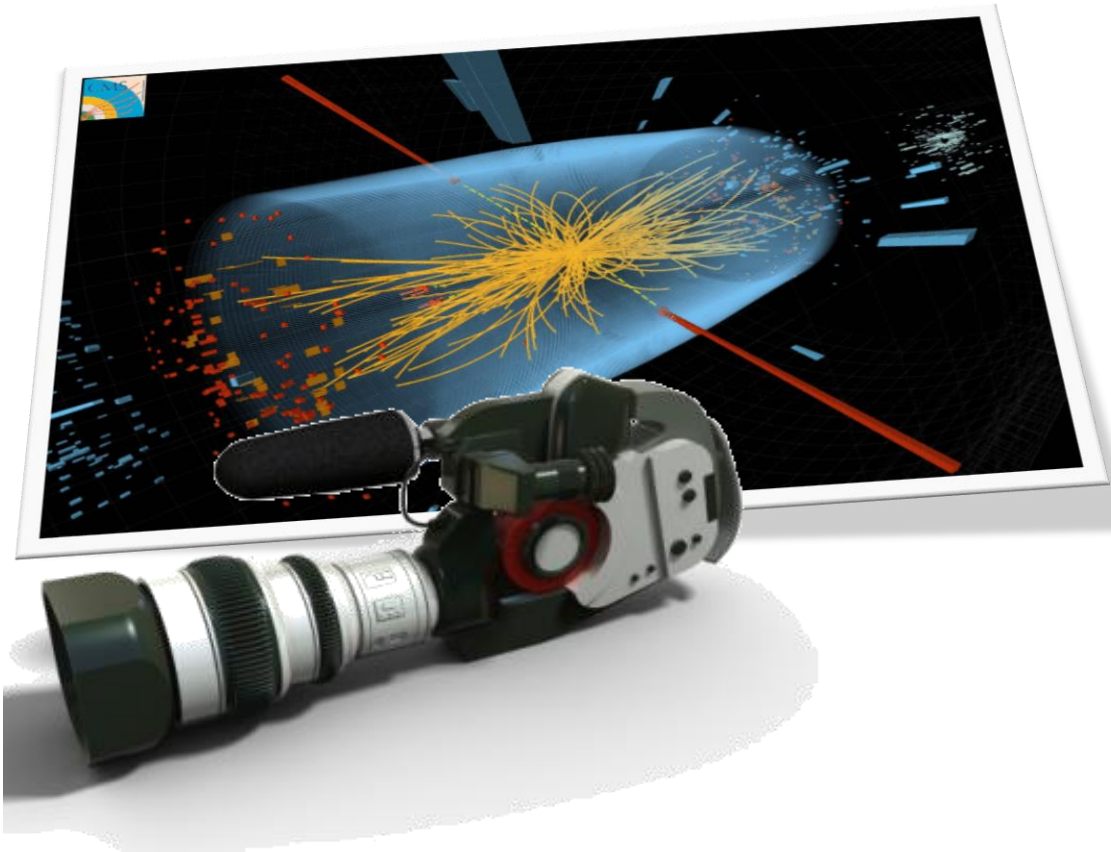


I rivelatori



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):

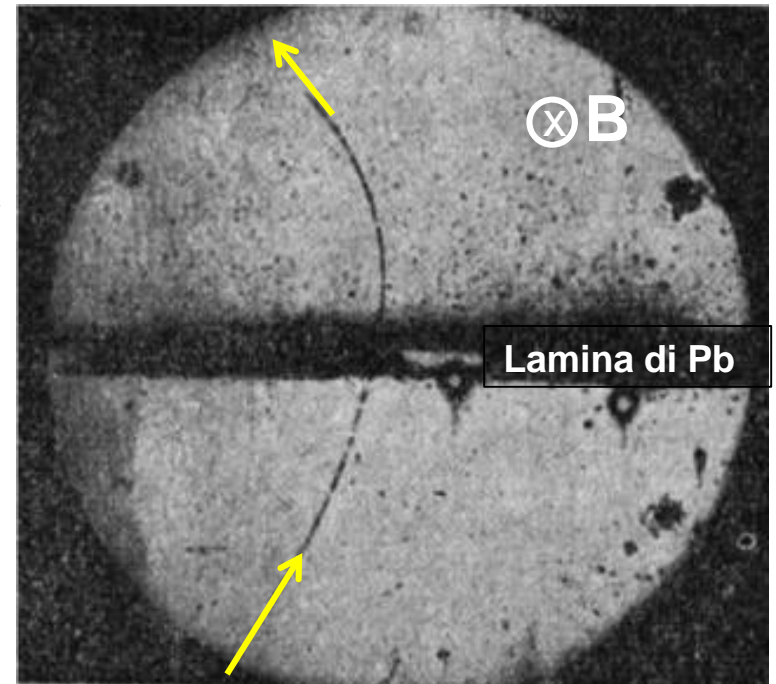
Camera riempita di vapore saturo che condensa a seguito della ionizzazione, rendendo visibile la traccia

Scoperta del positrone (e^+)

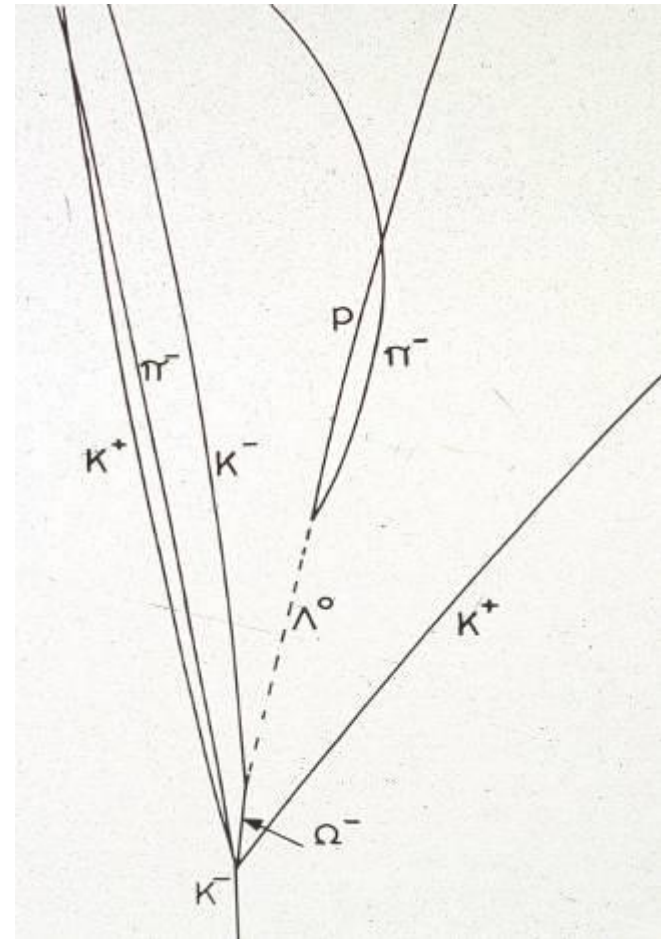
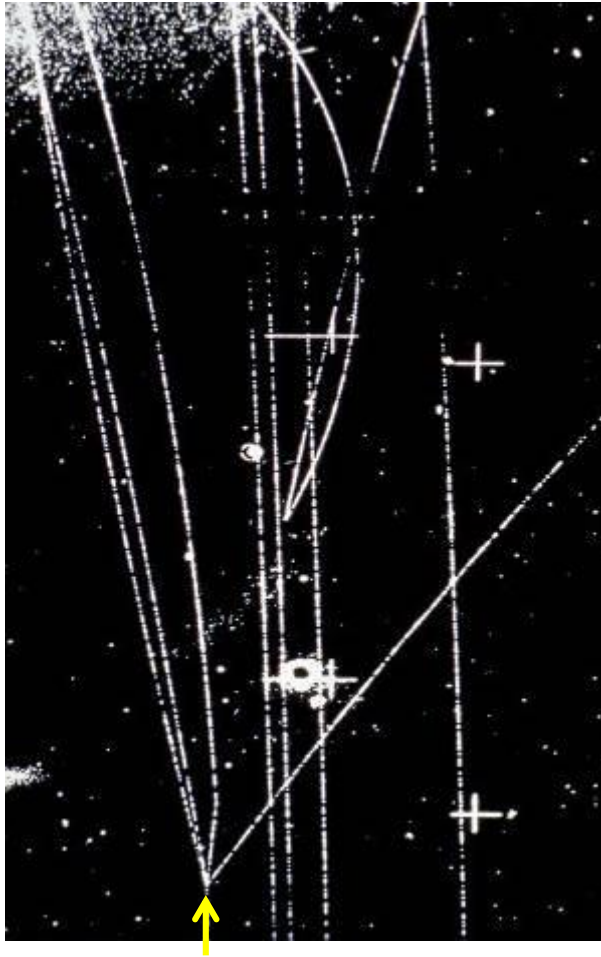
(Anderson, 1932; premio Nobel 1936):

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)

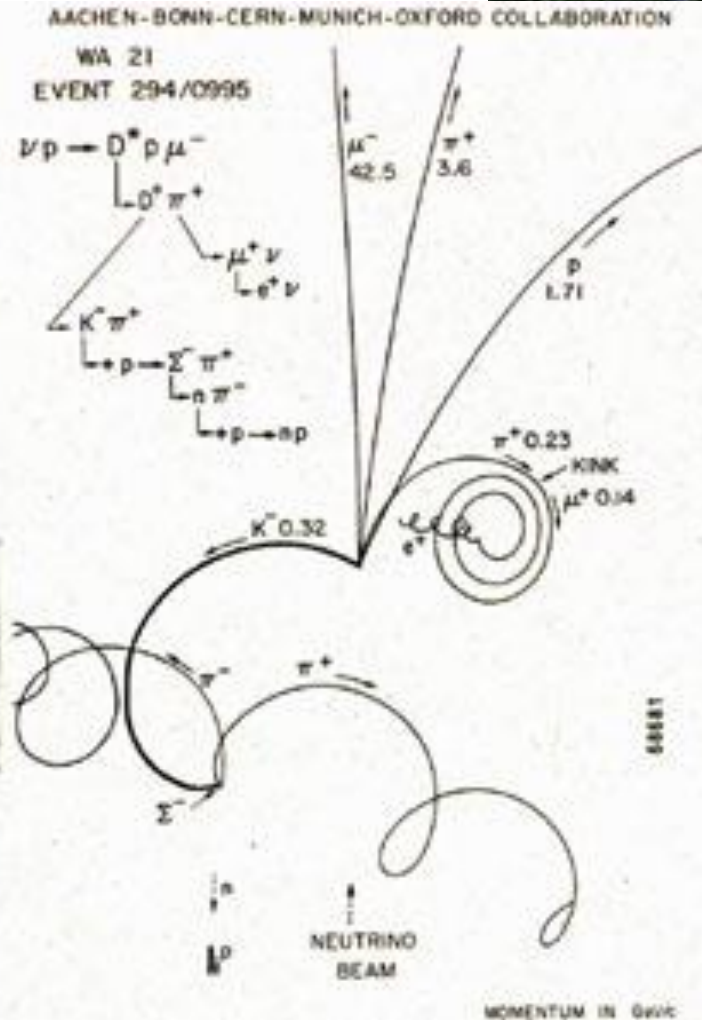
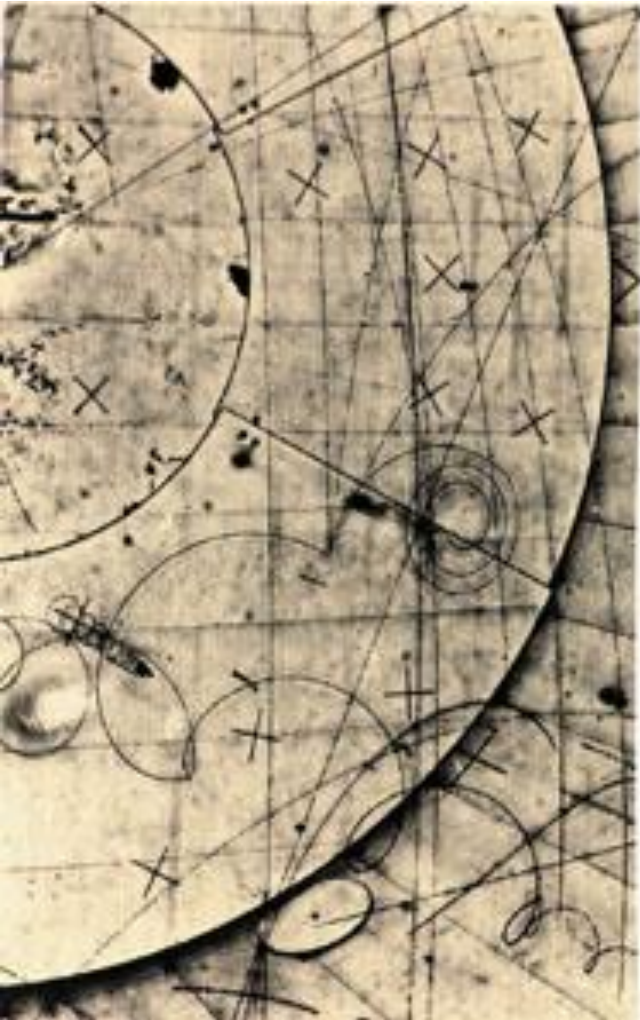


I primi rivelatori: Camere a bolle



Milioni di collisioni fotografate e studiate una ad una..

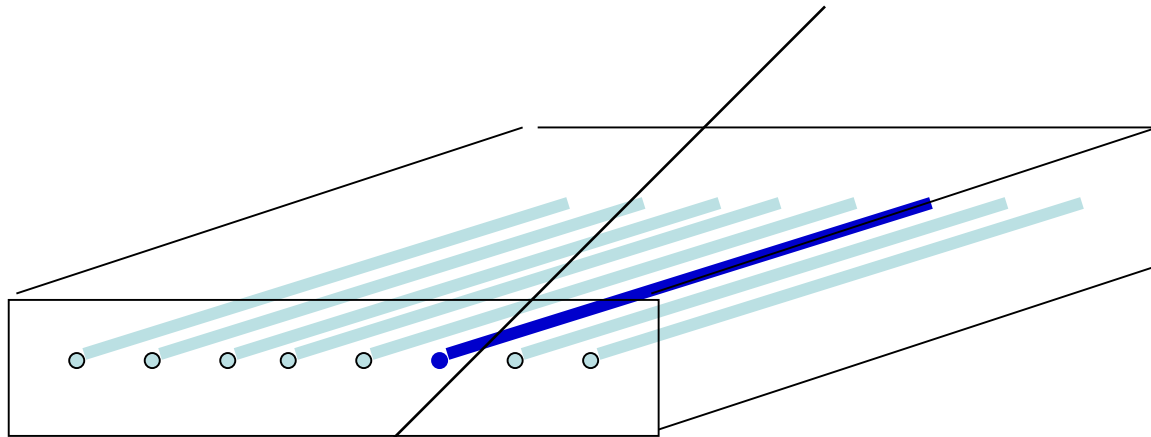
Gargamelle



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

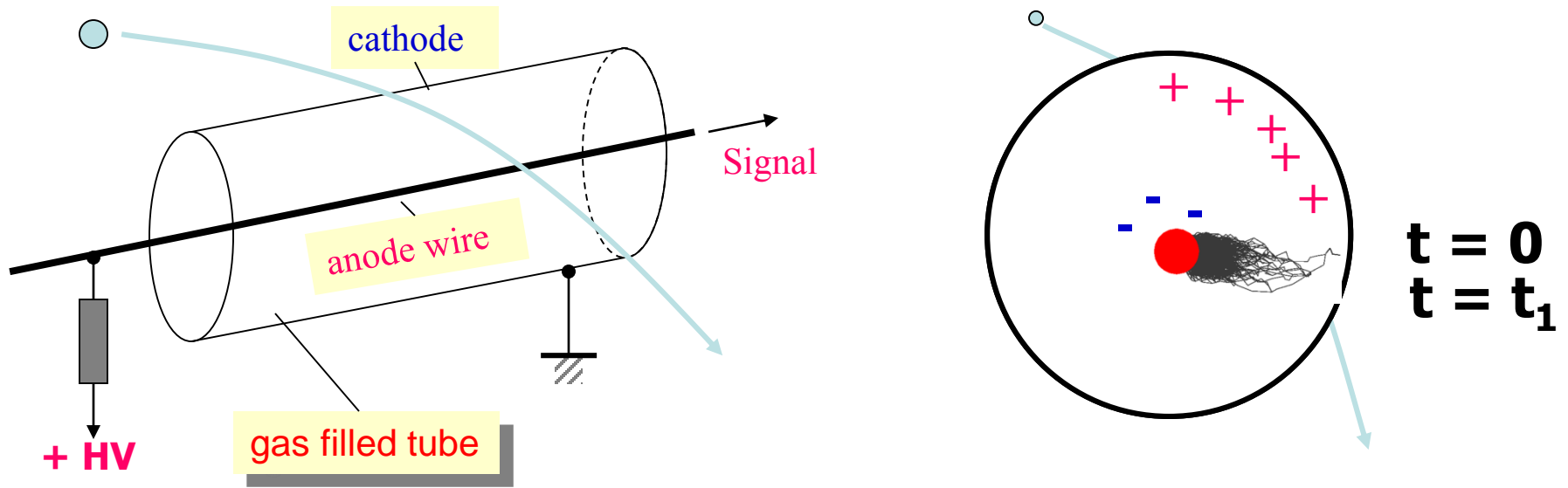


Premio Nobel nel 1992

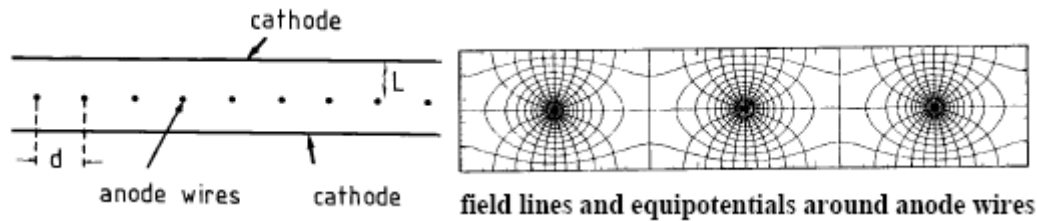
Si passa all'era totalmente elettronica:

- 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....

