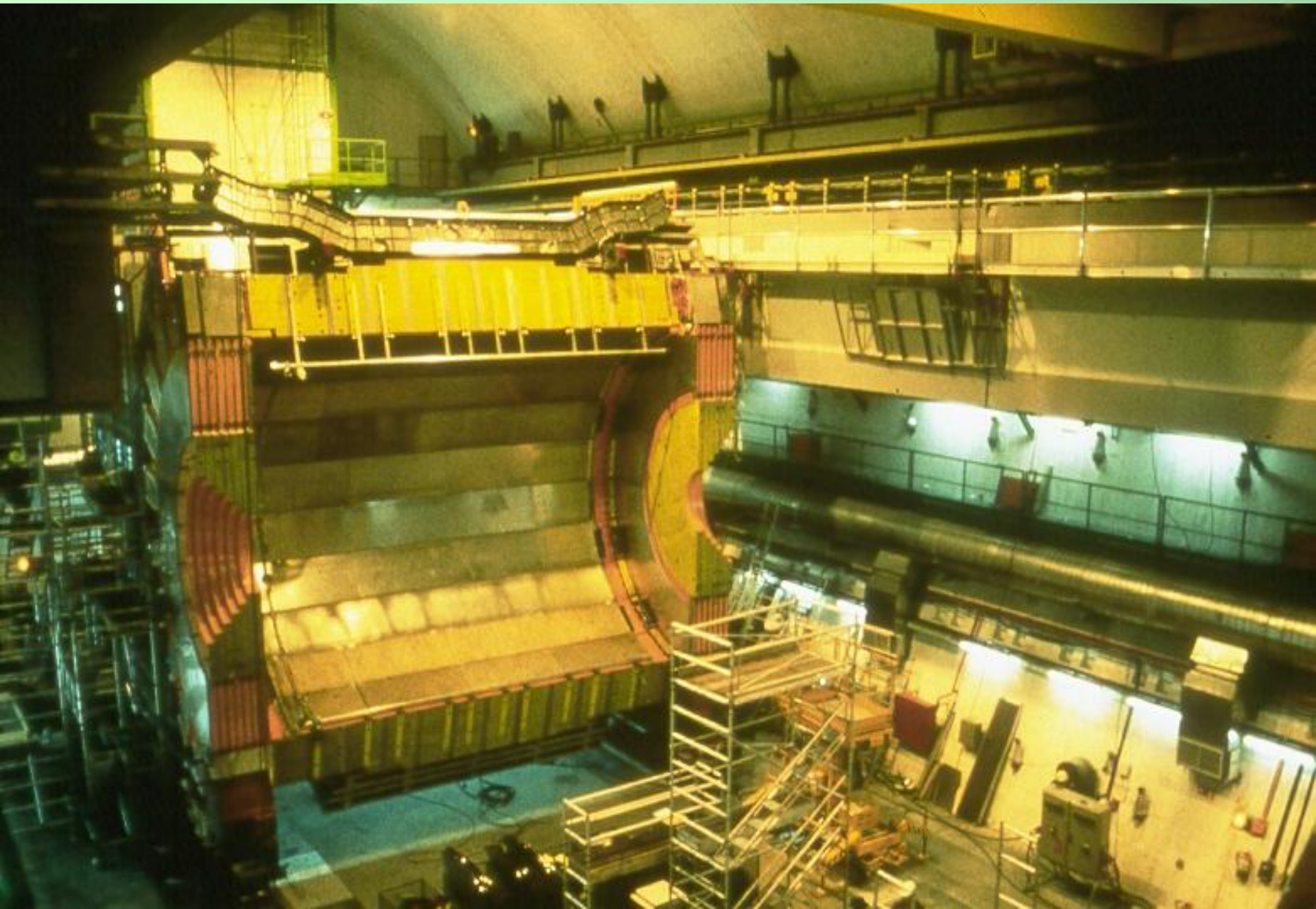
**Silicon Vertex
Detector**

New Endplug Calorimeter



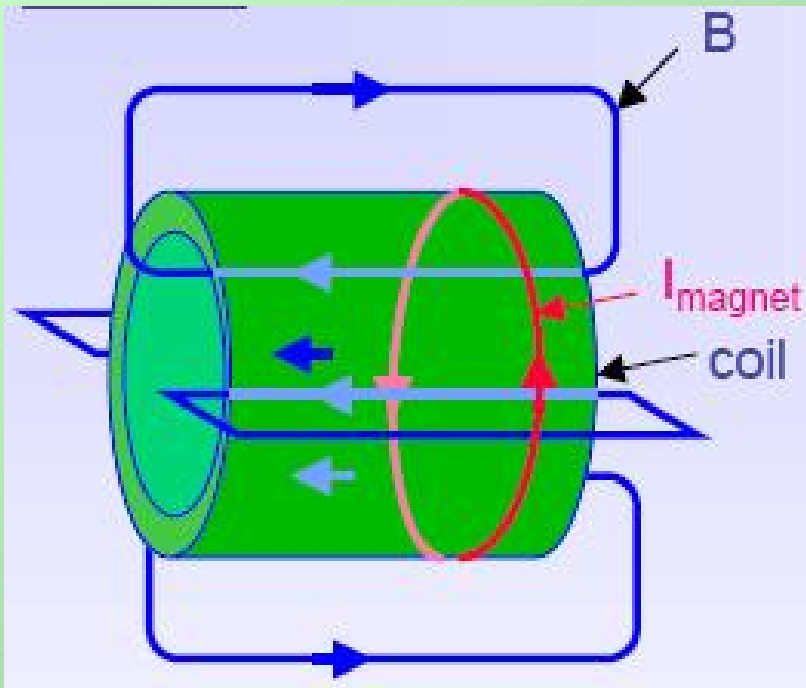






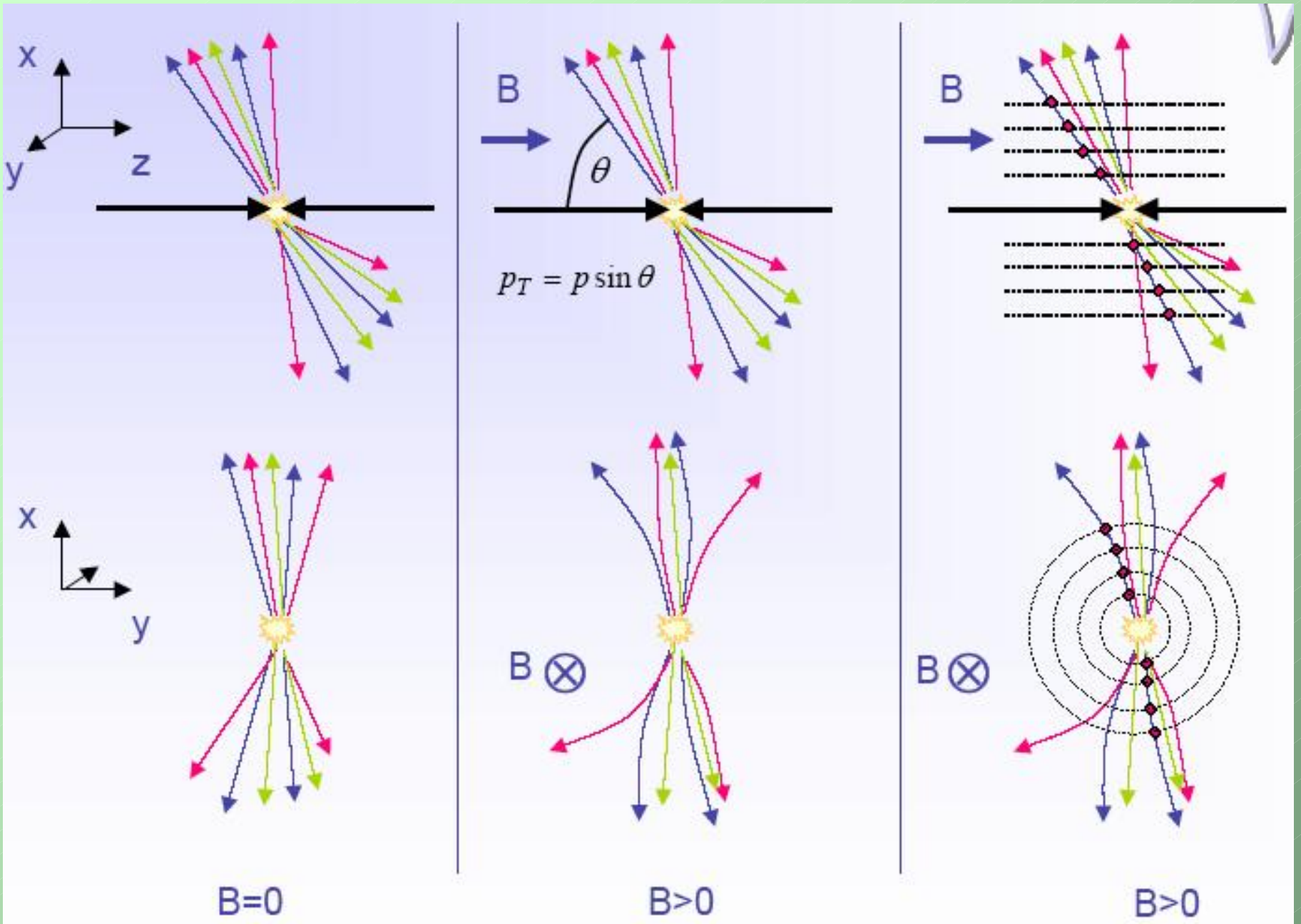
Solenoid per rivelatore a "4 π "

- Campo molto intenso all'interno
- Campo debole all'esterno, che "ritorna" attraverso il ferro
- Superconduttore per ottenere campi elevati (> 1 Tesla)
- Curvatura solo relativa alla componente dell'impulso \perp al campo

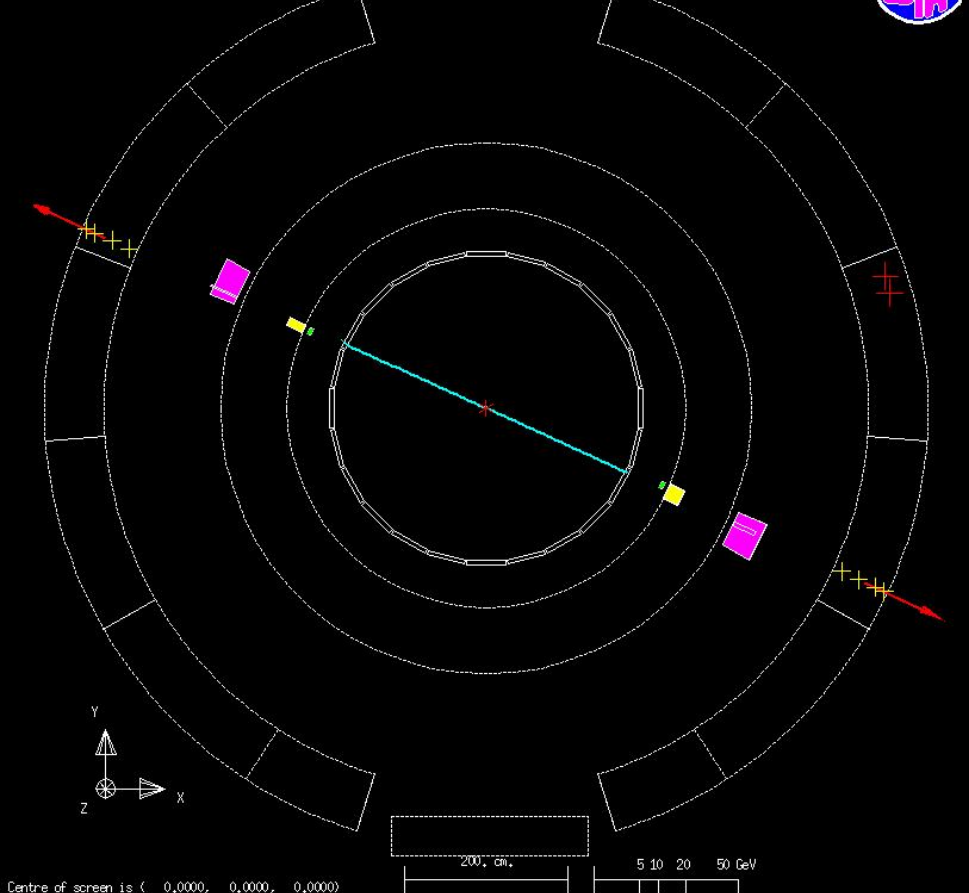


Esempi:

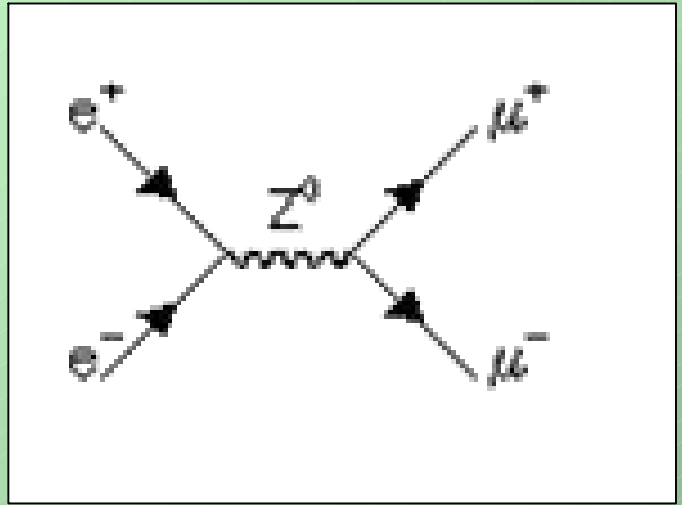
- Delphi: SC, 1.2 T, 5.2 m, L 7.4 m
- L3: NC, 0.5 T, 11.9 m, L 11.9 m
- CMS: SC, 4 T, 5.9 m, L 12.5 m



Run: event 4083; 4566 Date 930527 Time 22439 Ctrk(N= 2 Sump= 86,8) Ecal(N= 5 SumE= 1,6) Hcal(N= 4 SumE= 4,0)
 Ebeam 45,688 Evis 90,8 Emiss 0,6 Vtx (-0,05, 0,08, 0,35) Muon(N= 2) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 0 SumE= 0,0)
 Bz=4,350 Thrust=0,9999 Aplan=0,0000 Oblat=0,4110 Spher=0,0003

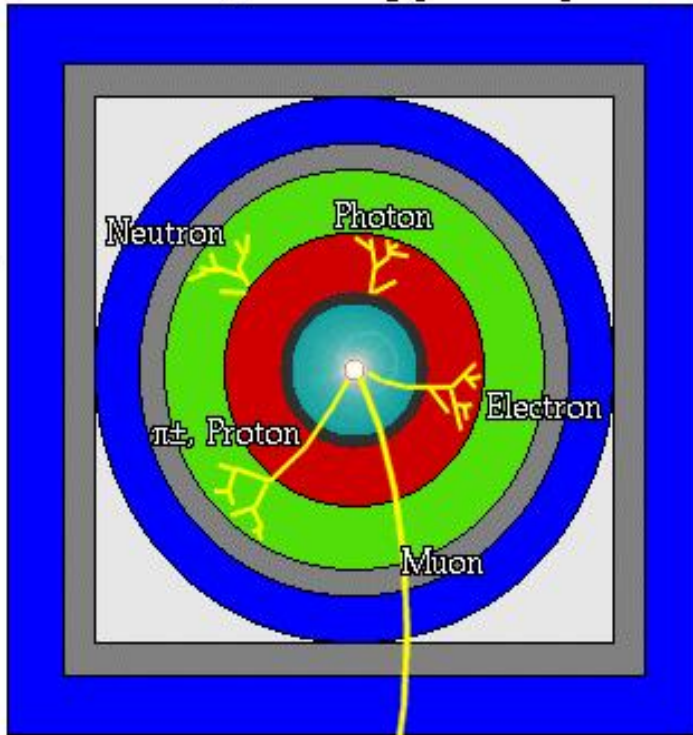


Centre of screen is (0,0000, 0,0000, 0,0000)

