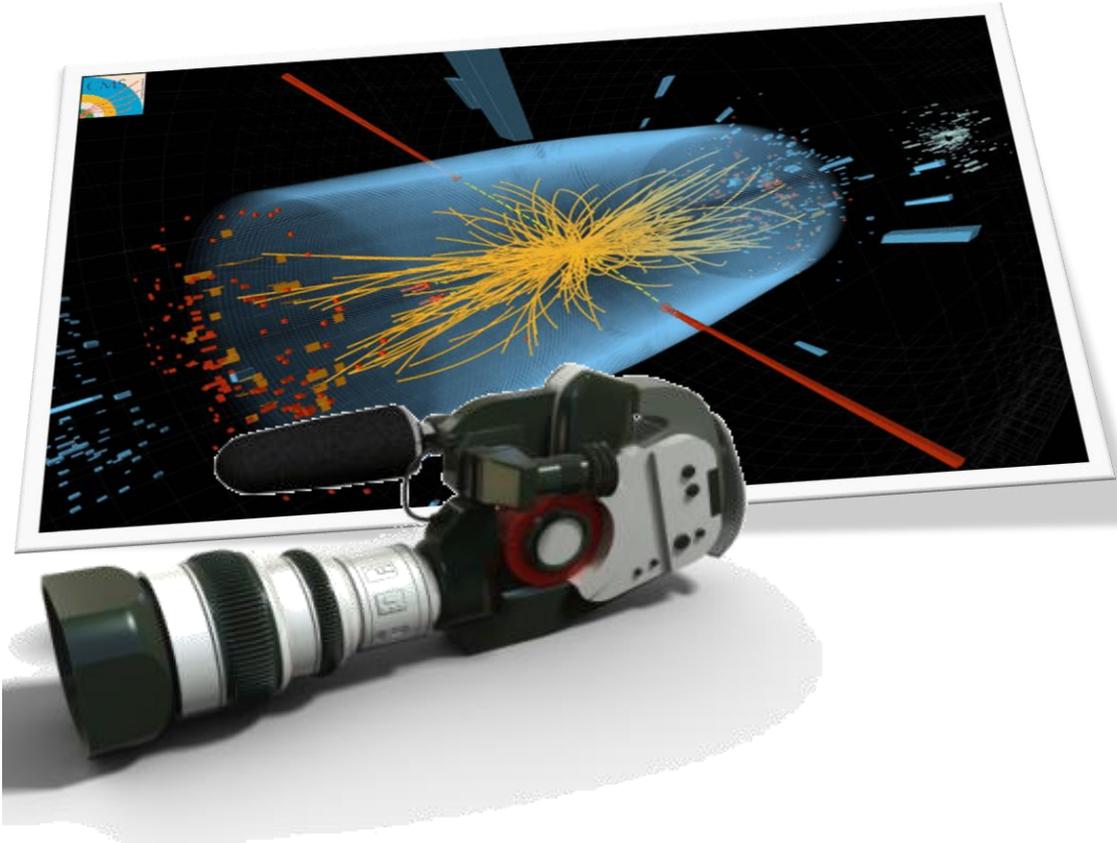


# I rivelatori



Un rivelatore ***non*** è una grossa macchina fotografica...

Sistema di **migliaia di sensori specializzati**

- Sfruttano l'interazione delle particelle con la materia per ricavare **misure indipendenti di posizione, energia, quantità di moto**
- Misure che vanno poi messe insieme per ricostruire cosa è successo

# I rivelatori

Per ricostruire cosa e' successo al momento dell'interazione tra i due protoni, dobbiamo ricostruire tutte le particelle che sono state prodotte nello stato finale.

Di queste vogliamo misurare tutto:

- massa, dunque identita' (elettroni, fotoni, muoni, tipo di adrone...)
- momento (ovvero velocita') ed energia
- traiettoria, dunque angoli e direzioni

Per far questo combiniamo le informazioni di molti rivelatori posti in successione.

Inoltre vogliamo dei rivelatori **VELOCI** perche' vogliamo analizzare eventi molto rari (e quindi registrare molte interazioni)  
E rivelatori **PRECISI**, per essere piu' efficienti.

→ rapida carrellata sui rivelatori

→ i rivelatori a LHC

# Come si "vedono" le particelle?

Sfruttando i meccanismi con cui interagiscono con la materia

- Esempio: le particelle cariche ionizzano la materia al loro passaggio



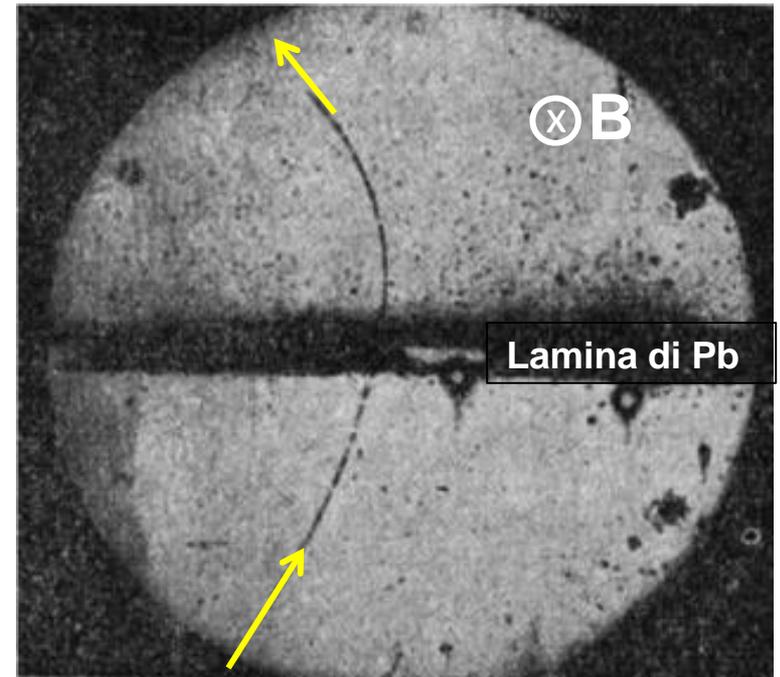
**Camera a nebbia** (Wilson, 1911; premio Nobel 1927):

Camera riempita di vapore saturo che condensa a seguito della ionizzazione, rendendo visibile la traccia

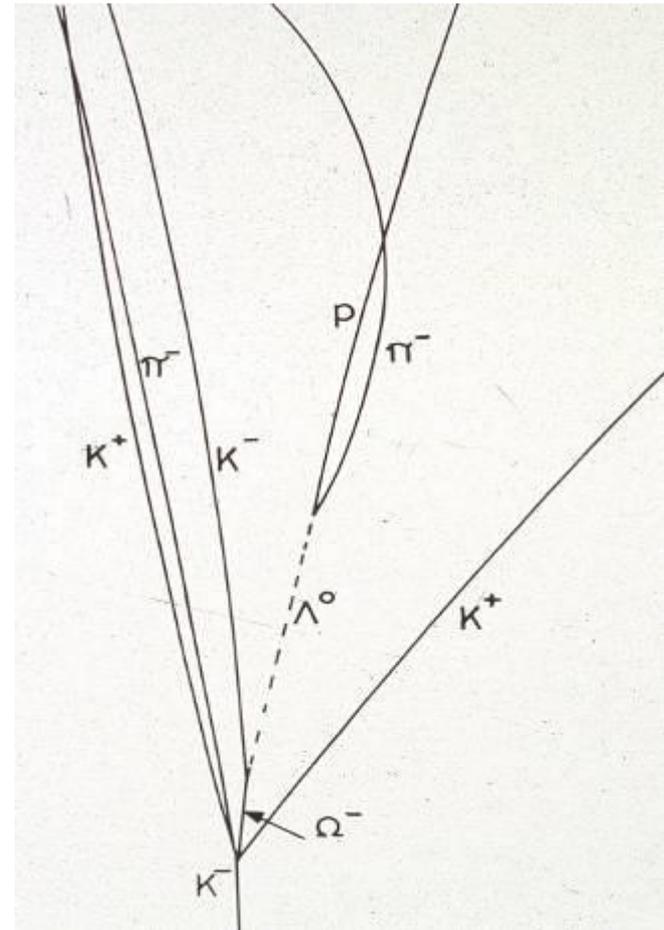
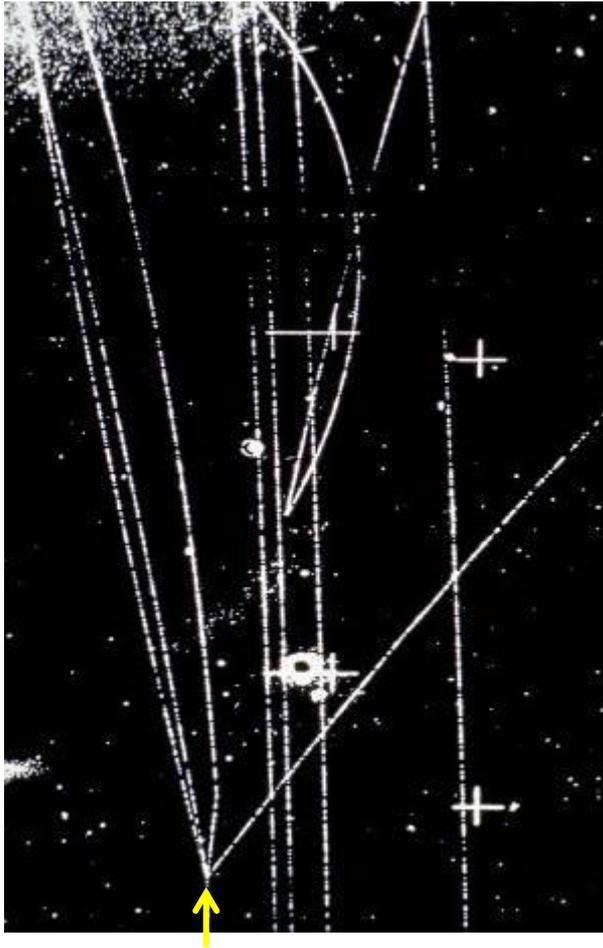
## Scoperta del positrone ( $e^+$ )

(Anderson, 1932; premio Nobel 1936):  
Osservando *raggi cosmici* attraverso una camera a nebbia immersa in un campo magnetico che ne curva la traiettoria, con una lastra di piombo per assorbire parte dell'energia

(1928 Dirac introduced the anti-matter)

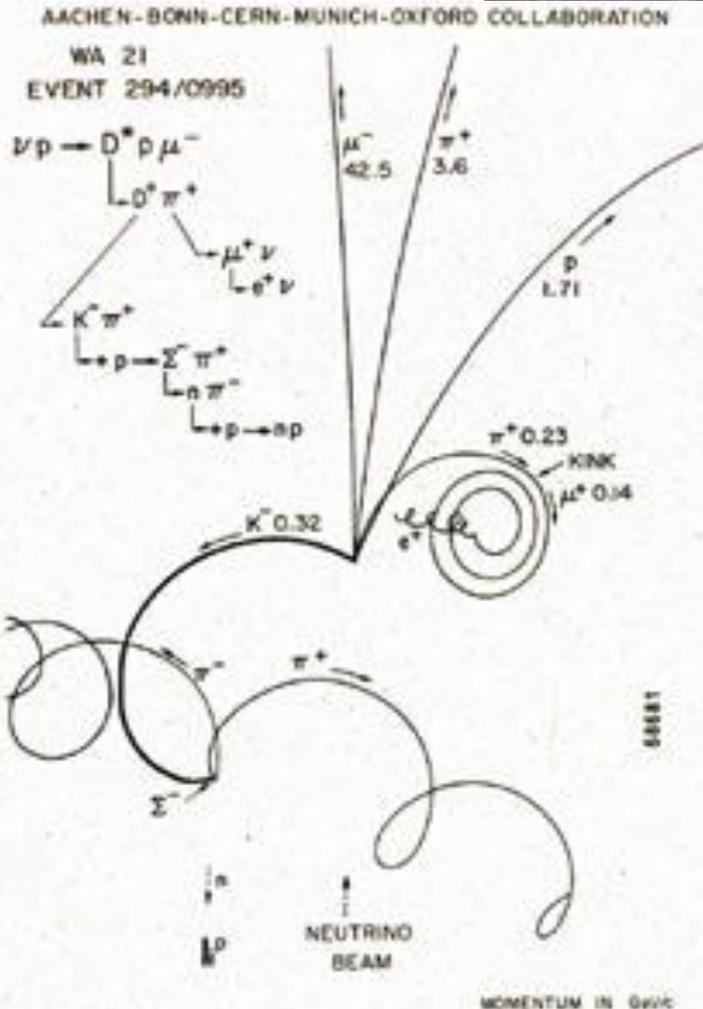
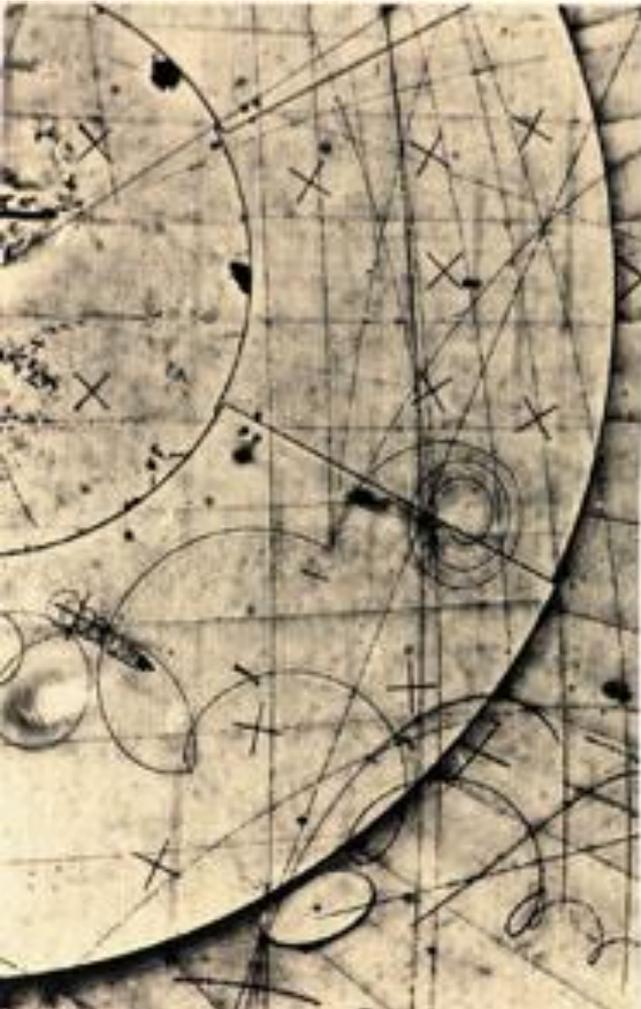


# I primi rivelatori: Camere a bolle



Milioni di collisioni fotografate e studiate una ad una..

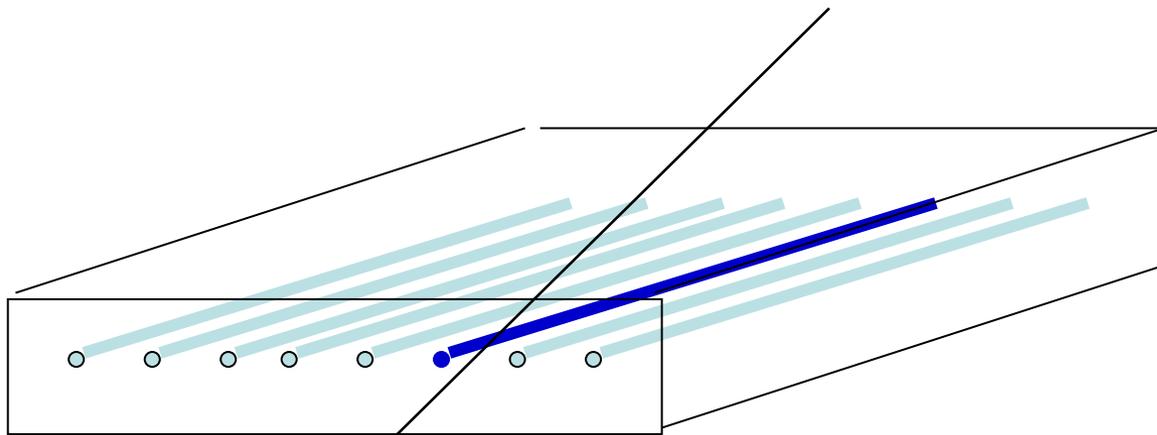
# Gargamelle



# Rivelatori elettronici

Foto camere a bolle: procedimento lento sia per acquisizione sia per lettura

1968: Georges Charpak al CERN inventa la  
**Camera Proporzionale a Multi-fili**



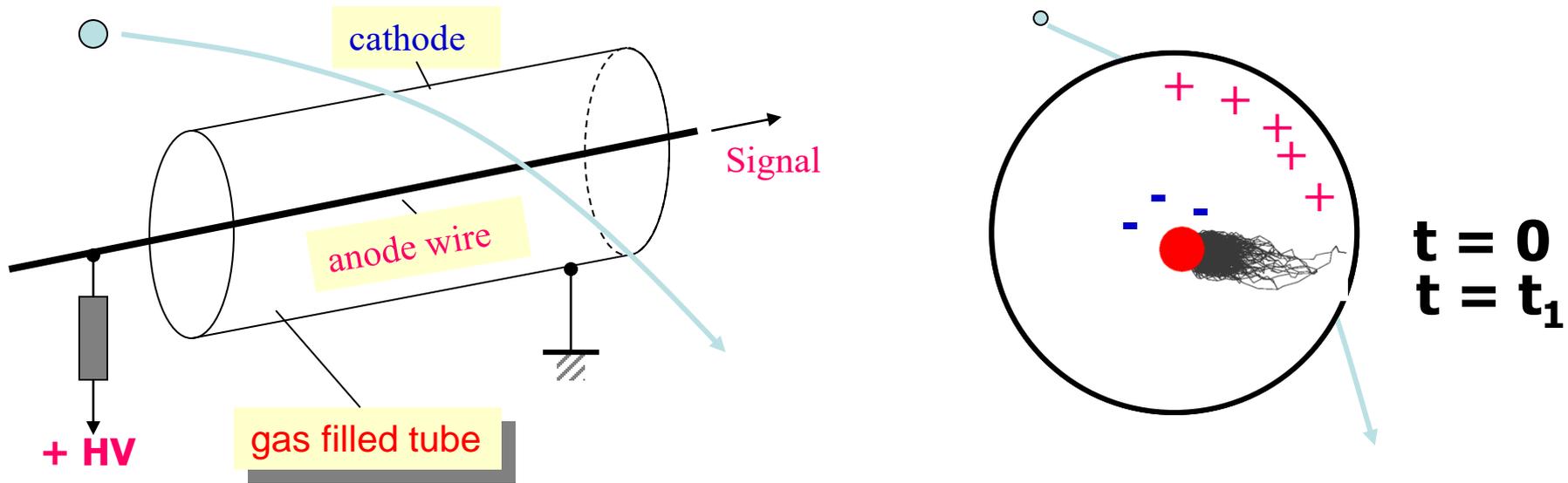
Camera con gas+ fili sotto alta tensione  
particella ionizza il gas →  
le cariche sono raccolte dal filo piu' vicino  
→ segnale elettronico



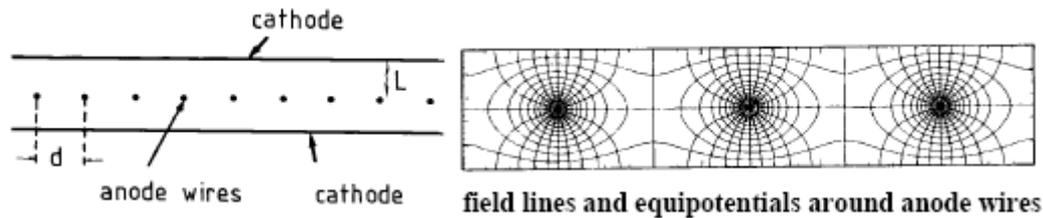
Premio Nobel nel 1992

Si passa all'era totalmente elettronica:  
- Rapidità di acquisizione e di lettura  
- Possibilità di processamento con computer

# Rivelatori a gas



- Geiger-Counter: Binary response
- Proportional Counter:
- MWPC: Multi Wire Proportional Chamber
- e altri....

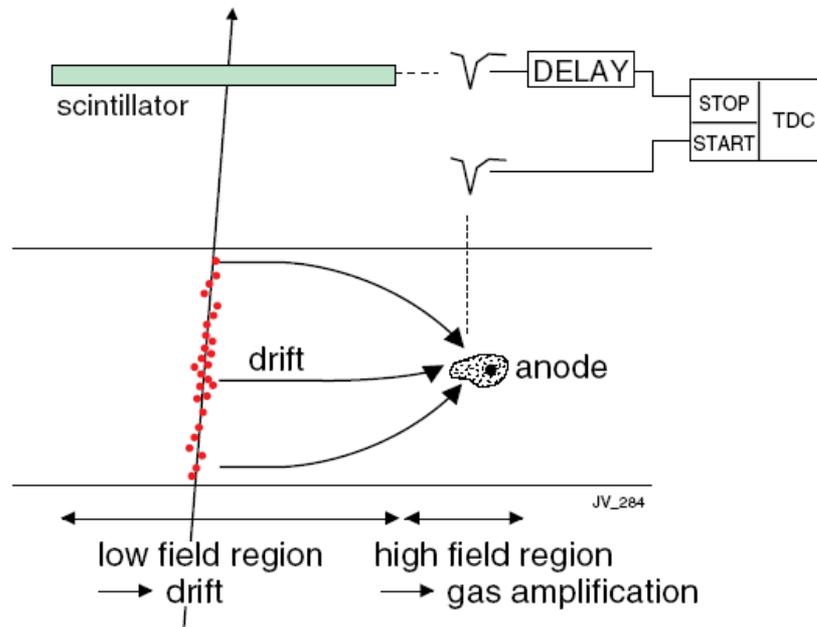


# Drift Chamber

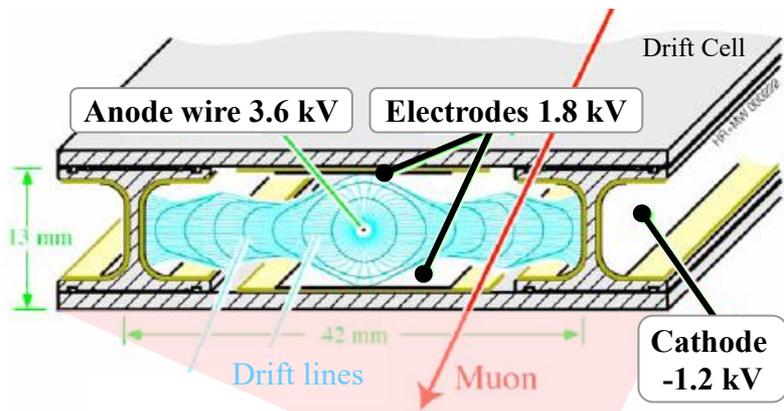
Le camere a fili standard sono limitate nella precisione della misura delle traiettoria dalla distanza tra i fili.

Le camere a deriva (drift chambers) misurano il tempo di deriva delle cariche migliorando la risoluzione.

Il tempo di passaggio della particella deve però essere noto.