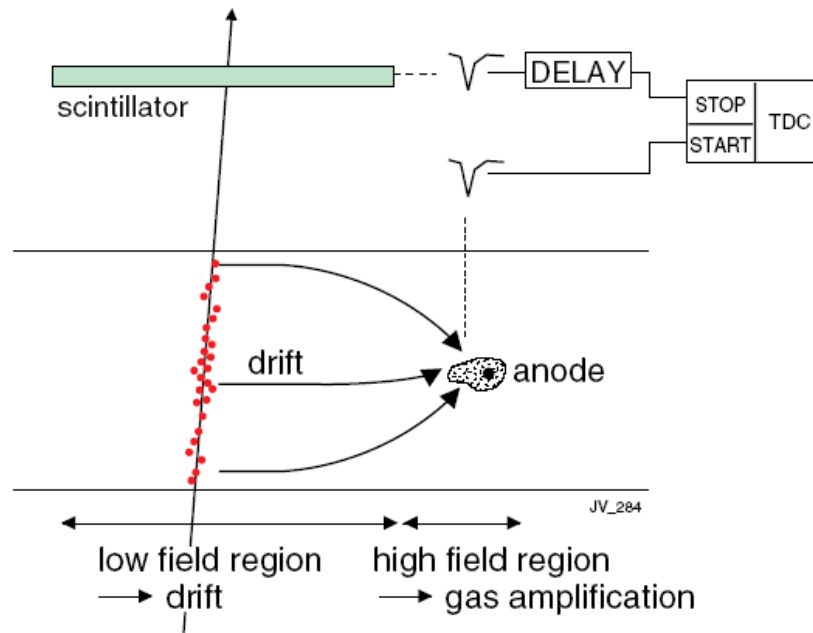


Drift Chamber

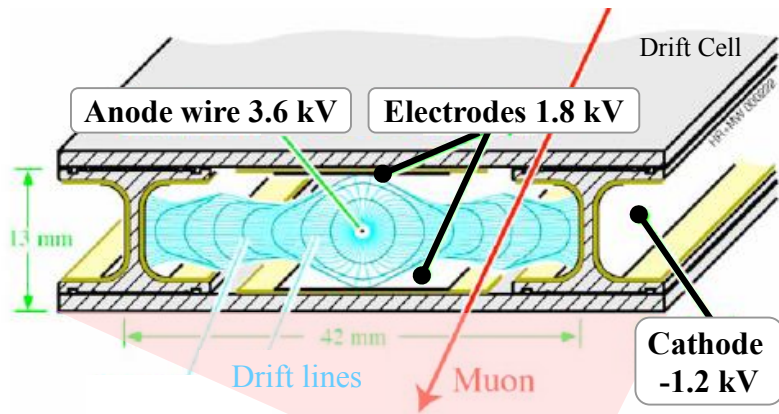
Le camere a fili standard sono limitate nella precisione della misura delle traiettoria dalla distanza tra i fili.

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.

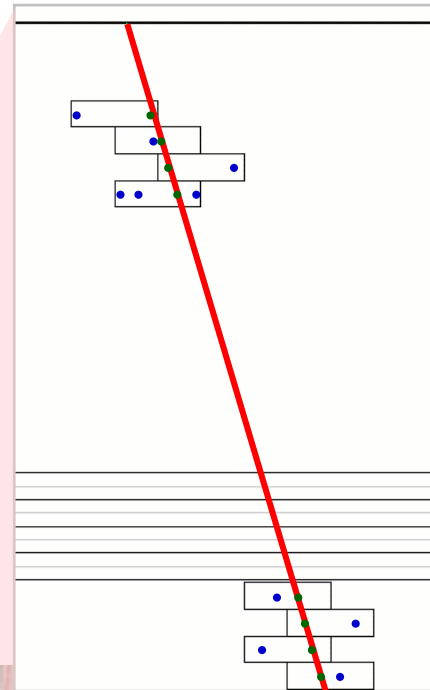
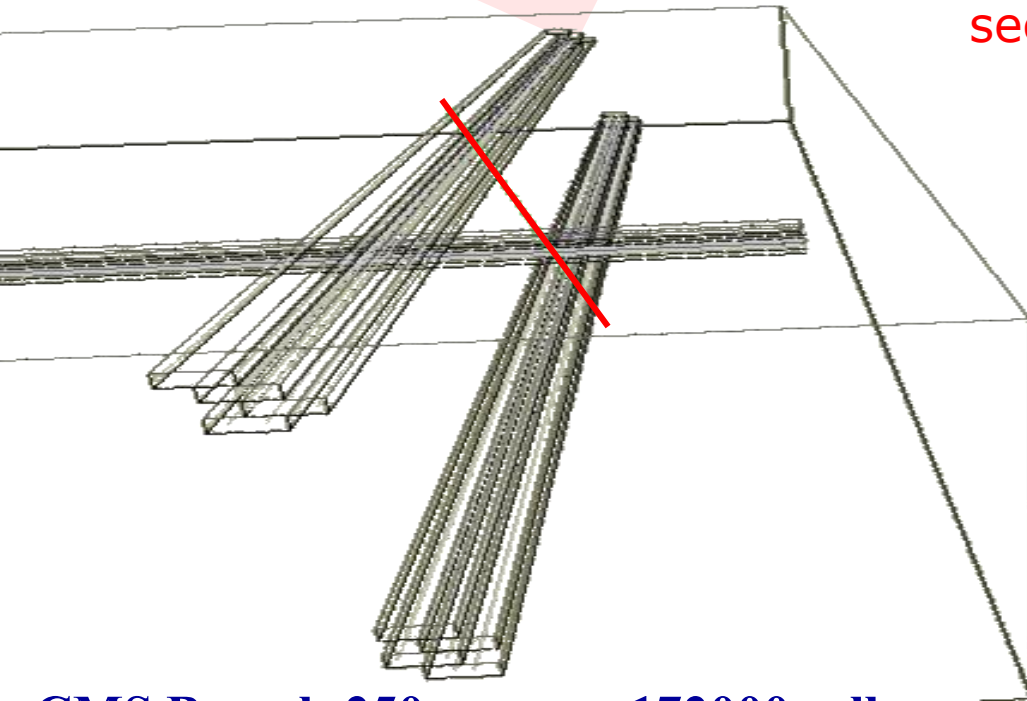


Camere a muoni: es. Drift Tubes



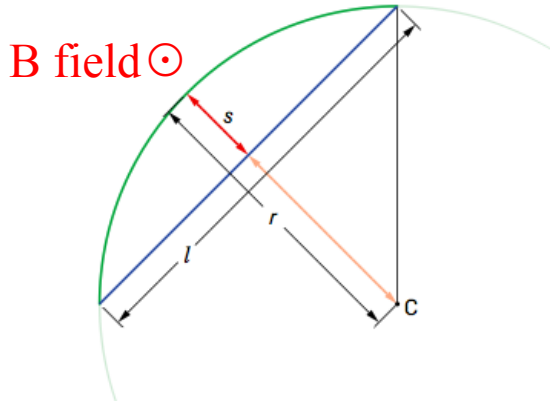
Strati sovrapposti di celle indipendenti

- 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

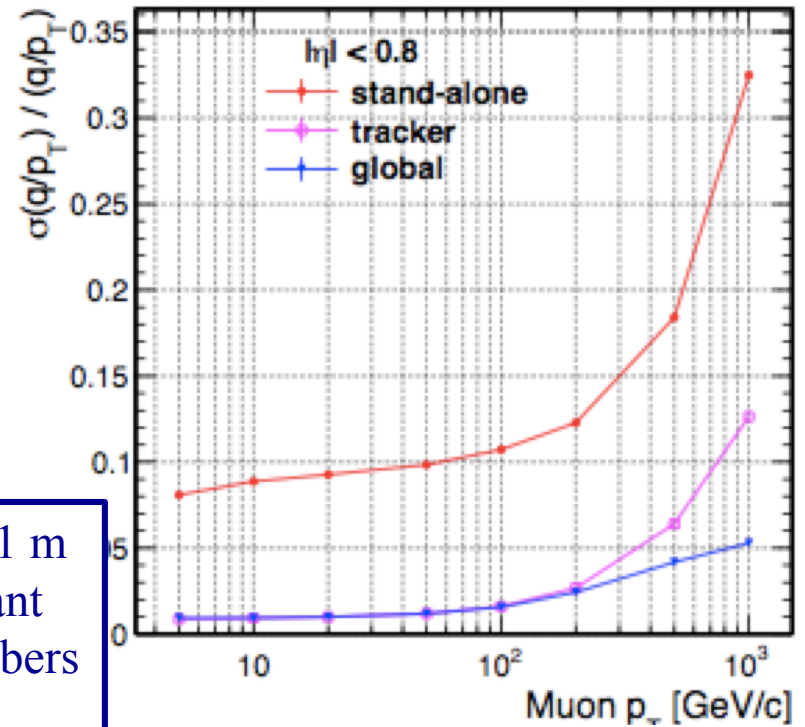


$$r = \frac{\ell^2}{8s} + \frac{s}{2} \gg \frac{\ell^2}{8s} \quad \text{high } P_t$$

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

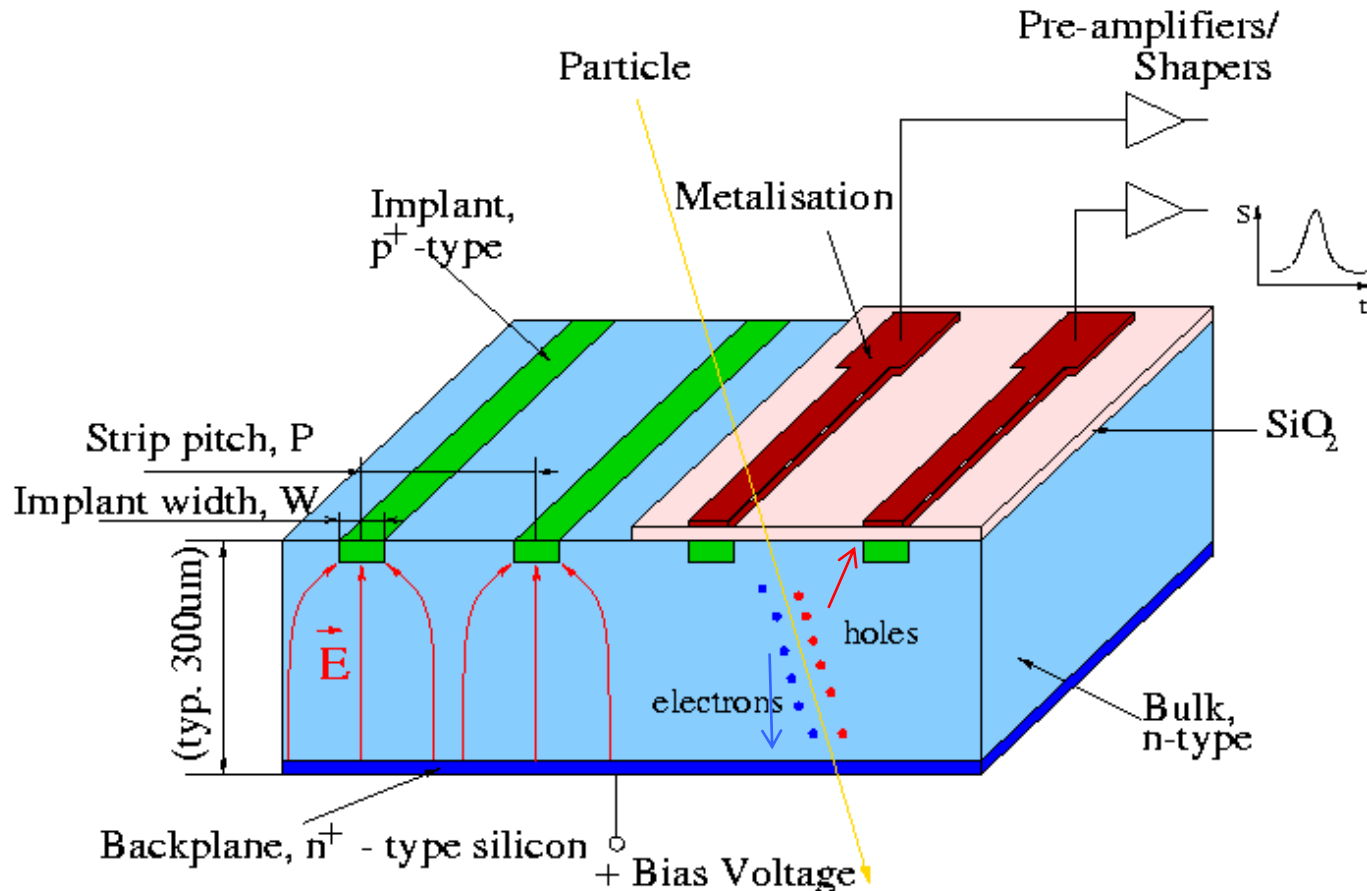
$$\frac{\Delta P_t}{P_t} \propto \frac{\Delta s}{\ell^2} + \dots$$

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



Rivelatori al silicio

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



Rivelatori al vertice

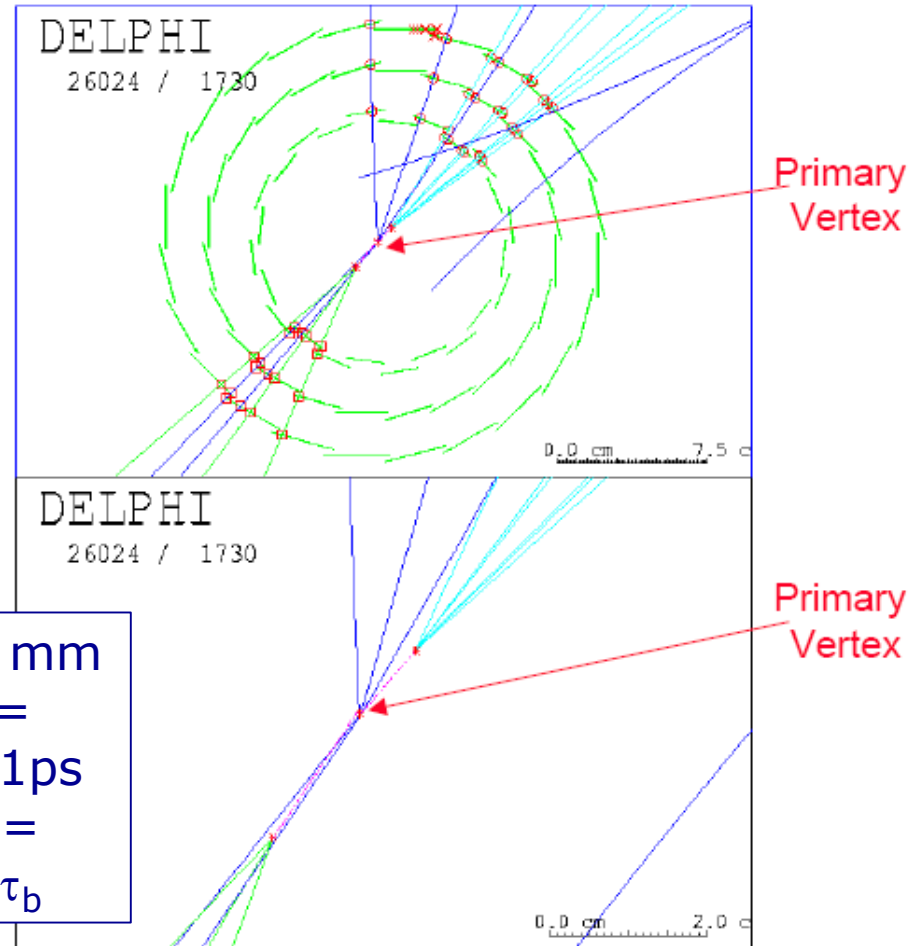
Il rivelatori al silicio permettono misure di posizione con altissime precisioni ($\sim 10\mu\text{m}$)

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

Sono molto costosi (~ 8 euro/cm²) 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