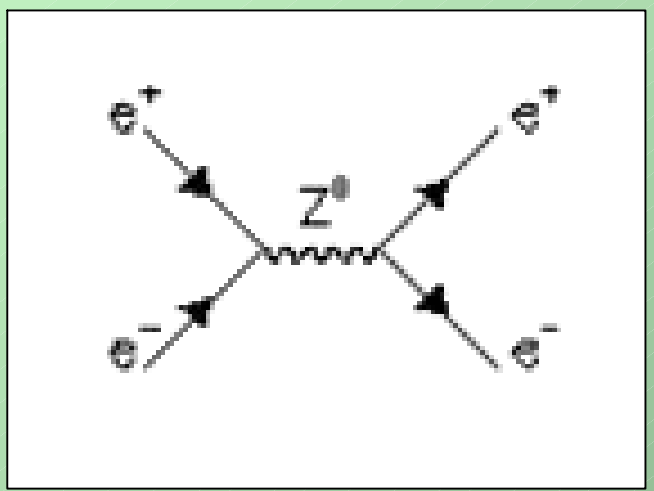
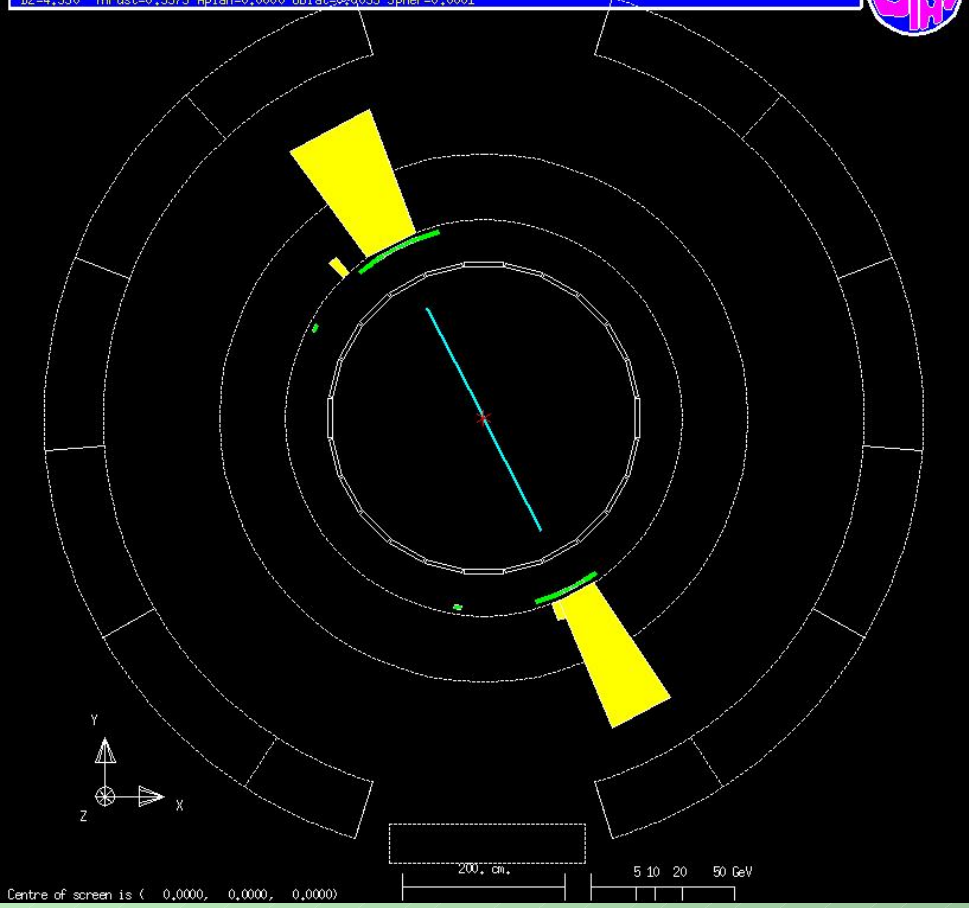


A detector cross-section, showing particle paths

- Beam Pipe (center)
- Tracking Chamber
- Magnet Coil
- E-M Calorimeter
- Hadron Calorimeter
- Magnetized Iron
- Muon Chambers

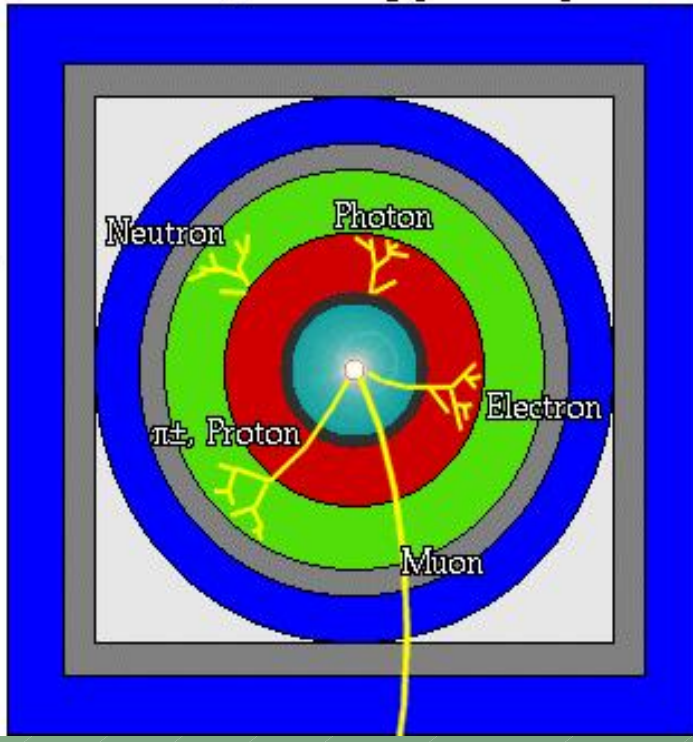


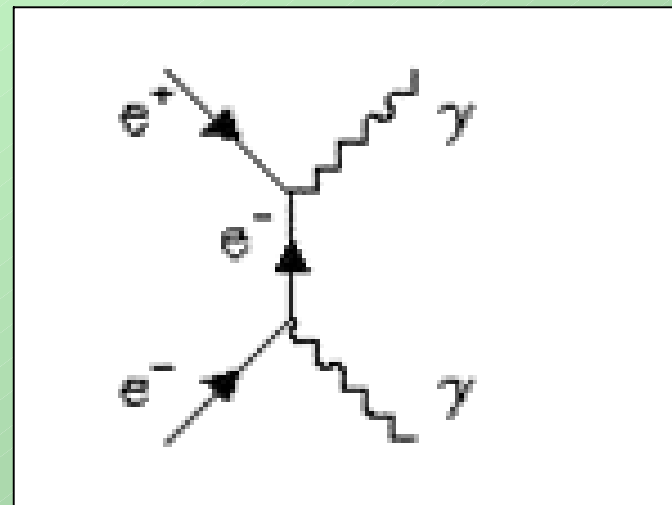
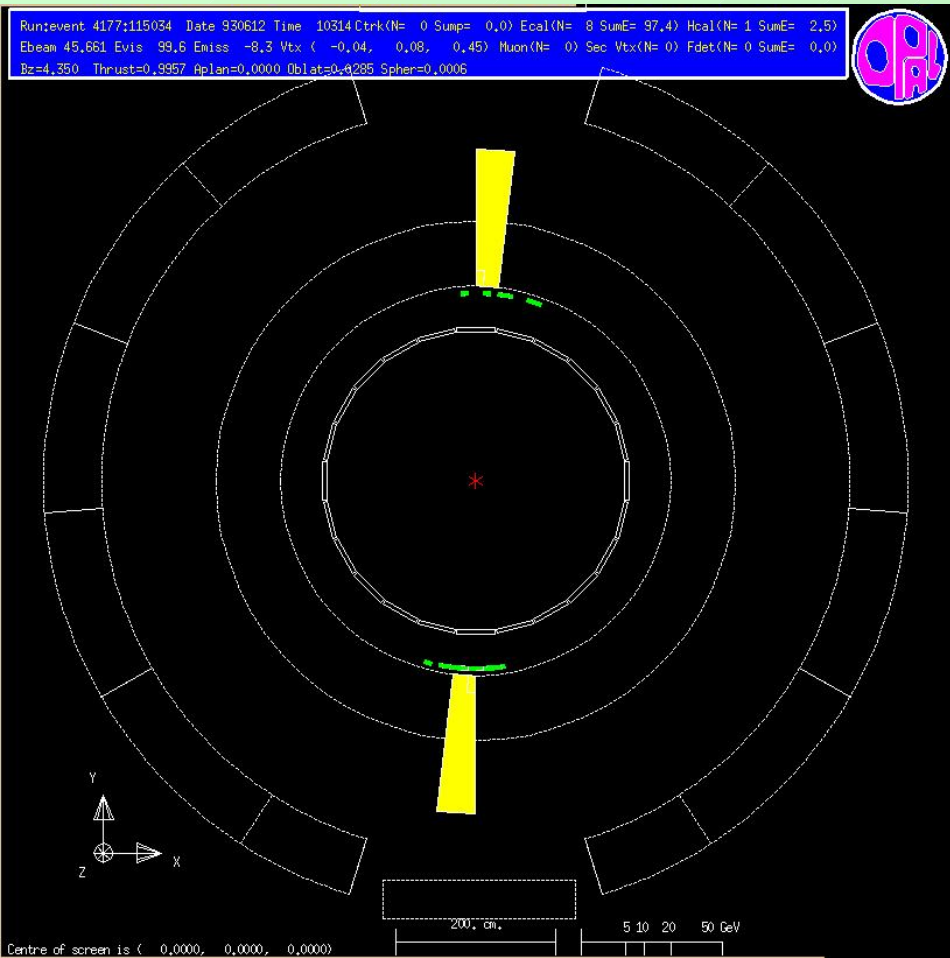
Run:vent 4093; 1150 Date 930527 Time 20751 Ctrk(N= 2 Sump= 92.4) Ecal(N= 9 SumE= 90.5) Hcal(N= 0 SumE= 0.0)
 Ebeam 45.658 Evis 94.4 Emiss -3.1 Vtx (-0.05, 0.08, 0.36) Muon(N= 0) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 1 SumE= 0.0)
 Bz=4.350 Thrust=0.9979 Aplan=0.0000 Oblat=0.4039 Spher=0.0001



A detector cross-section, showing particle paths

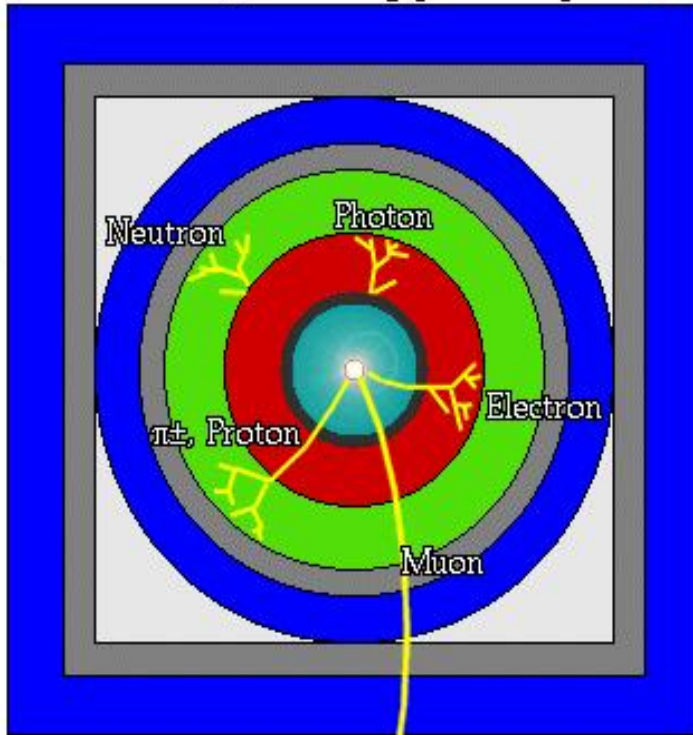
- Beam Pipe (center)
- Tracking Chamber
- Magnet Coil
- E-M Calorimeter
- Hadron Calorimeter
- Magnetized Iron
- Muon Chambers



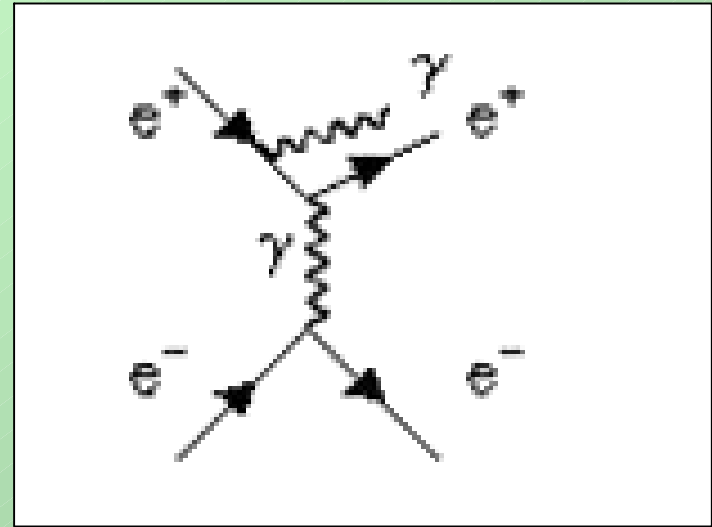


A detector cross-section, showing particle paths

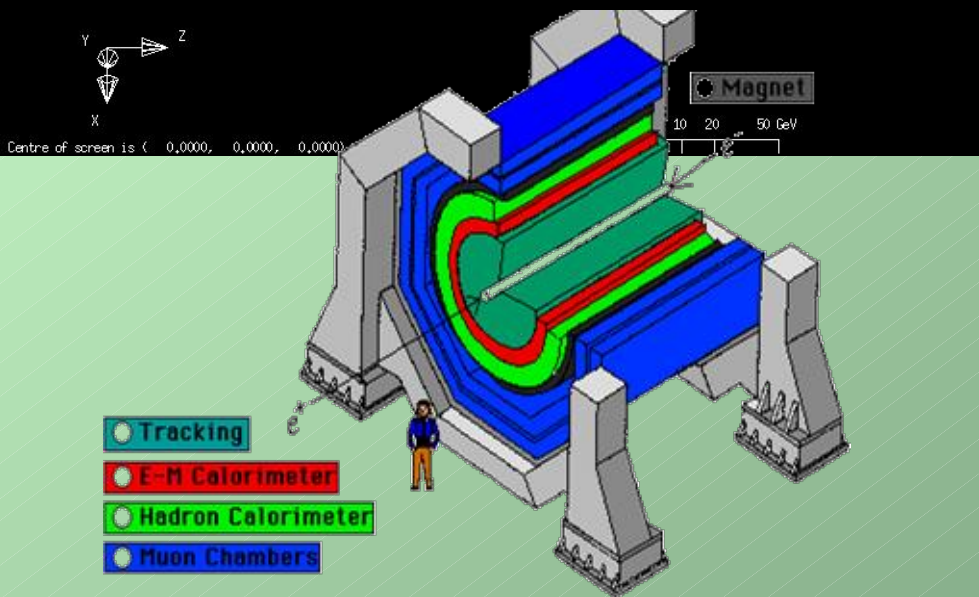
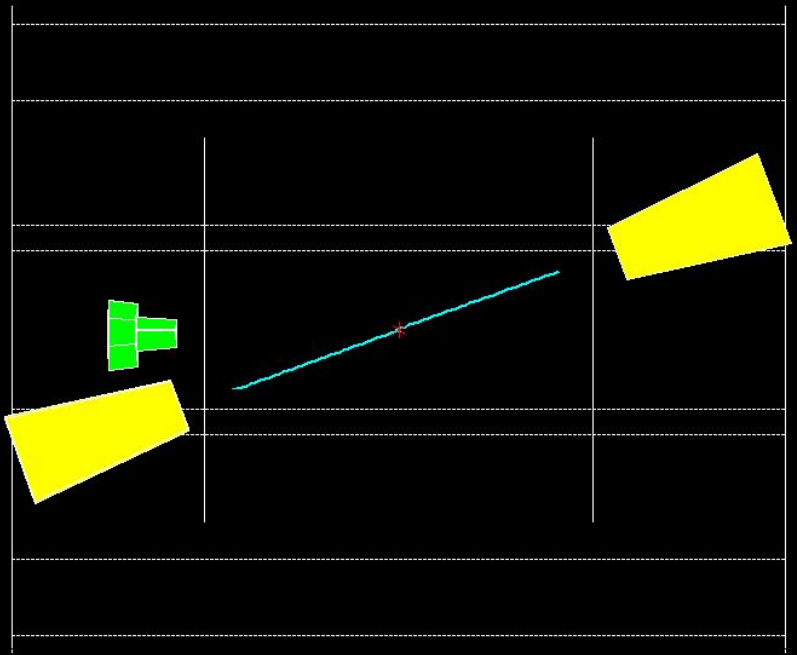
- Beam Pipe (center)
- Tracking Chamber
- Magnet Coil
- E-M Calorimeter
- Hadron Calorimeter
- Magnetized Iron
- Muon Chambers