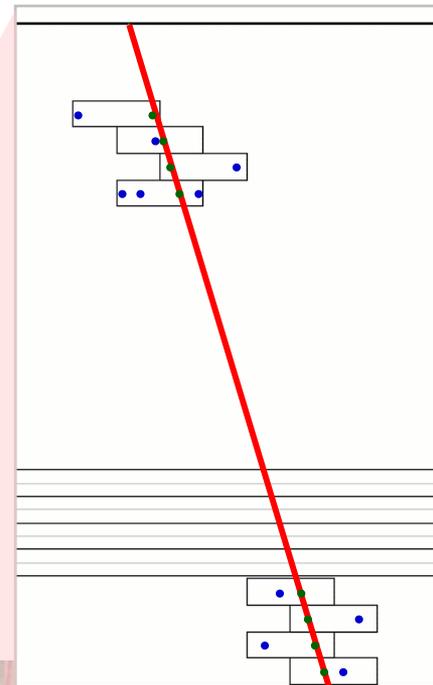
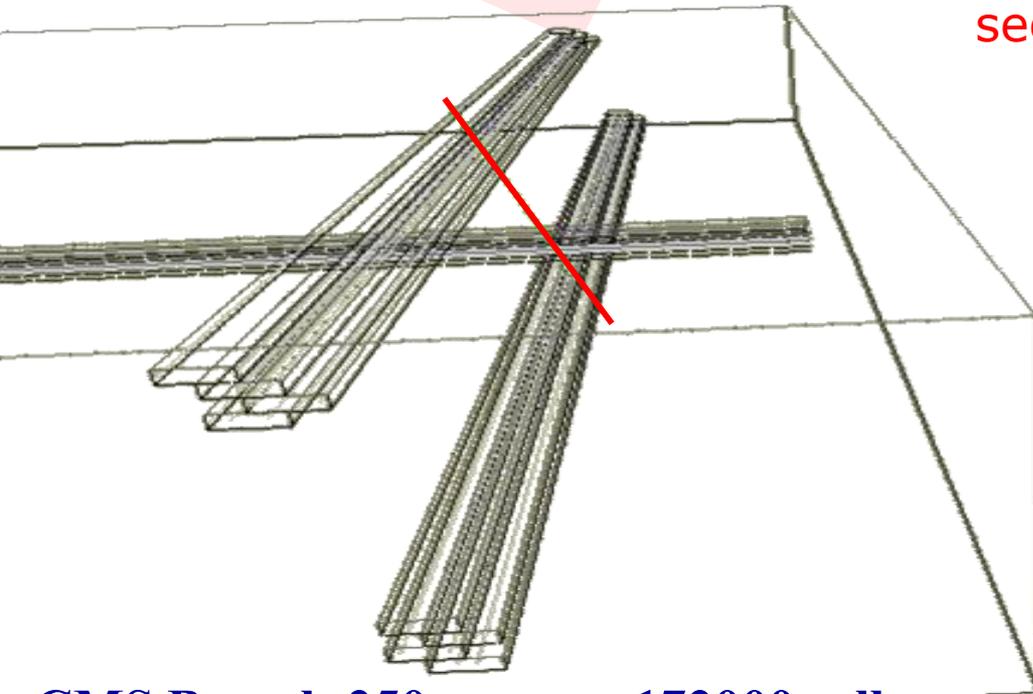


# Camere a muoni: es. Drift Tubes



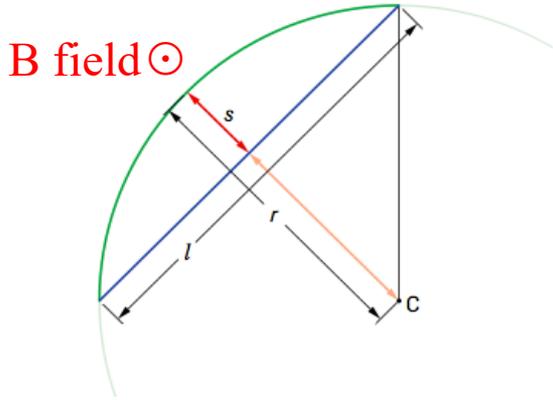
Strati sovrapposti di celle indipendenti

- Misura della posizione dal tempo di drift delle cariche prodotte per ionizzazione
- Risoluzione  $\sim 200 \mu\text{m}$
- Gruppi di di strati ortogonali permettono la ricostruzione di un **segmento 3D**



**CMS Barrel: 250 camere, 172000 celle**

# Compact MUON Solenoid

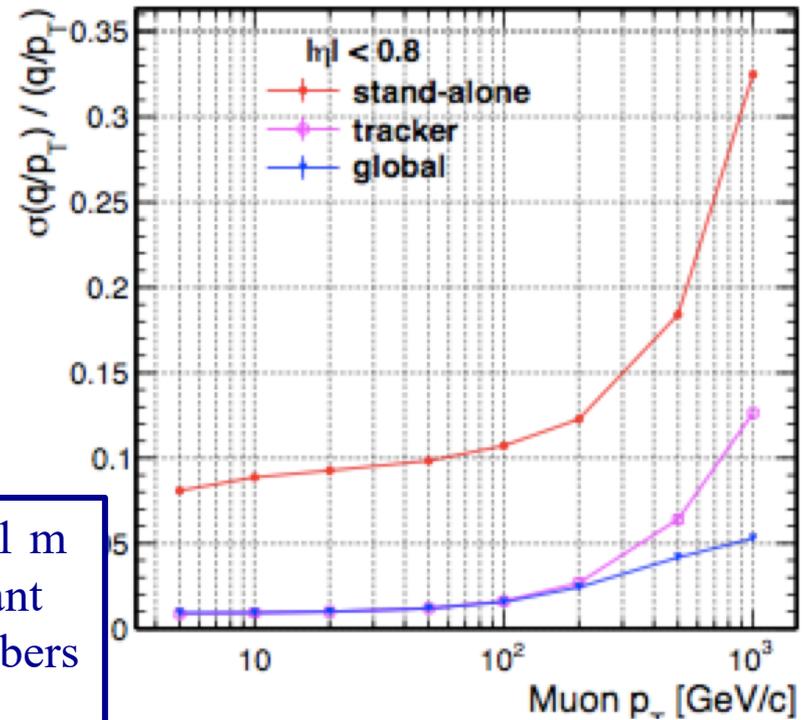


$$r = \frac{\ell^2}{8s} + \frac{s}{2} \gg \frac{\ell^2}{8s} \quad \text{high } P_t$$

$$P_t \propto 0.3 \times B \times r$$

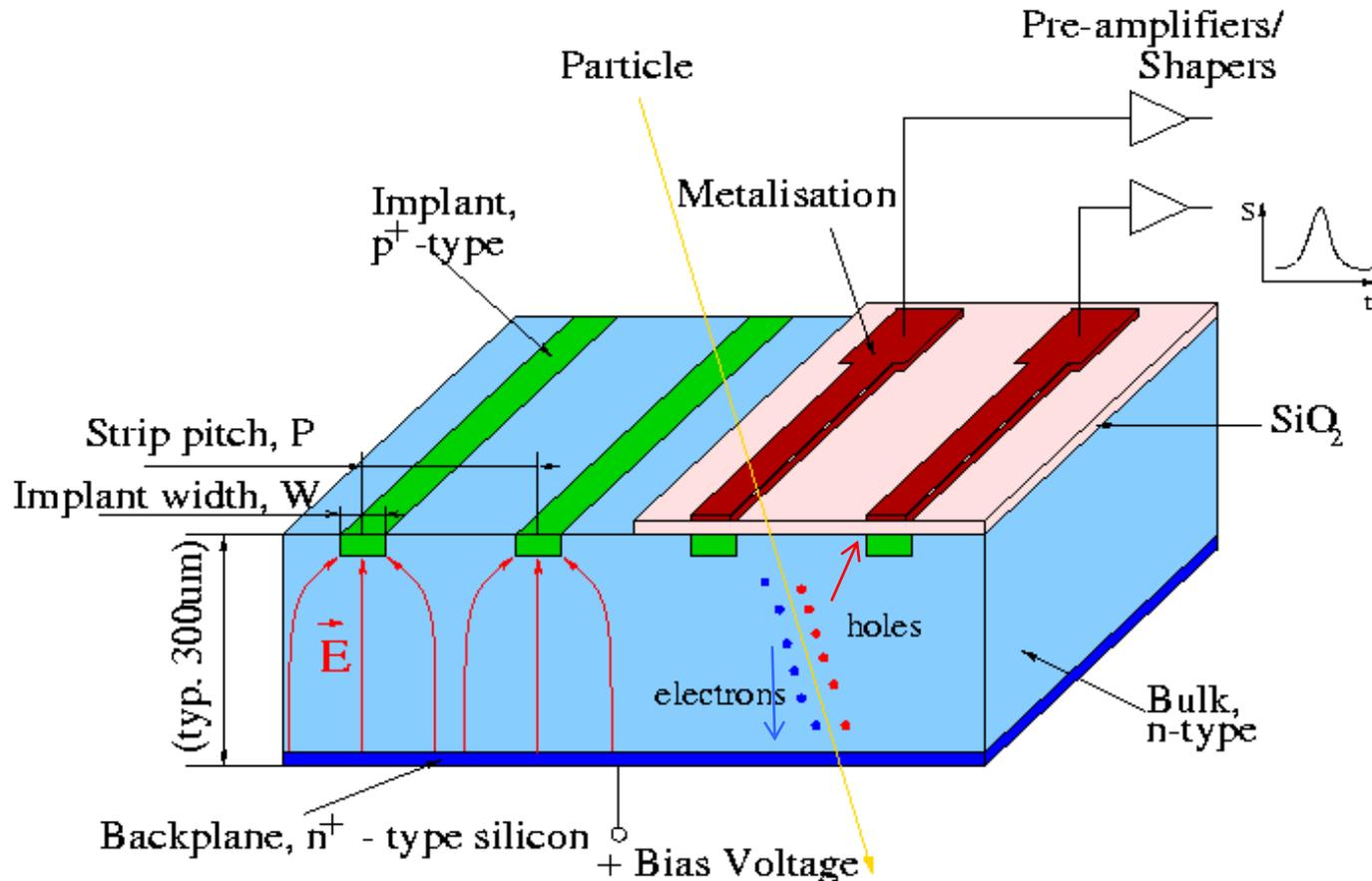
$$\frac{\Delta P_t}{P_t} \propto \frac{\Delta s}{\ell^2} + \dots$$

$\ell$  (path length in uniform B) is  $\sim 1.1$  m for the Si-tracker, but more important is the first layer of the Muon chambers ( $\sim 3$  m)



# Rivelatori al silicio

Invece di un gas, si usa un materiale semiconduttore:  
il silicio, opportunamente drogato e lavorato:



# Rivelatori al vertice

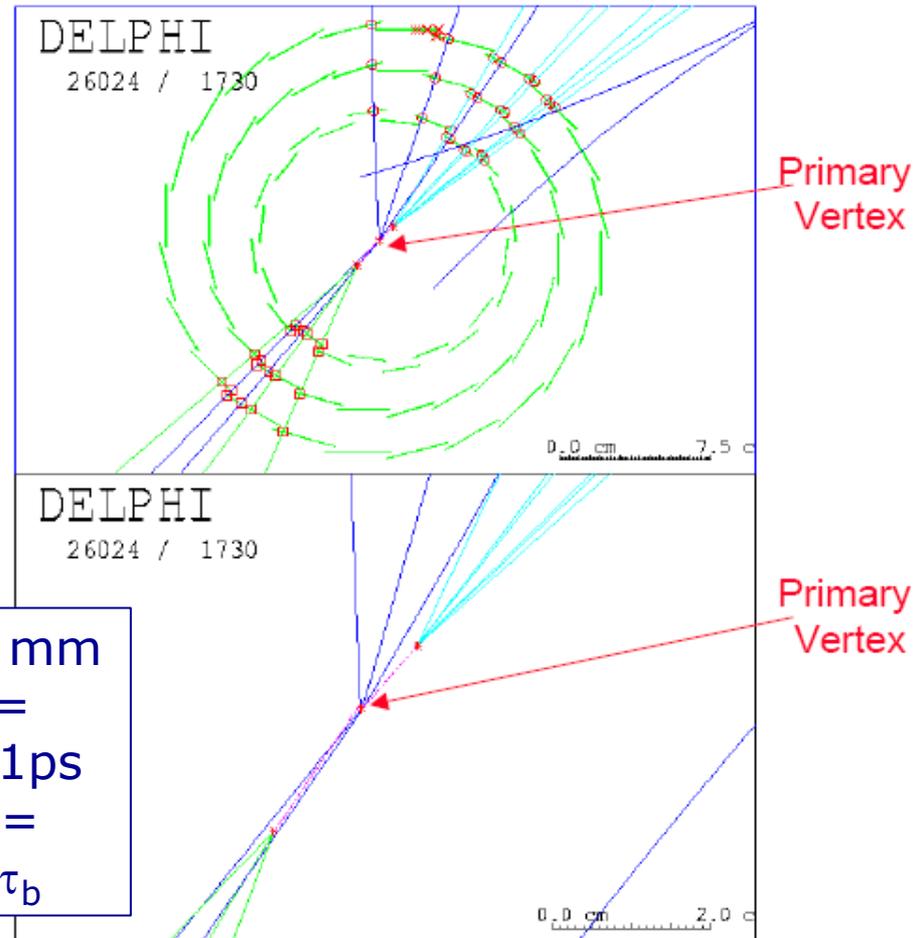
Il rivelatori al silicio permettono misure di posizione con altissime precisioni ( $\sim 10\mu\text{m}$ )

Sono ideali per misurare il vertice dell'interazione ed eventuali vertici secondari di particelle con lunga vita media.

Sono molto costosi ( $\sim 8$  euro/ $\text{cm}^2$ ) e vengono usati solo nelle zone vicino al vertice dell'interazione.

## Reconstructed B-mesons in the DELPHI micro vertex detector

$$\tau_B \approx 1.6 \text{ ps} \quad l = c\tau\gamma \approx 500 \mu\text{m} \cdot \gamma$$



# Misura della traiettoria: i tracciatori

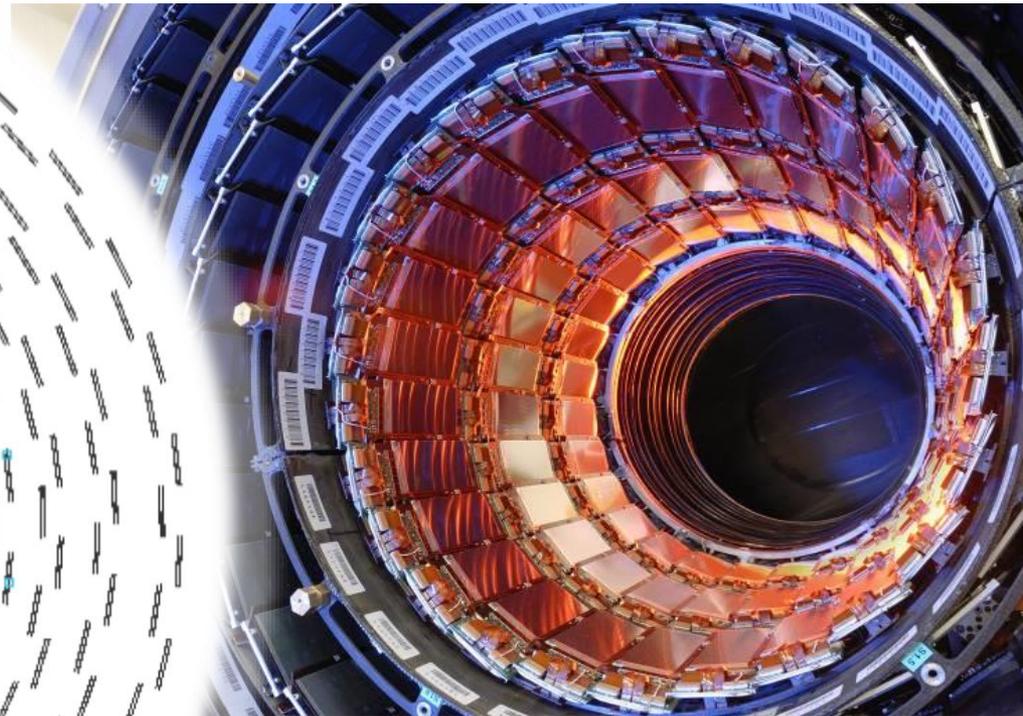
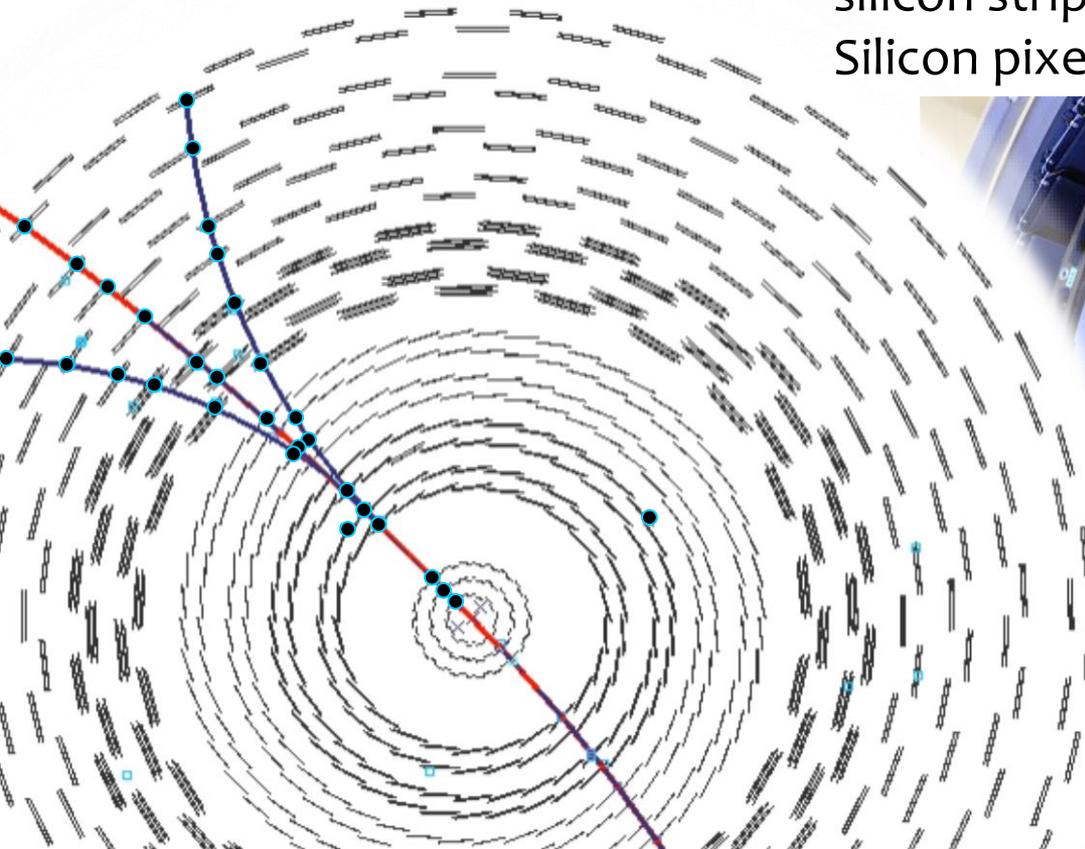
Ricostruzione della traiettoria: dai "punti" in strati successivi

Misura della quantità di moto: dalla curvatura nel campo magnetico

CMS Tracker:

silicon strips: 200 m<sup>2</sup>, 10M canali,  $\sigma = 80\text{-}180\ \mu\text{m}$

Silicon pixels: 16m<sup>2</sup>, 66M canali,  $\sigma = \sim 15\ \mu\text{m}$



# Misura dell'energia: il calorimetro

## Misura dell'energia via assorbimento *totale* (misura distruttiva)

La risposta del rivelatore deve essere **proporzionale ad E** per

- Particelle cariche: elettroni e adroni
- Particelle neutre: fotoni e neutroni

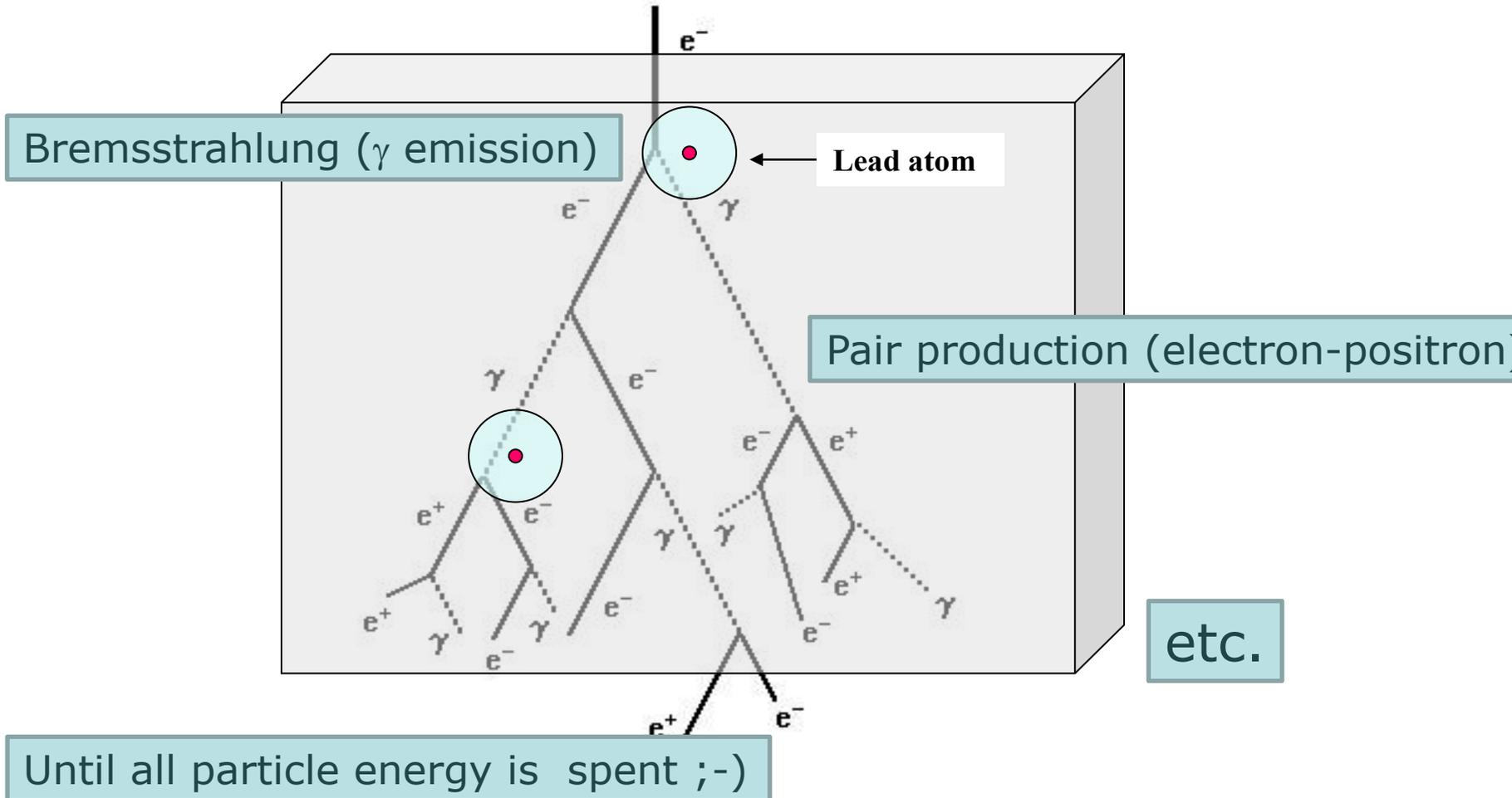
Principio di misura:

- **Sciame elettromagnetico** (interazioni elettromagnetiche delle particelle con il materiale)
- **Sciame adronico** (dominato da interazioni forti delle particelle con il materiale)

Il segnale che leggiamo è la conversione della ionizzazione o dell'eccitazione - provocata dalle particelle dello sciame - del materiale del rivelatore: si misura corrente e tensione.