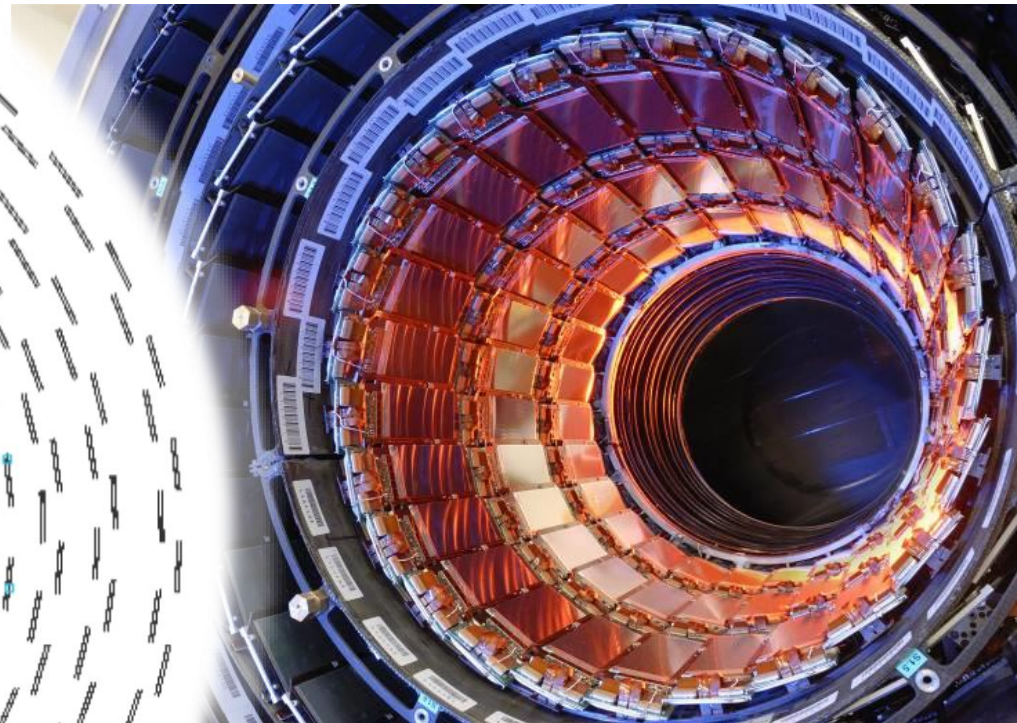
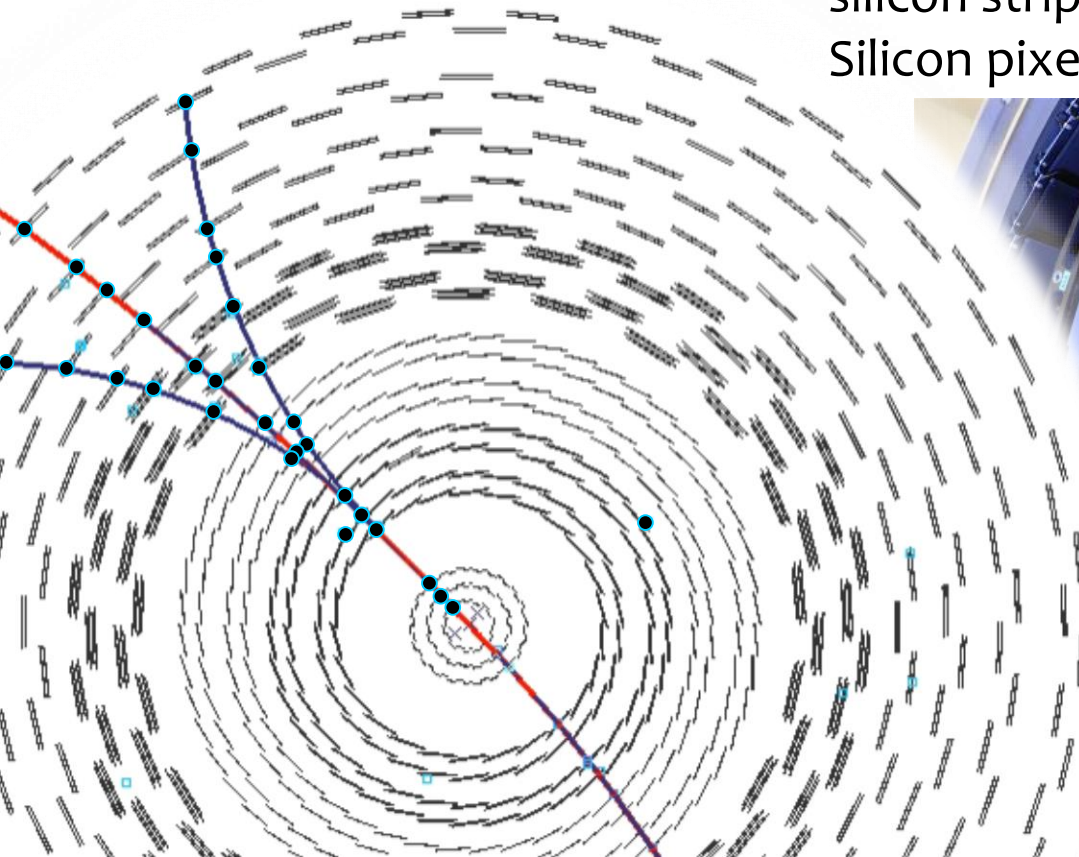
Ricostruzione della traiettoria: dai "punti" in strati successivi

Misura della quantità di moto: dalla curvatura nel campo magnetico

CMS Tracker:

silicon strips: 200 m², 10M canali, $\sigma = 80\text{-}180\ \mu\text{m}$

Silicon pixels: 16m², 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

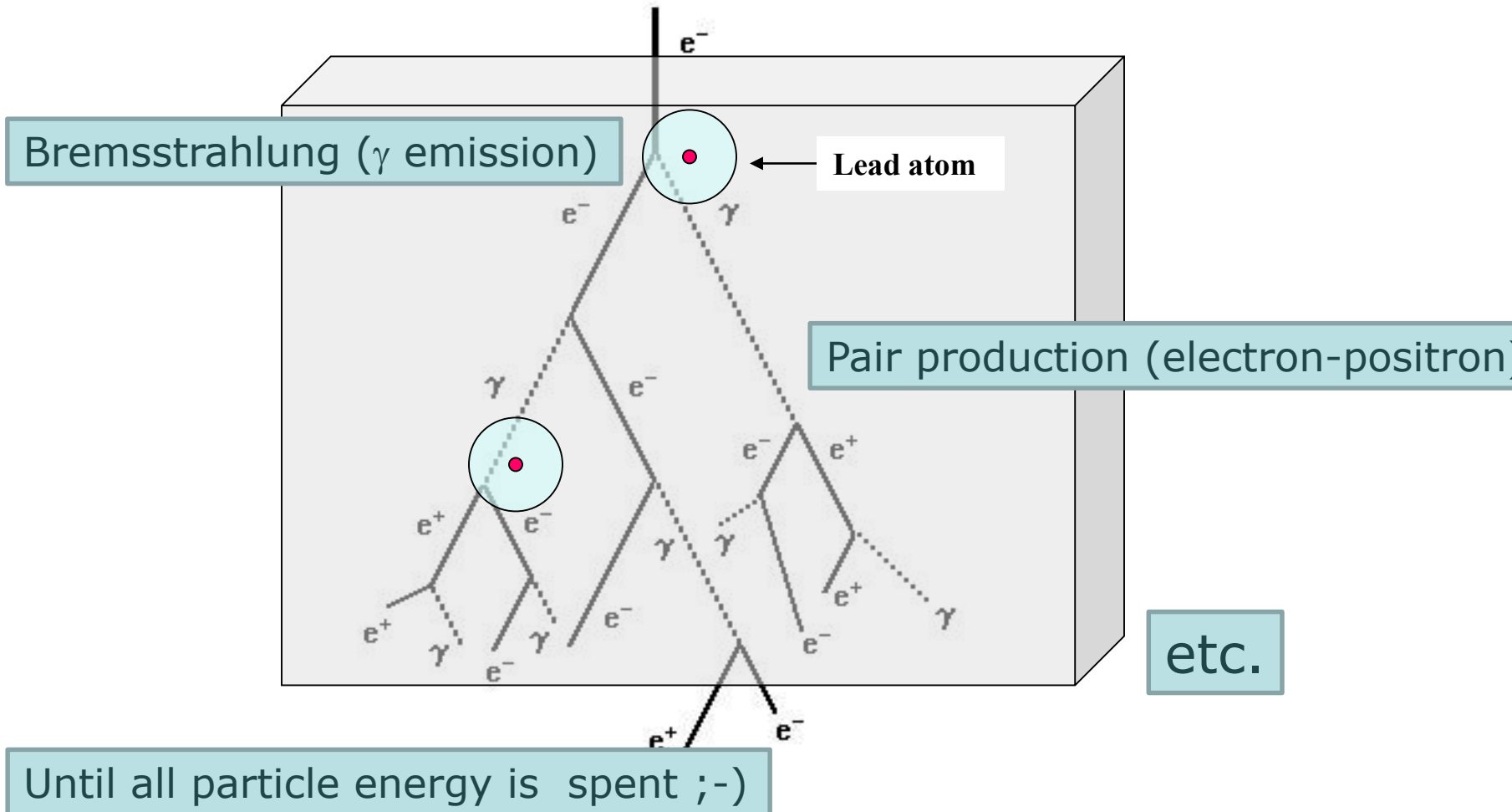
Principio di misura:

- **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

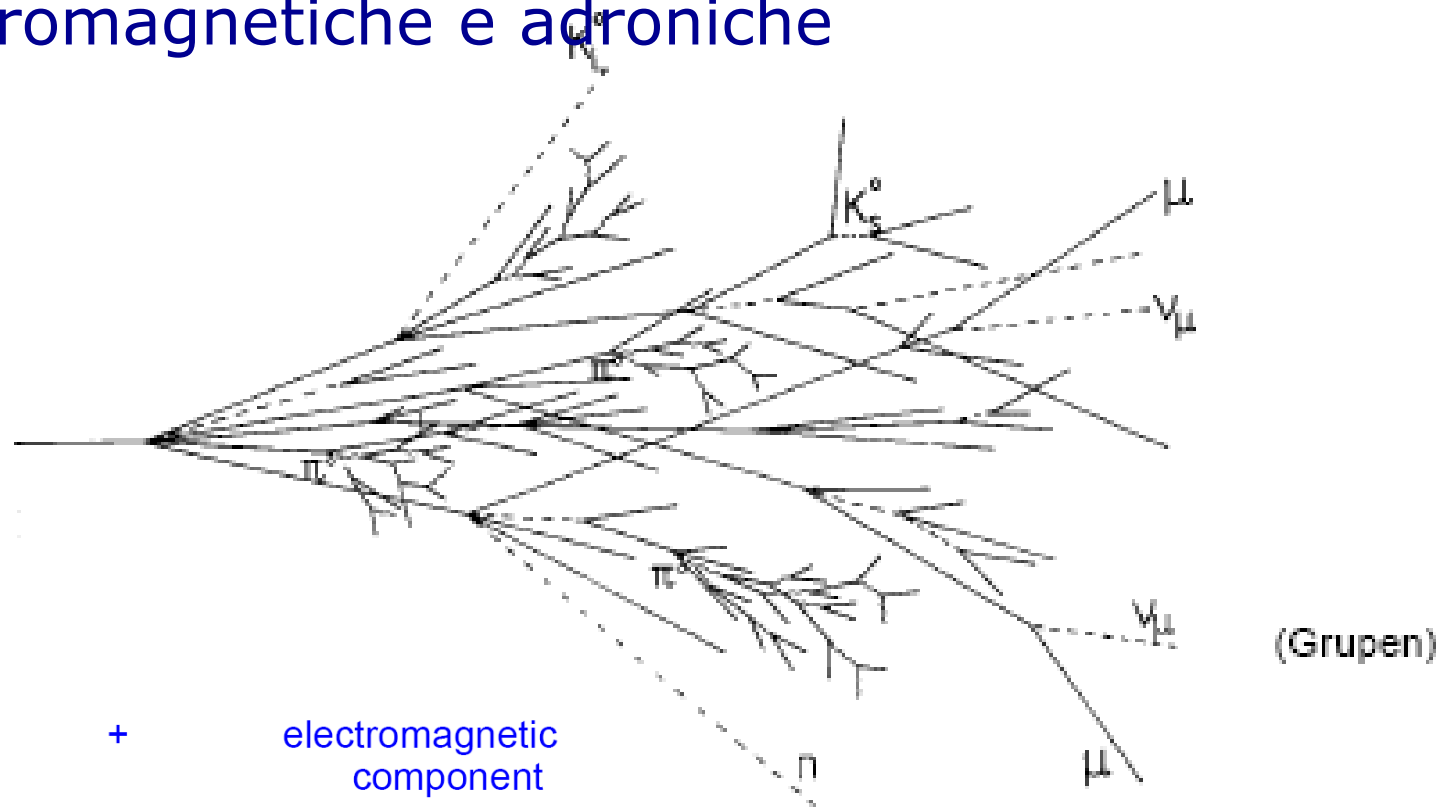
Sciame elettromagnetico



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



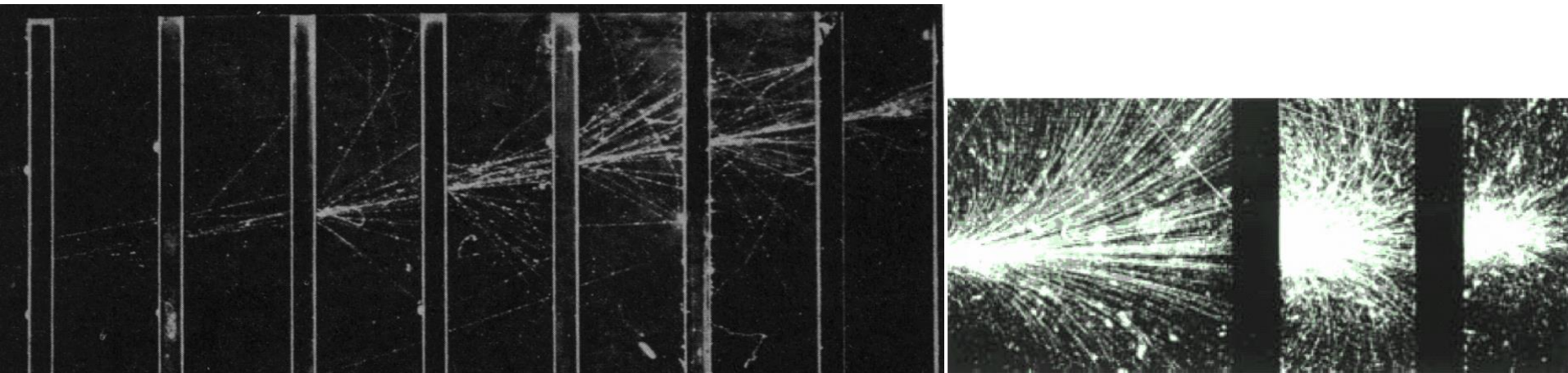
charged pions, protons, kaons
 Breaking up of nuclei
 (binding energy),
 neutrons, neutrinos, soft γ 's
 muons \rightarrow invisible energy



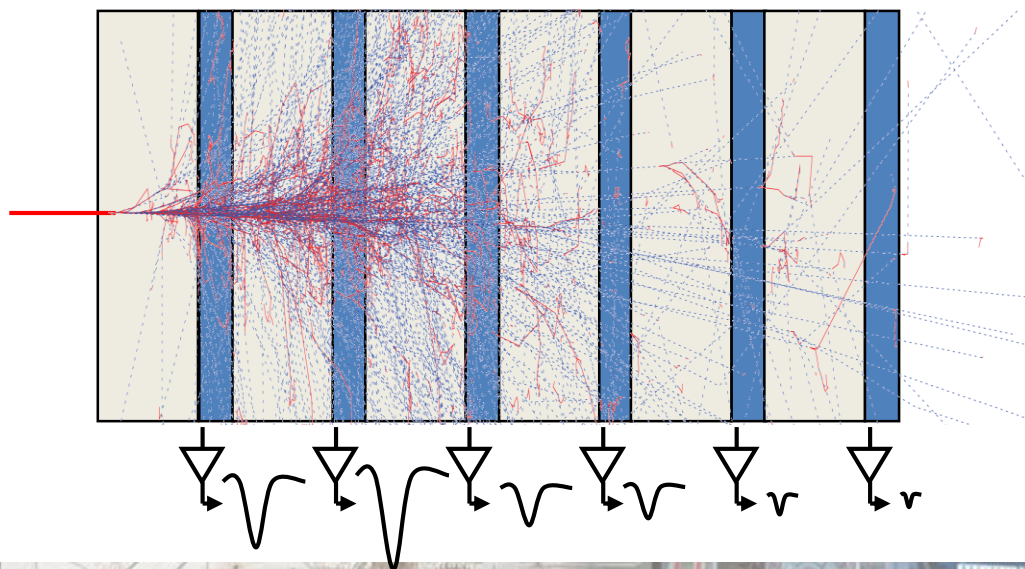
neutral pions $\rightarrow 2\gamma \rightarrow$
 electromagnetic cascade
 $n(\pi^0) \approx \ln E(\text{GeV}) - 4.6$
 example 100 GeV: $n(\pi^0) \approx 18$

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

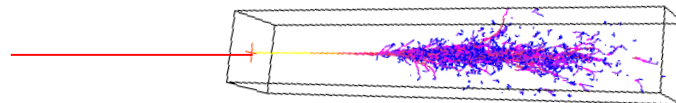
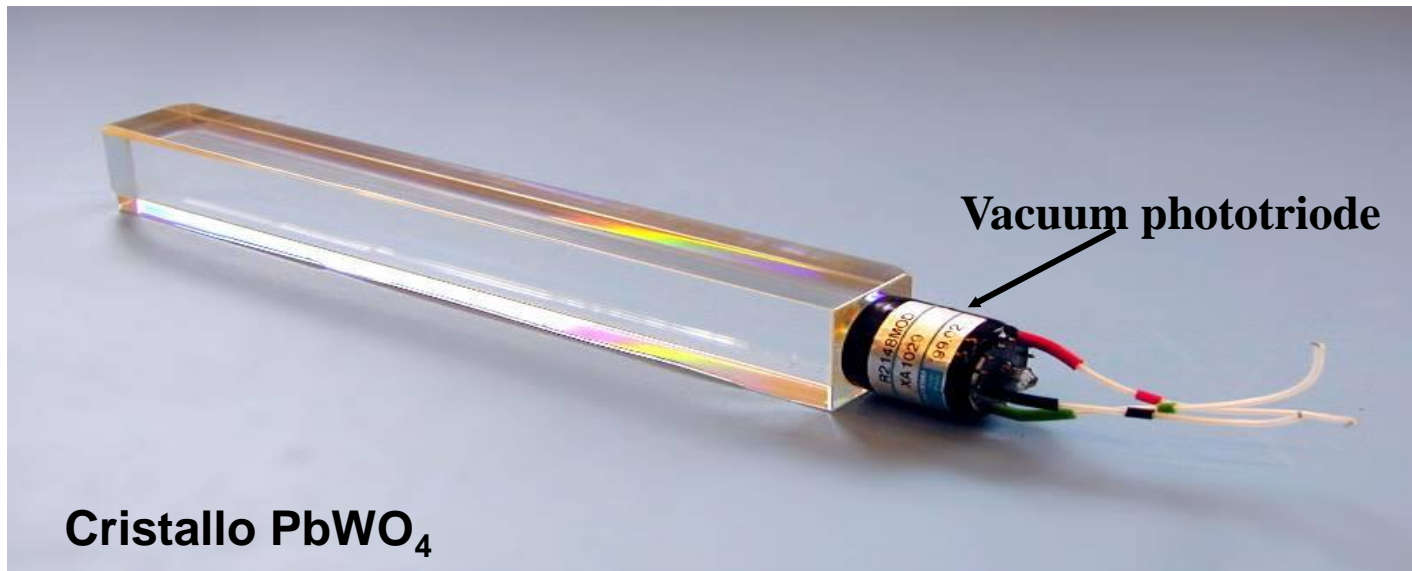


Possono essere composti da **assorbitori passivi** (che fanno sciamare le particelle) alternati ad **elementi sensibili** (che permettono di "leggere" la particella...)