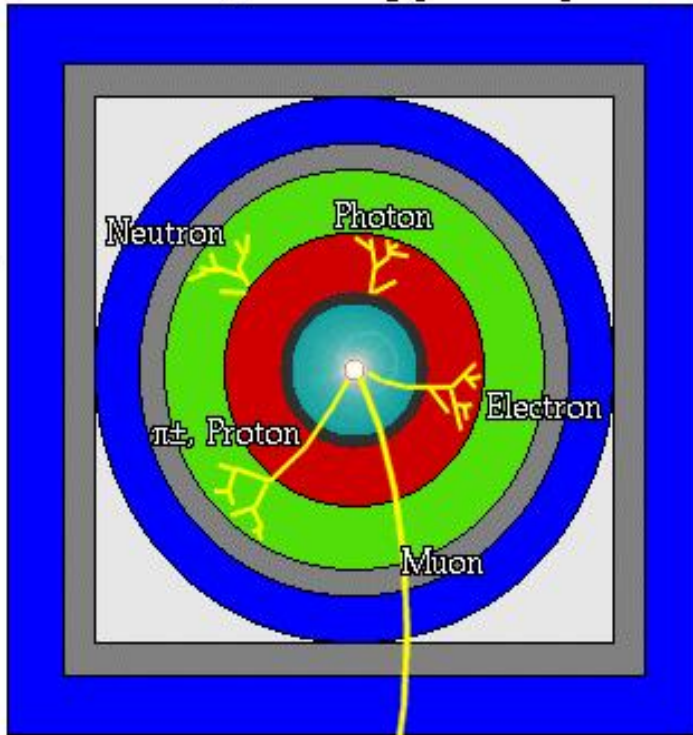
Run: event 4093; 2238 Date 930527 Time 21457 Ctrk(N= 3 Sump= 0,0) Ecal(N= 5 SumE= 94,1) Hcal(N= 0 SumE= 0,0)
 Ebeam 45,698 Evis 0,2 Emiss 91,1 Vtx (-0,05, 0,08, 0,36) Muon(N= 0) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 2 SumE= 5,5)
 Bz=4,350 Thrust=***** Aplan=***** Oblat=***** Spher=*****



A detector cross-section, showing particle paths



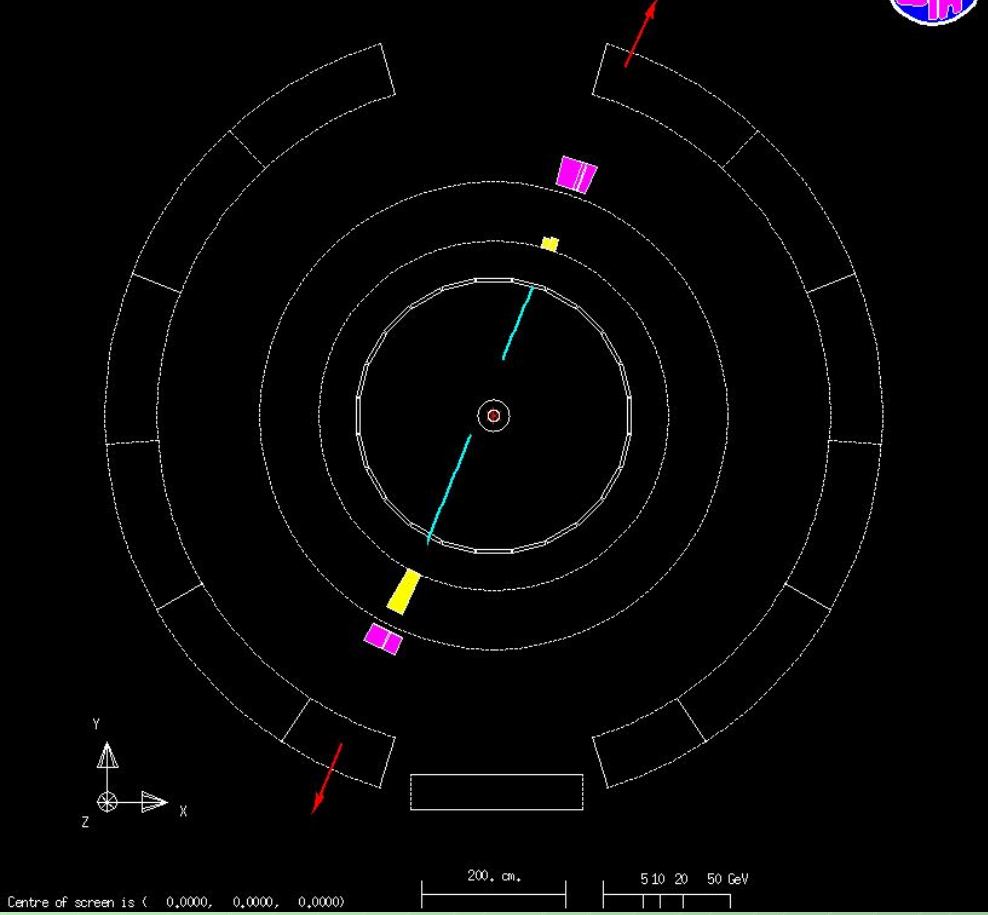
- Beam Pipe (center)
- Tracking Chamber
- Magnet Coil
- E-M Calorimeter
- Hadron Calorimeter
- Magnetized Iron
- Muon Chambers




```

Run: event 4126; 6435 Date 930602 Time 123109 Ctrk(N= 14 Sump= 0,0) Ecal(N= 8 SumE= 7,2) Hcal(N= 5 SumE= 3,7)
Ebeam 45,535 Evis 3,9 Emiss 87,2 Vtx ( -0,04, 0,00, 0,29) Muon(N= 3) Sec Vtx(N= 0) Fdet(N= 0 SumE= 0,0)
Bz=4,350 Thrust=0,9807 Aplan=0,0035 Oblat=0,0391 Spher=0,0096

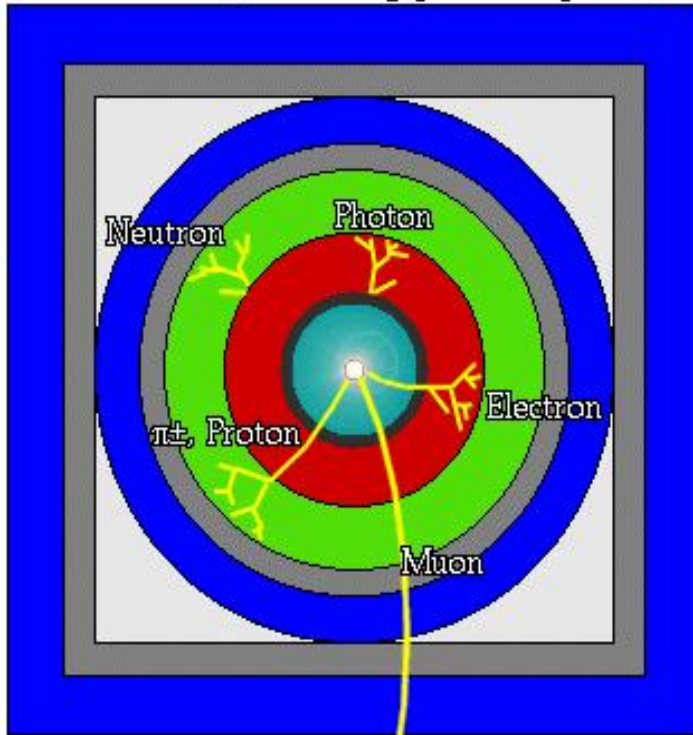
```

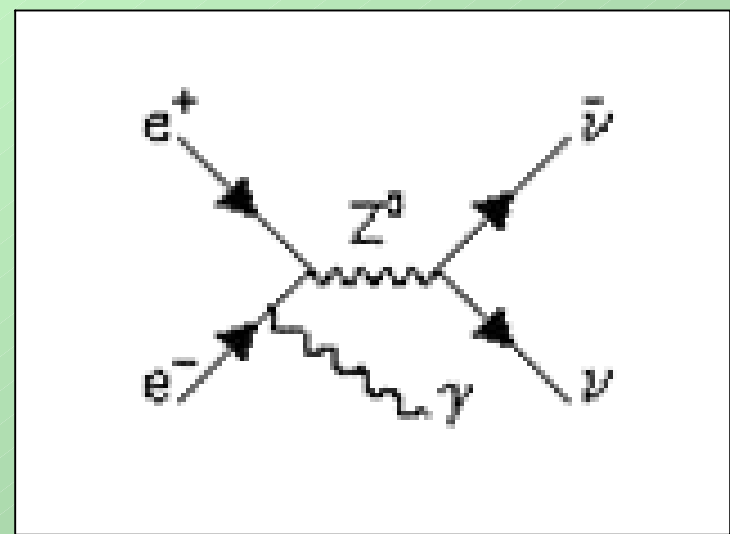
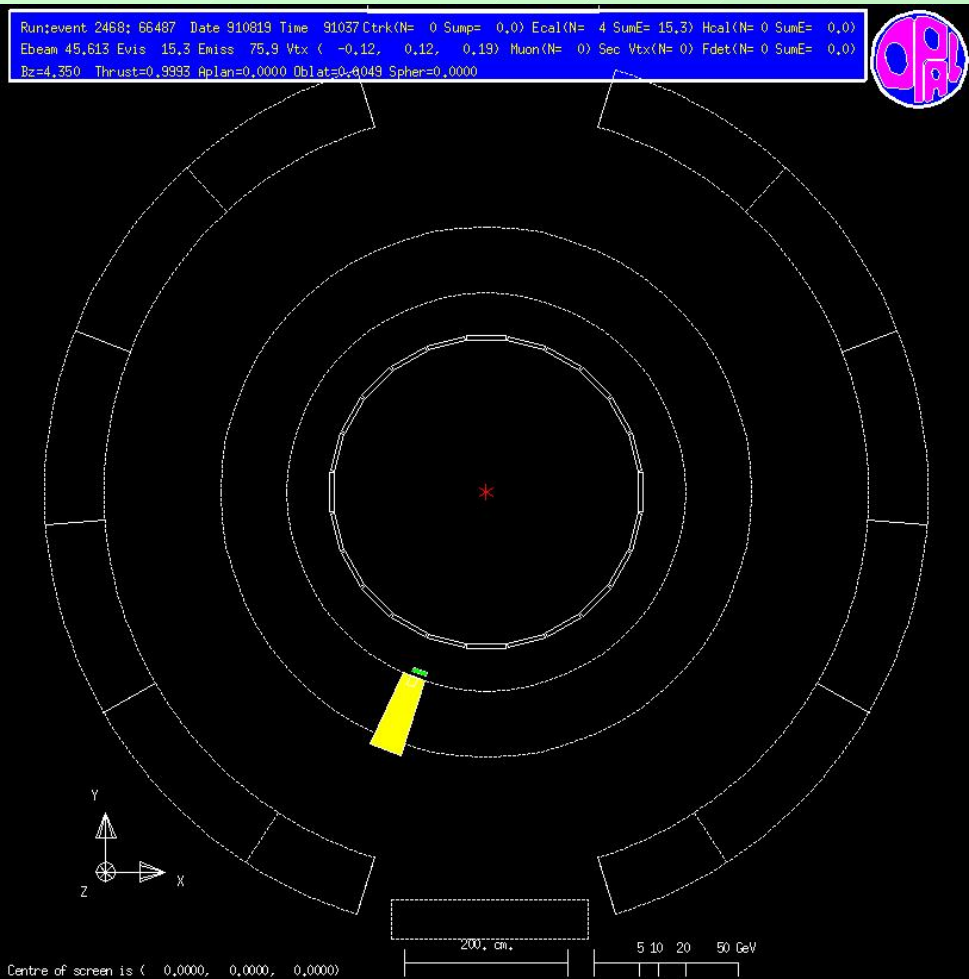


Raggio cosmico ! (muone)

A detector cross-section, showing particle paths

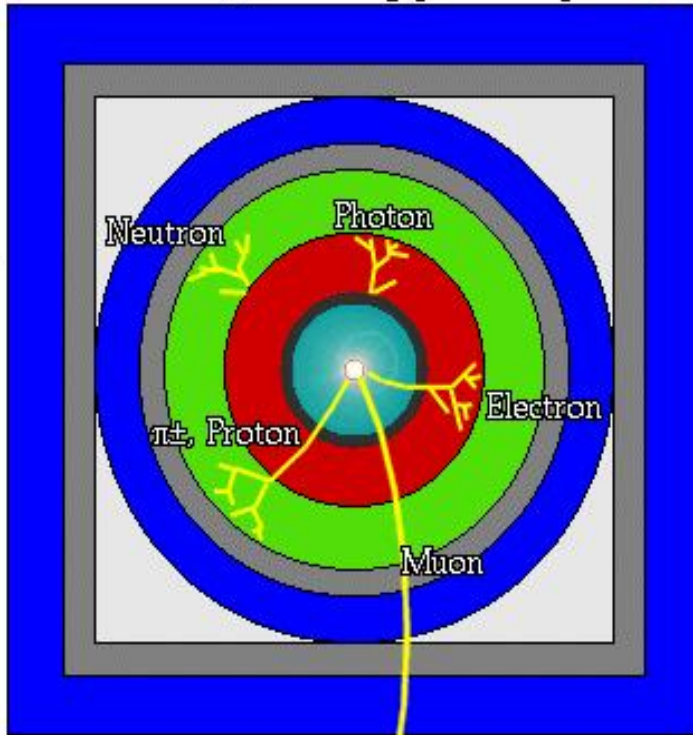
- Beam Pipe (center)
- Tracking Chamber
- Magnet Coil
- E-M Calorimeter
- Hadron Calorimeter
- Magnetized Iron
- Muon Chambers



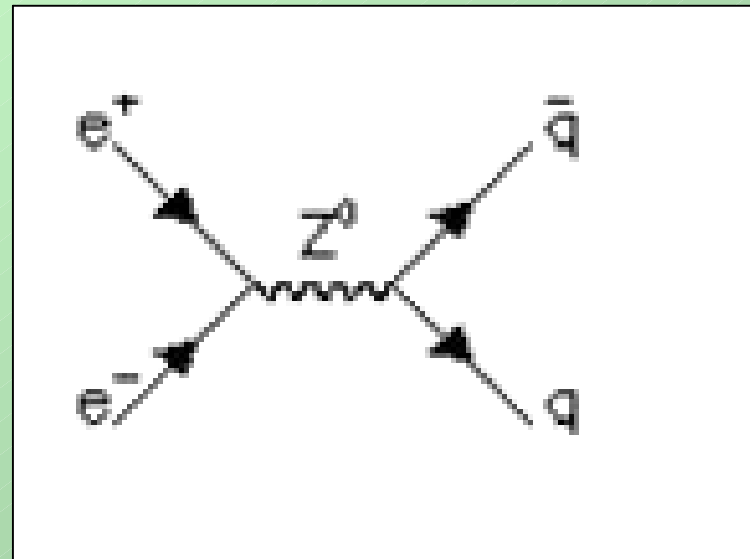
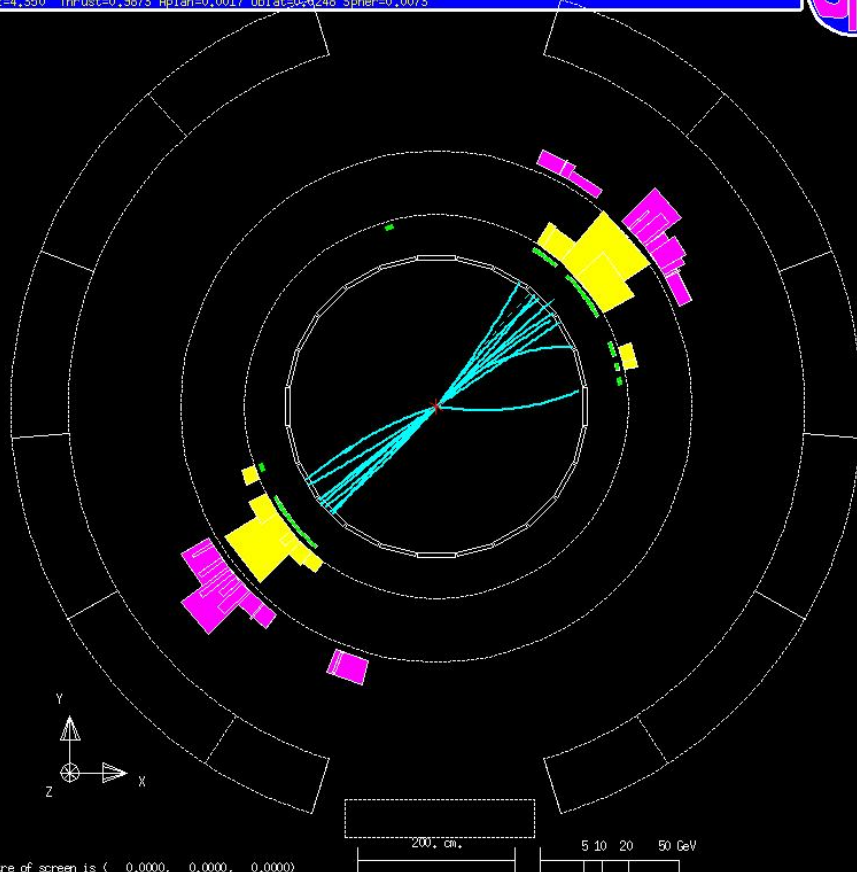