**Il numero di particelle prodotte è proporzionale all'energia incidente**

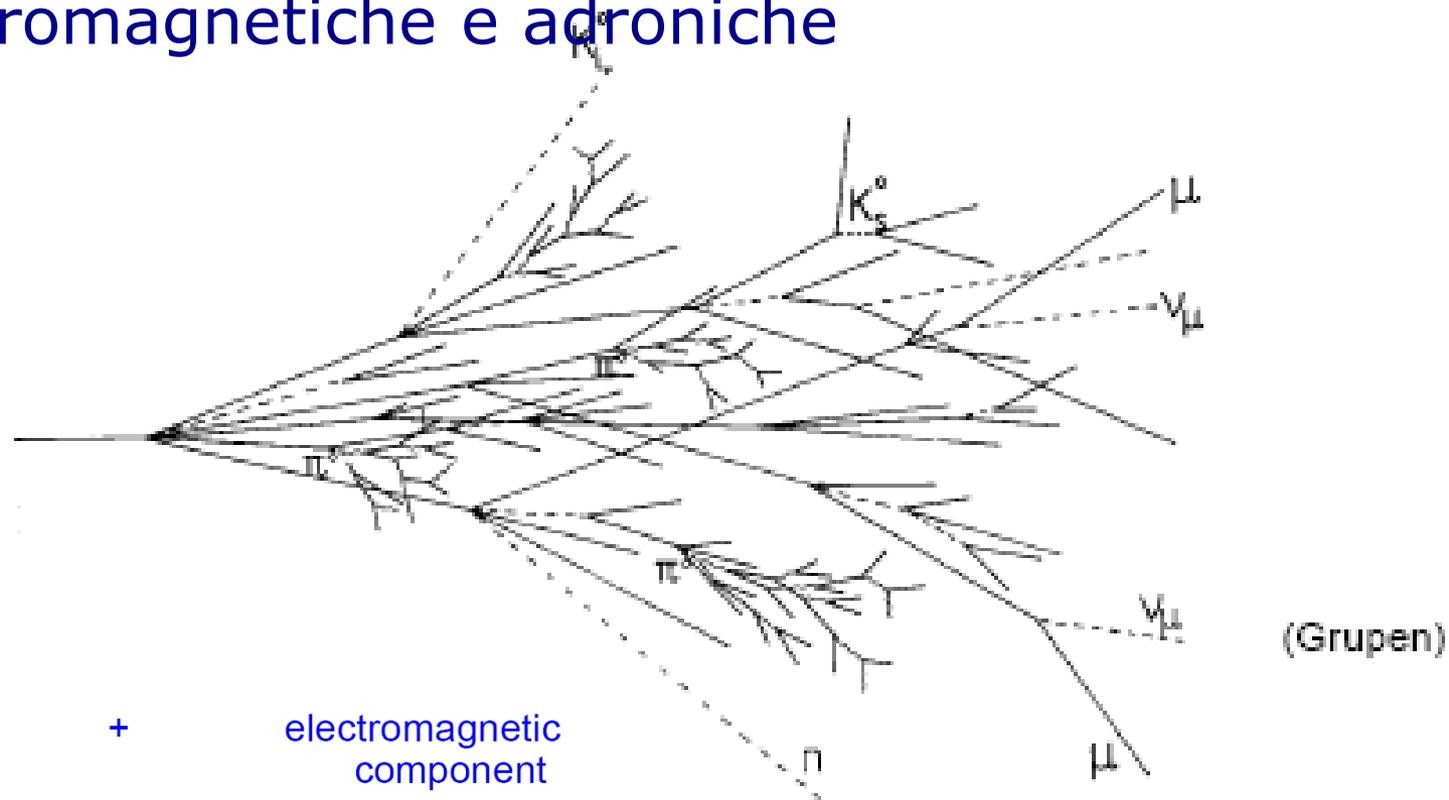
# Sciame elettromagnetico



Radiation length:  $X_0$  = Length, where  $1/e$  particle energy is emitted via Bremsstrahlung

# Calorimetro adronico

## Cascata di particelle con componenti elettromagnetiche e adroniche



Hadronic

+

electromagnetic component



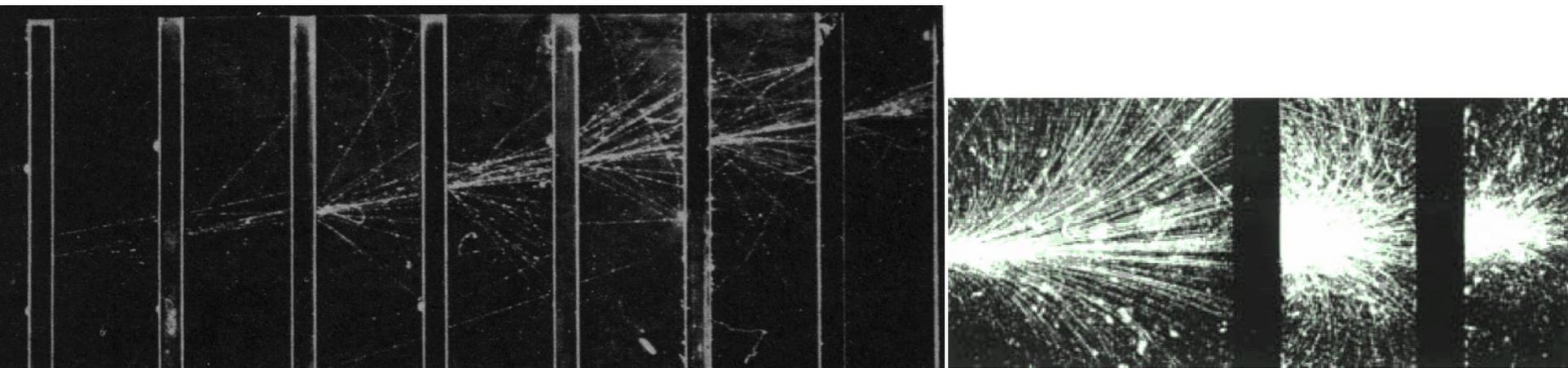
charged pions, protons, kaons ....  
 Breaking up of nuclei  
 (binding energy),  
 neutrons, neutrinos, soft  $\gamma$ 's  
 muons ....  $\rightarrow$  invisible energy



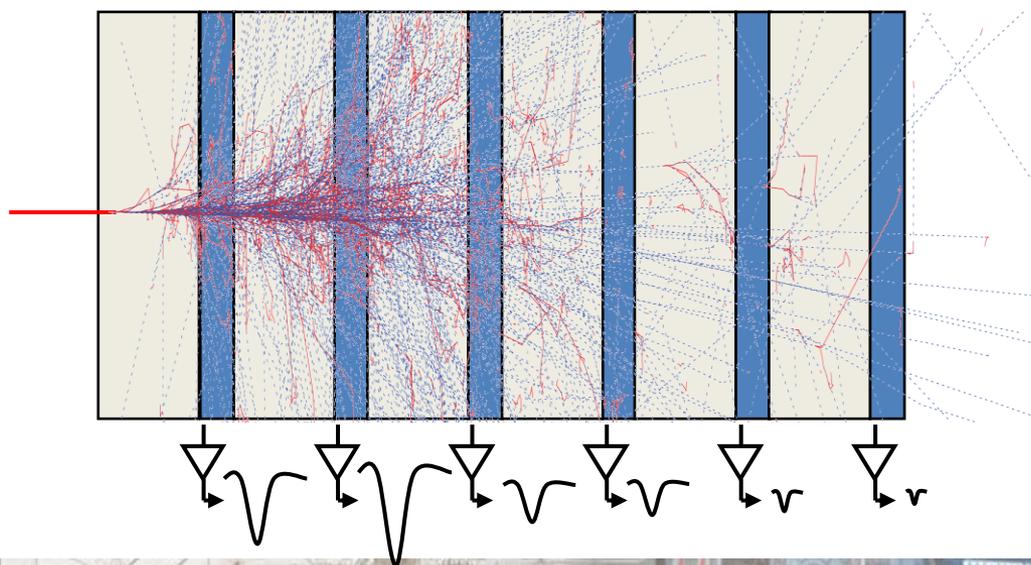
neutral pions  $\rightarrow 2\gamma \rightarrow$   
 electromagnetic cascade  
 $n(\pi^0) \approx \ln E(\text{GeV}) - 4.6$   
 example 100 GeV:  $n(\pi^0) \approx 18$

Misura dell'energia e' meno precisa dei calorimetri elettromagnetici, a causa di grandi fluttuazioni negli sciami adronici

# Sciami: l'energia e' proporzionale al numero di particelle prodotto

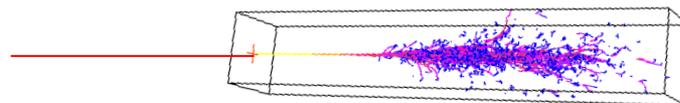


Possono essere composti da **assorbitori passivi** (che fanno sciamare le particelle) alternati ad **elementi sensibili** (che permettono di "leggere" la particella...)



... I calorimetri possono anche essere composti da un materiale omogeneo che agisce contemporaneamente da assorbitore e da materiale sensibile

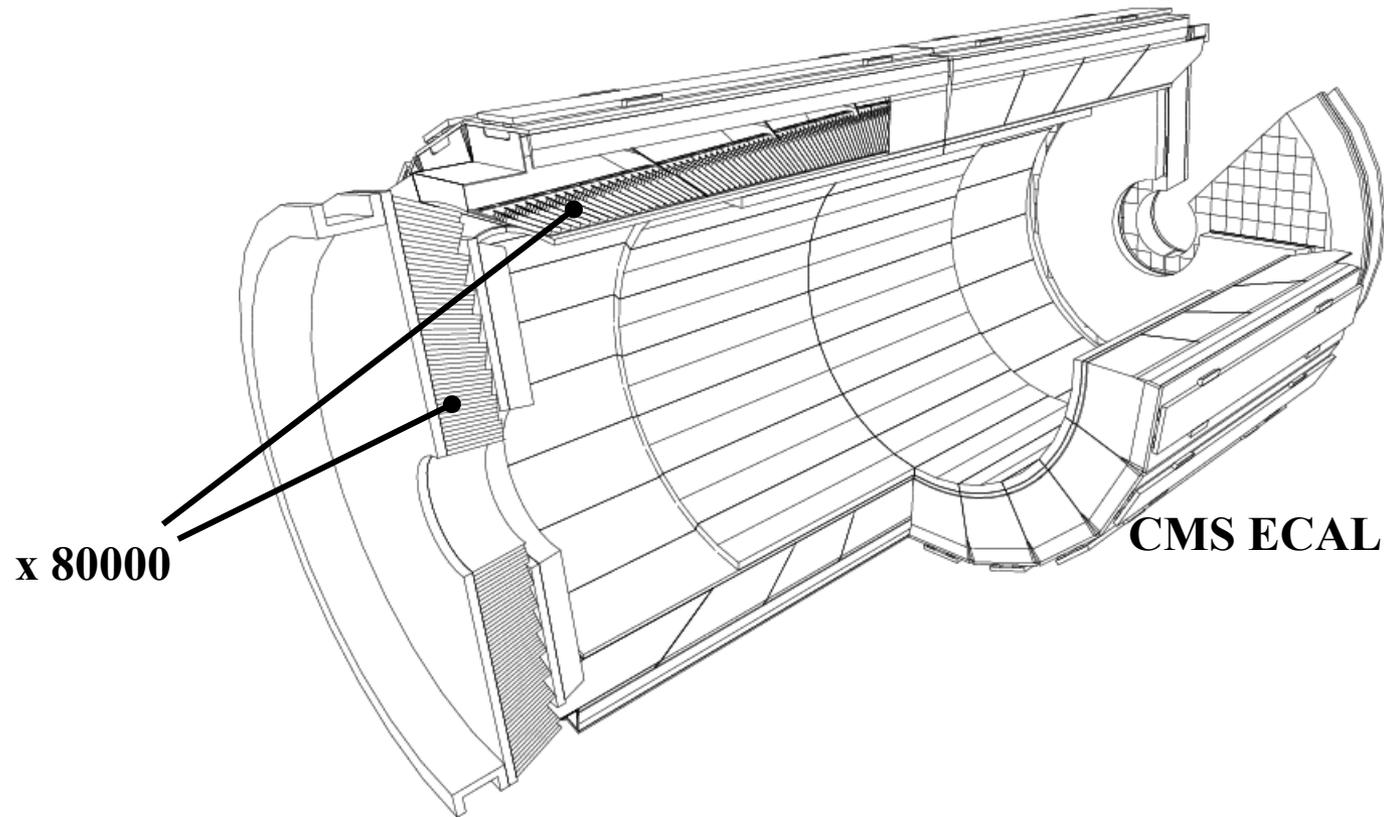
Il materiale deve essere speciale: ad alto "A" per far sciamare le particelle, ma trasparente, da poter permettere alla luce generata da queste di arrivare al fotocatodo.



# Calorimetro Elettromagnetico di CMS

80000 cristalli di  $\text{PbWO}_4$

Puntano verso il vertice dell'interazione protone-protone



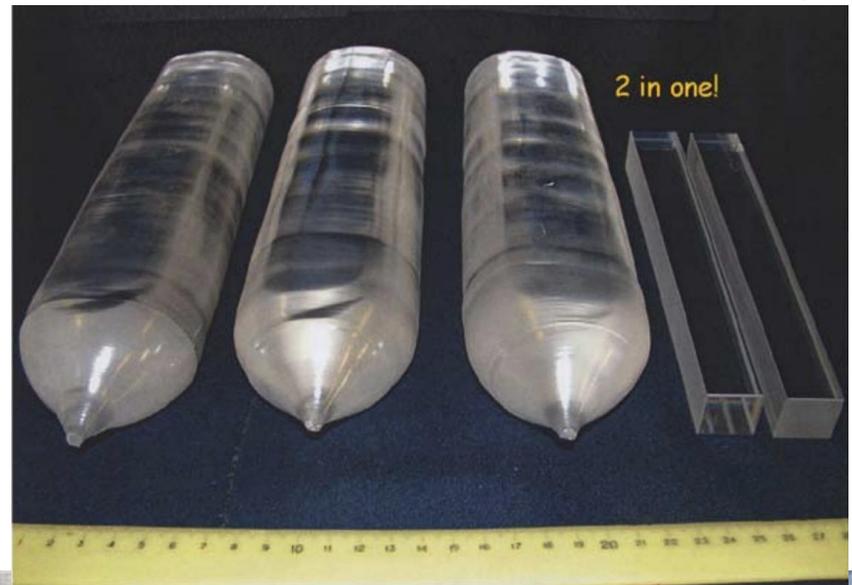
# Tecnica di Czochralski (Russia)

75.000 cristalli di CMS  $\text{PbWO}_4$  +meccanica+cooling +readout: 110 MCH

10.000 cristalli di Vetro al piombo di DELPHI + meccanica+ cooling+readout  
10MCH

Il cristallo di Tungstenato di piombo viene fatto crescere in un crogiolo di platino a partire da un « seed » di dimensione di un chicco di mais. Ci va una settimana perche' cresca fino a  $>20$  cm. Poi va tagliato e lucidato.  
La temperatura a cui si fa crescere e' di 2800 gradi.

I cinesi mettevano i sali di WO in una forma di alluminio e facevano crescere il cristallo per 1 mese a 3000-4000 gradi (da ogni forma si tagliavano 2 rivelatori).



# Le diverse particelle

Le particelle interagiscono diversamente con la materia:

Tutte le particelle cariche sono "tracciabili", ionizzano un gas o un silicio.

**Gli elettroni** sciamano in modo "elettromagnetico" (risentono della forza elettromagnetica e debole, ma non forte)

**I fotoni** sono neutri: non sono tracciabili e sciamano in modo elettromagnetico (risentono solo della forza elettromagnetica)

**I muoni**: interagiscono pochissimo con la materia (risentono forza elettromagnetica e debole): possono attraversare spessi strati di materiale – non sciamano, ma ionizzano un gas.

**Gli adroni** sciamano adronicamente: risentono della forza forte.

**I neutrini** "non" interagiscono (risentono solo della forza debole) ed escono dal rivelatore

# Perdita di energia per Bremsstrahlung (emissione di fotoni)

- la sezione d'urto è proporzionale a  $1/m^2$

$$\sigma \propto \left( \frac{e^2}{mc^2} \right)^2$$

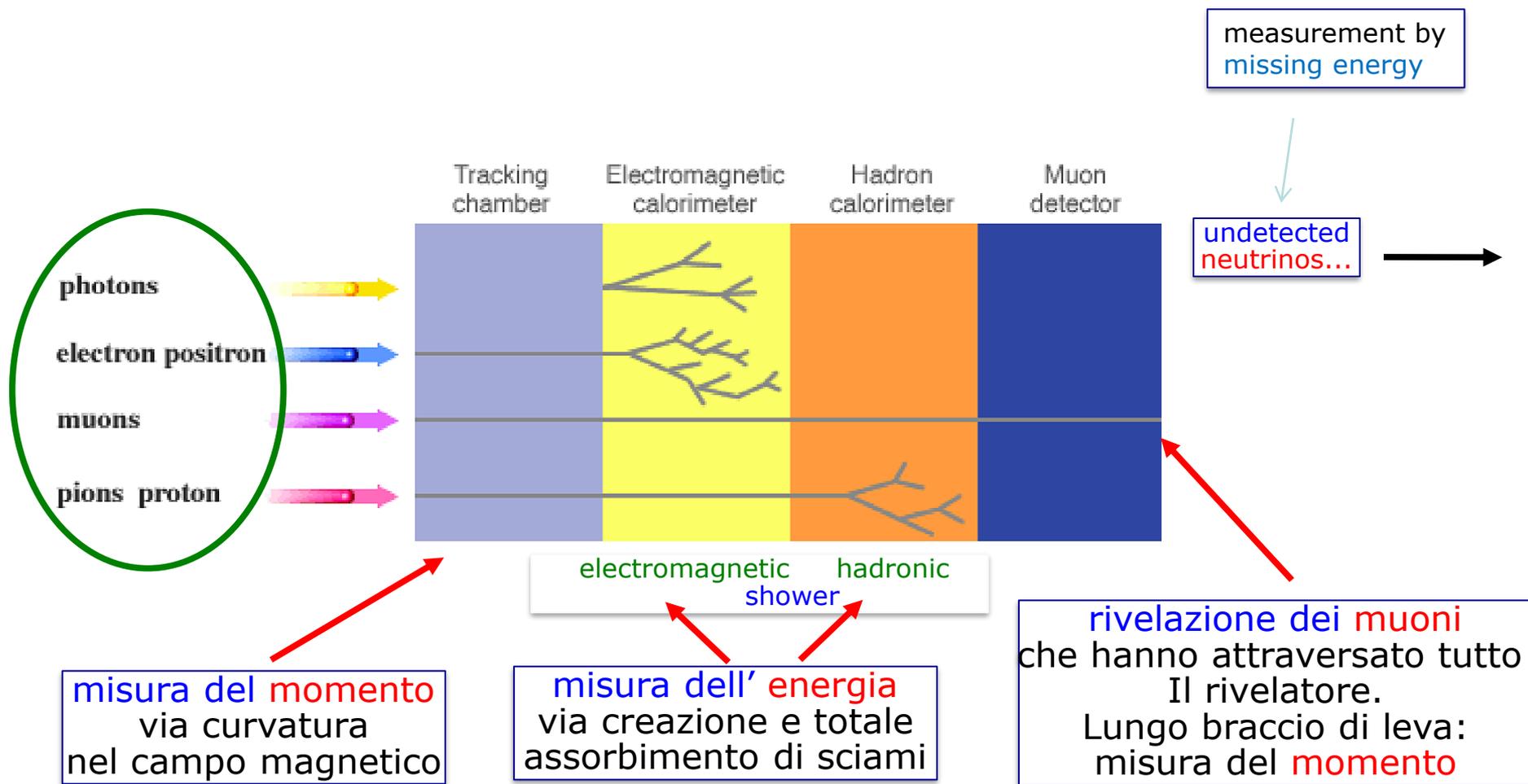
- a energie inferiori a qualche centinaio di GeV, solo gli elettroni perdono sensibilmente energie per radiazione

- $m_e/m_\mu \approx 1/200$

- fattore 40.000 in probabilità di radiazione

- L'effetto principale è dovuto allo scattering con il campo elettrico dei nuclei

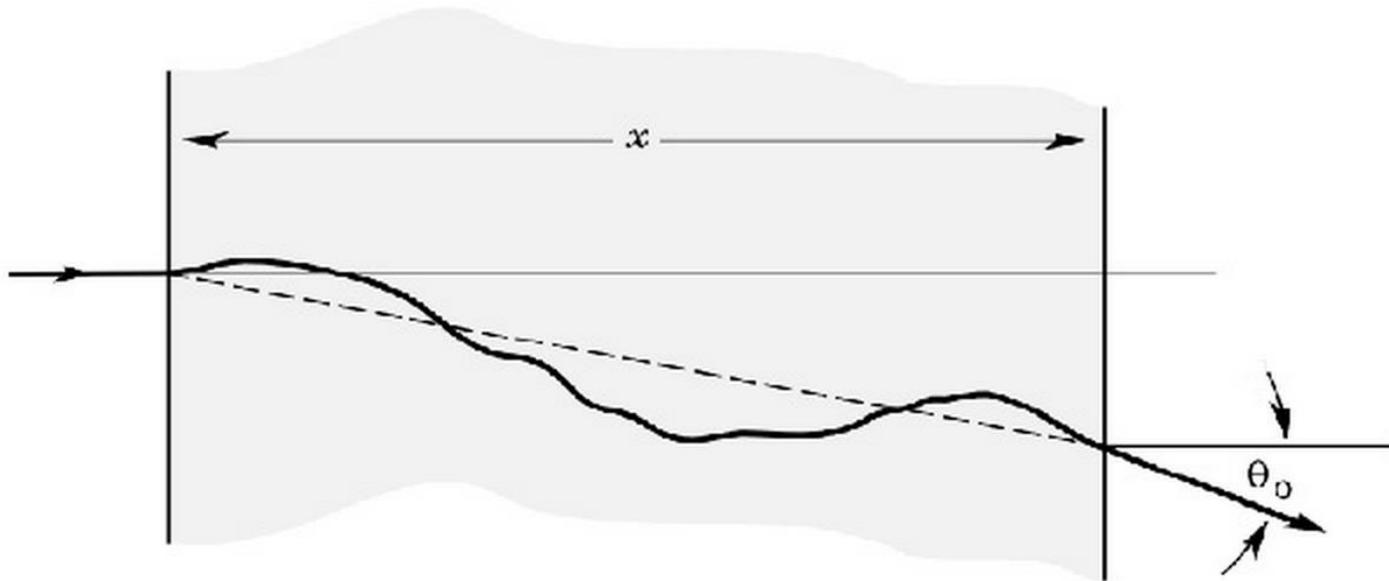
# Il passaggio delle particelle



# Lo scattering multiplo

Man mano che ci si allontana dal vertice dell'interazione, si usano rivelatori con minor precisione intrinseca – e meno cari! – perché le particelle interagiscono con il materiale dei rivelatori che attraversano e la loro posizione è nota a meno di un "errore".