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

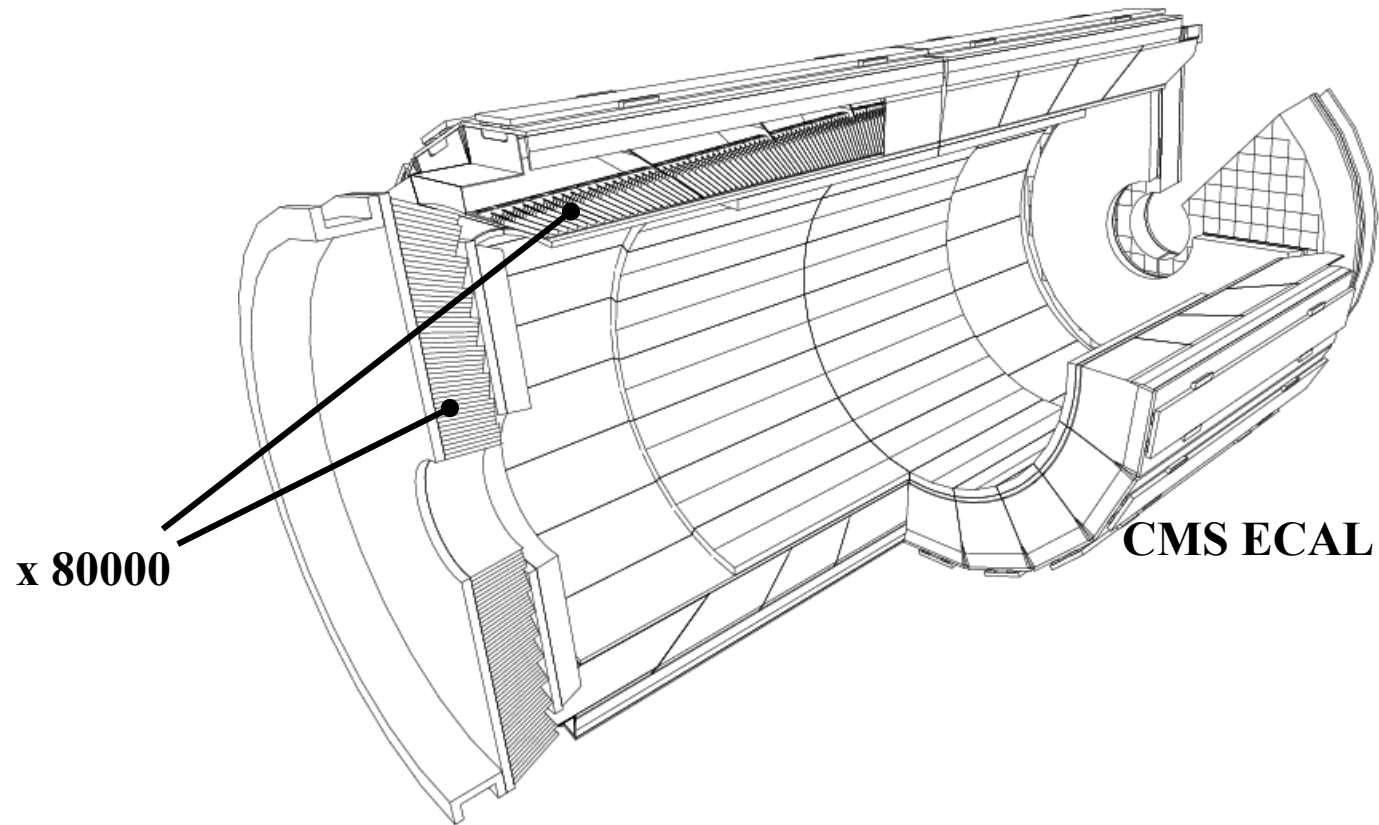
Il materiale deve essere speciale: ad alto "A" per far sciamare le particelle, ma trasparente, da poter permettere alla luce generata da queste di arrivare al fotocatodo.



Calorimetro Elettromagnetico di CMS

80000 cristalli di PbWO_4

Puntano verso il vertice dell'interazione protone-protone



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 $1/m^2$

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

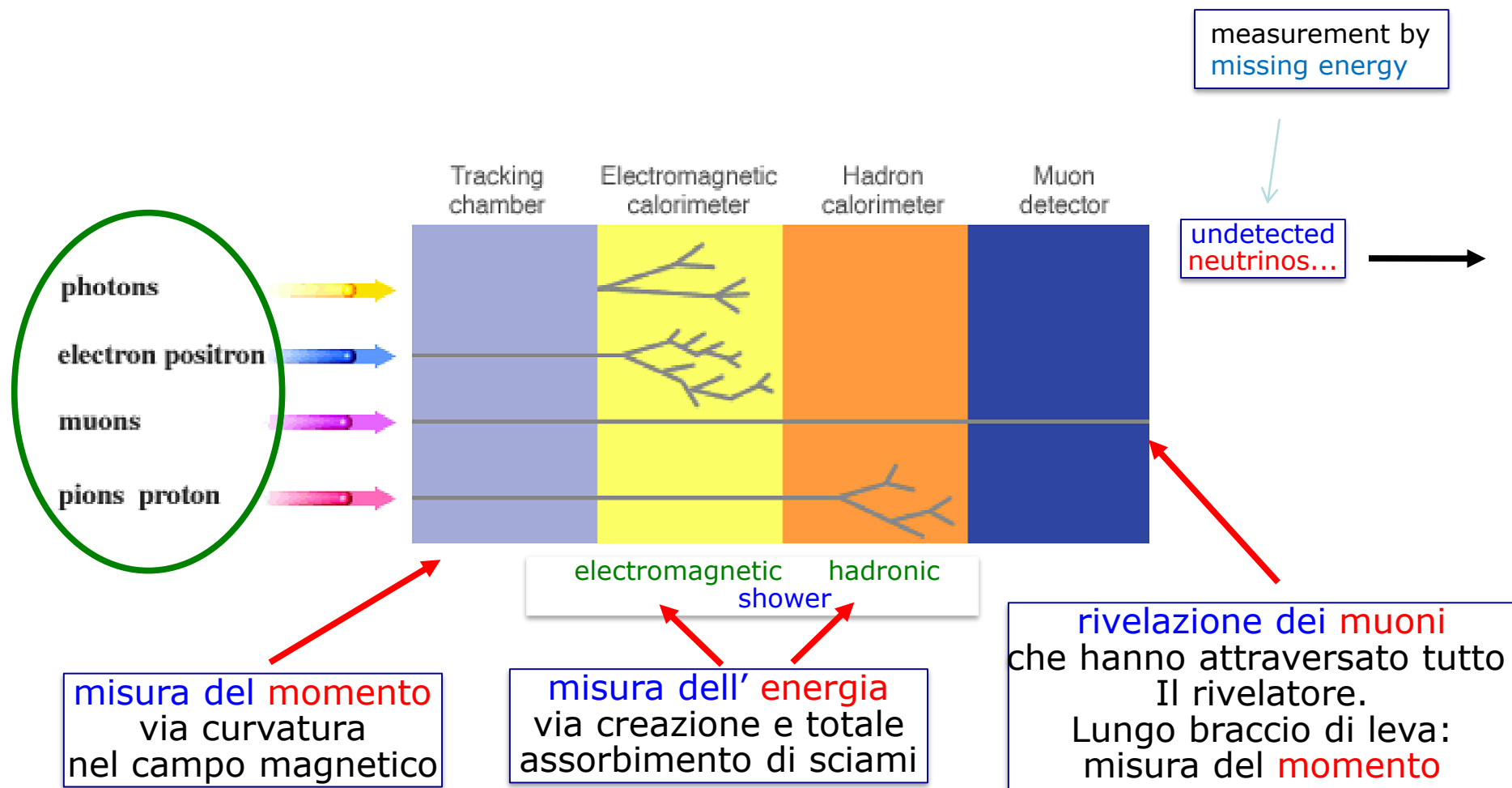
- a energie inferiori a qualche centinaio di GeV, solo gli elettroni perdono sensibilmente energie per radiazione

- $m_e/m_\mu \approx 200$

- fattore 40.000 in probabilità di radiazione

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

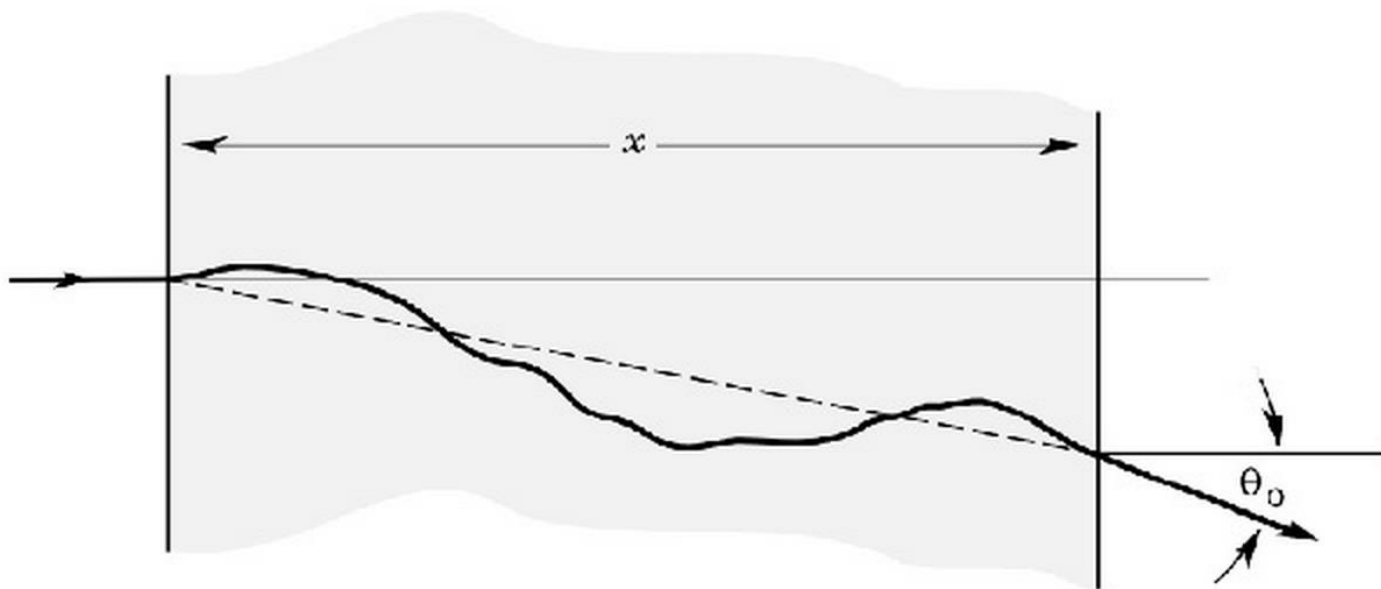
Il passaggio delle particelle



Lo scattering multiplo

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

"multiple scattering"



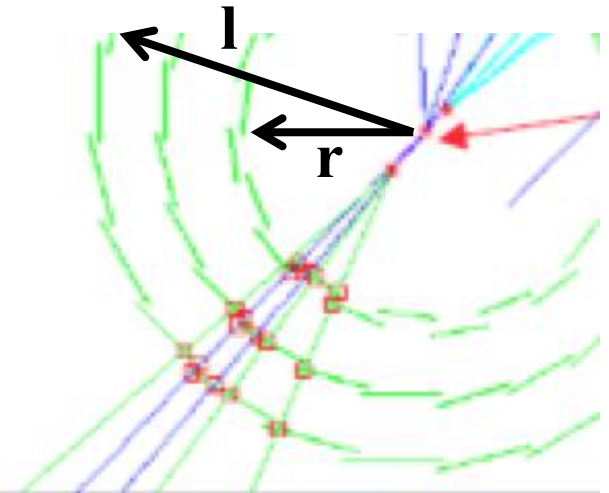
La precisione necessaria

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...

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

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



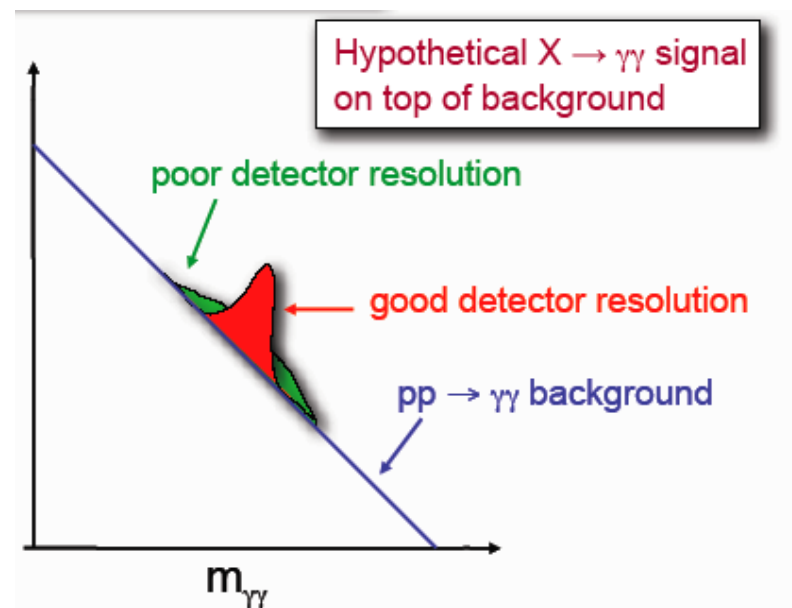
La precisione necessaria

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

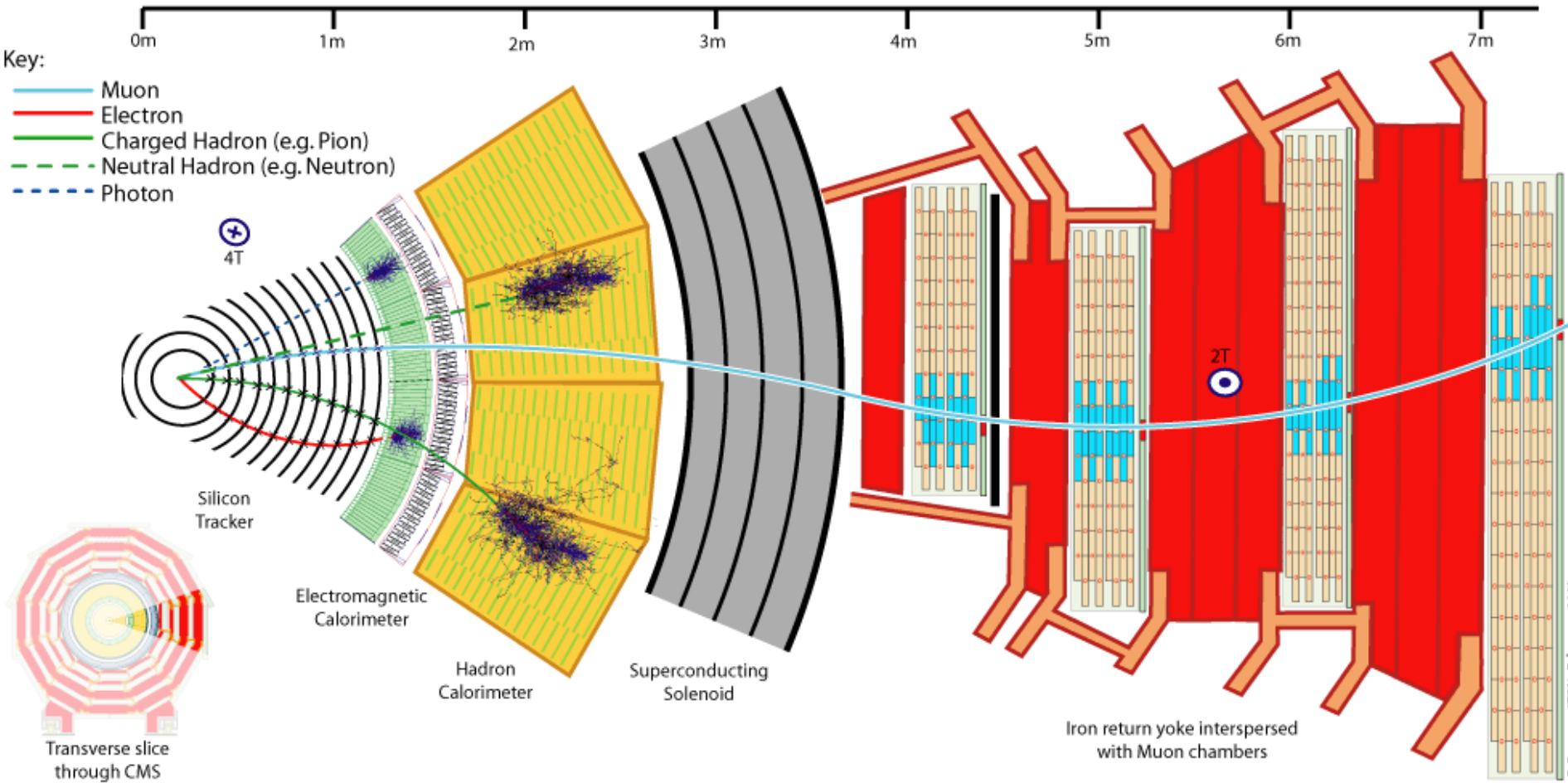
$$m_{\gamma\gamma}^2 = 2E_1E_2(1-\cos\theta)$$