A detector cross-section, showing particle paths

- Beam Pipe (center)
- Tracking Chamber
- Magnet Coil
- E-M Calorimeter
- Hadron Calorimeter
- Magnetized Iron
- Muon Chambers

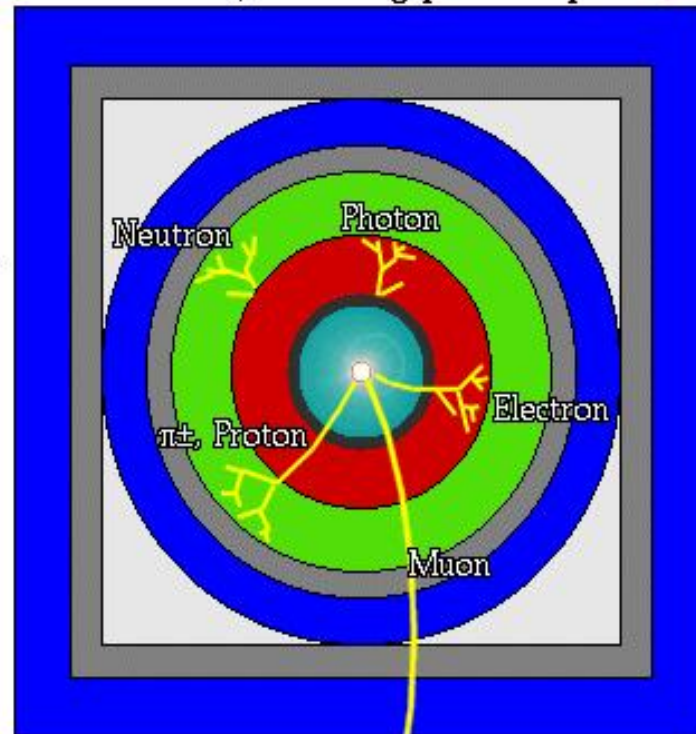


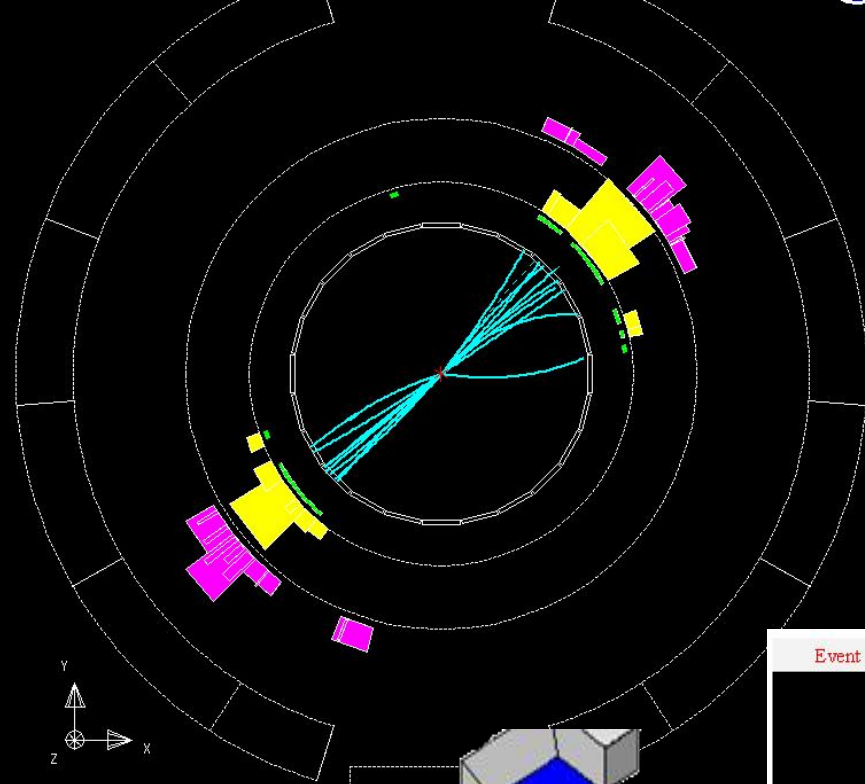
Run: 4093; 1000 Date: 930527 Time: 20716 Ctrk(N= 39 Sump= 73.3) Ecal(N= 25 SumE= 32.6) Hcal(N=22 SumE= 22.6)
 Ebeam 45.658 Evis 99.9 Emiss -8.6 Vtx (-0.07, 0.06, -0.80) Muon(N= 0) Sec Vtx(N= 3) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)
 Bz=4.350 Thrust=0.9873 Aplan=0.0017 Oblat=0.0248 Spher=0.0073



A detector cross-section, showing particle paths

- Beam Pipe (center)
- Tracking Chamber
- Magnet Coil
- E-M Calorimeter
- Hadron Calorimeter
- Magnetized Iron
- Muon Chambers

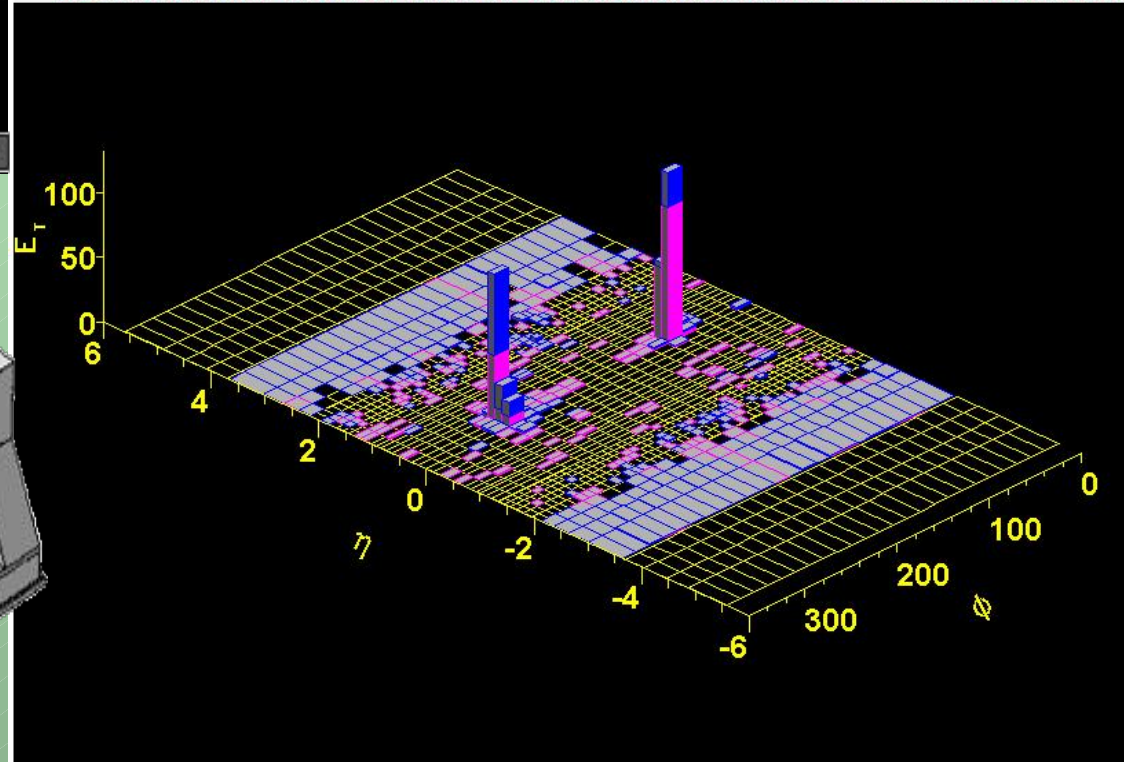
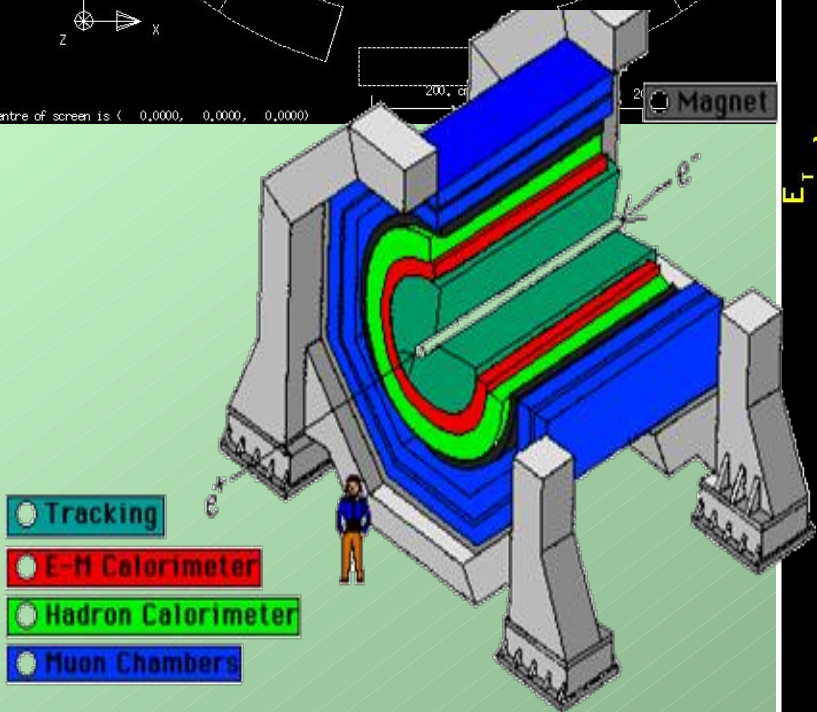




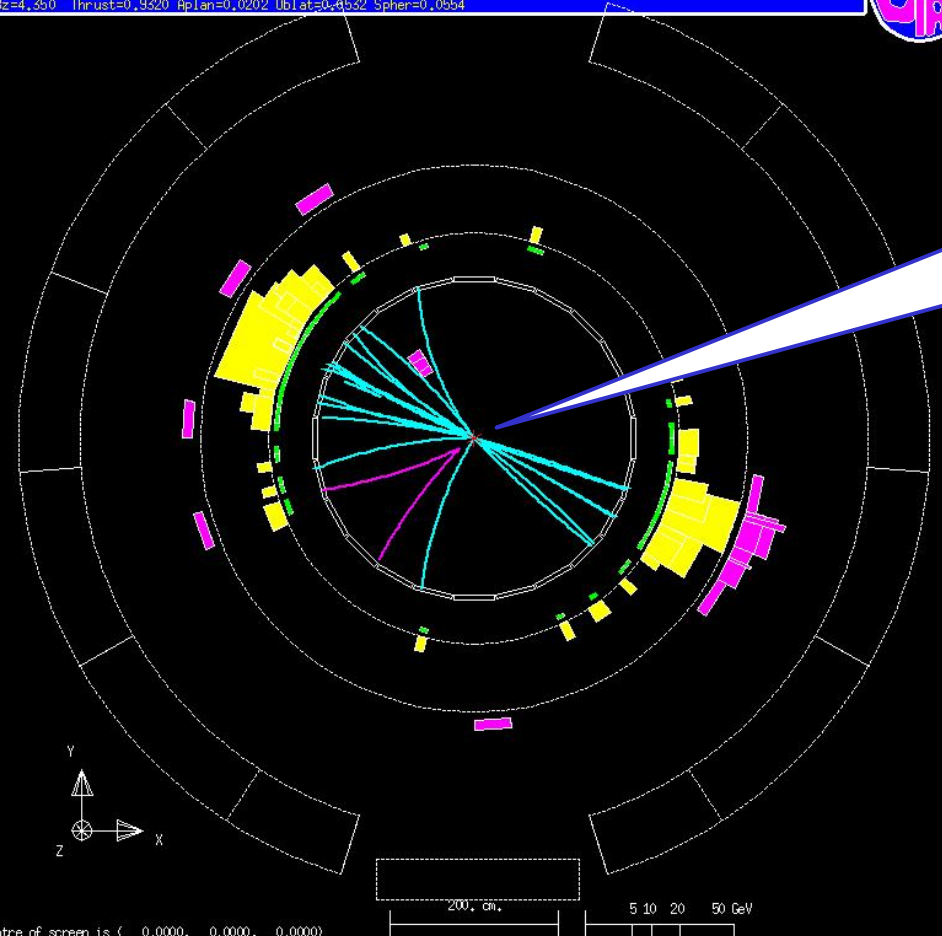
Misura dell'energia dei jet con i calorimetri (lego plot)



Event : 7973 Run : 102837 EventType : 0 TRIG: Unpr. - Fired bits: 1,41,14,15,21,22,23,24,26,30, Pr. - Fired bits: 22, Myron mode 0



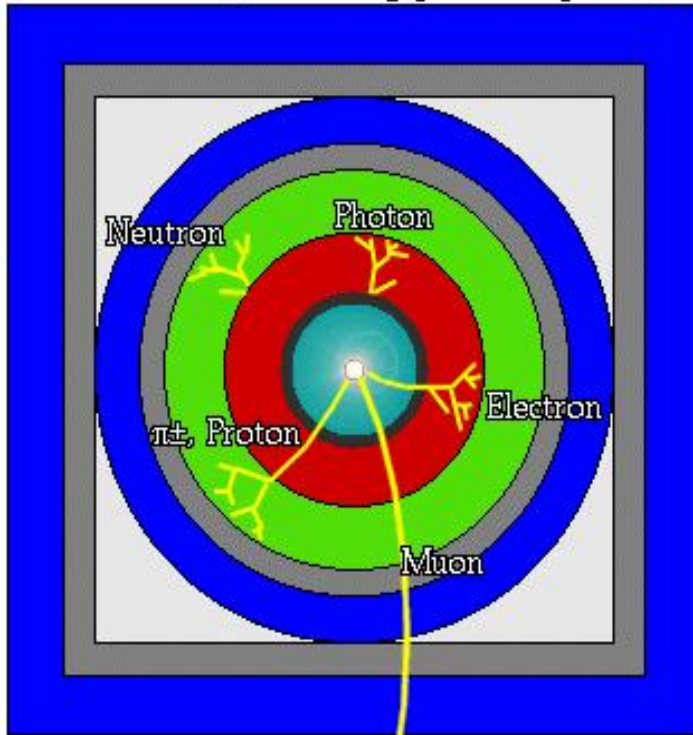
Run: event 2419; 67143 Date 910723 Time 112832 Ctrk(N= 26 Sump= 47.4) Ecal(N= 50 SumE= 73.1) Hcal(N=13 SumE= 7.6)
 Ebeam 45.623 Evis 89.3 Emiss 2.0 Vtx (-0.10, -0.16, -0.10) Muon(N= 0) Sec Vtx(N= 3) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)
 Bz=4.350 Thrust=0.9320 Aplan=0.0202 Oblat=0.4532 Spher=0.0554