"multiple scattering"



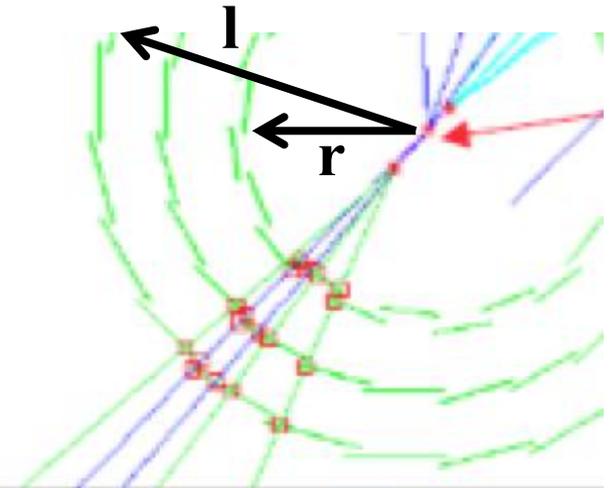
# La precisione necessaria

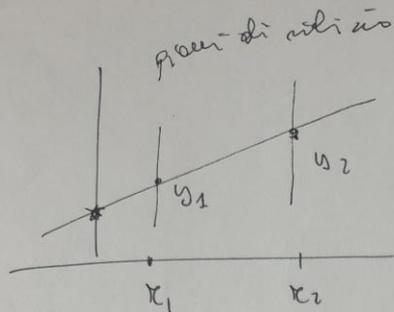
E' necessario stimare bene la precisione di cui si ha bisogno da ogni rivelatore data la misura che si vuole fare e le condizioni a contorno.

Per esempio: il rivelatore al vertice vuole misurare particelle che decadono in 1.5 ps, ovvero che decadono dopo 3mm dal vertice primario; precisioni "intrinseche" di  $\sim 10\mu\text{m}$  sono necessarie. Il rivelatore deve essere posizionato a un raggio piu' piccolo possibile, e avere almeno 3 strati per determinare la traccia...

$$S_{res}^2 = S_{int}^2 \sqrt{1 + 2\frac{r}{l} + 2\frac{r^2}{l^2}} + S_{MS}^2$$

$\sigma_{int}$  e' data dalla distanza tra le "strisce" attive del silicio  
 $\sigma_{MS}$  (multiple-scattering)  $\sim a^2 + b^2/p^2 \sin\theta^{3/2}$





perché

$$y - y_1 = (y_2 - y_1) \times \frac{x - x_1}{(x_2 - x_1)}$$

per  $x=0$

$$\hookrightarrow y = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot x_1$$

Esempio  $y = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} x_1$

$$y = \frac{y_2}{x_2 - x_1} x_2 + \frac{y_1}{x_2 - x_1} x_1$$

$$\delta y^2 = \delta y_1^2 \left( \frac{x_2}{x_2 - x_1} \right)^2 + \delta y_2^2 \left( \frac{x_1}{x_2 - x_1} \right)^2$$

$$= \delta_{int}^2 \times \left( \frac{x_2^2}{(x_2 - x_1)^2} + \frac{x_1^2}{(x_2 - x_1)^2} \right)$$

$$x_2 - x_1 = l \quad x_2 = l + x_1$$

$$= \delta_{int}^2 \times \left( 1 + 2 \frac{x_1}{l} + 2 \frac{x_1^2}{l^2} \right)$$

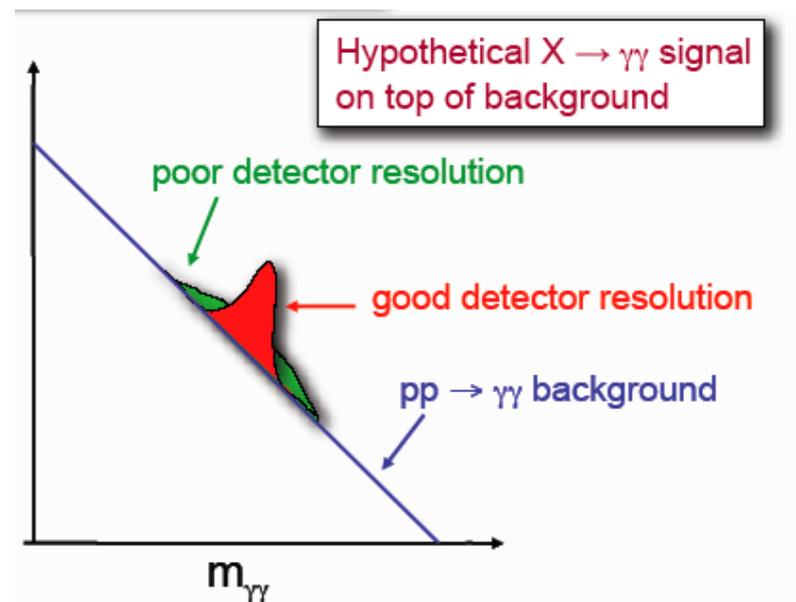
# La precisione necessaria

Se vogliamo rivelare  $H \rightarrow \gamma\gamma$  e avere un picco "stretto" in massa, il nostro calorimetro dovrà avere una ottima, e costante nel tempo, risoluzione in energia

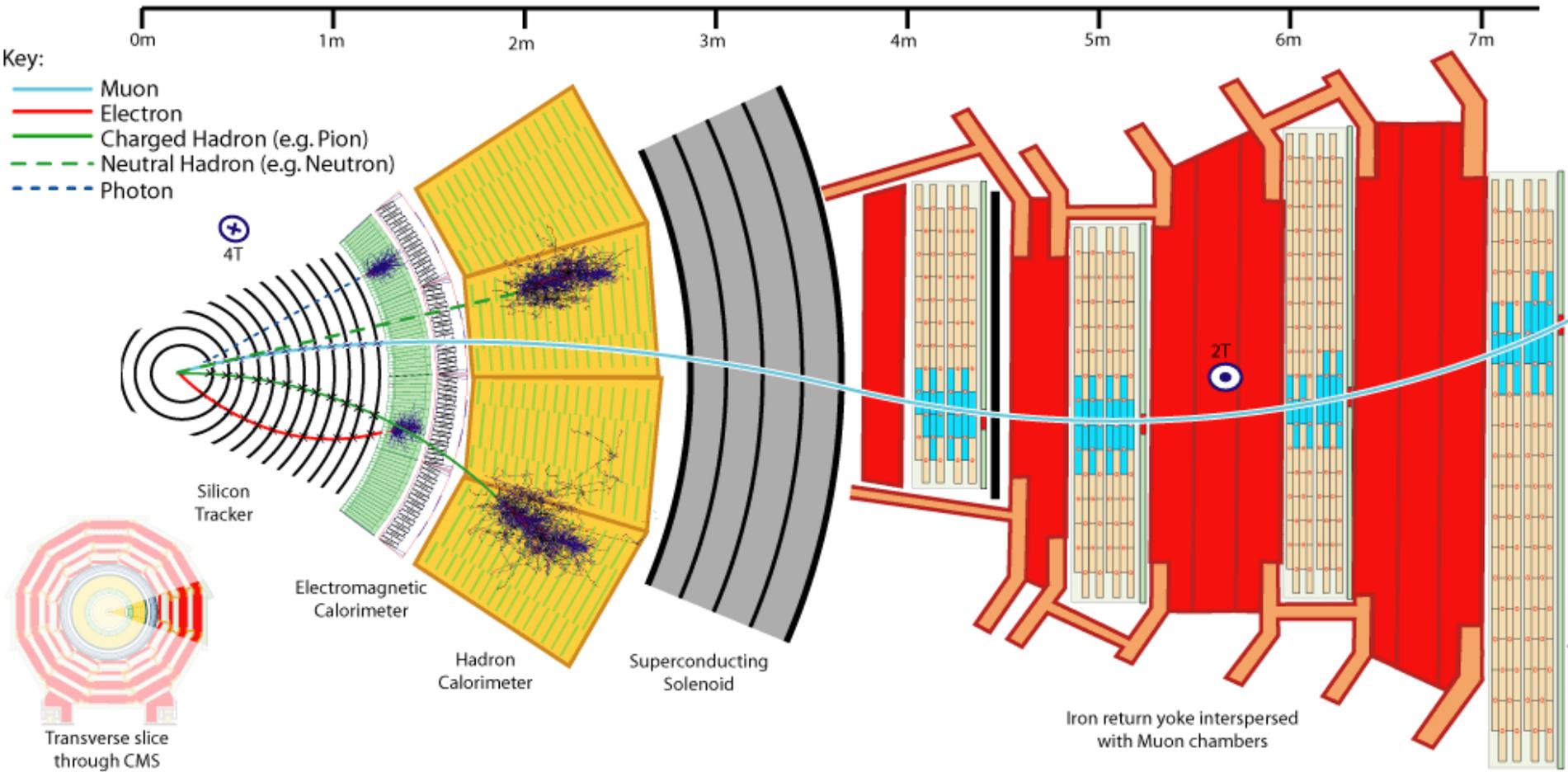
$$m_{\gamma\gamma}^2 = 2E_1E_2(1-\cos\langle \rangle)$$

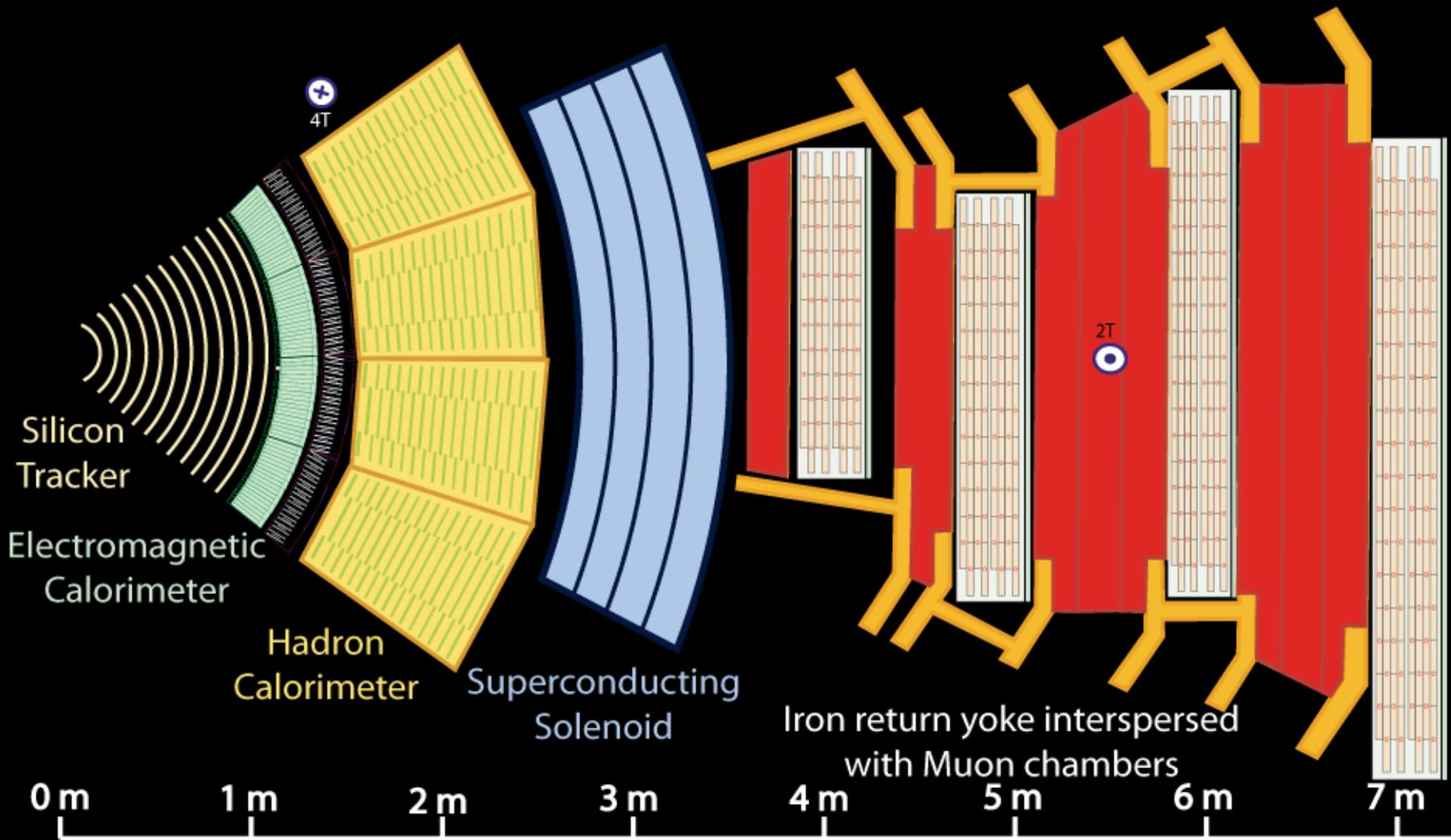
Incertezza su  $m \leftarrow$

Incertezza su Energia fotoni  
e su direzione dei fotoni



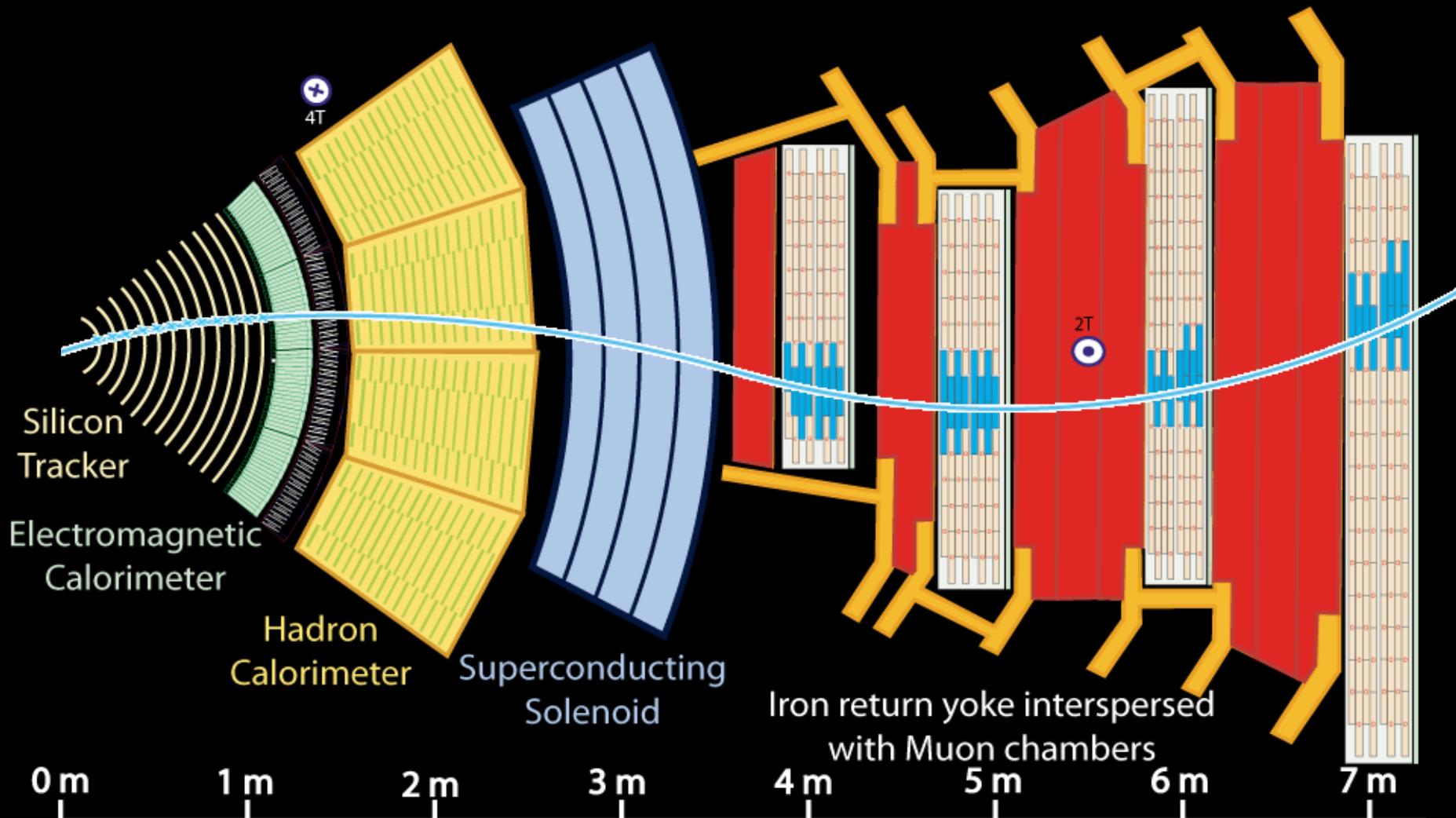
# CMS a LHC





Key:

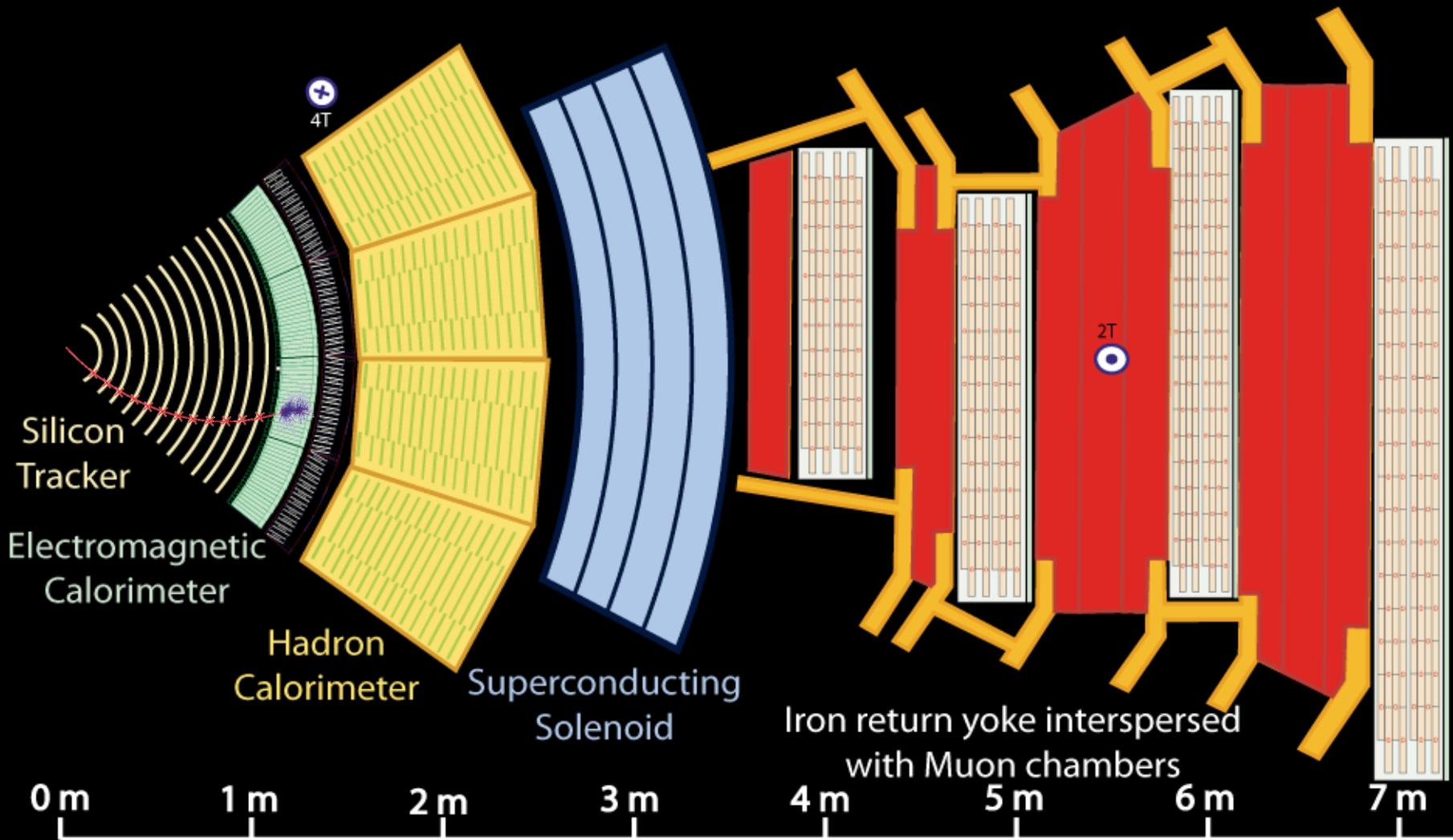
- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon



0 m      1 m      2 m      3 m      4 m      5 m      6 m      7 m

Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon



Key:

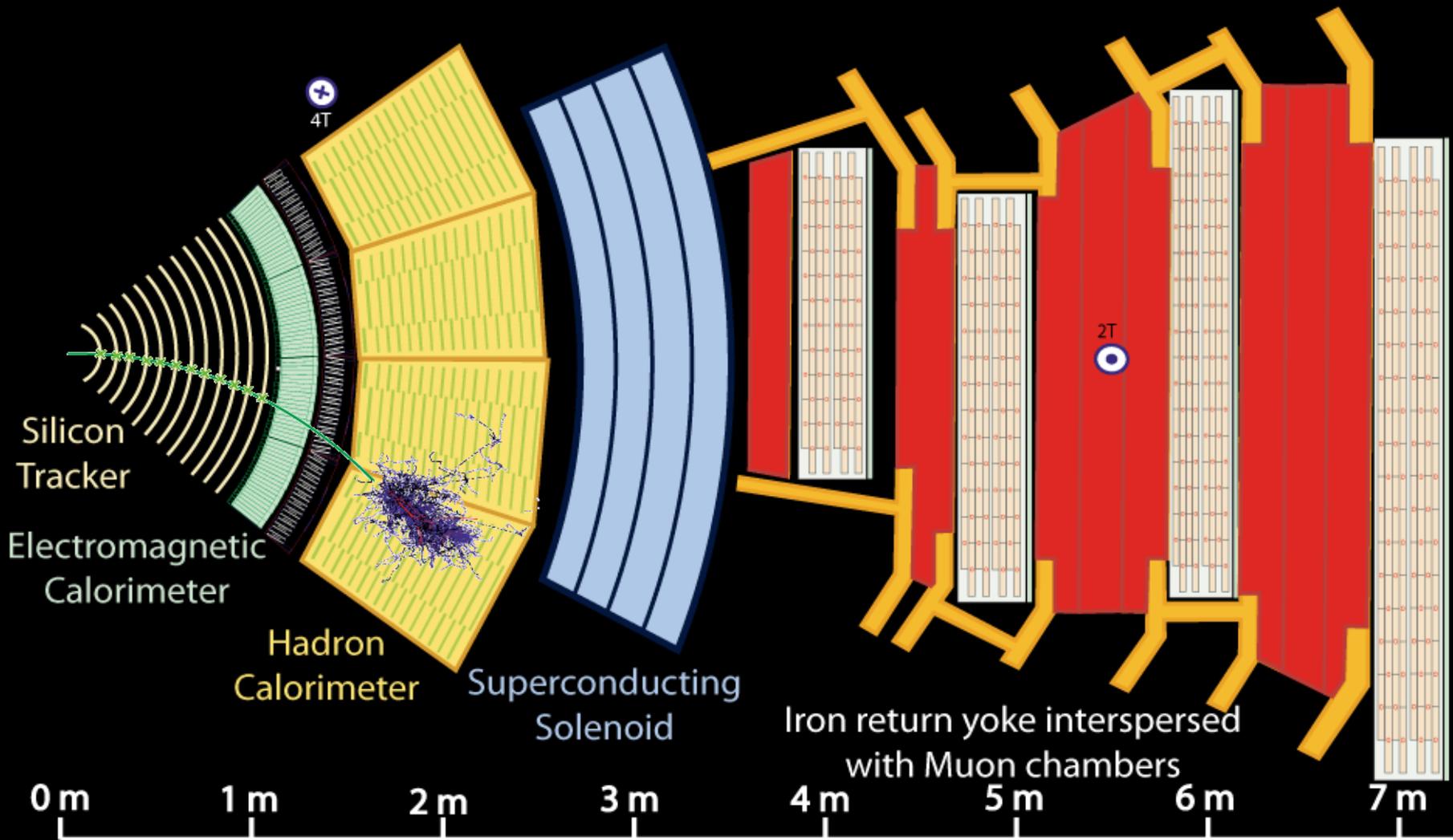
— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