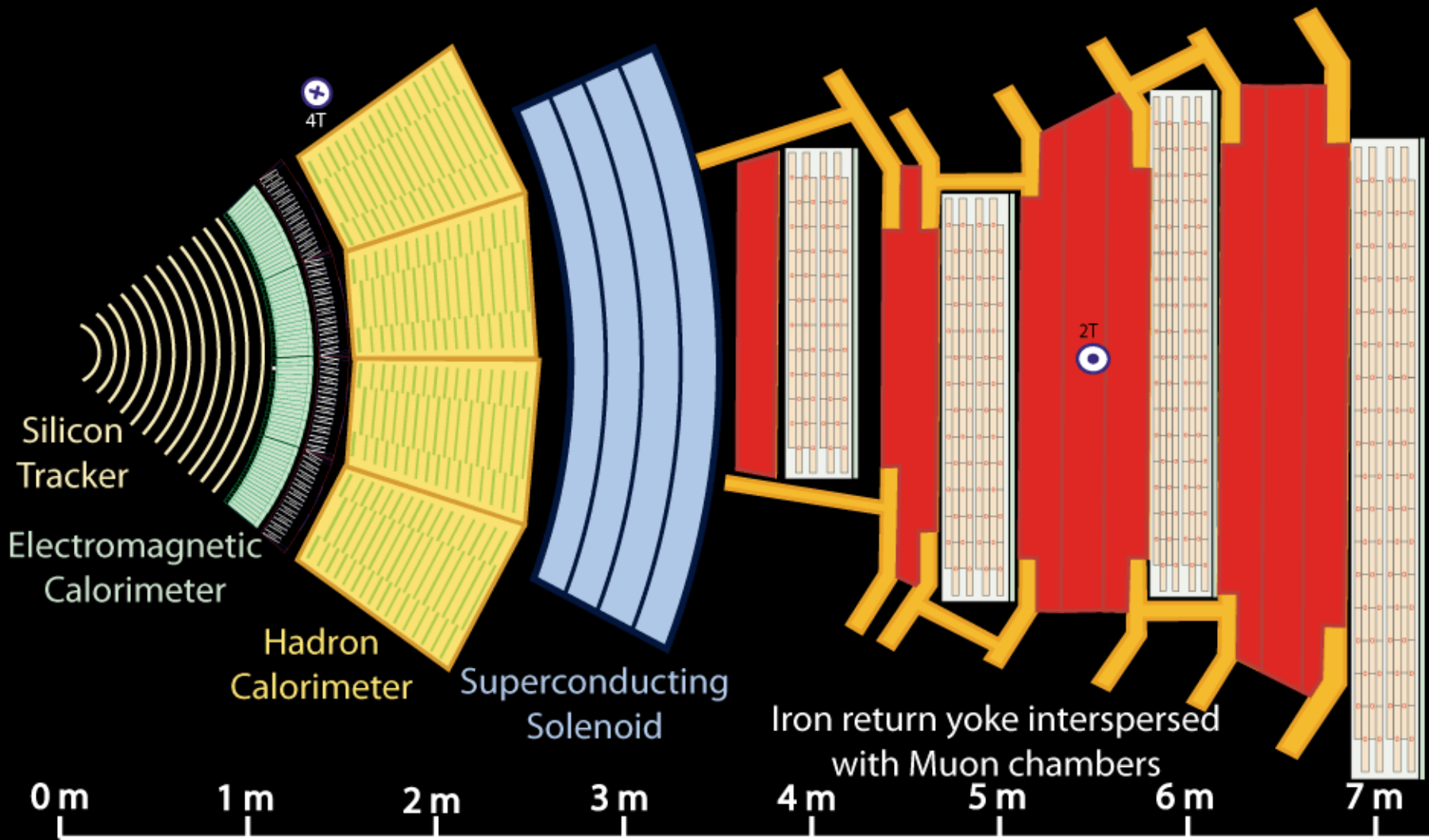
Incertezza su $m \leftarrow$

Incertezza su Energia fotoni
e su direzione dei fotoni



CMS a LHC





Key:

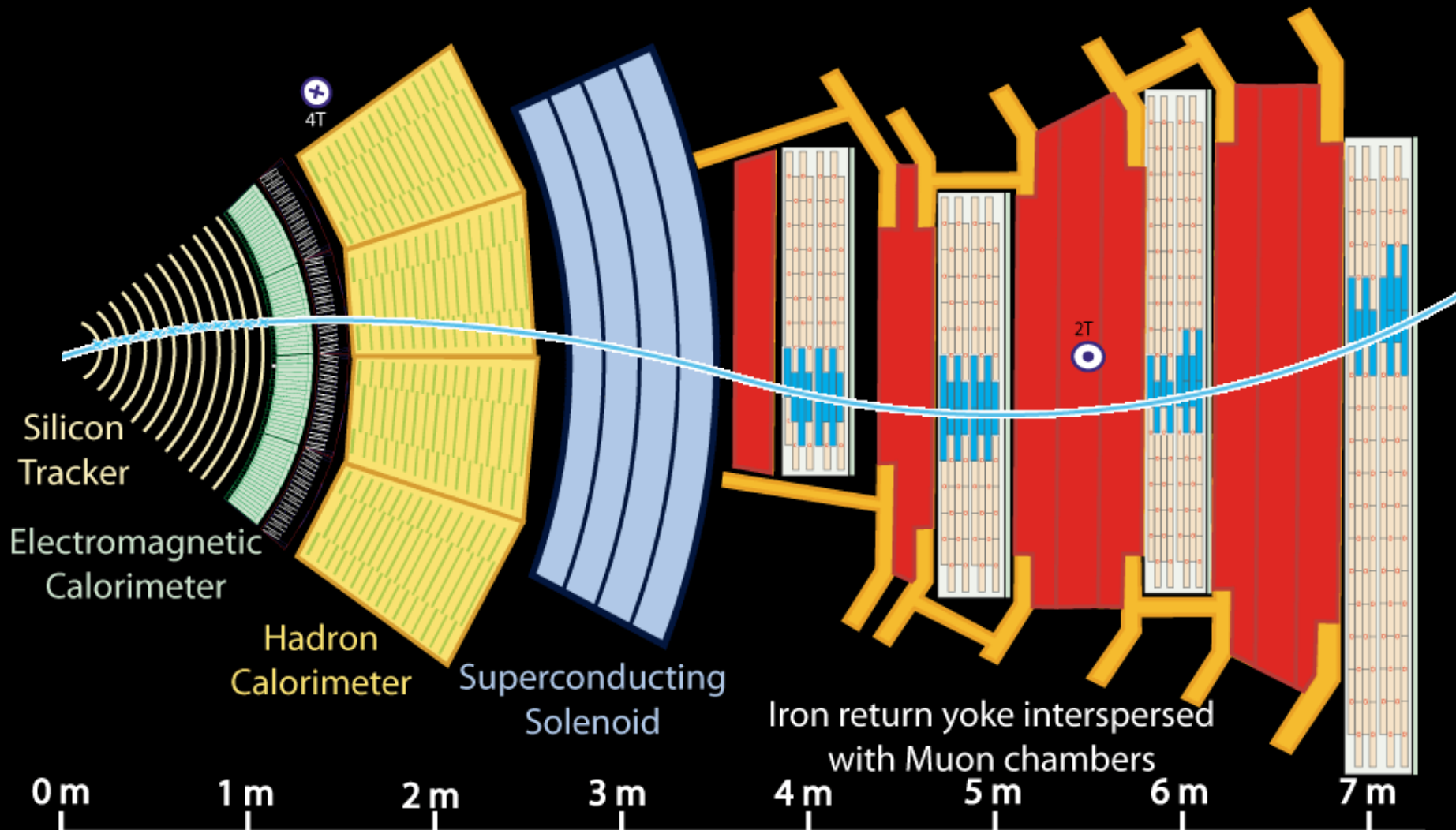
— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

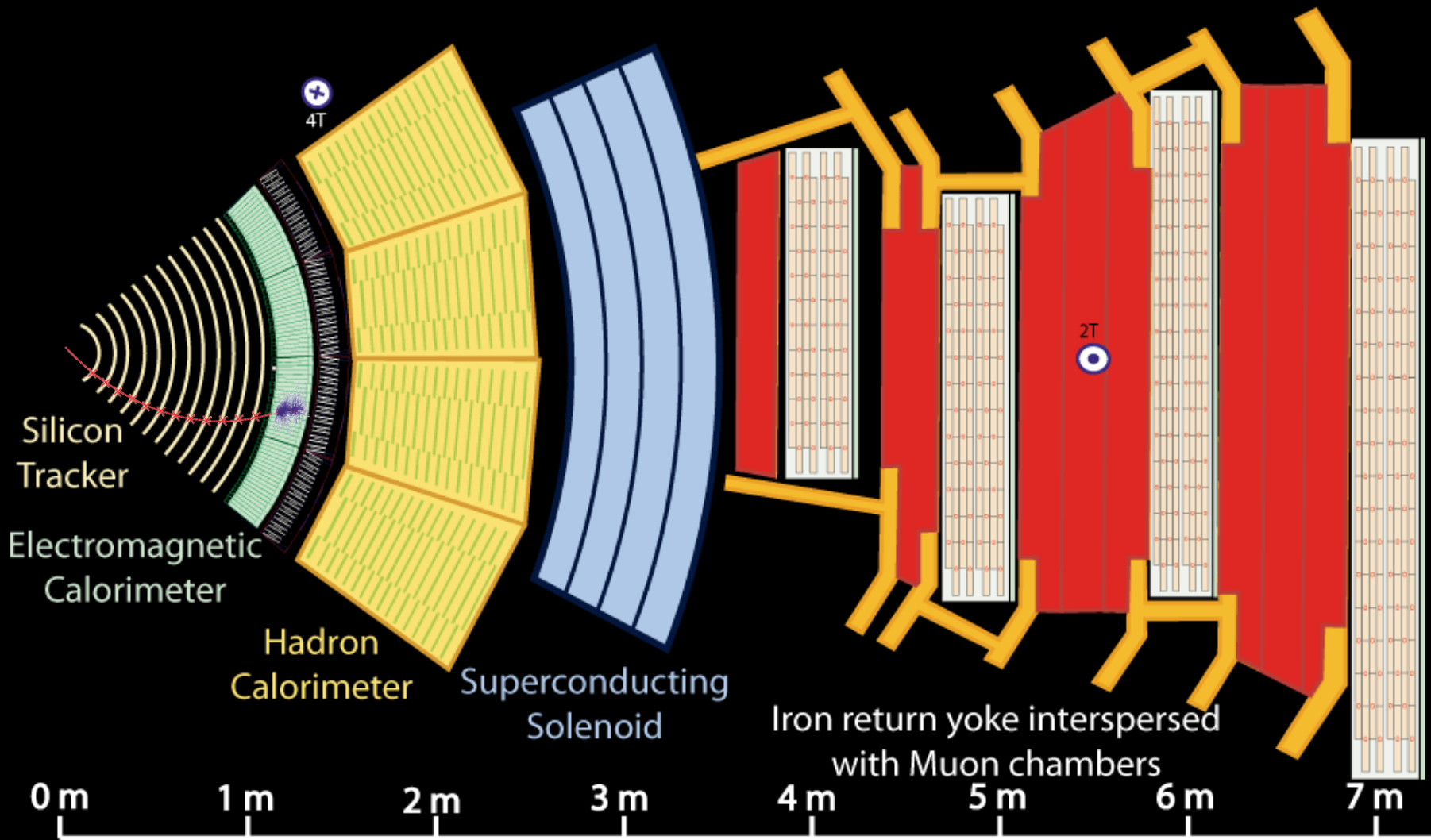
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon



Key:

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



Key:

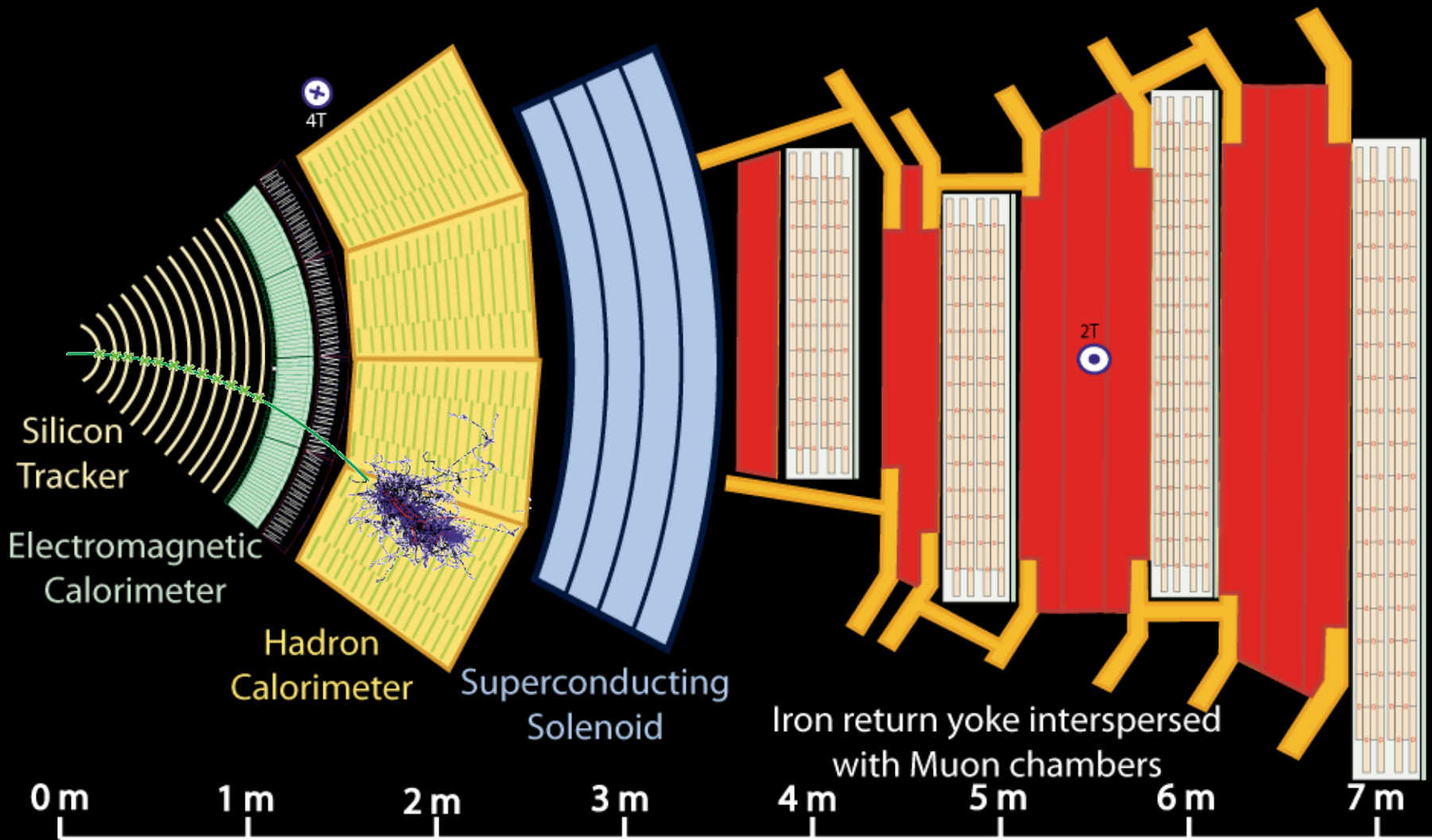
— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