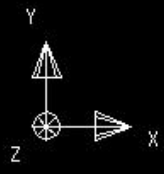
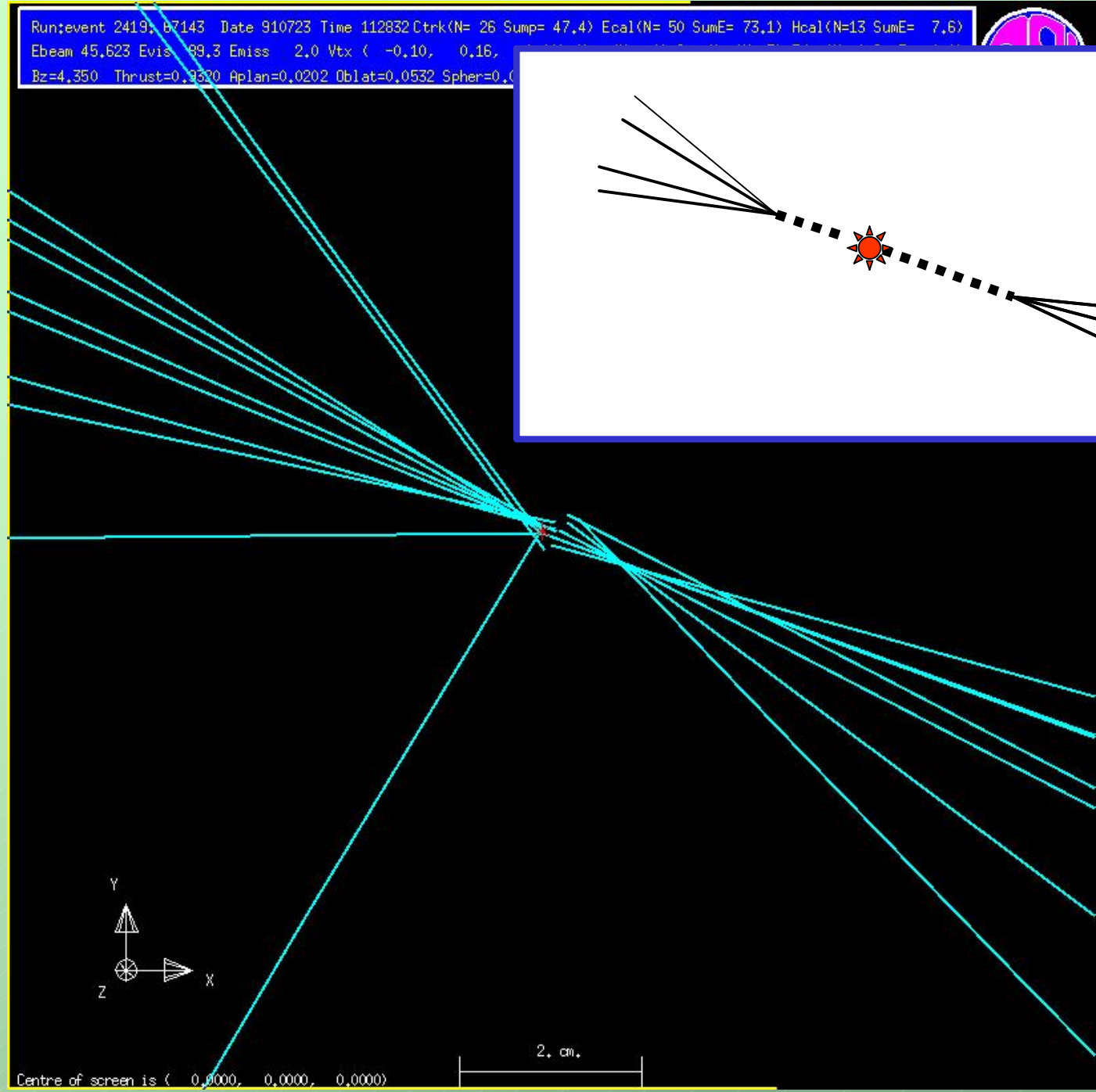
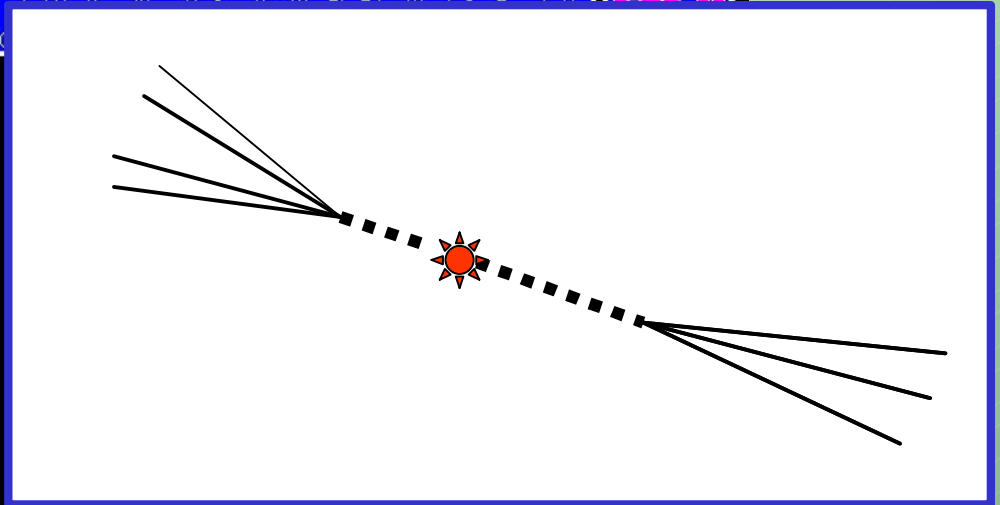
Ingrandiamo la
 zona attorno al
 vertice di
 interazione

A detector cross-section, showing particle paths

- Beam Pipe (center)
- Tracking Chamber
- Magnet Coil
- E-M Calorimeter
- Hadron Calorimeter
- Magnetized Iron
- Muon Chambers



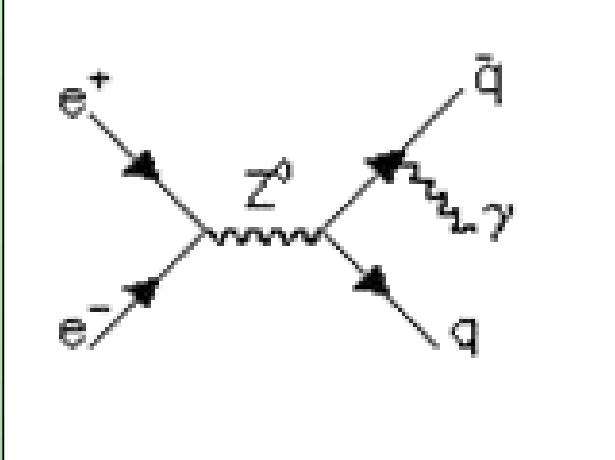
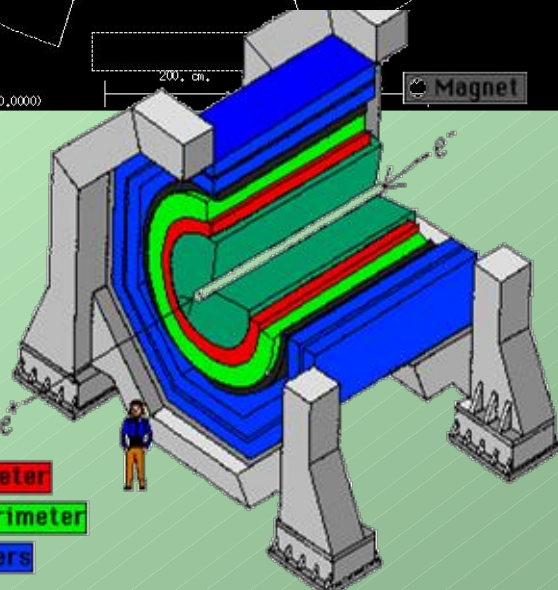
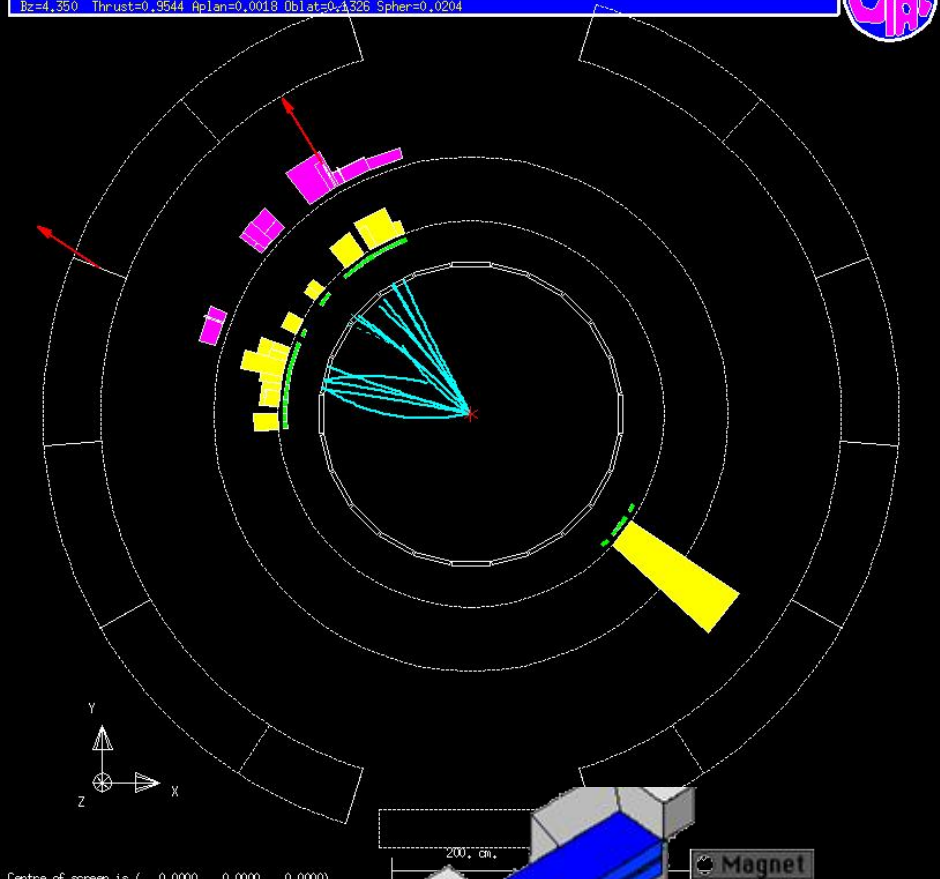
Run: event 2419, 07143 Date 910723 Time 112832 Ctrk(N= 26 Sump= 47.4) Ecal(N= 50 SumE= 73.1) Hcal(N=13 SumE= 7.6)
Ebeam 45.623 Evis 99.3 Emiss 2.0 Vtx (-0.10, 0.16,
Bz=4.350 Thrust=0.9320 Aplan=0.0202 Oblat=0.0532 Spher=0.0



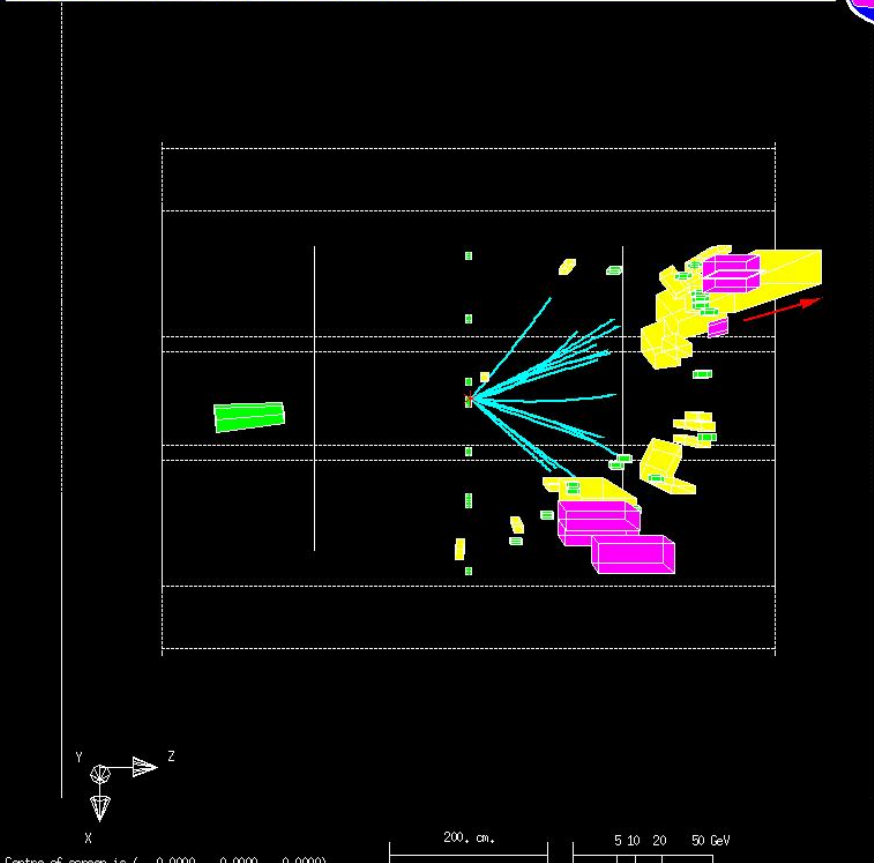
2. cm.

Centre of screen is (0.0000, 0.0000, 0.0000)

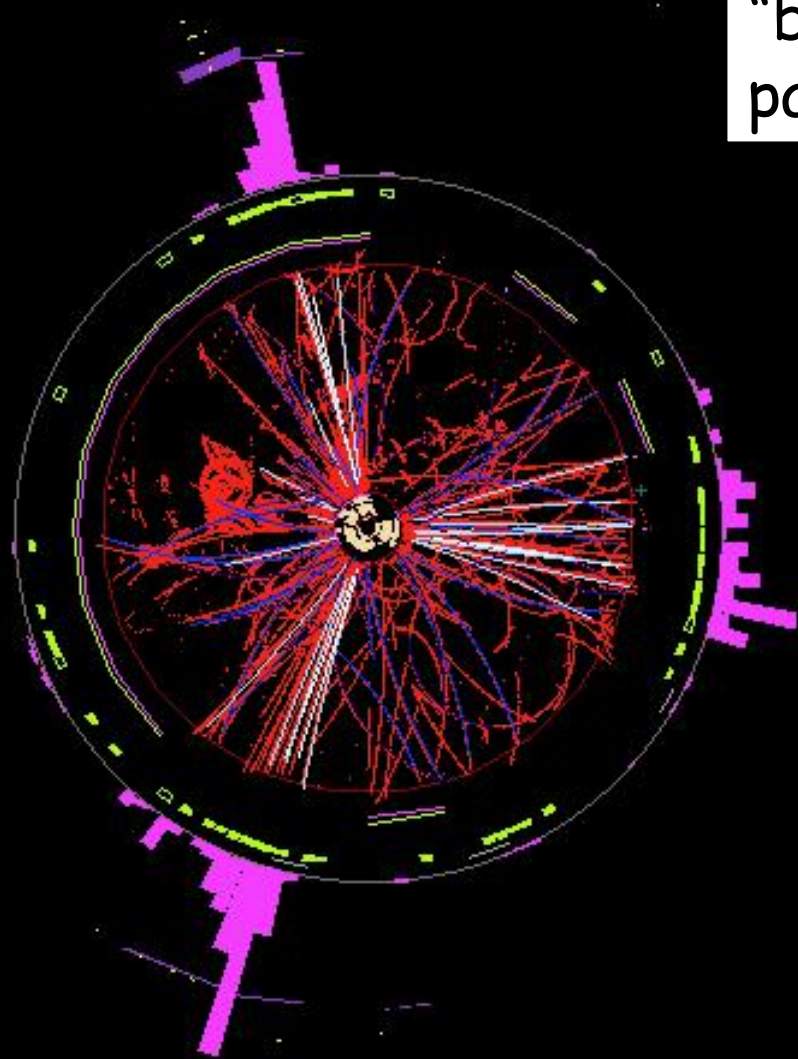
Runzevent 4055: 17355 Date 930619 Time 43933 Ctrk(N= 17 Sump= 34,2) Ecal(N= 20 SumE= 65,8) Hcal(N=11 SumE= 7,7)
 Ebeam 45,699 Evis 96,8 Emiss -5,5 Vtx (-0,03, 0,09, -0,56) Muon(N= 2) Sec Vtx(N= 1) Fdet(N= 0 SumE= 0,0)
 Bz=4,350 Thrust=0,9544 Aplan=0,0018 Oblat=0,4326 Spher=0,0204