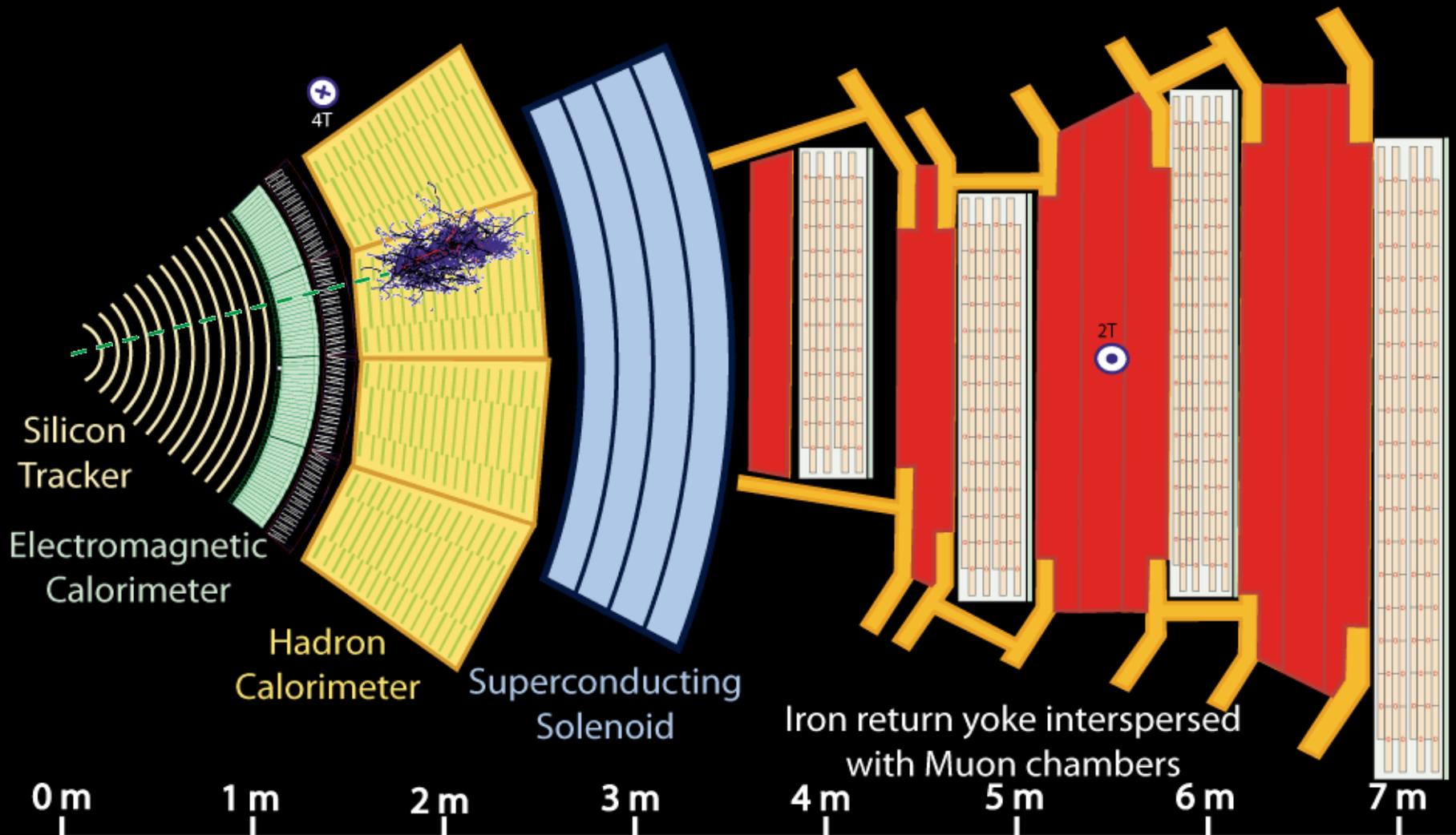
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon



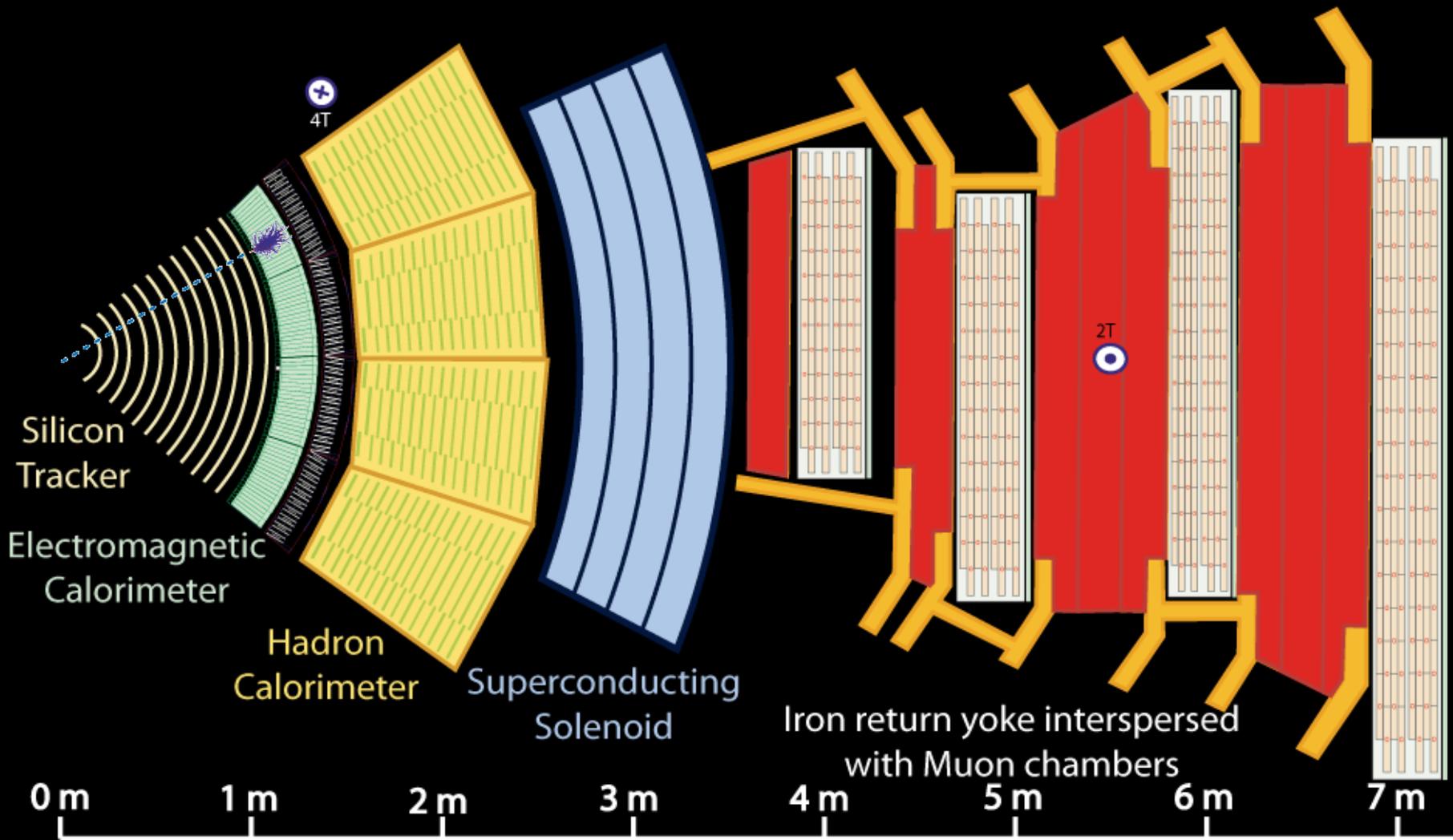
Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon



Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon

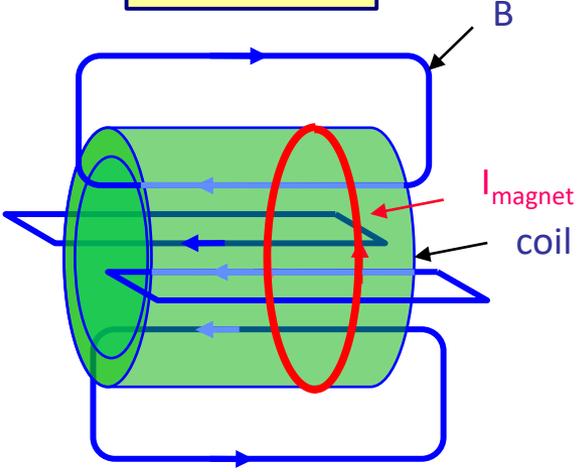


Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon

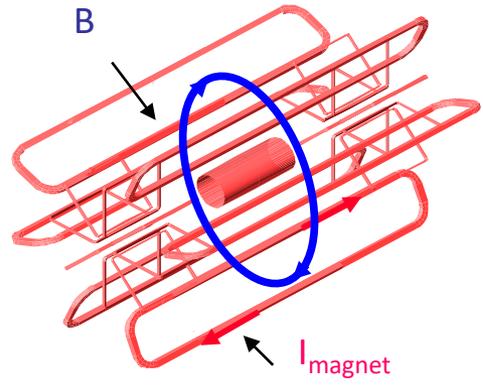
# Configurazione dei magneti di ATLAS e CMS

**Solenoide**



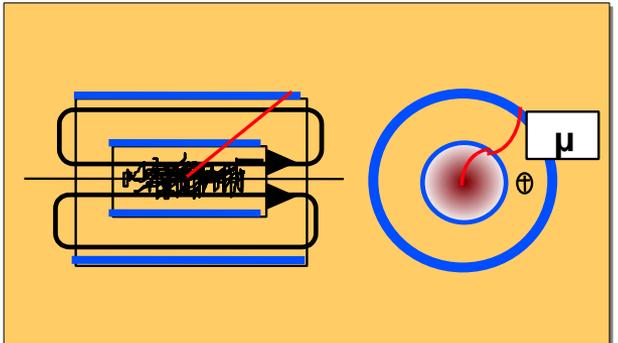
- + strong and homogeneous field in solenoid
- massive iron return yoke necessary
- limited in size (cost)
- solenoid thickness (radiation length)

**(air-core) Toroide**

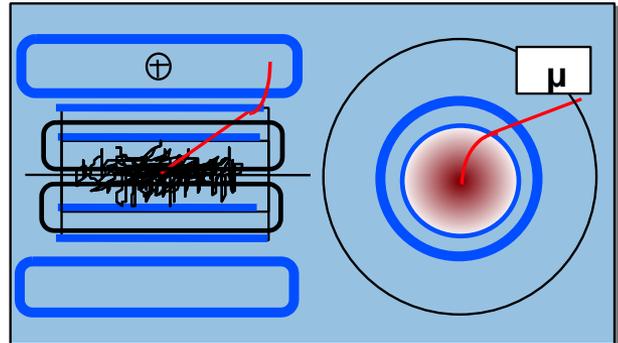


- + large air core, no iron, low material budget
- additional solenoid in the inner parts necessary
- inhomogeneous field
- complex structure

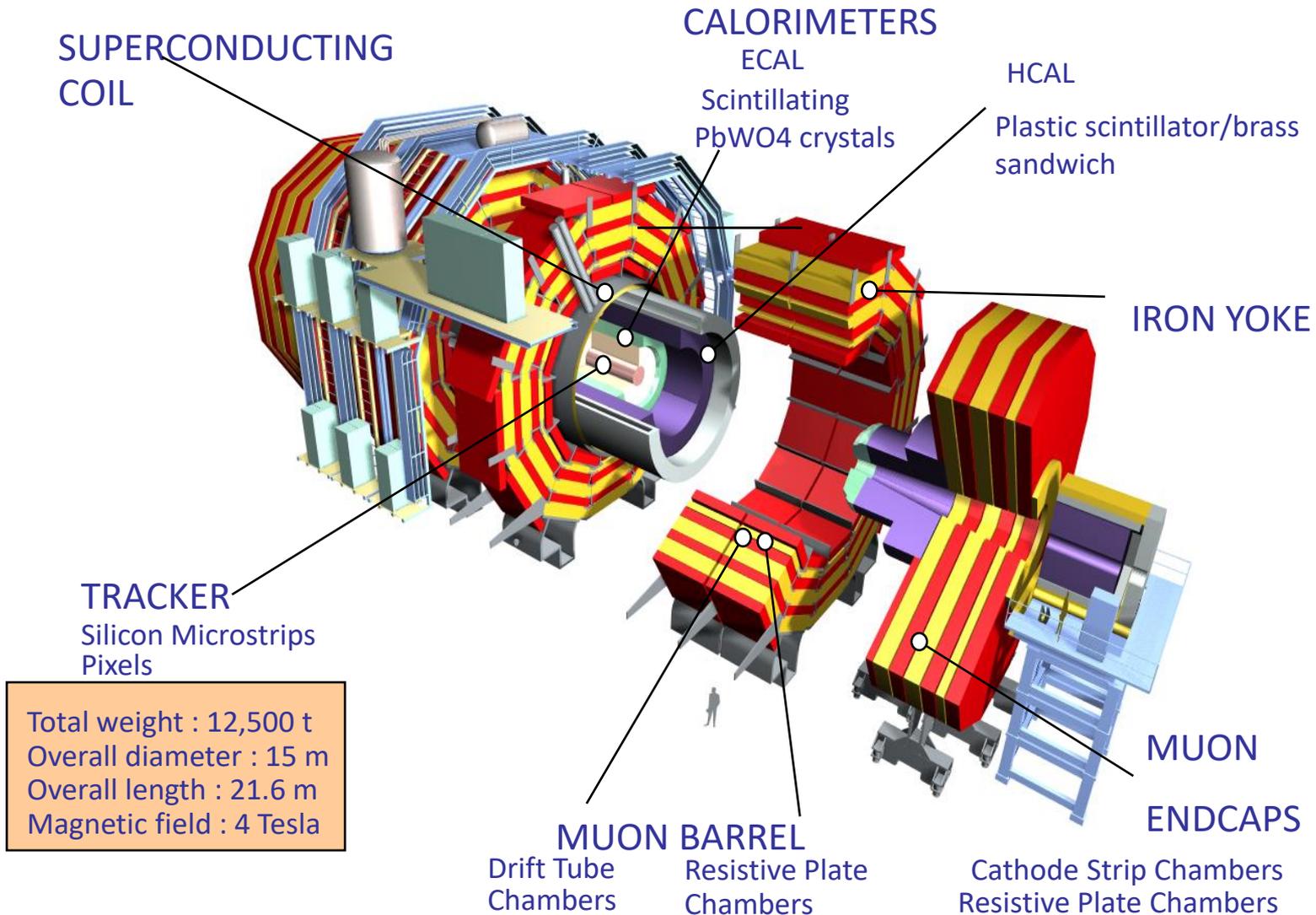
CMS, ALICE, LEP Detectors



ATLAS



# Exploded View of CMS

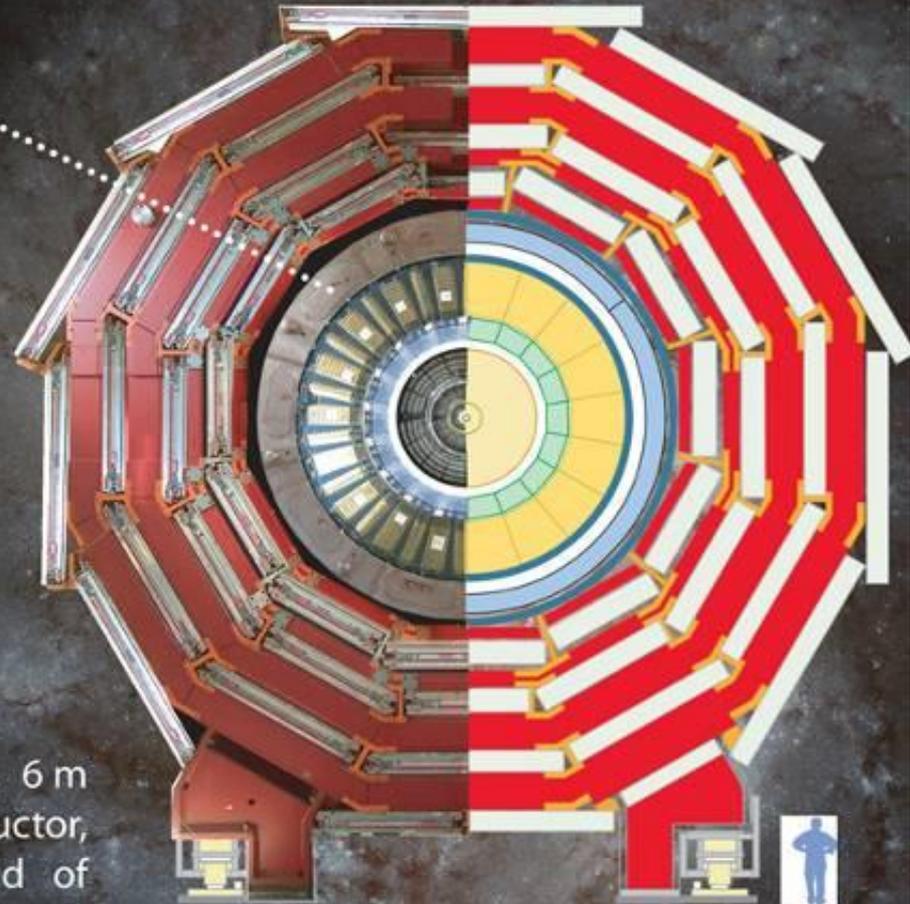


# Il magnete superconduttore di CMS



## Superconducting Solenoid

Passing 20 000 amperes through a 13 m long, 6 m diameter coil of niobium-titanium superconductor, cooled to  $-270^{\circ}\text{C}$ , produces a magnetic field of 4 teslas (about 100 000 times stronger than that of the Earth). This field bends the trajectories of charged particles, allowing their separation and momenta measurements.