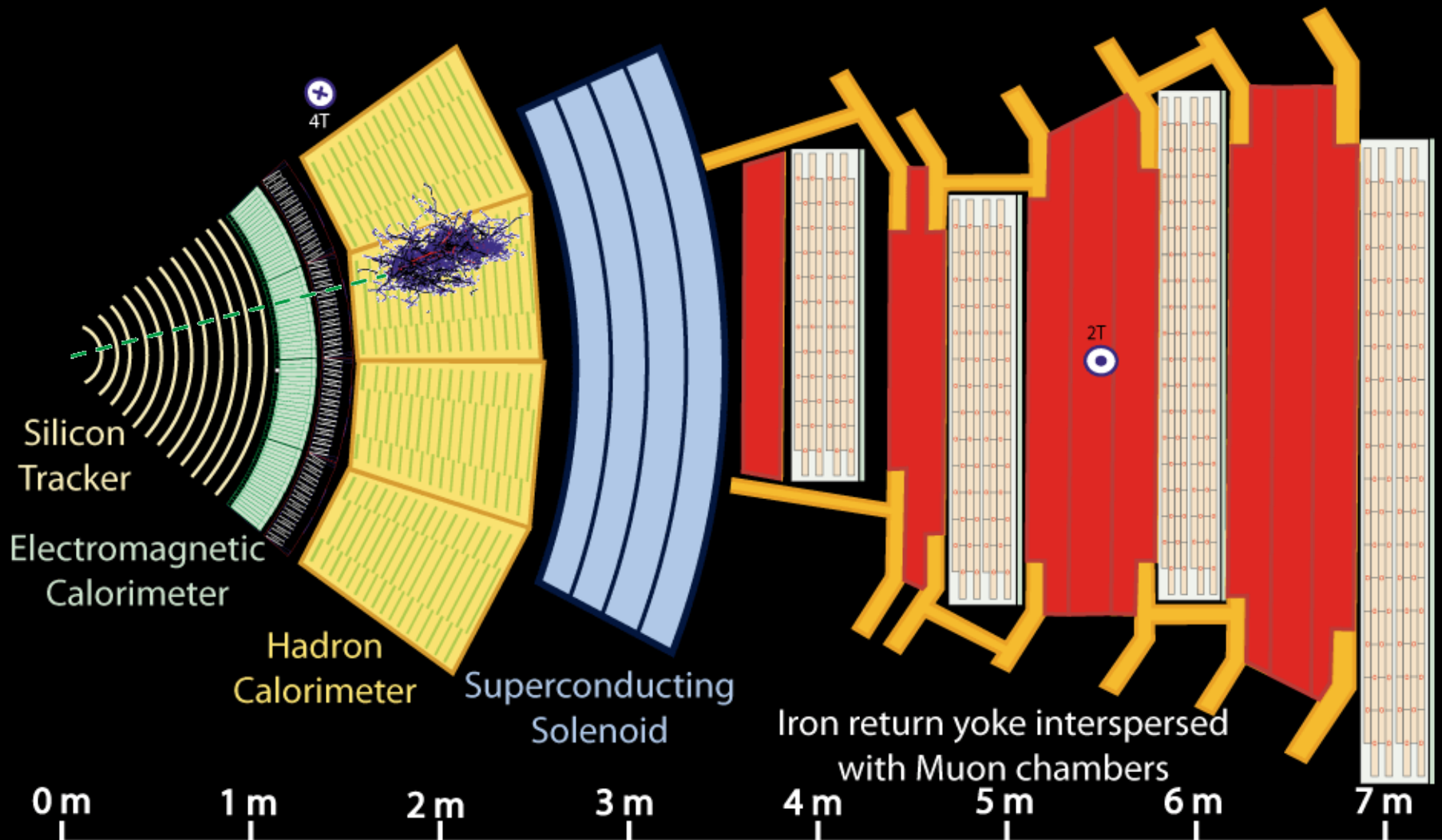
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon



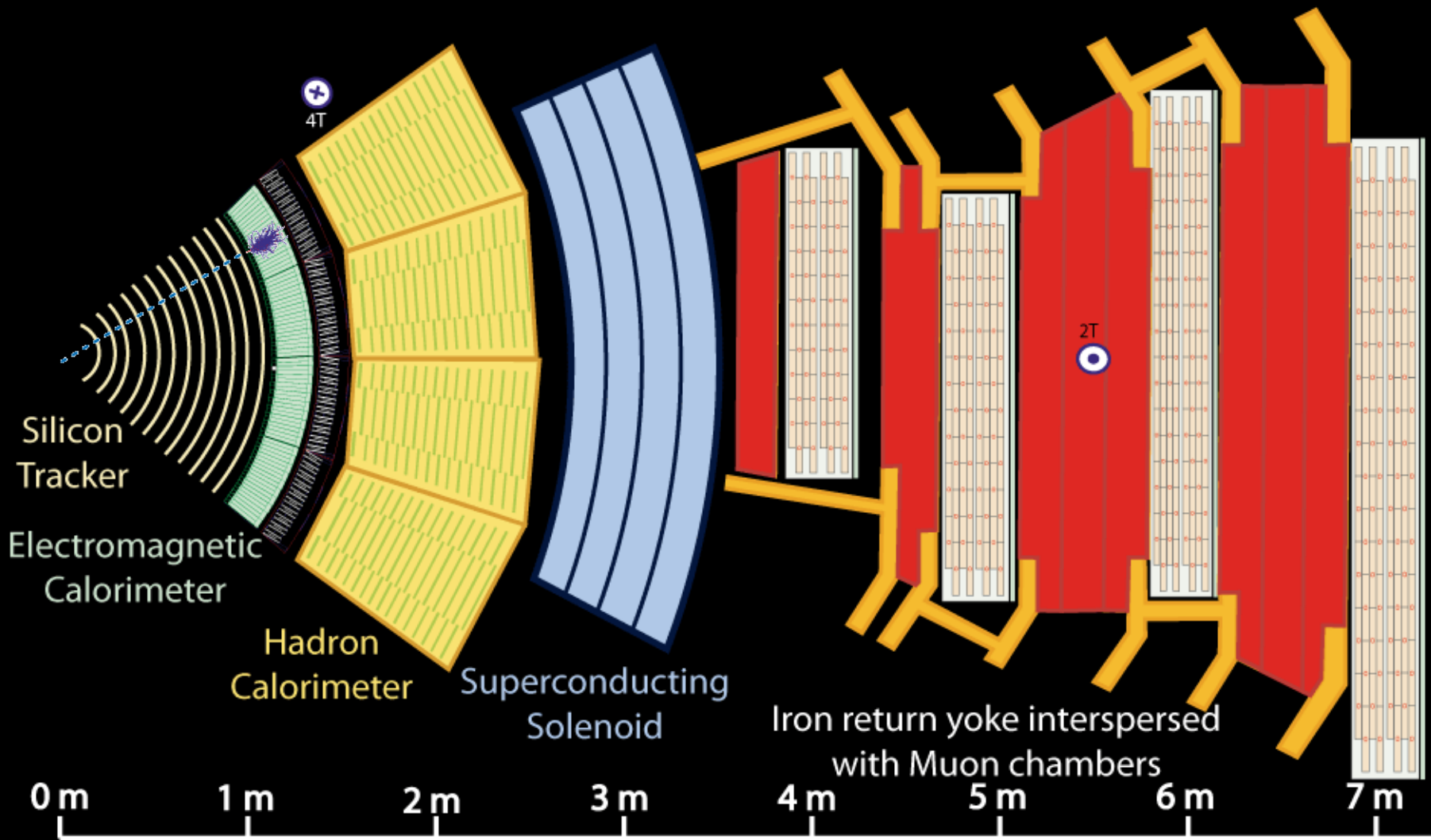
Key:

- 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

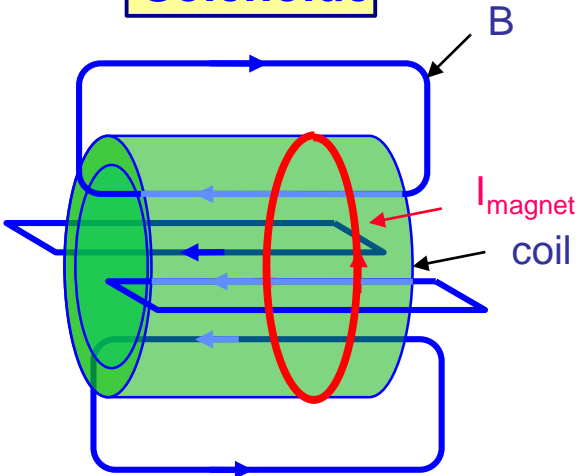
— Charged Hadron (e.g. Pion)

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

- - - Photon

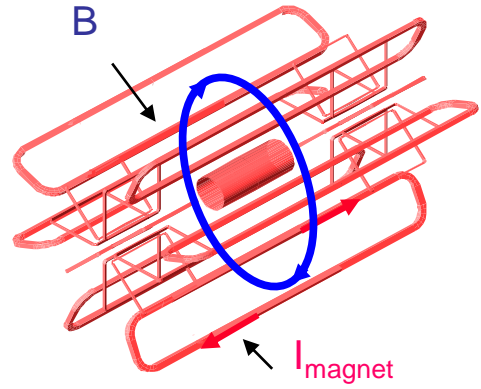
Configurazione dei magneti di ATLAS e CMS

Solenoide



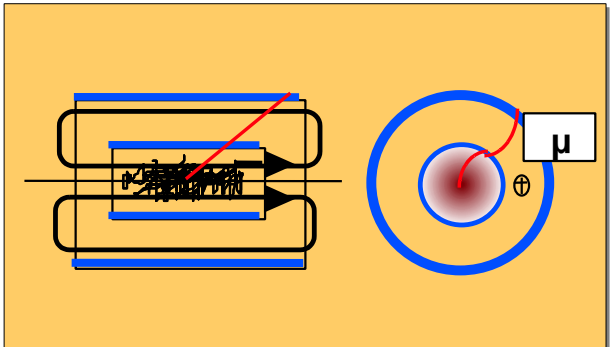
- + strong and homogeneous field in solenoid
- massive iron return yoke necessary
- limited in size (cost)
- solenoid thickness (radiation length)

(air-core) Toroide

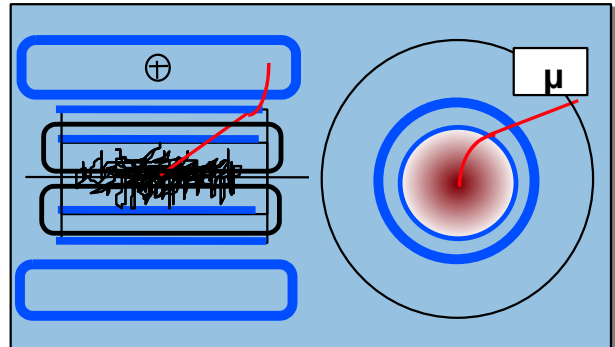


- + large air core, no iron, low material budget
- additional solenoid in the inner parts necessary
- inhomogeneous field
- complex structure

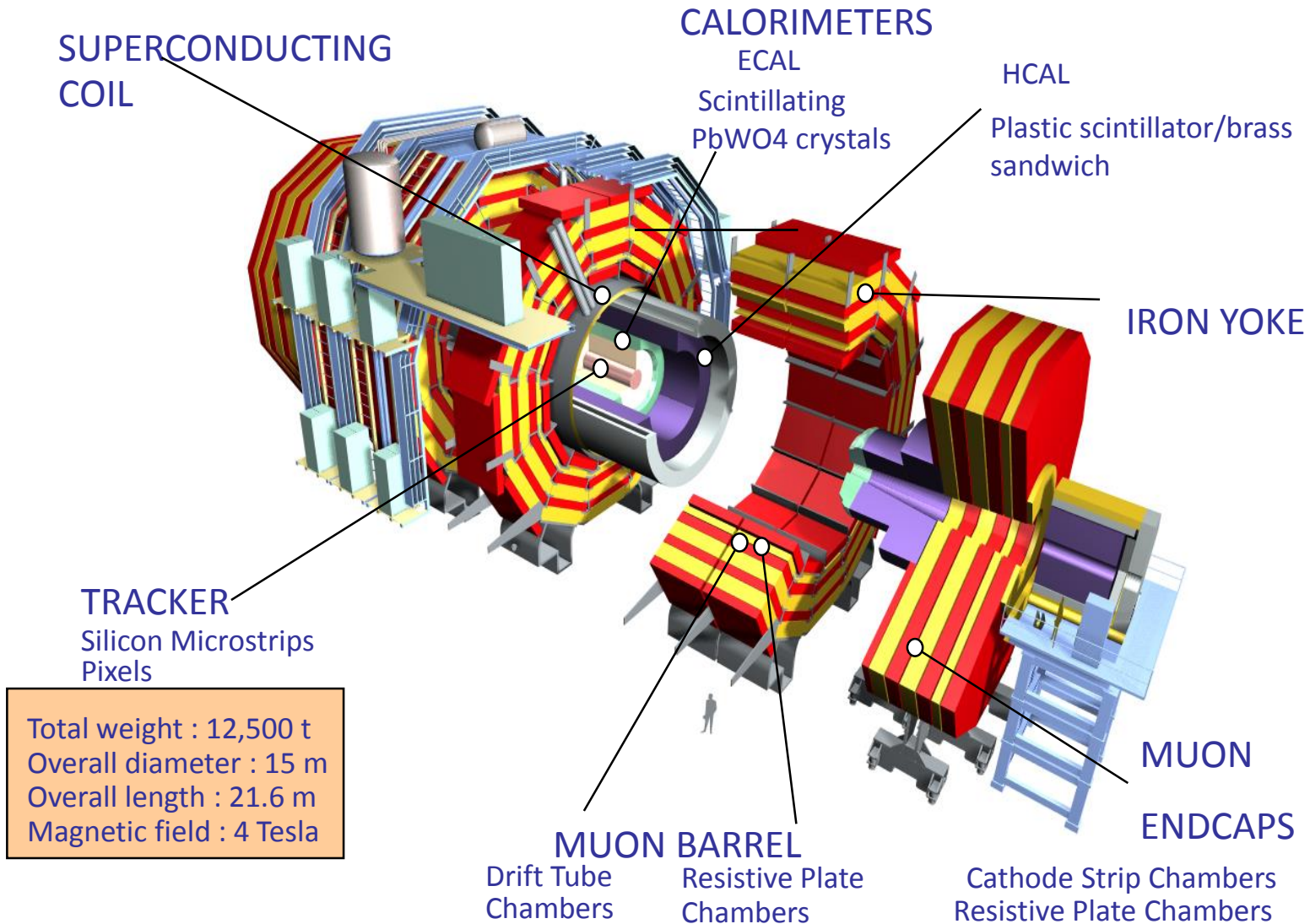
CMS, ALICE, LEP Detectors



ATLAS



Exploded View of CMS

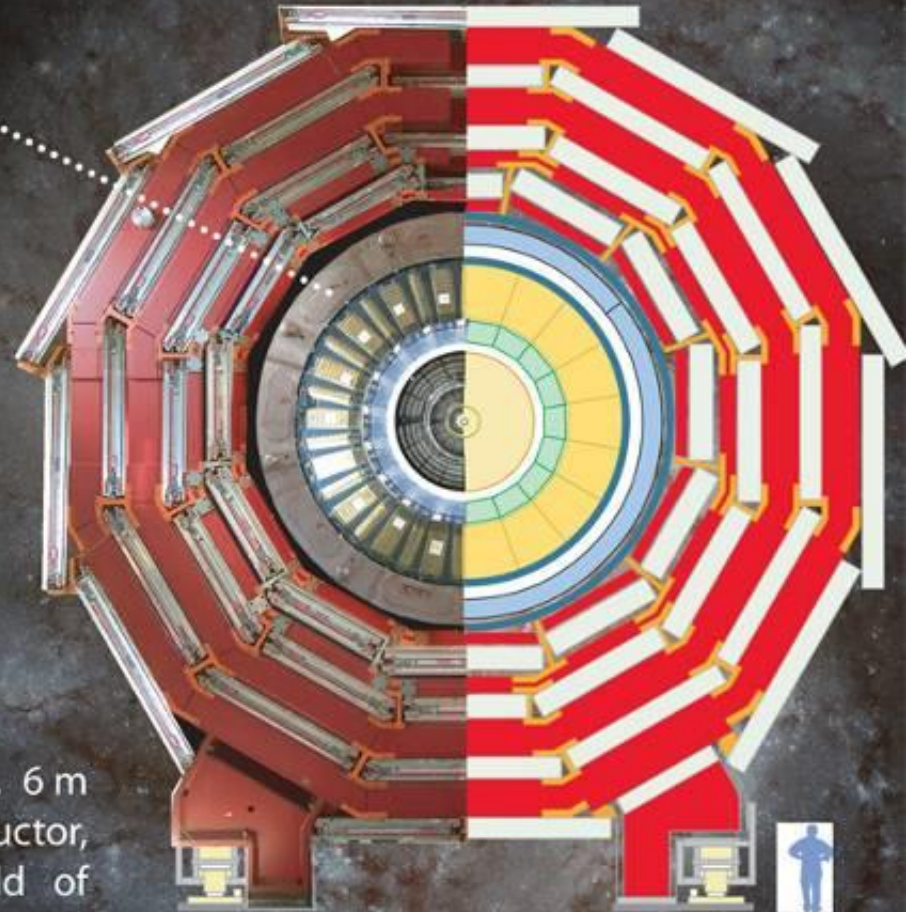


Il magnete superconduttore di CMS




Superconducting Solenoid

Passing 20 000 amperes through a 13 m long, 6 m diameter coil of niobium-titanium superconductor, cooled to -270°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.