Runzevent 4063: 5700 Date 930621 Time 14704 Ctrk(N= 16 Sump= 40,5) Ecal(N= 26 SumE= 41,7) Hcal(N= 7 SumE= 3,5)
 Ebeam 45,699 Evis 65,2 Emiss 26,1 Vtx (-0,02, 0,07, 2,81) Muon(N= 1) Sec Vtx(N= 1) Fdet(N= 1 SumE= 47,7)
 Bz=4,350 Thrust=0,7049 Aplan=0,0097 Oblat=0,5528 Spher=0,4127



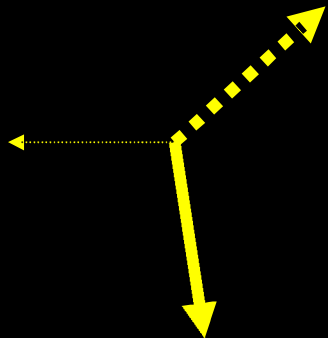
In generale le tracce
"buone" sono una piccola
parte dei segnali raccolti



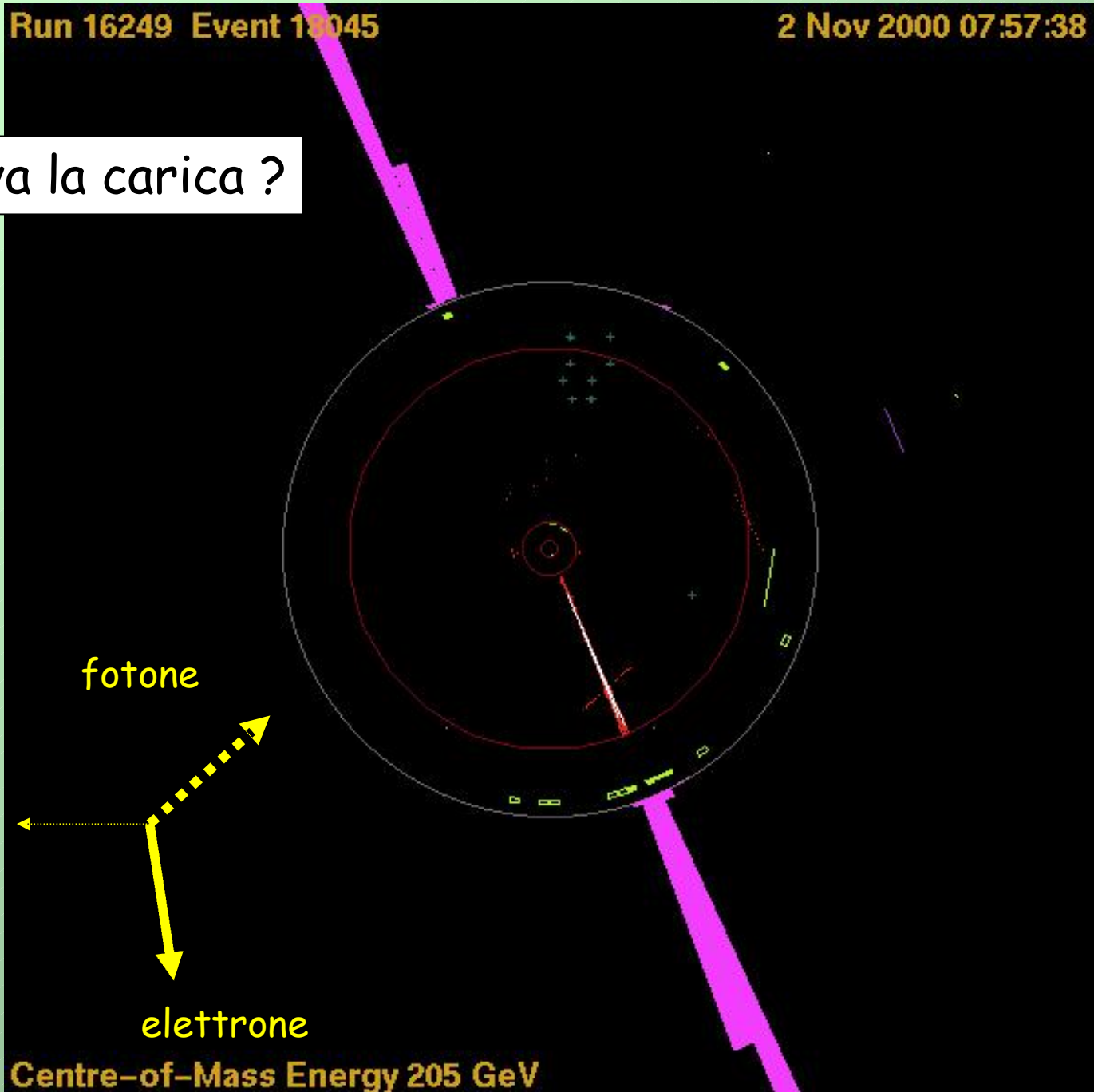
Non si conserva la carica ?

Elettrone in avanti,
non visto dal
rivelatore

fotone



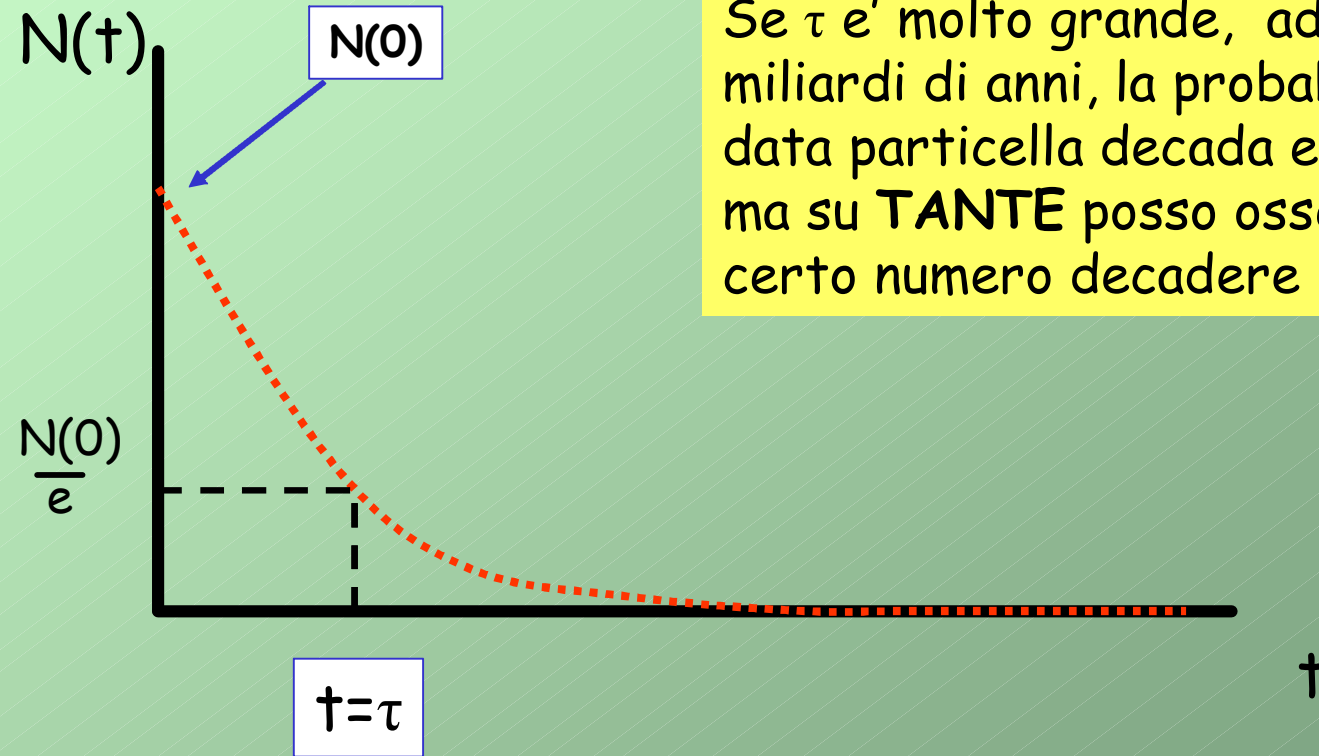
elettrone



Ricerca di fenomeni rari: il decadimento del protone

Legge del decadimento: $N(t) = N(0) e^{-t/\tau}$

Date $N(0)$ particelle con vita media τ al tempo $t=0$,
al tempo t ne sopravvivono $N(t)$



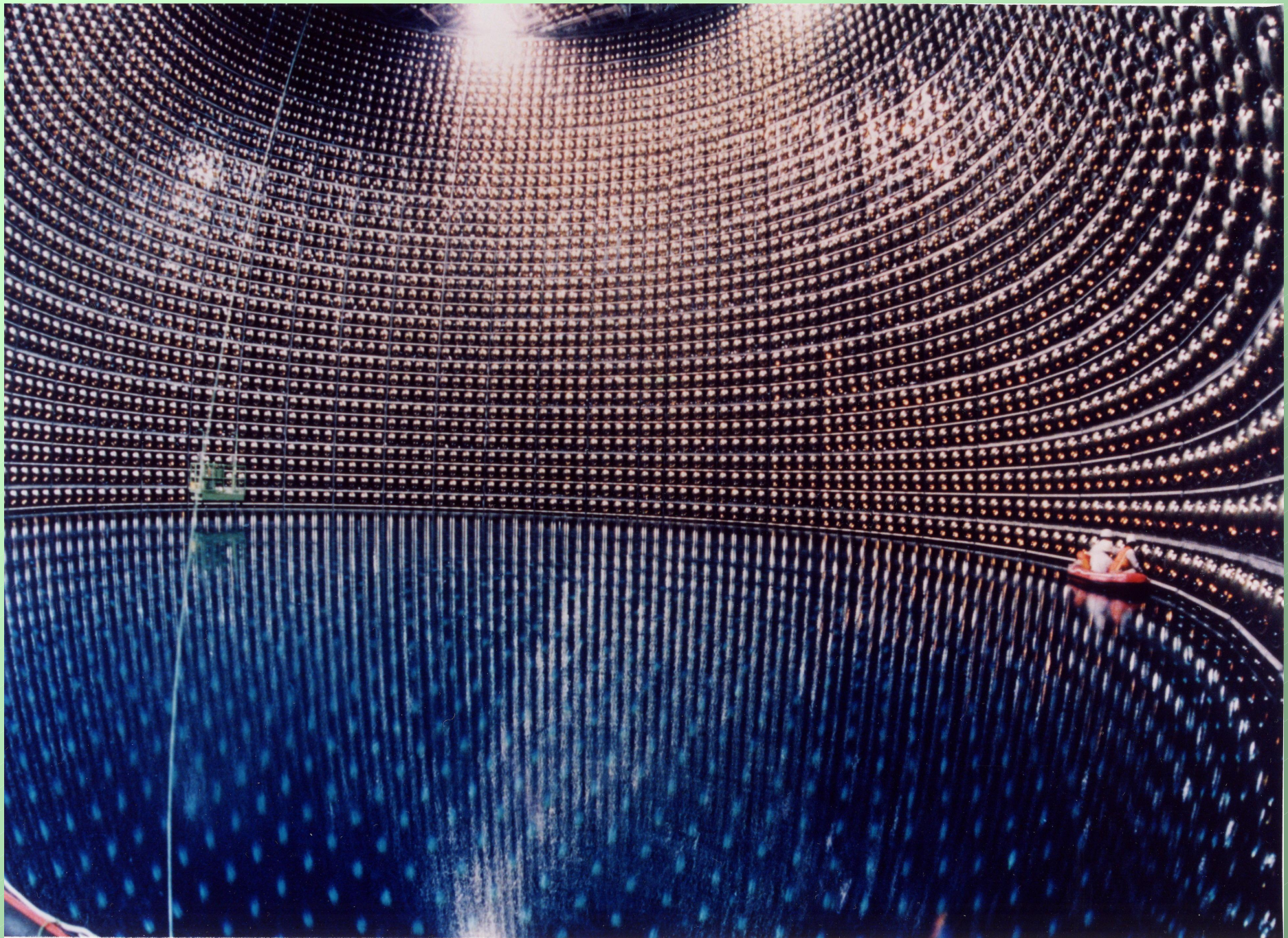
Se τ e' molto grande, ad esempio miliardi di anni, la probabilita' che **UNA** data particella decada e' piccolissima, ma su **TANTE** posso osservarne un certo numero decadere

Nel caso del protone, $\tau > 10^{33}$ anni
(molto maggiore dell'età dell'universo, che è di
circa 1.5×10^{10} anni)

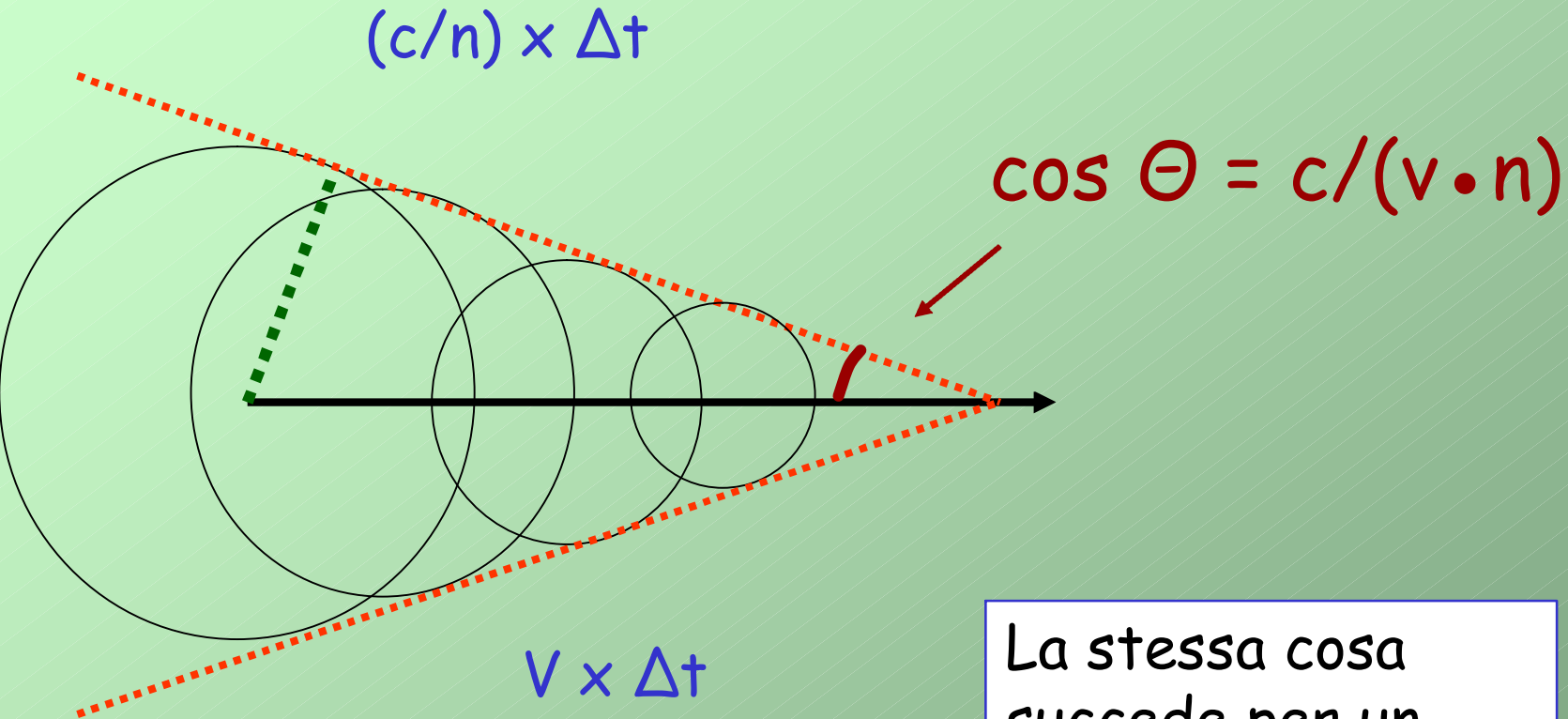
Quindi per poter osservare dell'ordine di 1 decadimento
all'anno, (nel caso fosse $\tau = 10^{33}$ anni)
è necessario avere $N(0) \sim 10^{33}$ protoni, che corrispondono a
1.7 milioni di Kg, ovvero una piscina cubica di acqua
di più di 100 metri di lato !