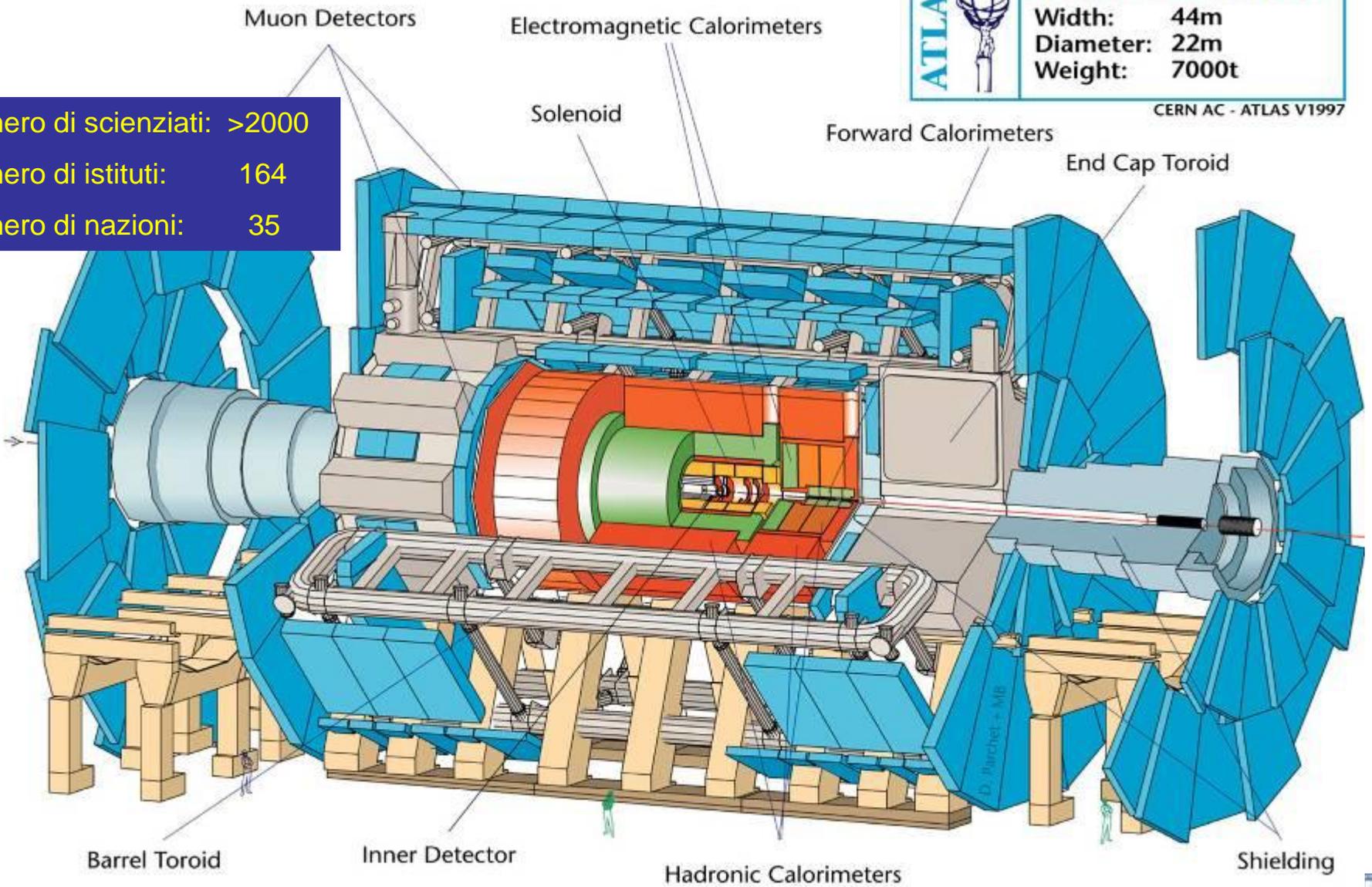


# ATLAS

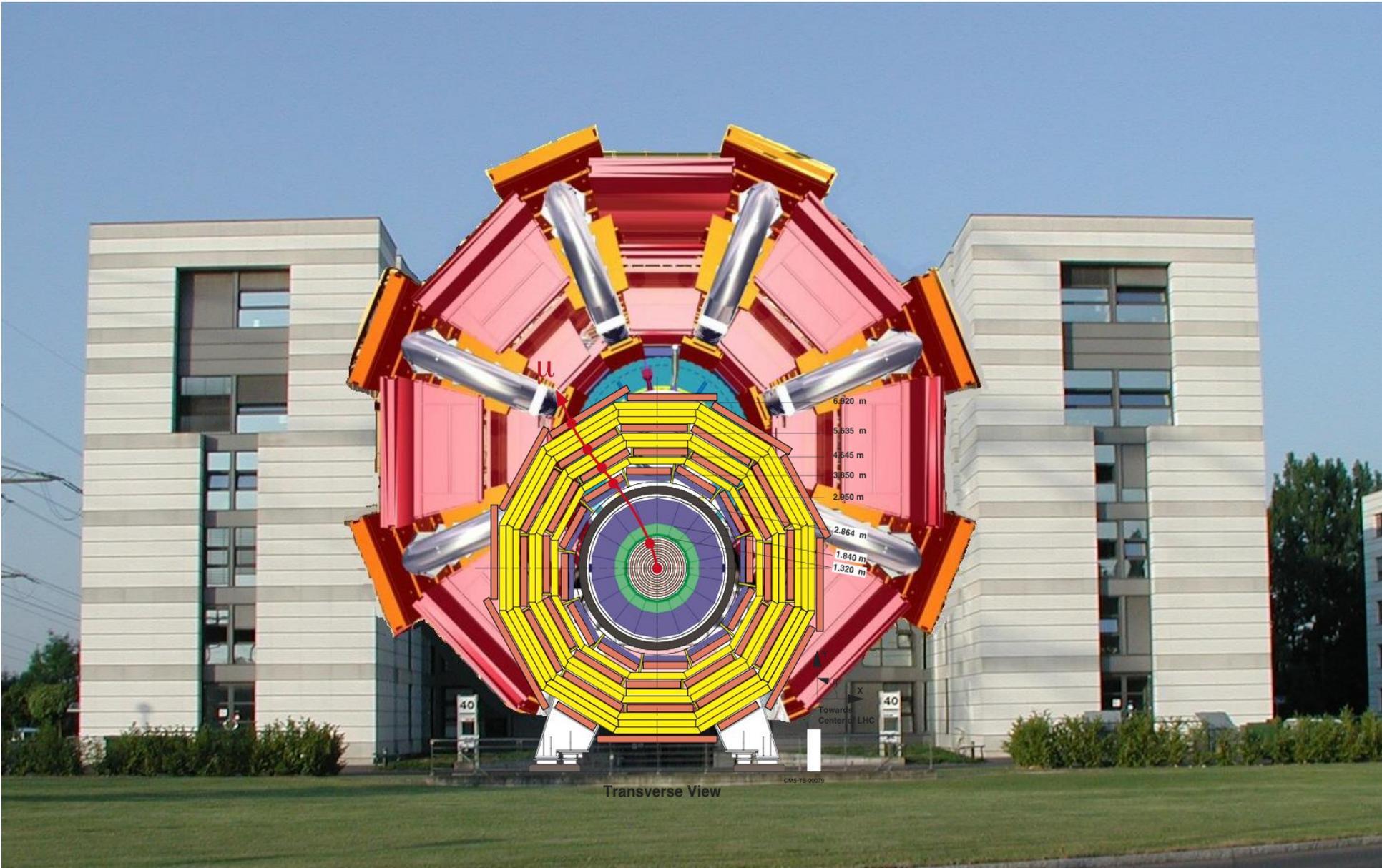
ATLAS		<b>Detector characteristics</b>	
		<b>Width:</b>	<b>44m</b>
		<b>Diameter:</b>	<b>22m</b>
		<b>Weight:</b>	<b>7000t</b>

CERN AC - ATLAS V1997

Numero di scienziati: >2000  
Numero di istituti: 164  
Numero di nazioni: 35



# Gli apparati sperimentali ATLAS e CMS



Transverse View

CMS-TS-00079

# Ricostruzione degli "oggetti"

Ogni rivelatore da una informazione "parziale" sulla particella passata.

- il "tracciatore" rivela la particella e' carica, misura il momento, la carica, e la direzione.
- Il calorimetro elettromagnetico: misura l'energia dell' elettrone o fotone
  - tracciatore\_+ cal EM = distinzione tra elettrone e fotone
- Il calorimetro adronico misura l'energia delle altre particelle (gli adroni).
  - Tracciatore + cal HAD = distinzione tra adrone neutro e carico
- Il rivelatore a muoni identifica la particella come un muone: e' l'unica particella carica che riesce ad attraversare i rivelatori precedenti.

→ elettroni, fotoni, muoni e adroni

# Ricostruzione degli "oggetti": neutrini

Il neutrino non e' rivelabile perche' interagisce molto poco con la materia,  
→ si manifesta come mancanza di energia e momento,  
le sue caratteristiche sono ricostruibile dalla cinematica dell'evento:

Sommiamo tutte le particelle (energie e momenti): quello che otteniamo  
deve essere uguale a quello da cui siamo partiti (interazione protone protone).  
Se manca dell'energia o del momento -> un neutrino e' stato prodotto  
ed e' uscito dal rivelatore.

$$E(\text{protone} - \text{protone}) = \dot{\hat{a}} \text{Energia}(\text{particelle})$$

$$P_z(\text{protone} - \text{protone}) = \dot{\hat{a}} P_z(\text{particelle})$$

$$P_x(\text{protone} - \text{protone}) = \dot{\hat{a}} P_x(\text{particelle}) = 0$$

$$P_y(\text{protone} - \text{protone}) = \dot{\hat{a}} P_y(\text{particelle}) = 0$$

$$E(\text{neutrino}) = E(\text{protone} - \text{protone}) - \dot{\hat{a}} \text{Energia}(\text{particelle})$$

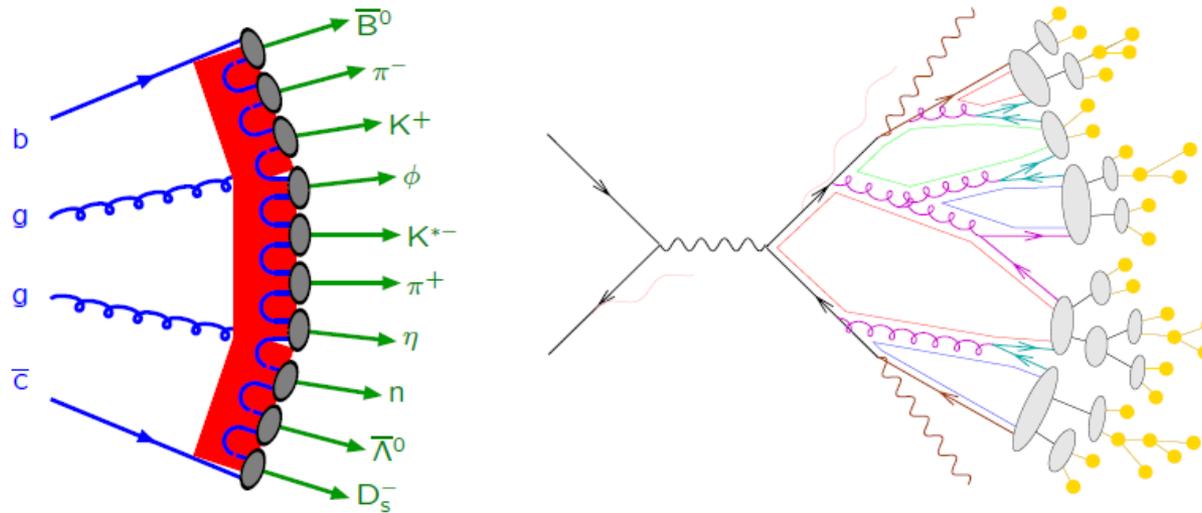
$$P_x(\text{neutrino}) = 0 - \dot{\hat{a}} P_x(\text{particelle})$$

$$P_y(\text{neutrino}) = 0 - \dot{\hat{a}} P_y(\text{particelle})$$

# Ricostruzione degli "oggetti": i jet

Nella realtà si osservano gli adroni, i quark non possono esistere "liberi",  
ma solo aggregati dentro gli adroni  
(mesoni: particelle composte da 2 quark , barioni: particelle composte da 3 quark)

E' possibile ottenere le informazioni sul quark o sul gluone che ha partecipato  
all'interazione studiando gli adroni che sono stati generati:



Gli adroni che provengono da un quark iniziale, tendono ad andare nella stessa direzione  
e dunque a associarsi in "getti" di particelle.

I JET sono dunque formati da adroni, elettroni, muoni, neutrini, fotoni etc...

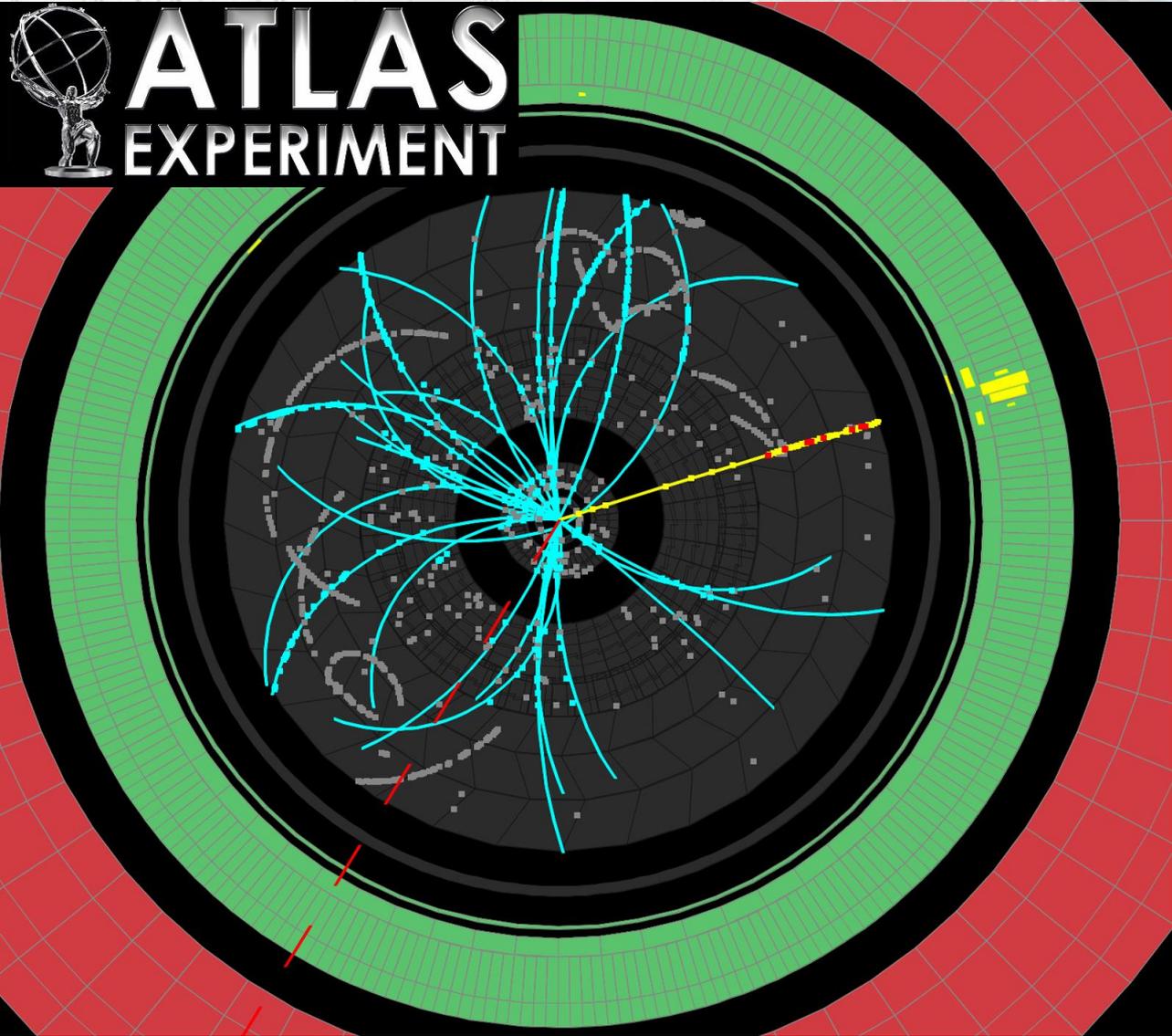


Esercizio: riconoscere le diverse particelle  
negli eventi seguenti

Ricordarsi i vari rivelatori  
e la regola della mano sinistra per il campo magnetico (pag 30)

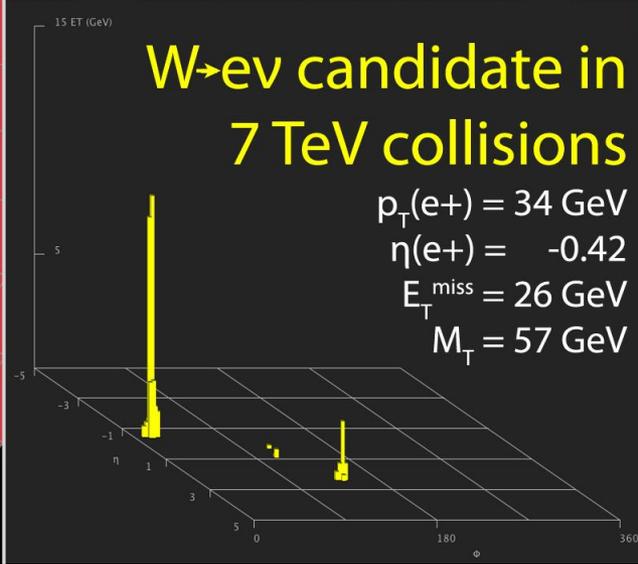
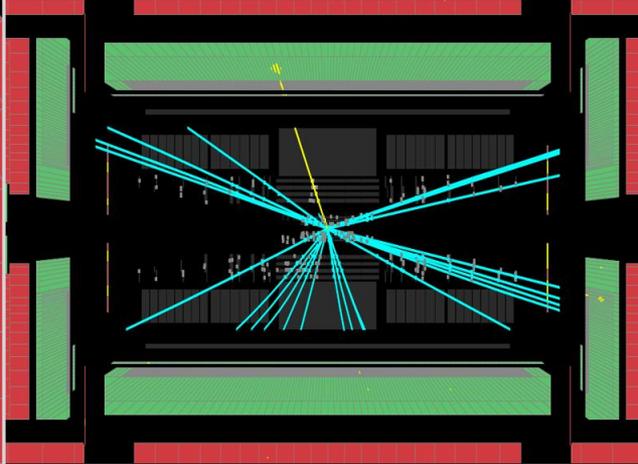


# ATLAS EXPERIMENT



Run Number: 152409, Event Number: 5966801

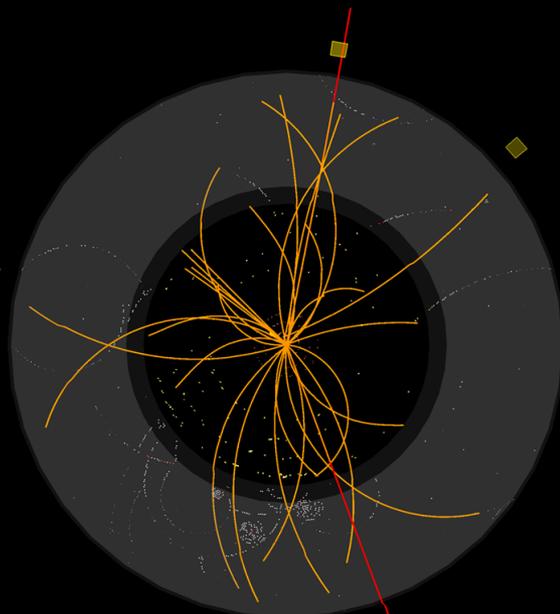
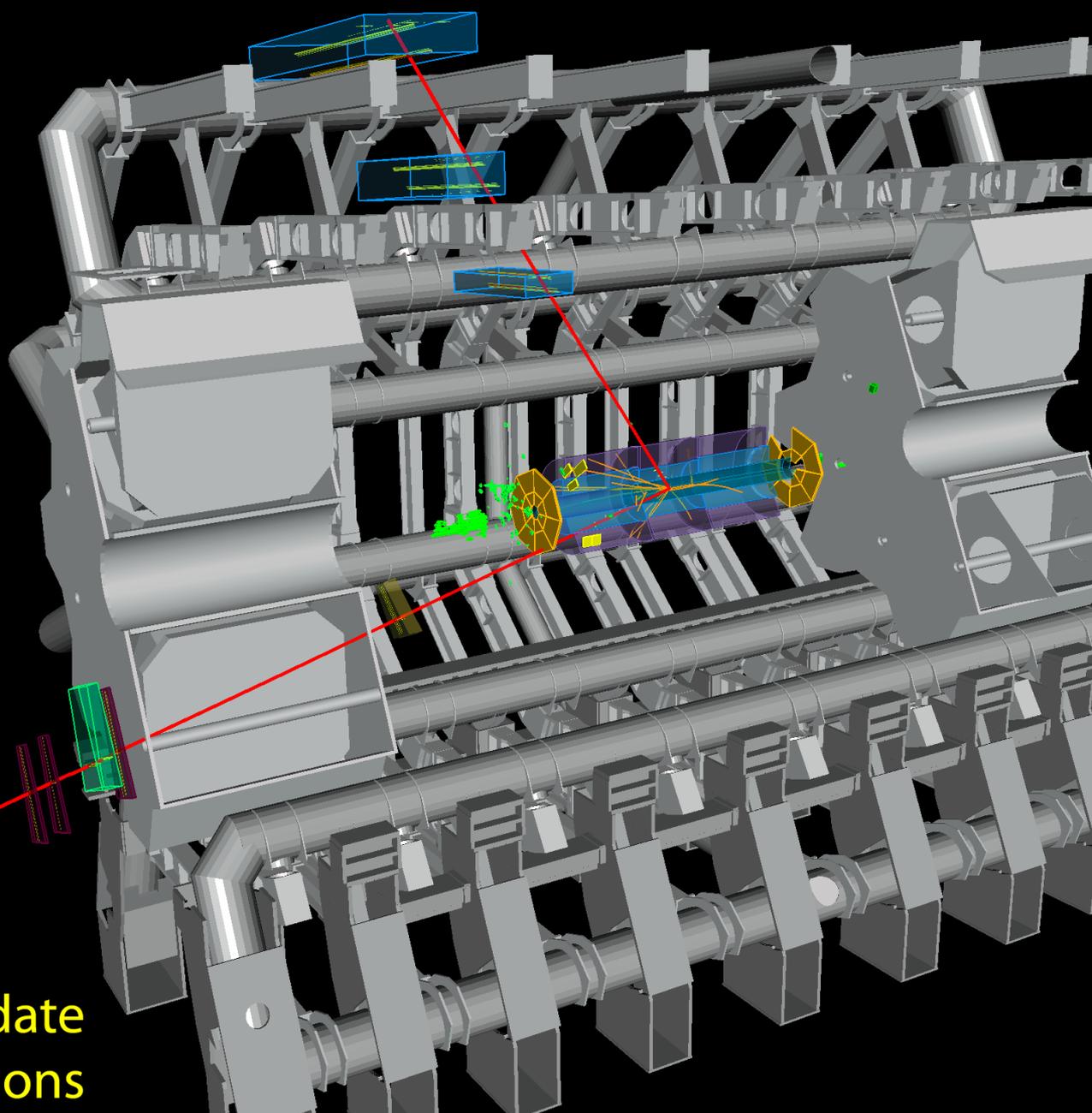
Date: 2010-04-05 06:54:50 CEST



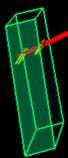


# ATLAS EXPERIMENT

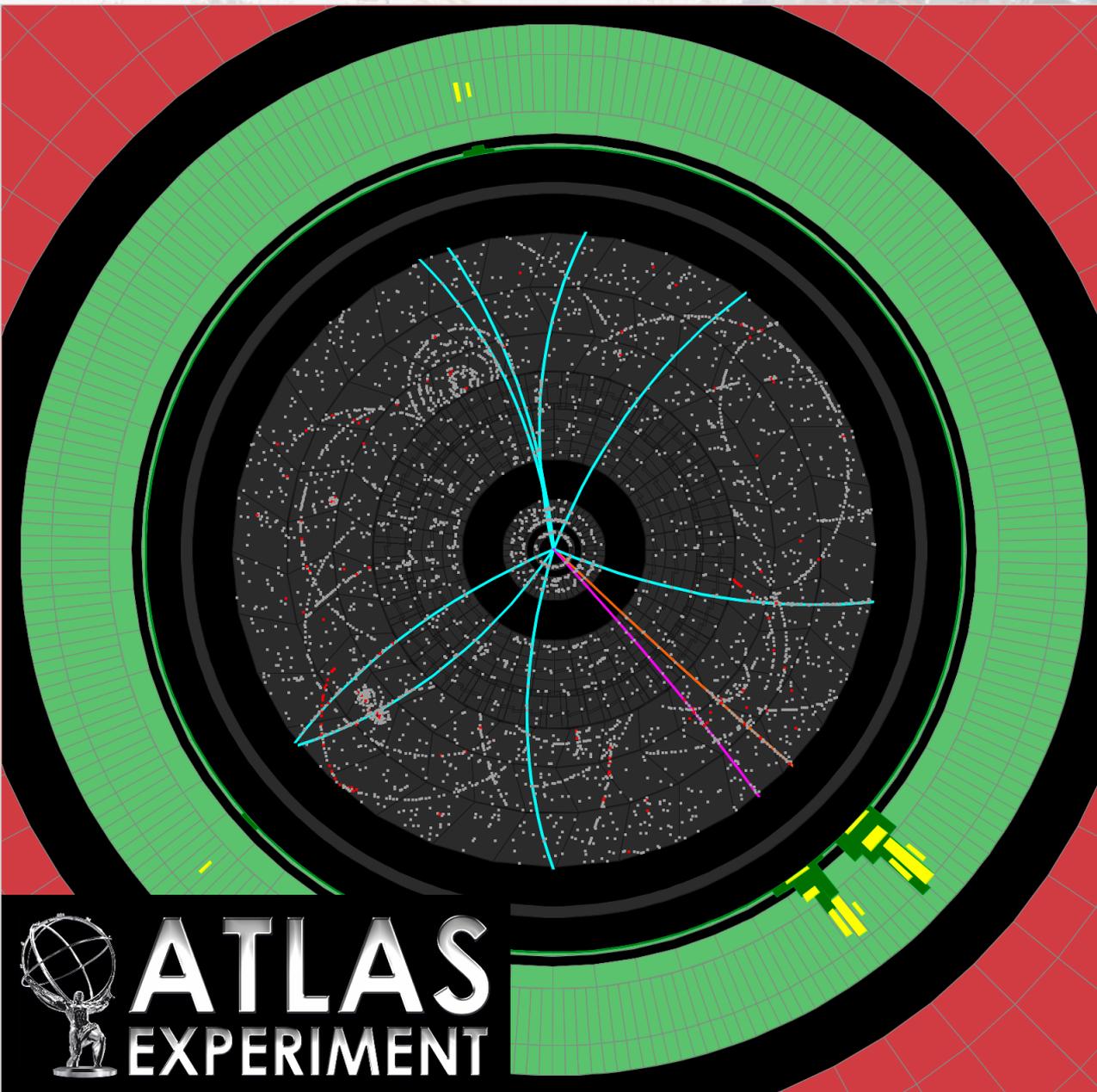
Run: 154822, Event: 14321500  
Date: 2010-05-10 02:07:22 CEST