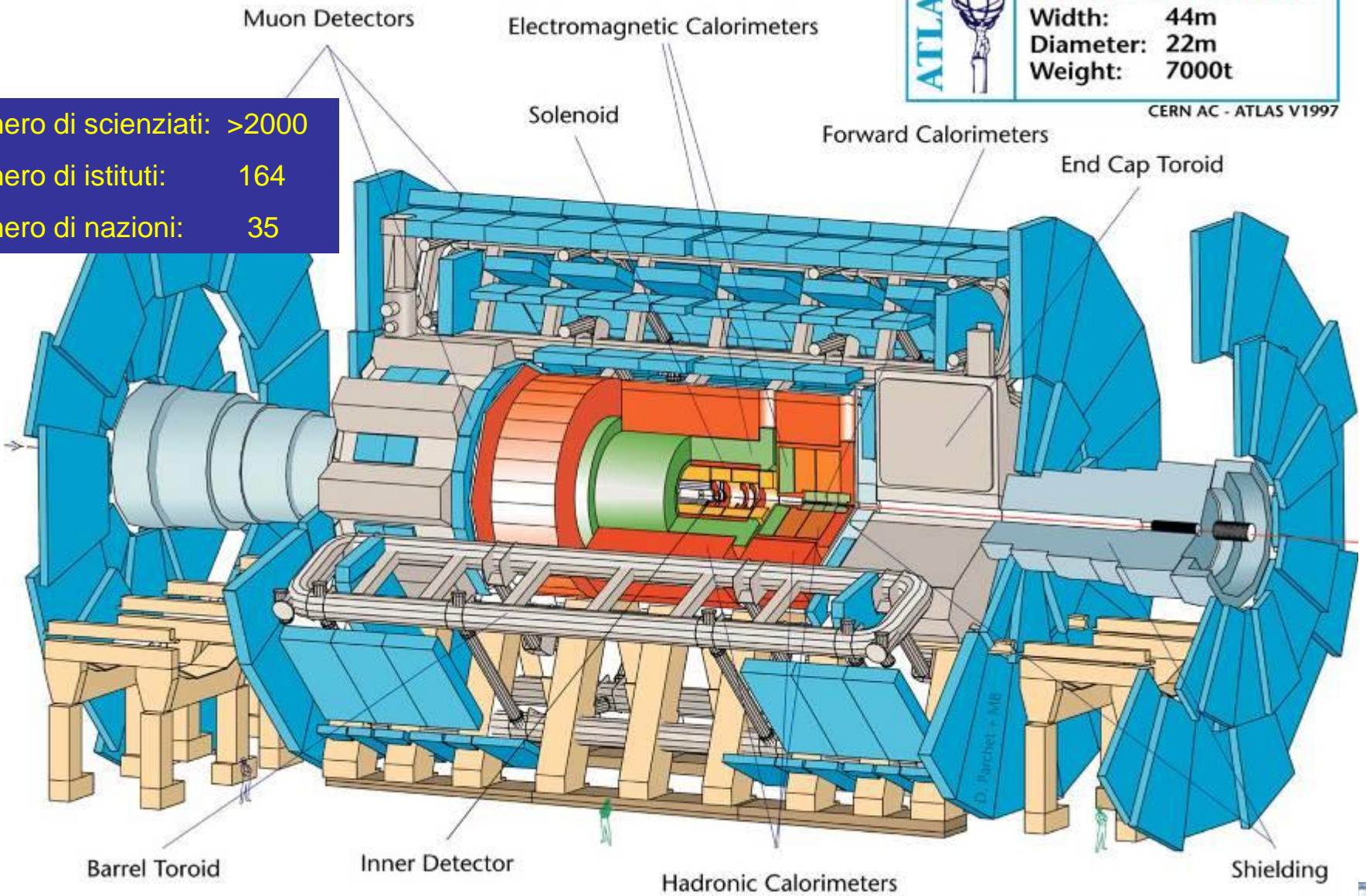
ATLAS

center cathode, z...

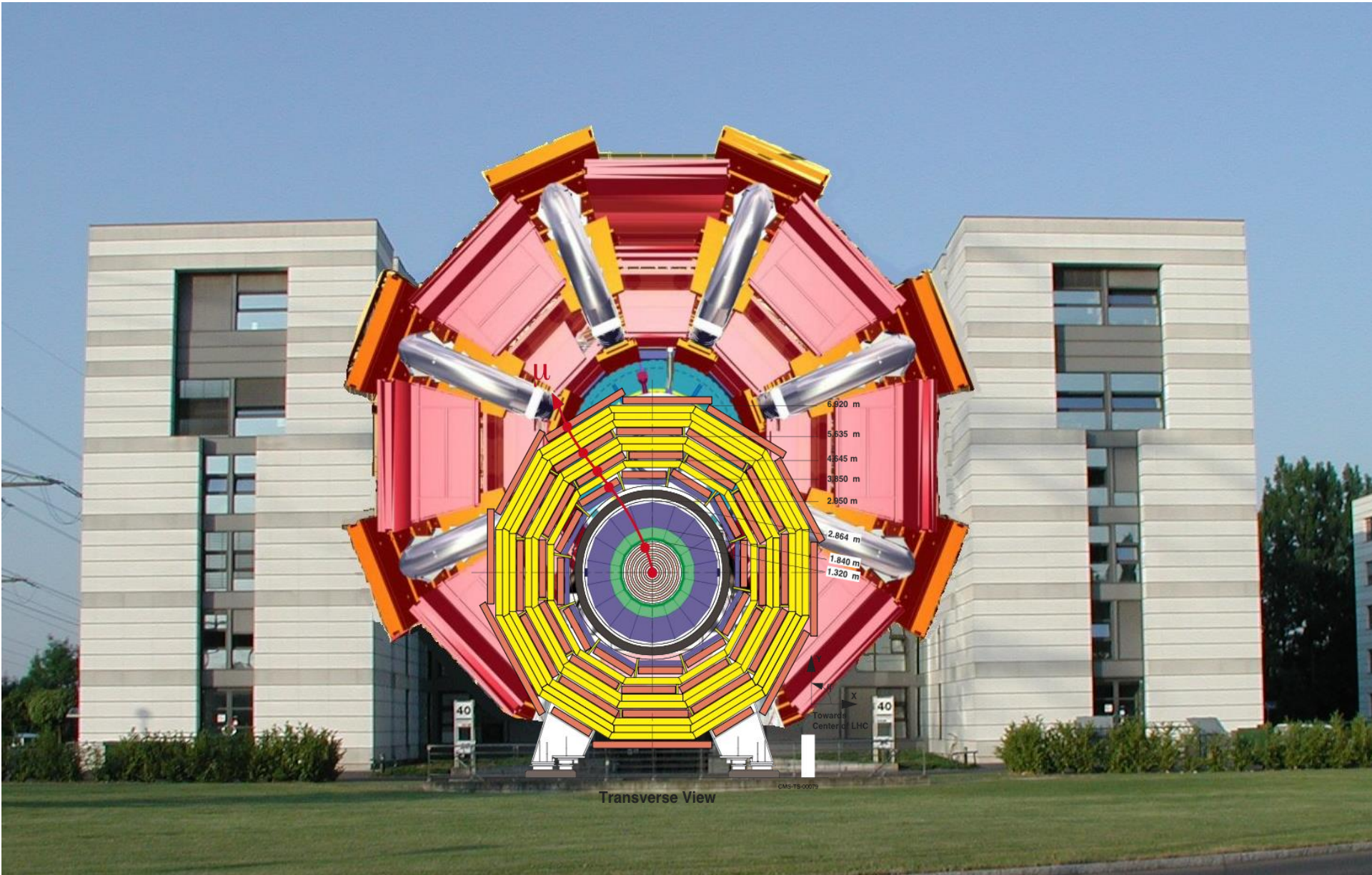
ATLAS		Detector characteristics	
		Width:	44m
		Diameter:	22m
		Weight:	7000t

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 ricostruibili 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.

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

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

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

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

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

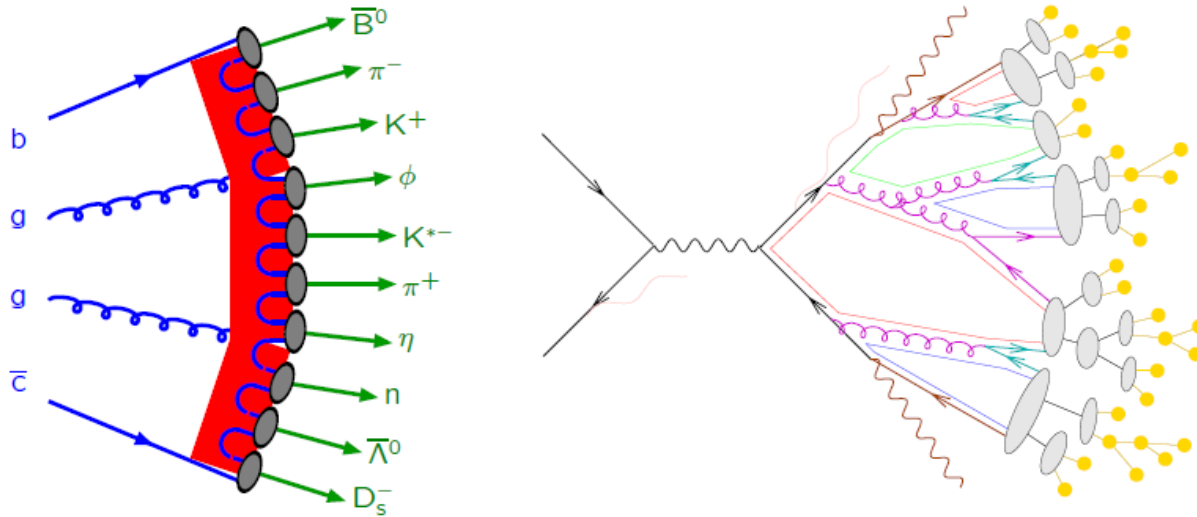
$$P_x(\text{neutrino}) = 0 - \dot{a} P_x(\text{particelle})$$

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

Ricostruzione degli "oggetti": i jet

Nella realta' 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...

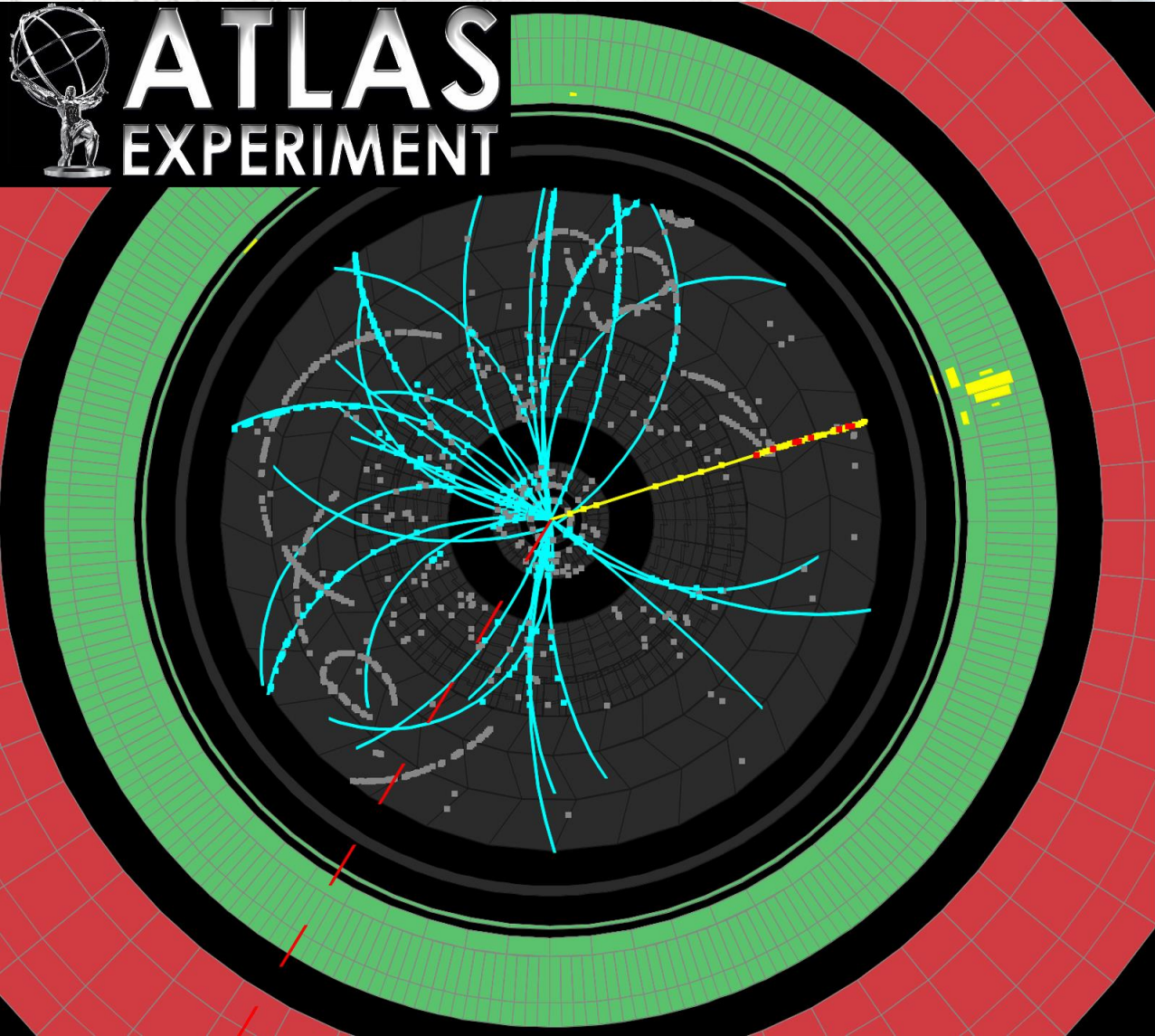


Esercizio: riconoscere le diverse particelle
negli eventi seguenti

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

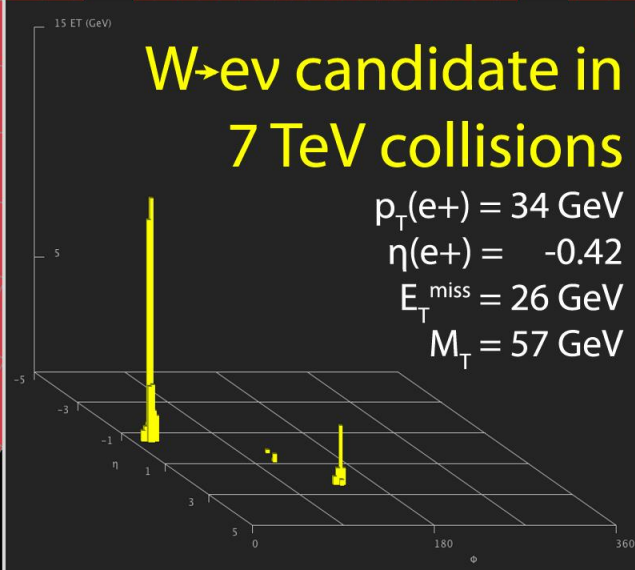
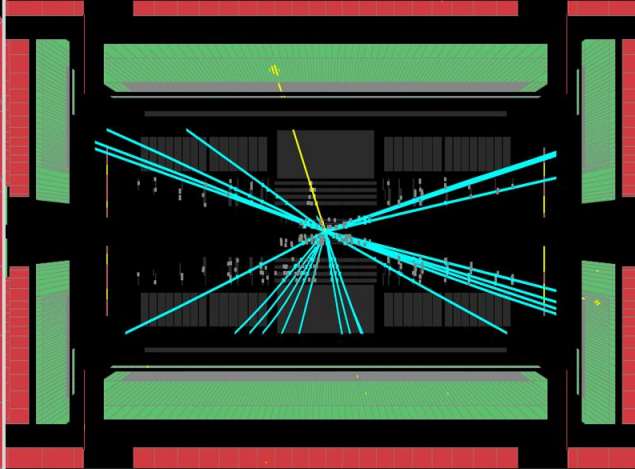


ATLAS EXPERIMENT



Run Number: 152409, Event Number: 5966801

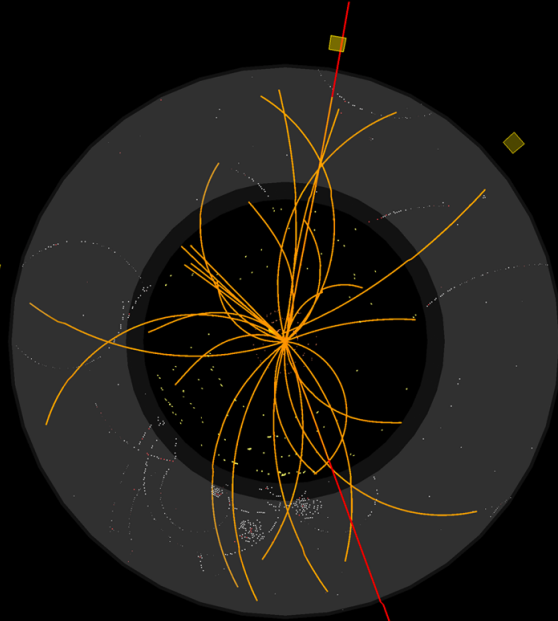
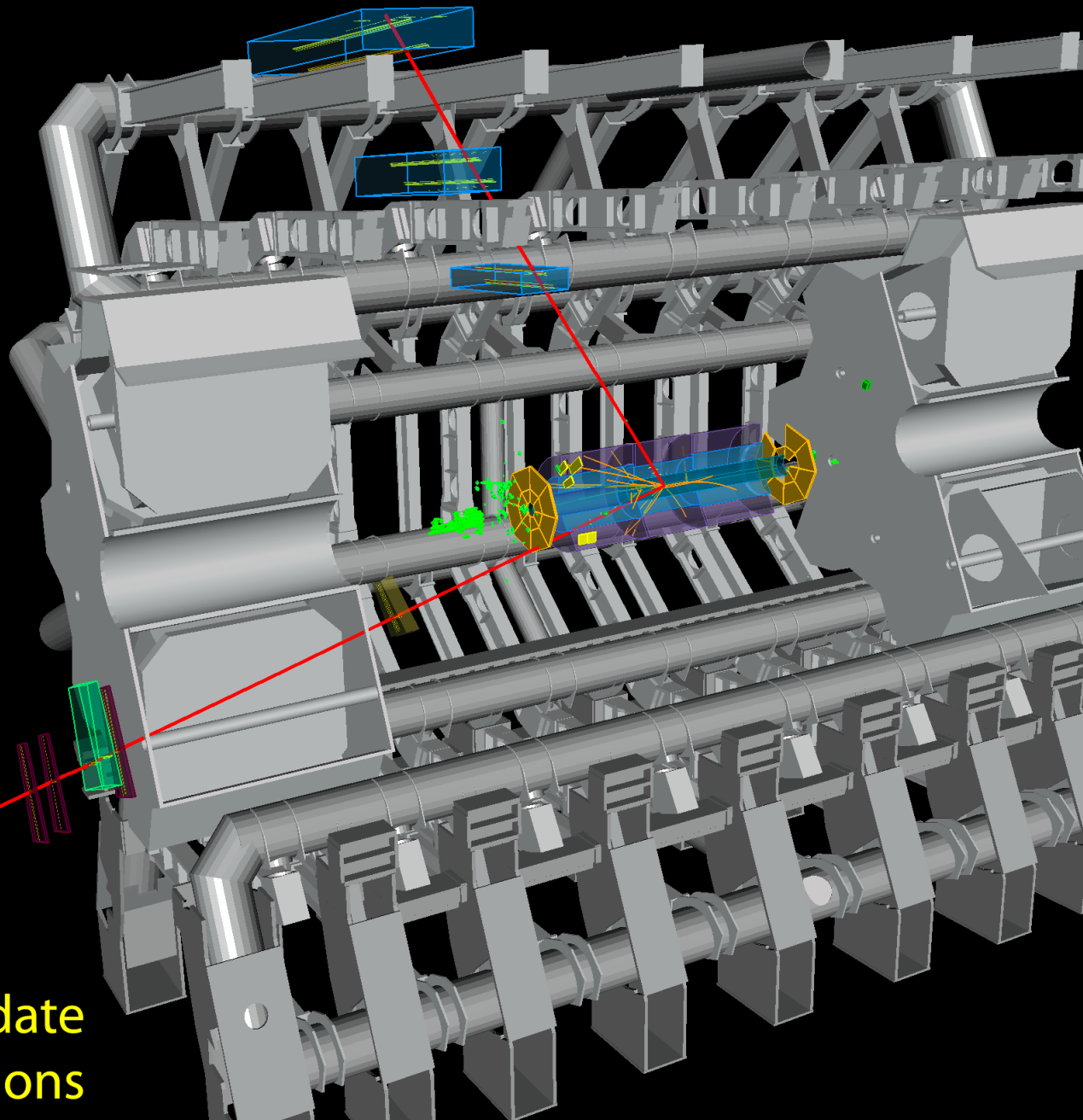
Date: 2010-04-05 06:54:50 CEST