In pratica esiste una limitazione tecnica per la misura
di vite medie così grandi, ed è possibile solo mettere
un limite inferiore alla vita media

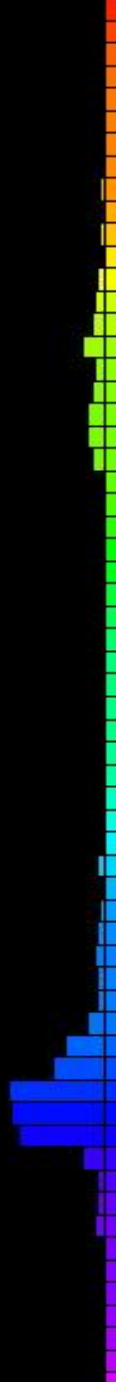
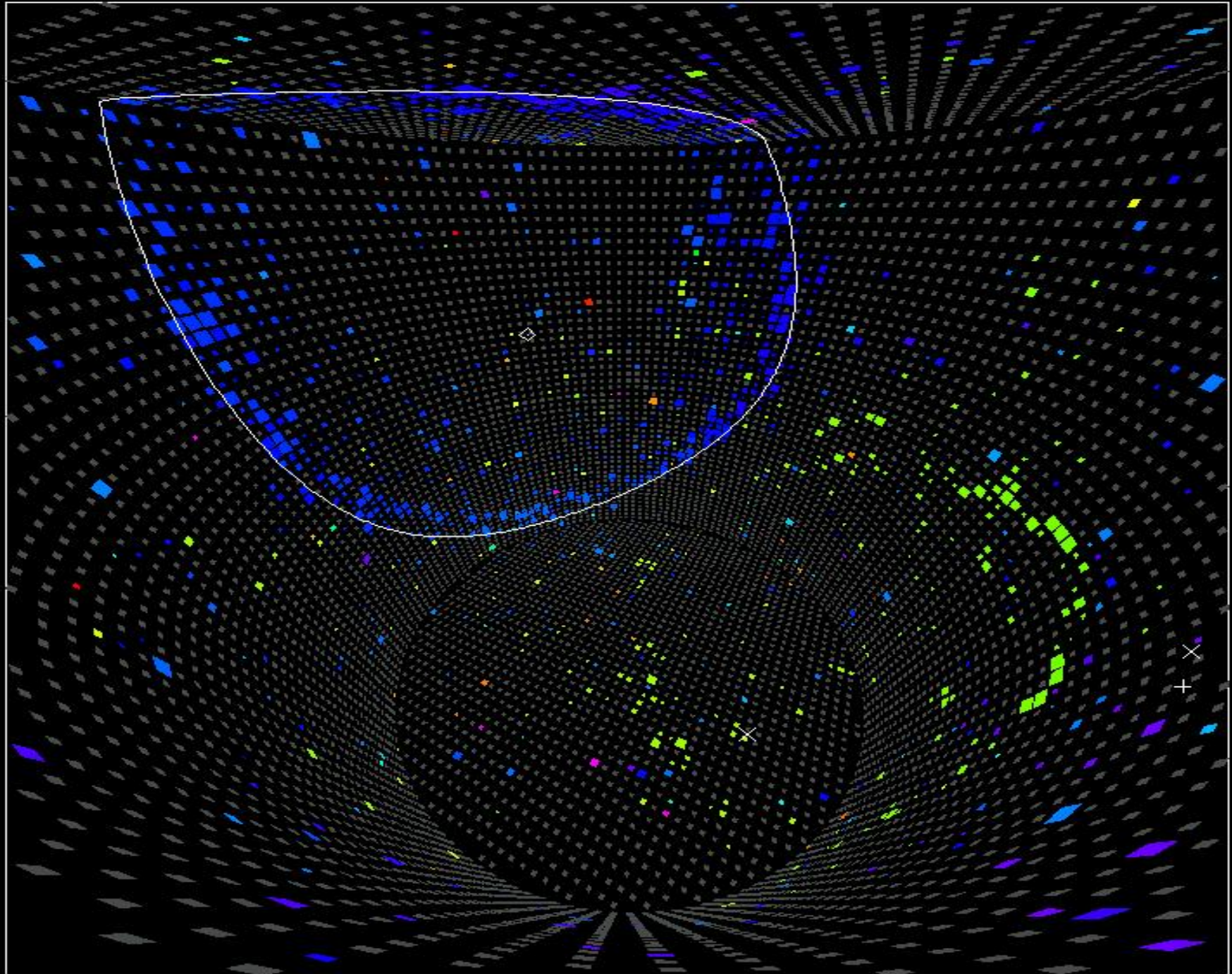
Inciso: se fosse $\tau_{\text{protone}} = 10^{16}$ anni, verremmo uccisi
dalle radiazioni causate dal decadimento dei protoni nel
nostro corpo

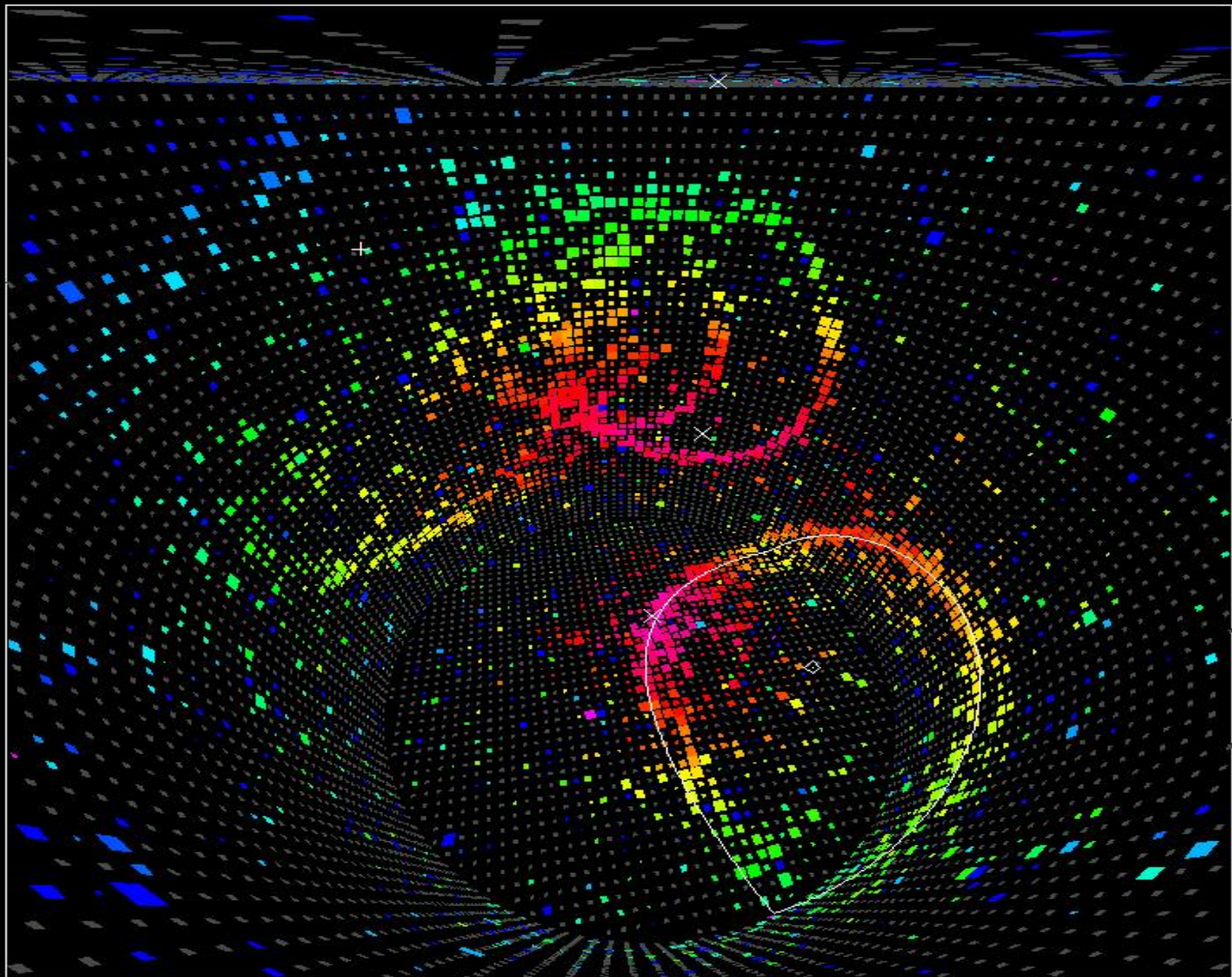


Effetto Cerenkov: particelle piu' veloci della luce



La stessa cosa succede per un aereo supersonico !