$p_T(\mu^-) = 27 \text{ GeV}$   $\eta(\mu^-) = 0.7$   
 $p_T(\mu^+) = 45 \text{ GeV}$   $\eta(\mu^+) = 2.2$   
 $M_{\mu\mu} = 87 \text{ GeV}$



**Z $\rightarrow\mu\mu$  candidate  
in 7 TeV collisions**

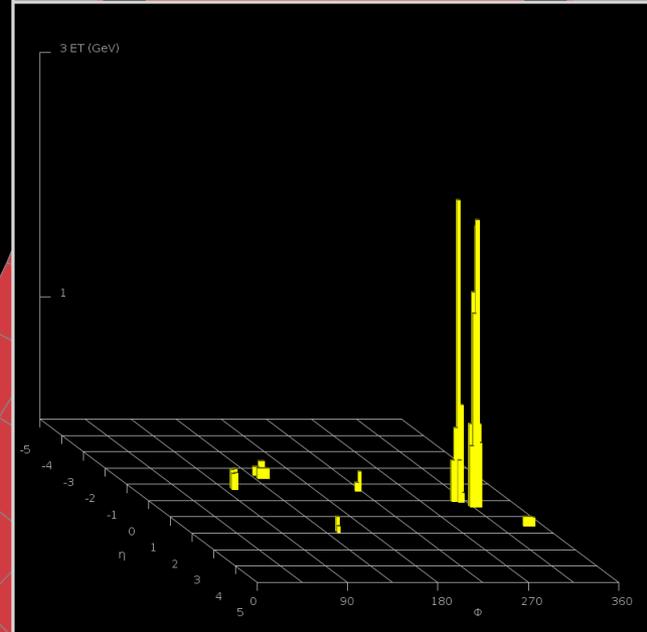
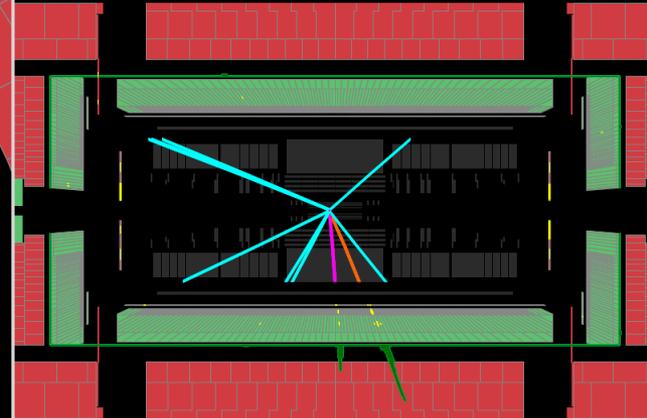


Run Number: 160736, Event Number: 3446804

Date: 2010-08-04 05:18:18 CEST

**$J/\psi \rightarrow ee$  candidate in 7 TeV collisions**

**$M_{ee} = 3.17$  GeV**

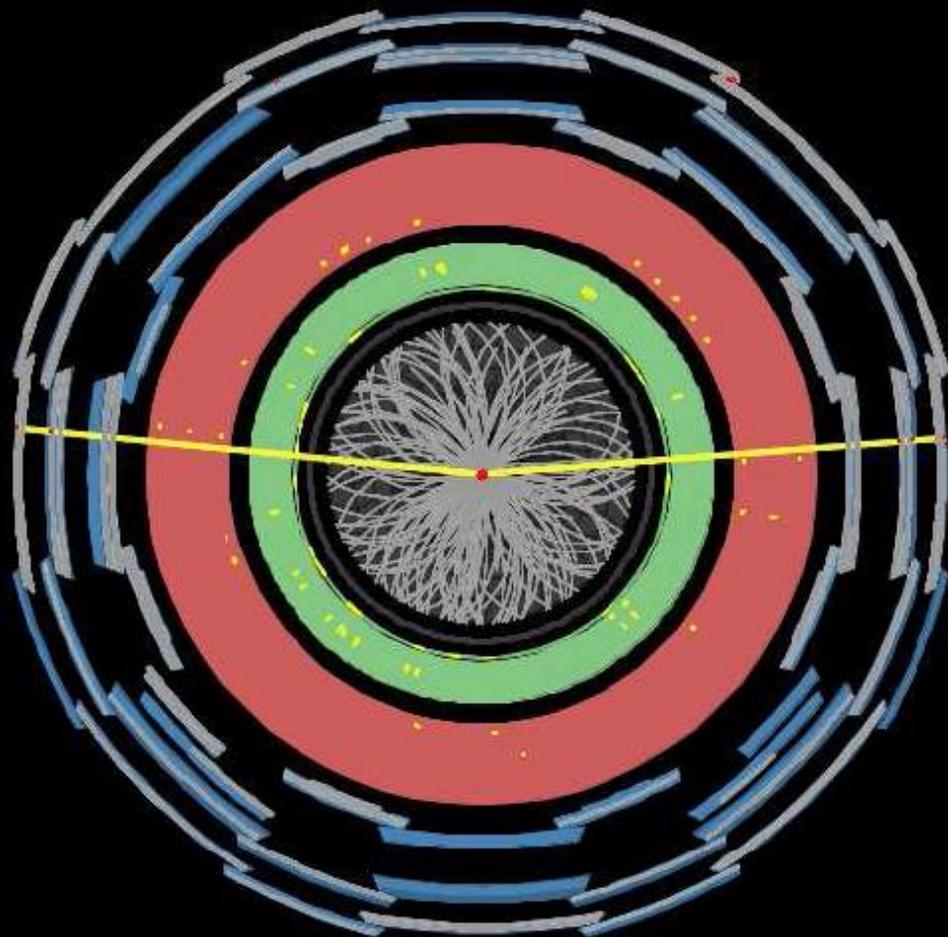


**ATLAS  
EXPERIMENT**

$Z \rightarrow \mu\mu$   
candidate with  
10 additional  
soft “pile-up”  
interactions.

High  $p_T$   
leptons allow  
us to select  
the interesting  
EW events.

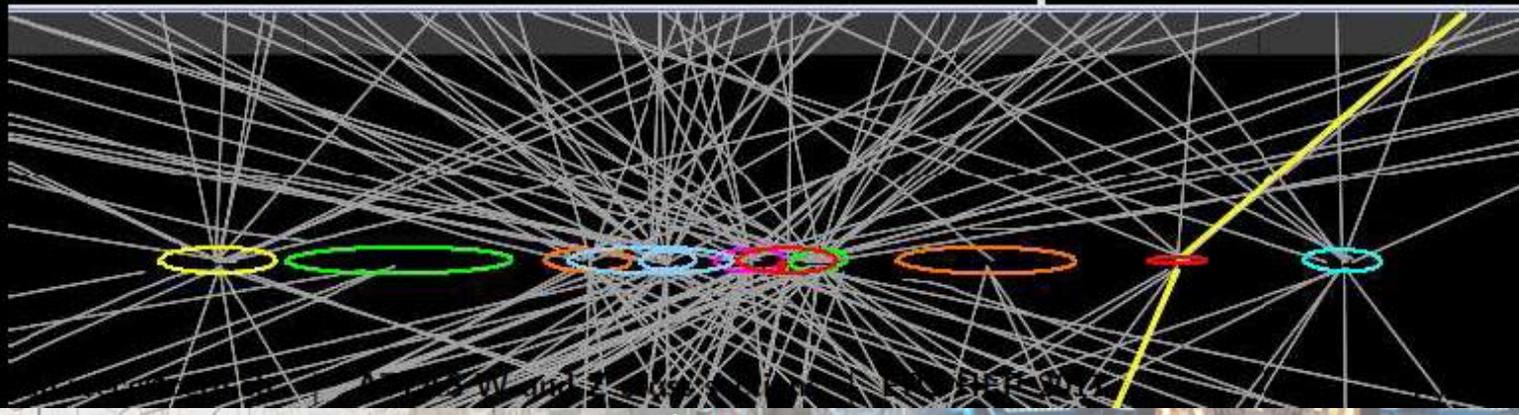
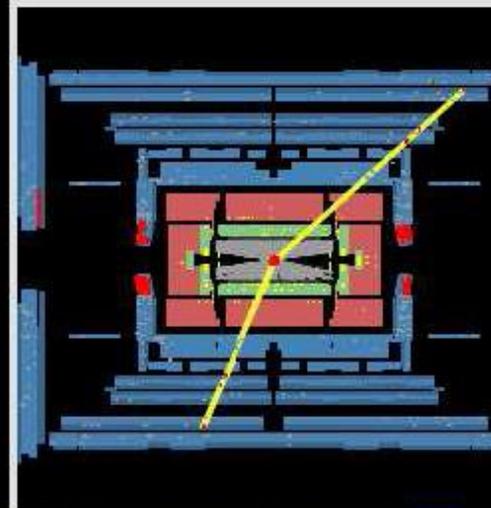
Conversely,  
 $W/Z$  provide  
events for  
understanding  
high  $p_T$  lepton  
performance.



# ATLAS EXPERIMENT

Run Number: 180164, Event Number: 14635109

Date: 2011-04-24 01:43:39 CEST

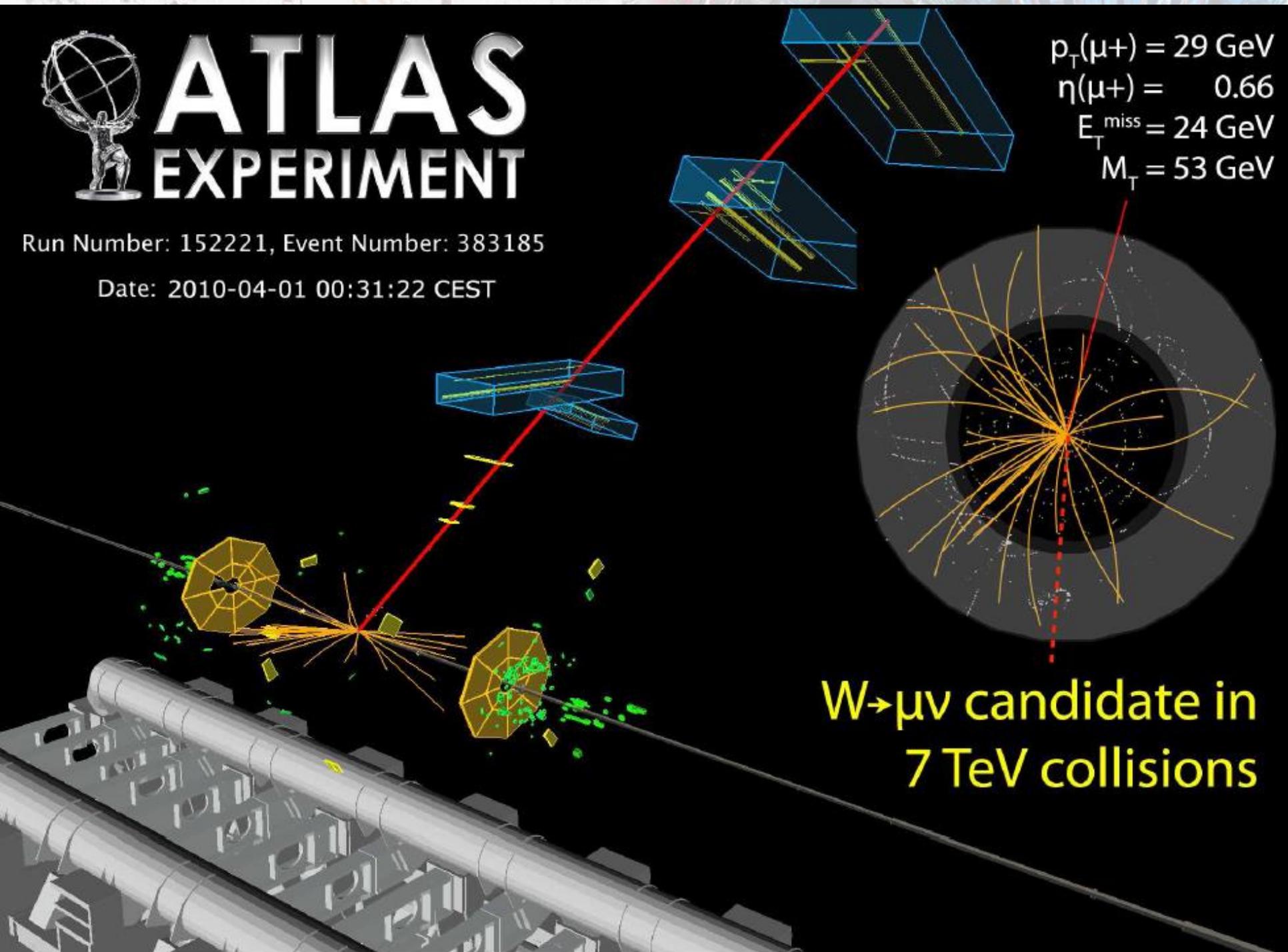




# ATLAS EXPERIMENT

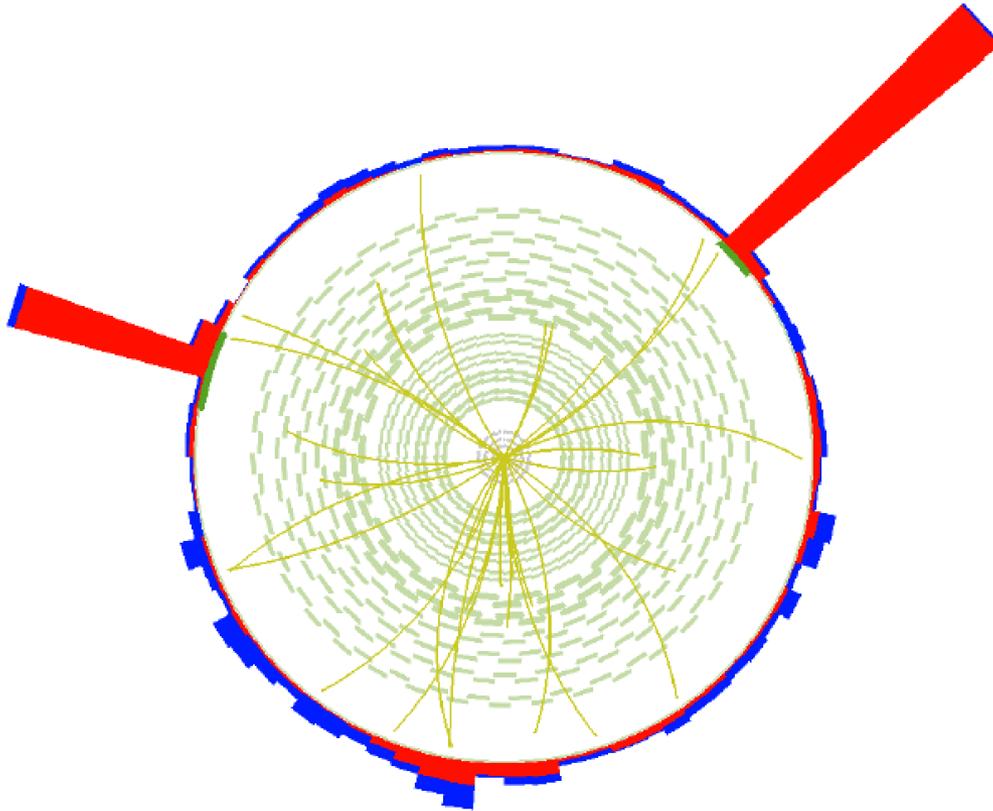
Run Number: 152221, Event Number: 383185

Date: 2010-04-01 00:31:22 CEST



$p_T(\mu^+) = 29 \text{ GeV}$   
 $\eta(\mu^+) = 0.66$   
 $E_T^{\text{miss}} = 24 \text{ GeV}$   
 $M_T = 53 \text{ GeV}$

$W \rightarrow \mu\nu$  candidate in  
7 TeV collisions



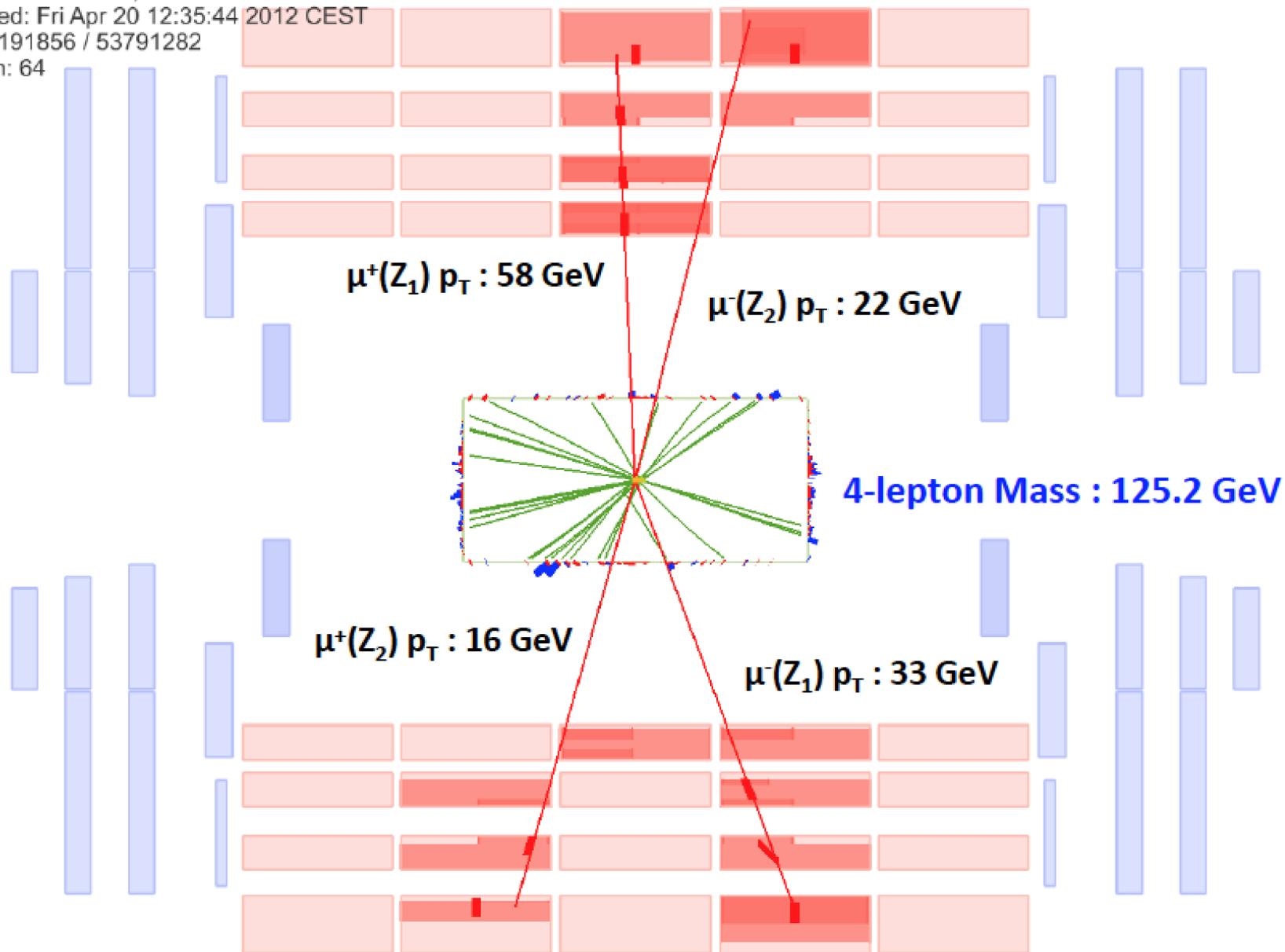
CMS Experiment at LHC, CERN  
Data recorded: Sun May 13 22:08:14 2012 CEST  
Run/Event: 194108 / 564224000  
Lumi section: 575

CMS Experiment at LHC, CERN

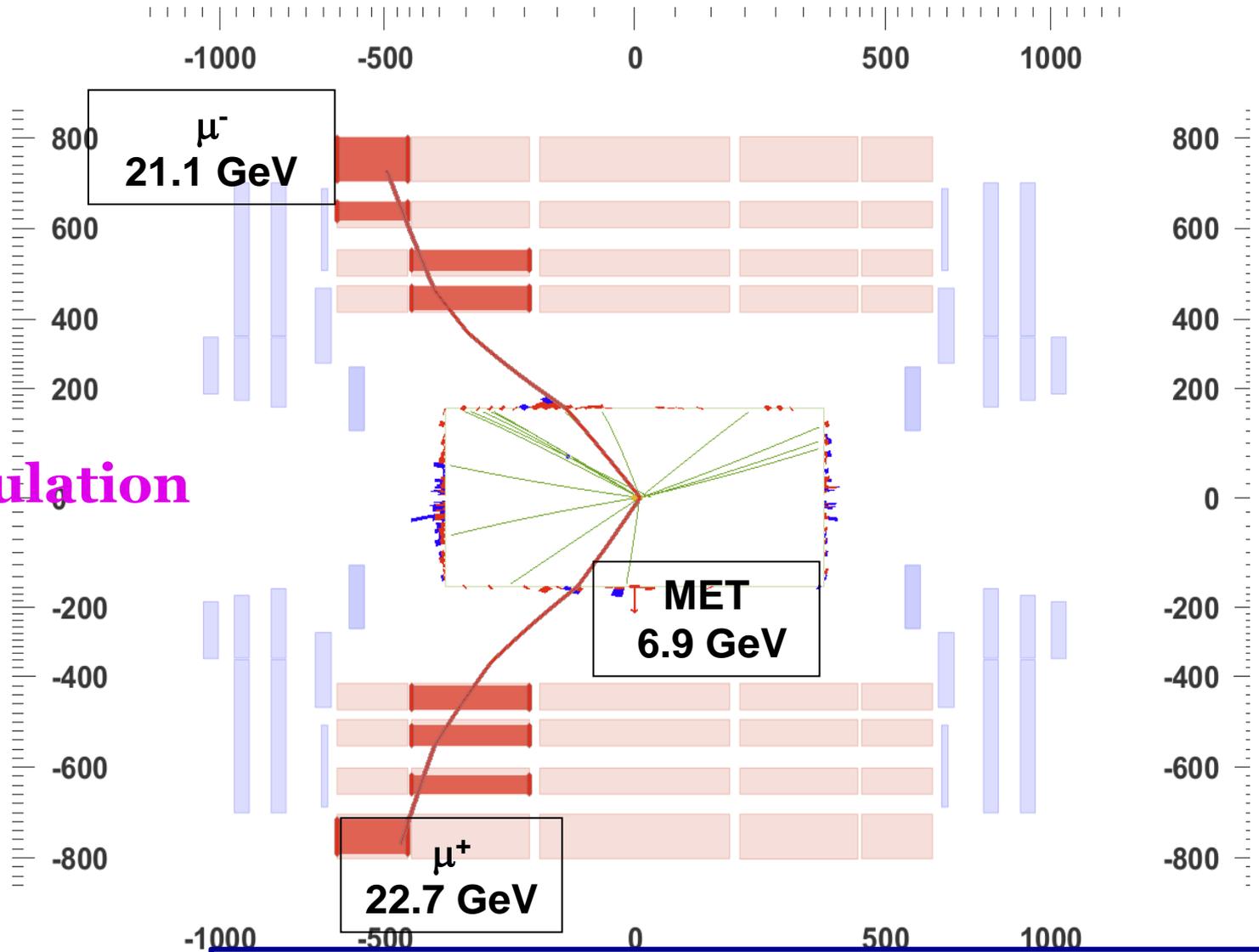
Data recorded: Fri Apr 20 12:35:44 2012 CEST