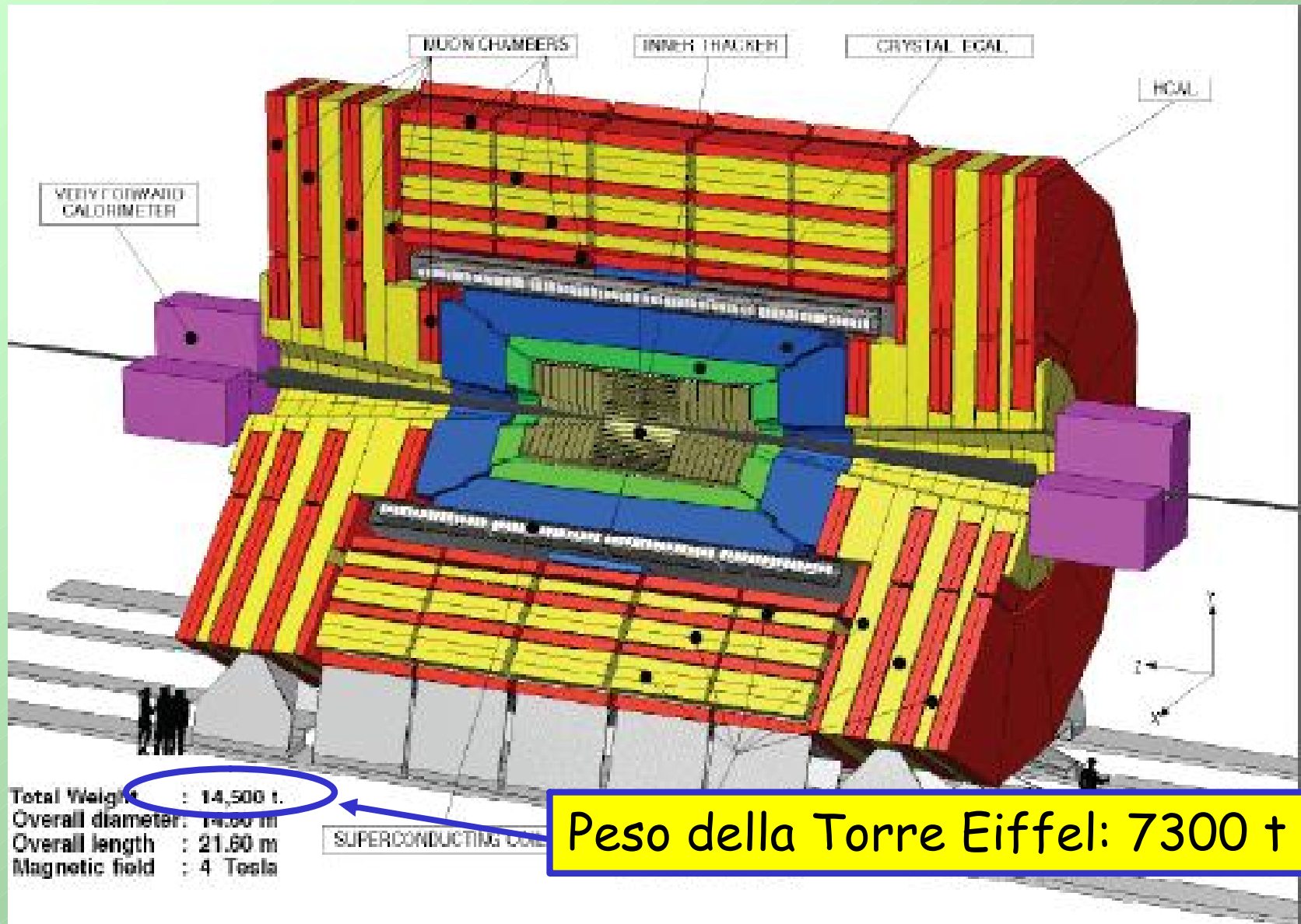




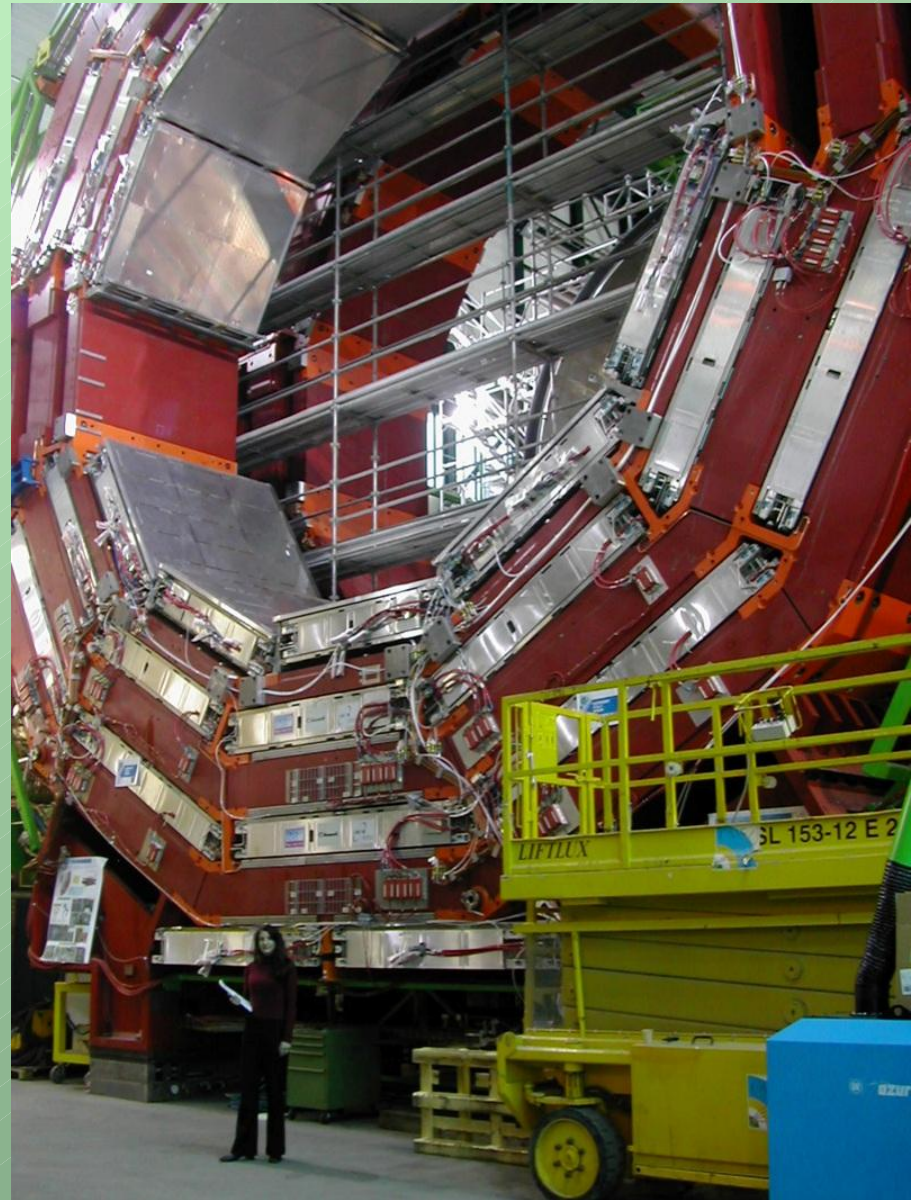
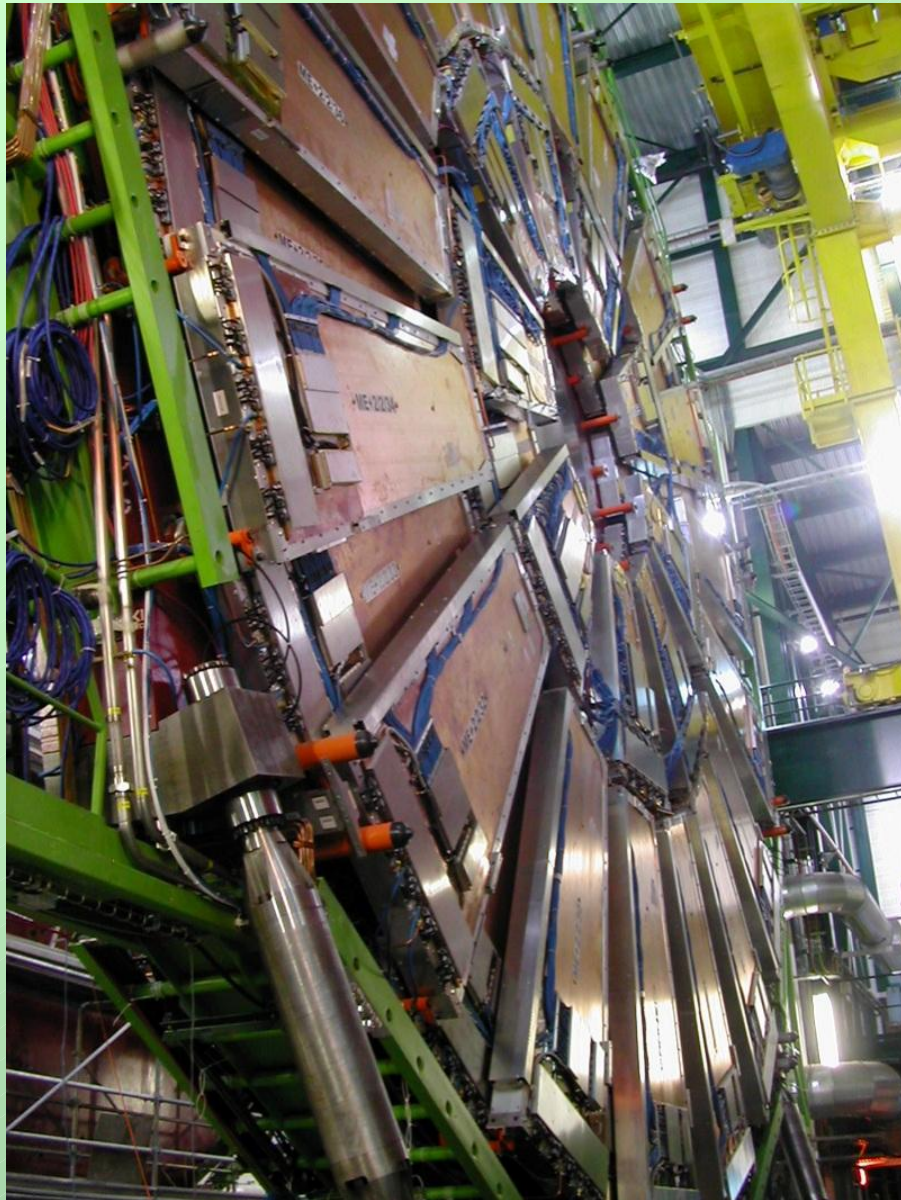
Esperimenti a LHC al CERN di Ginevra

CMS (Compact Muon Solenoid) al CERN

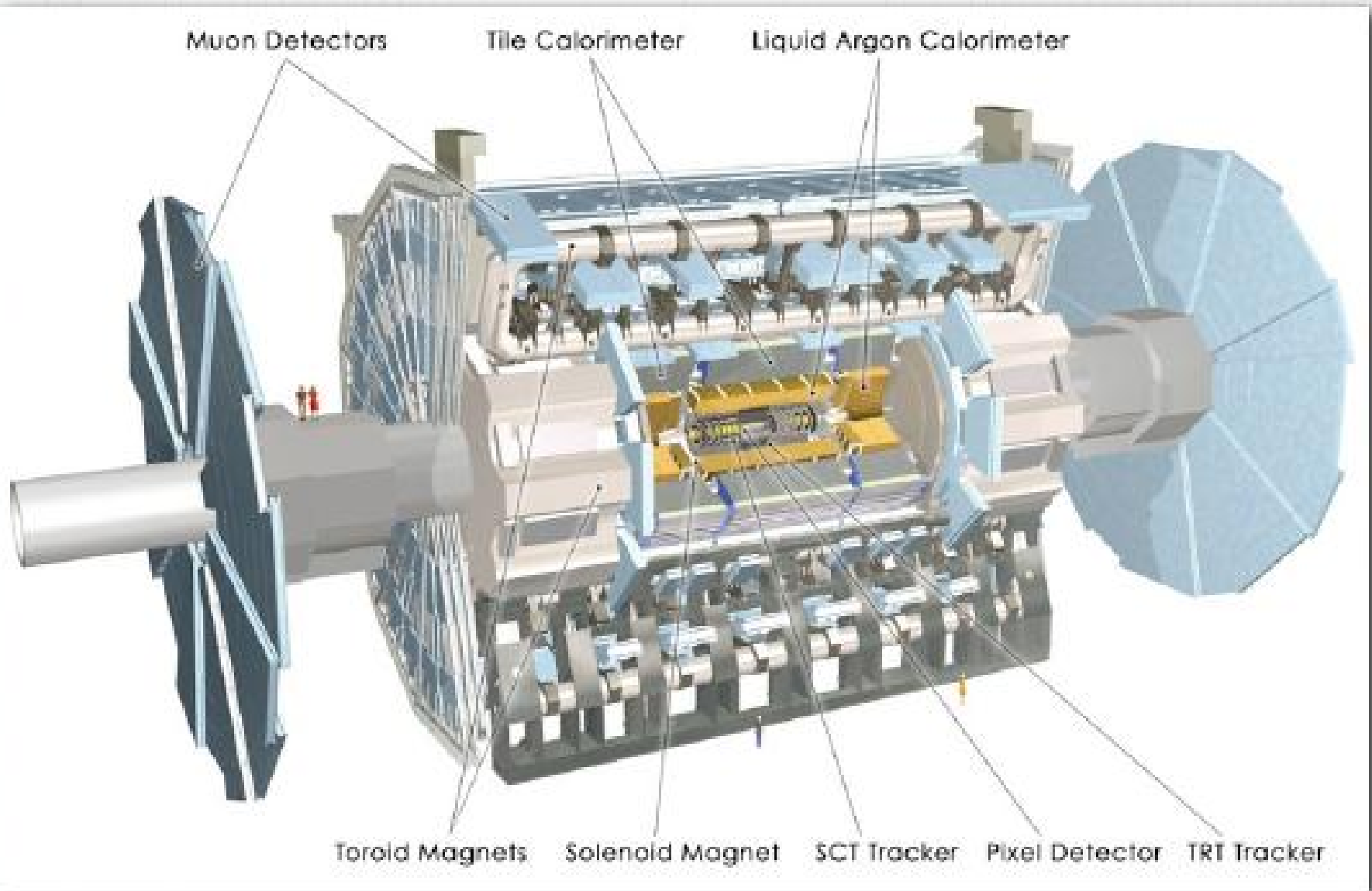
Un esperimento per LHC

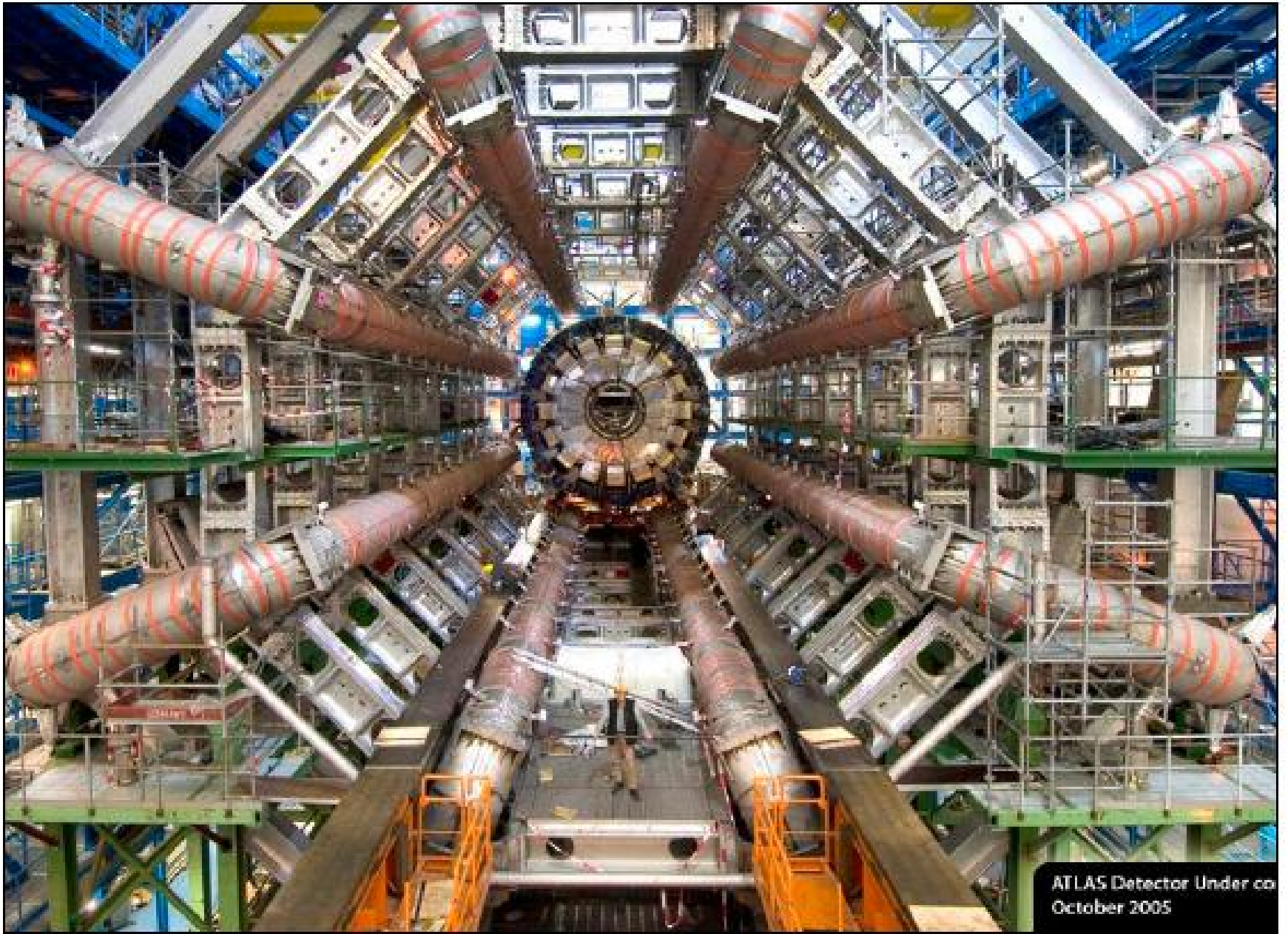


CMS (Compact Muon Solenoid)



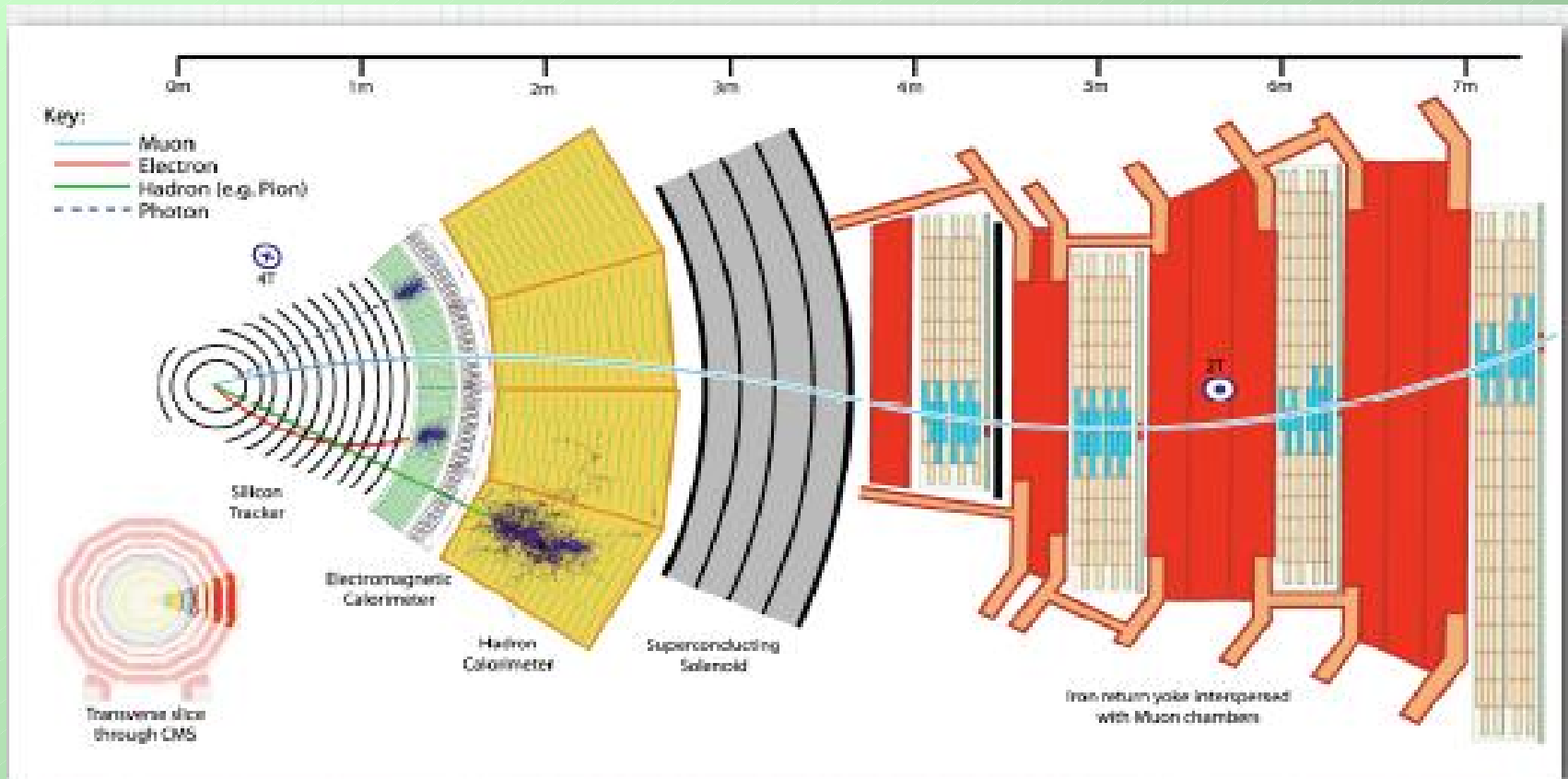
ATLAS





ATLAS Detector Under construction
October 2005

Una fetta di CMS



Alcune problematiche degli esperimenti a LHC

- I fasci si incrociano ogni 25 ns (BX = Bunch-Crossing)
- Ad ogni incrocio c'è (almeno) un evento fisico
- Non è possibile acquisire tutti gli eventi (1 Mb/evento), ma solo al massimo 100 eventi/s
- È necessario scegliere/scartare una grossa parte degli eventi già durante la presa dati, entro al massimo 3 micro secondi
- La risposta dei singoli componenti è circa 20 volte più lenta del tempo fra un BX e il successivo
- Ad ogni dato istante il rivelatore è "riempito" di segnali appartenenti a eventi diversi fra loro
- Occorre associare correttamente i segnali all'evento giusto
- Occorre processare tutti gli eventi in serie, per decidere quali accettare/scartare