Run/Event: 191856 / 53791282

Lumi section: 64



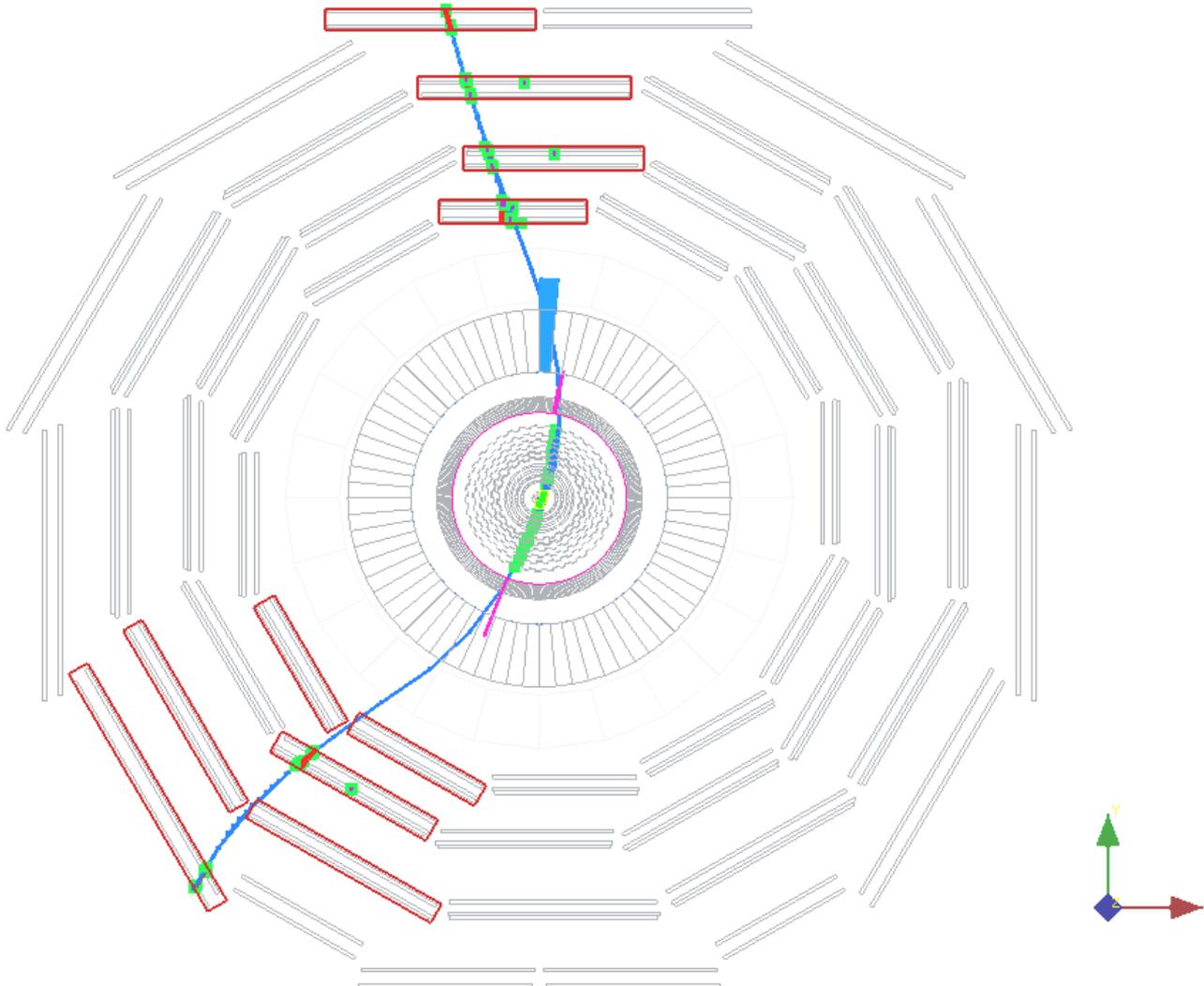
Simulation



drastically reduced by requiring MET in the event

# CRAFT event Cosmic Ray Four Tesla

Run 66748, Event 8894786, LS 160, Orbit 167263116, BX 1915



# Come si "vedono" le particelle?

Sfruttando i meccanismi con cui interagiscono con la materia

- Esempio: le particelle cariche ionizzano la materia al loro passaggio



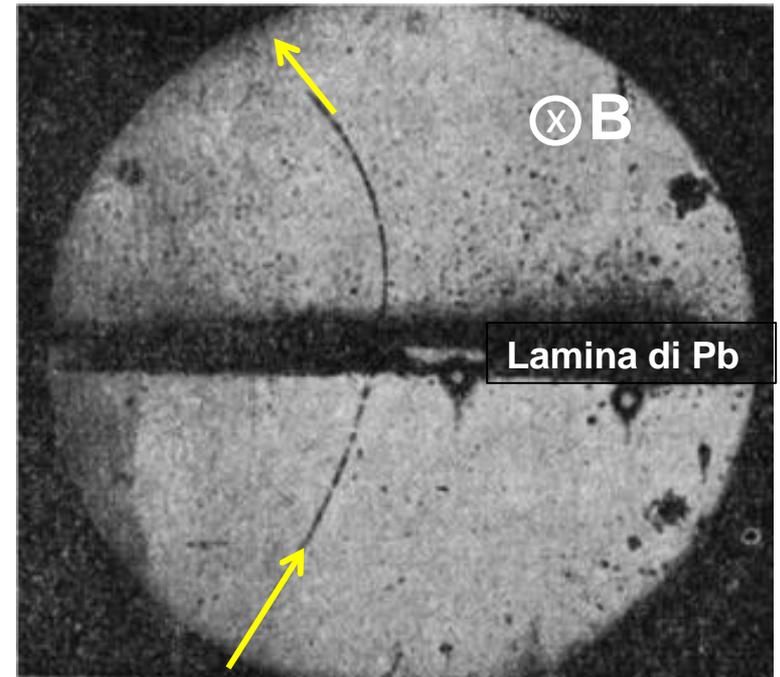
**Camera a nebbia** (Wilson, 1911; premio Nobel 1927):

Camera riempita di vapore saturo che condensa a seguito della ionizzazione, rendendo visibile la traccia

## Scoperta del positrone ( $e^+$ )

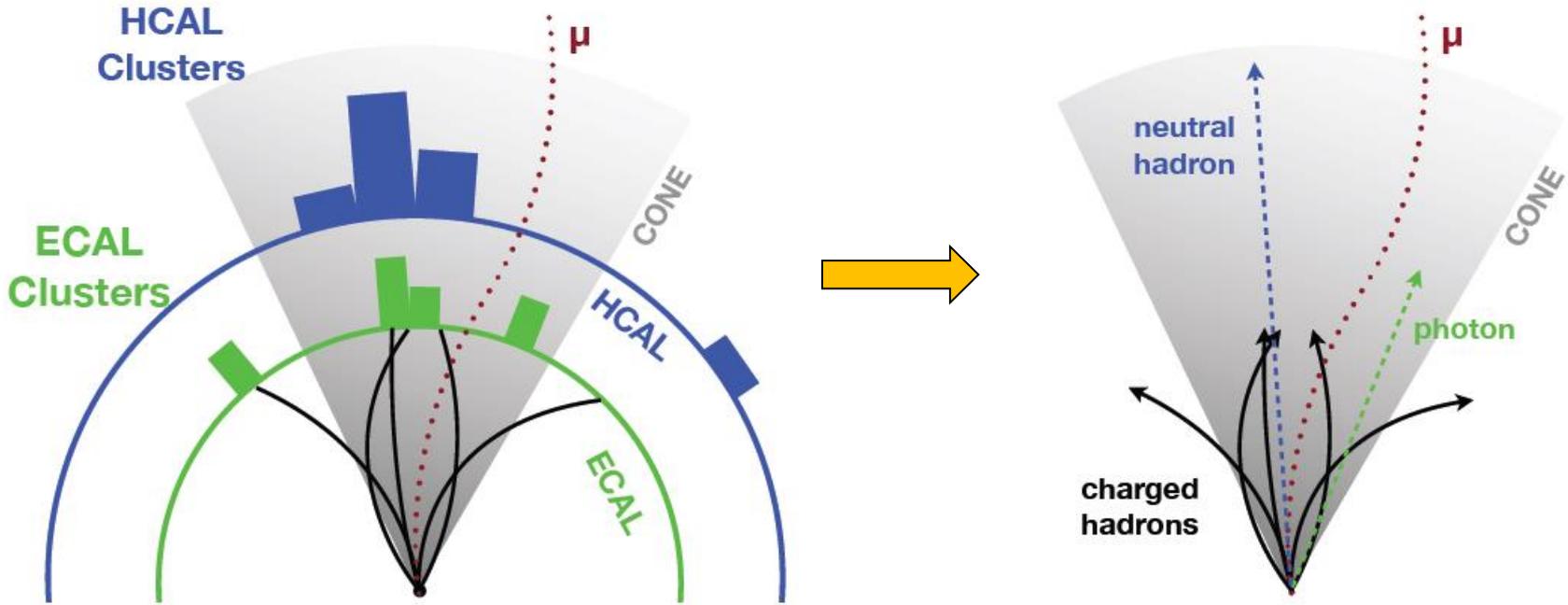
(Anderson, 1932; premio Nobel 1936):  
Osservando *raggi cosmici* attraverso una camera a nebbia immersa in un campo magnetico che ne curva la traiettoria, con una lastra di piombo per assorbire parte dell'energia

(1928 Dirac introduced the anti-matter)





# Descrizione globale dell'evento



Associare tutte le informazioni disponibili in una descrizione globale dell'evento

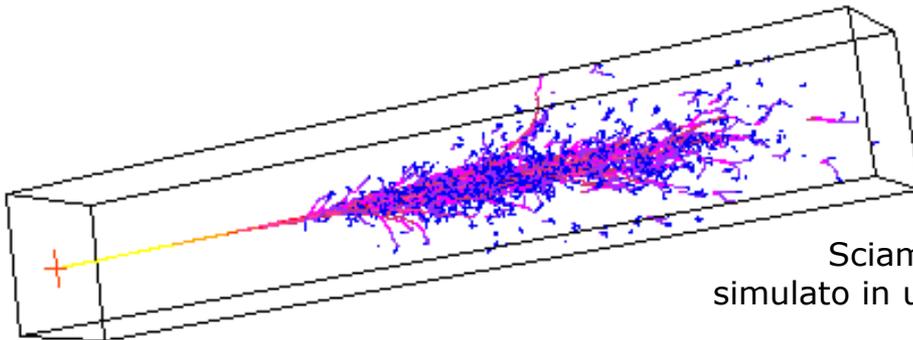
- Lista di **hit** → lista di **tracce/cluster** → Lista di **muoni, elettroni, fotoni, adroni carichi e neutri** → **jets e missing energy**

# Simulazione del detector

Per poter interpretare i dati raccolti, è necessario confrontarli con simulazioni dei processi fisici già noti, e quelli ipotizzati

1. Eventi fisici simulati: **generatori Monte Carlo**
2. Simulazione dell'**interazione delle particelle con il rivelatore**
  - Ogni particella viene seguita attraverso il rivelatore (GEANT) in un modello dettagliato di tutto l'apparato
3. **Simulazione dei segnali prodotti** nei rivelatori

Risultato: dati simulati identici a quelli reali



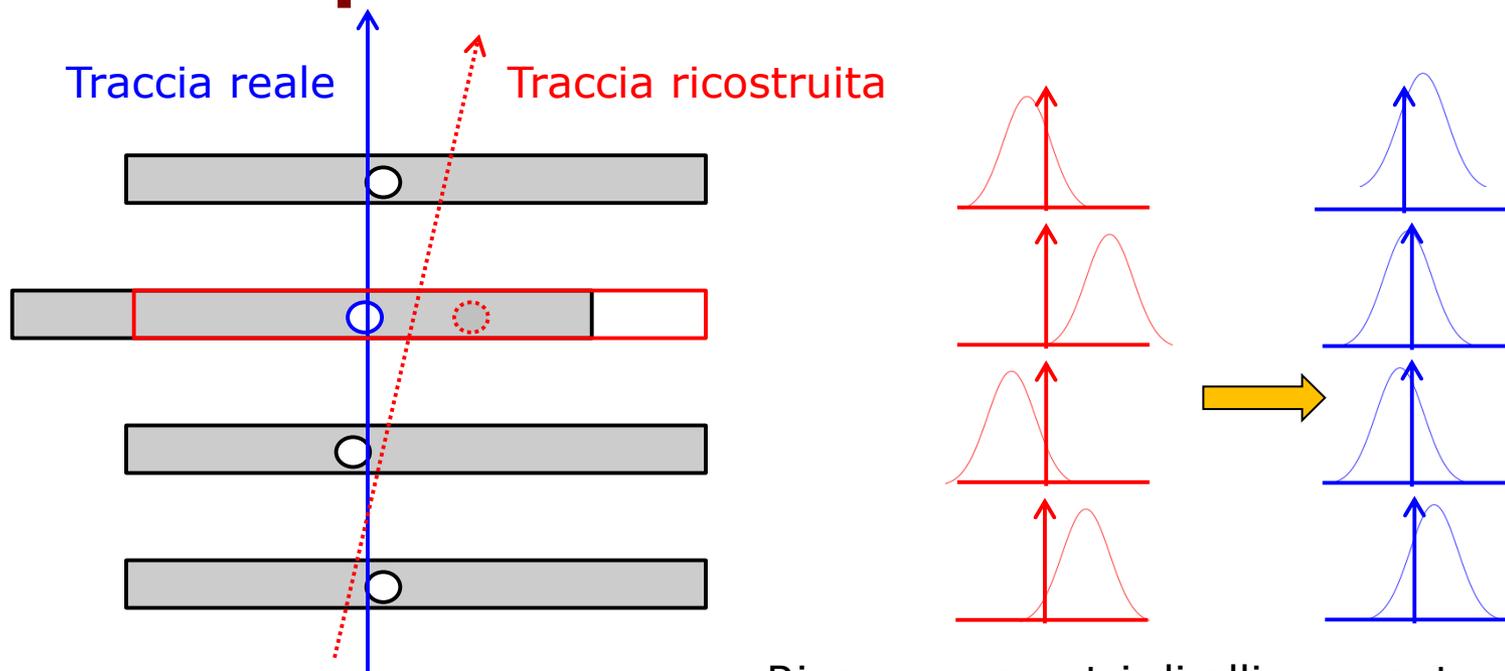
Sciame elettromagnetico  
simulato in un cristallo di  $\text{PbWO}_4$

# Capire il rivelatore con i dati

Eventi prodotti da processi "noti" sono preziosi per studiare e migliorare le prestazioni del rivelatore

- Calibrazioni, allineamenti, misure di efficienze dai dati

## Esempio: Allineamento dei tracciatori



Ricavo parametri di allineamento dai residui (=misura - posizione della traccia)

# Esempio: momentum scale

J. Beringer et al. (Particle Data Group), PR D86, 010001 (2012)

**Z**

$J = 1$

Charge = 0

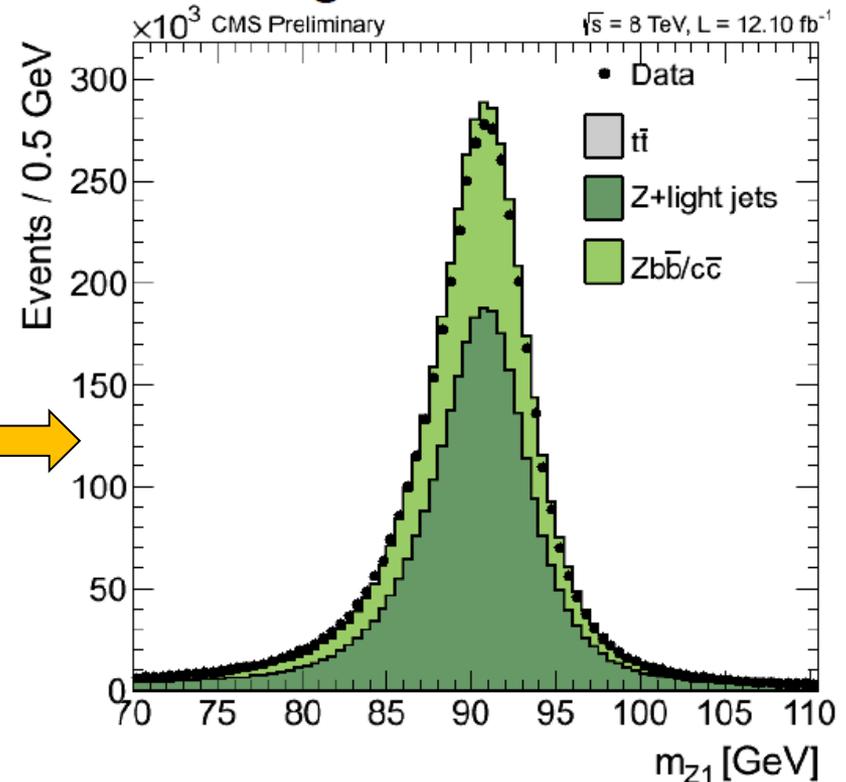
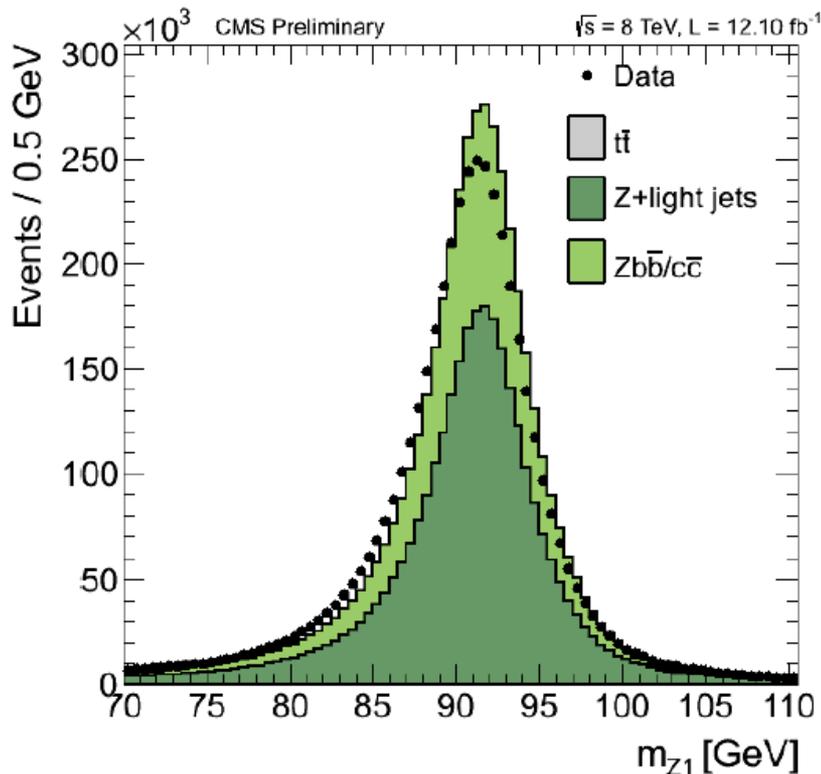
Mass  $m = 91.1876 \pm 0.0021$  GeV [a]

Full width  $\Gamma = 2.4952 \pm 0.0023$  GeV

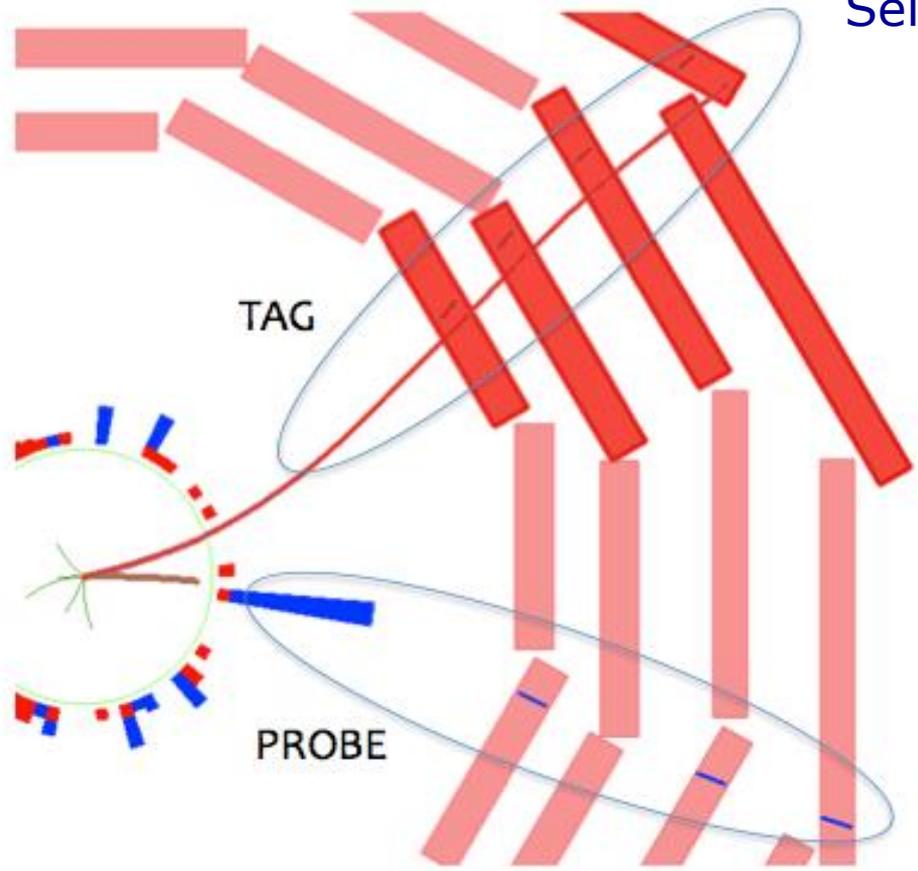
$\Gamma(\ell^+\ell^-) = 83.904 \pm 0.086$  MeV [b]

$\Gamma(\text{invisible}) = 499.0 \pm 1.5$  MeV [e]

Usando Eventi  $Z \rightarrow ee$  per  
costringere la scala in  
energia degli elettroni



# Misura dell'efficienza dai dati: "Tag-and-probe"



Selezione risonanze note ( $Z, J/\psi, Y \rightarrow \ell\ell$ ) sulla base di  $m_{\ell\ell}$

- richiedendo due tracce di cui almeno una soddisfa criteri di identificazione ("TAG").
- Studio l'efficienza di identificazione dell'altra ("PROBE")