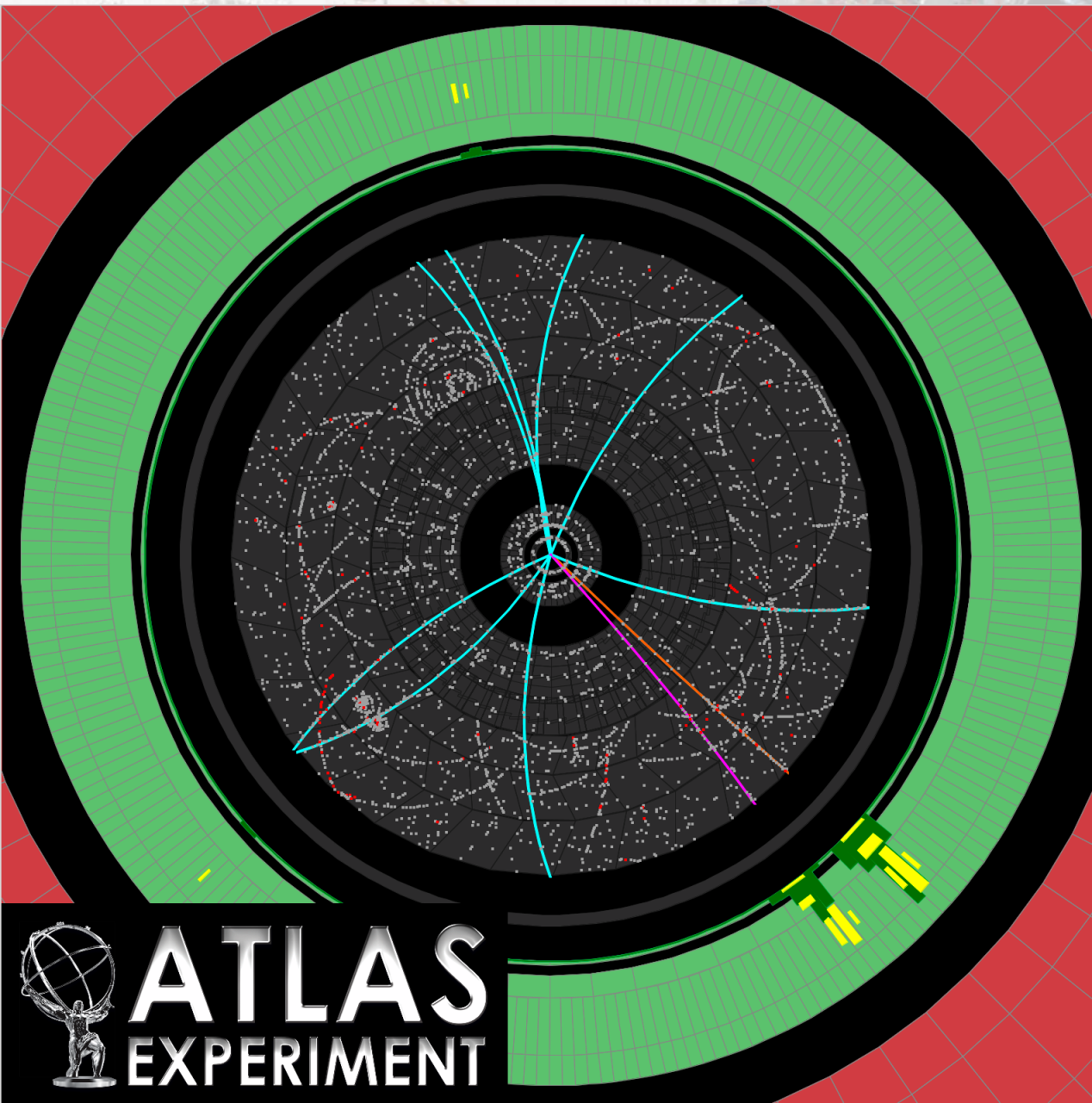
ATLAS EXPERIMENT

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**

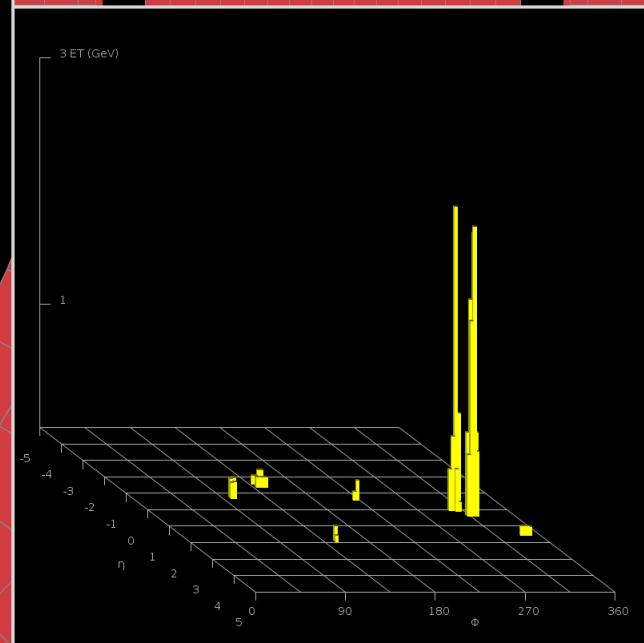
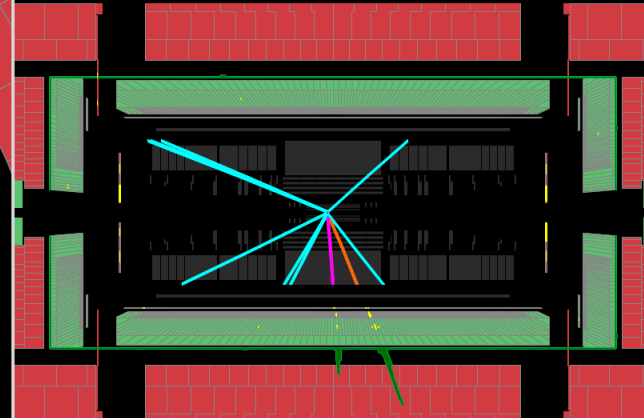


Run Number: 160736, Event Number: 3446804

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

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

$M_{ee} = 3.17$ GeV

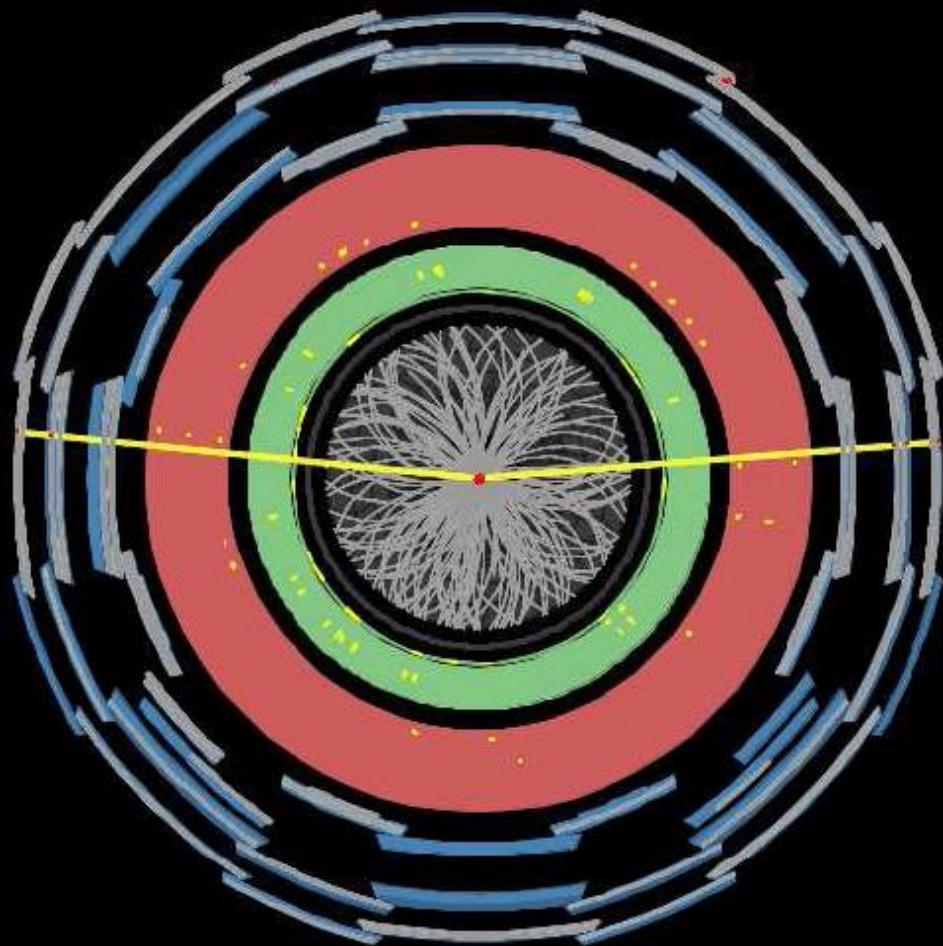


 **ATLAS**
EXPERIMENT

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

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

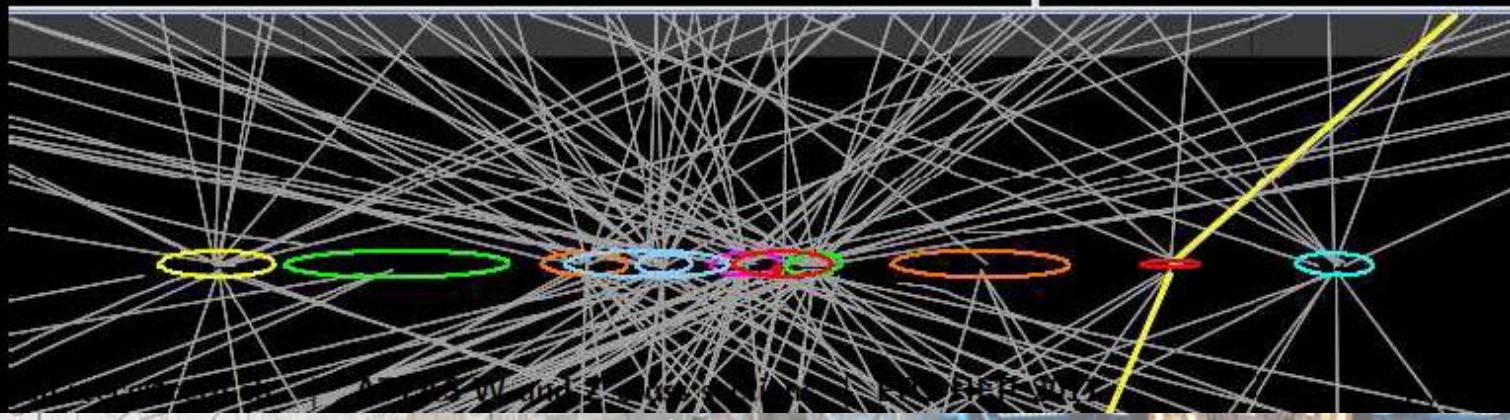
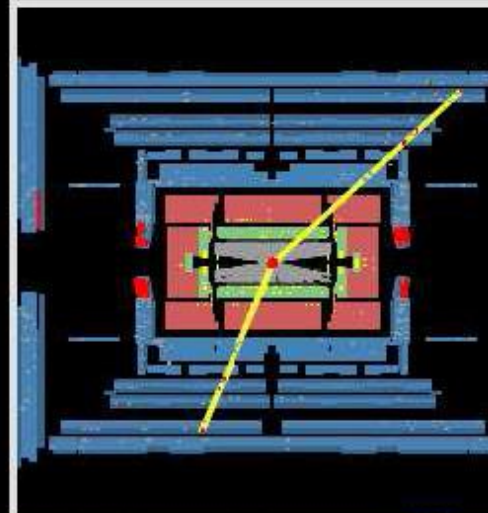
Conversely,
 W/Z provide
events for
understanding
high p_T lepton
performance.



ATLAS EXPERIMENT

Run Number: 180164, Event Number: 14635109

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

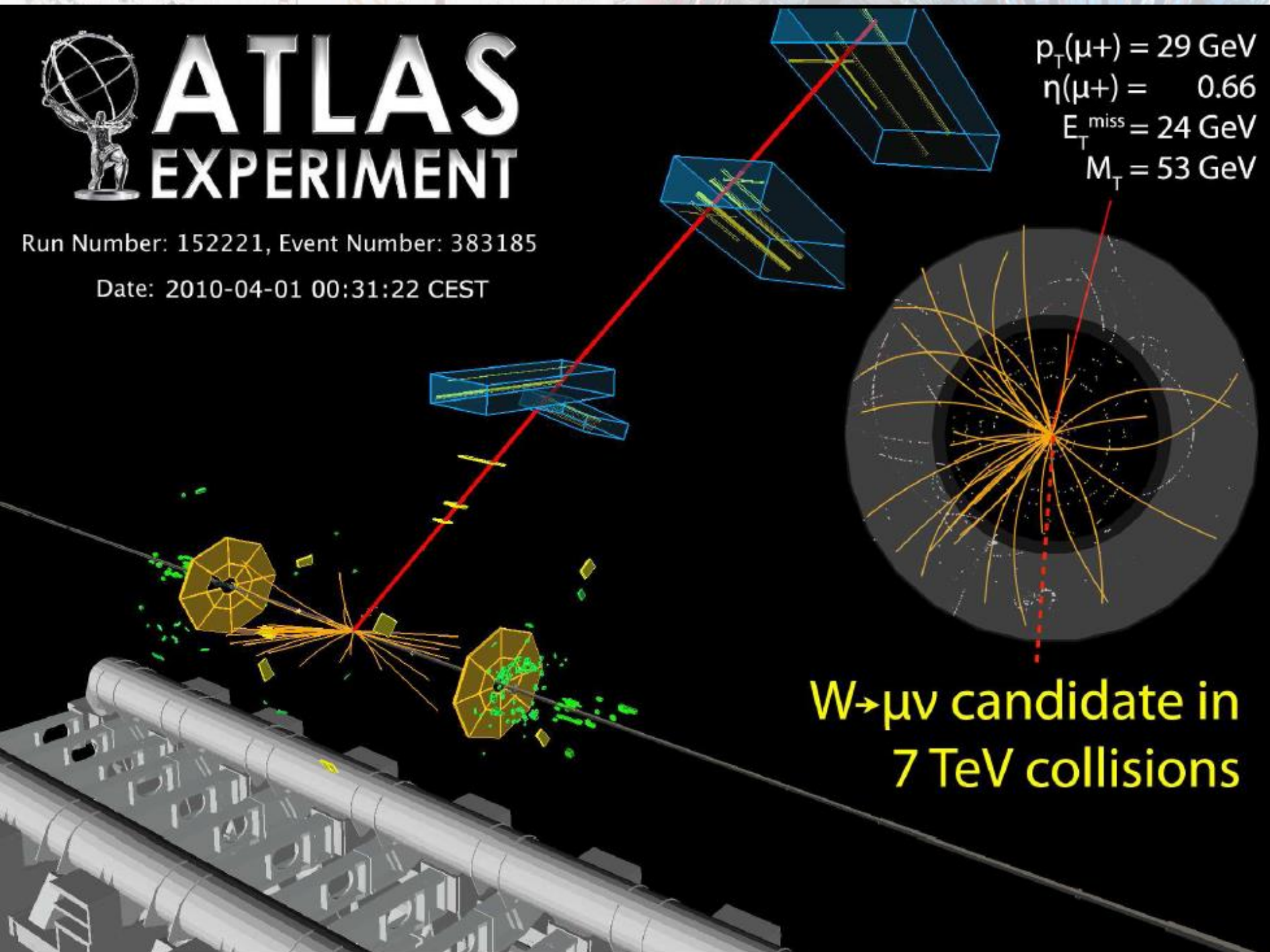




ATLAS EXPERIMENT

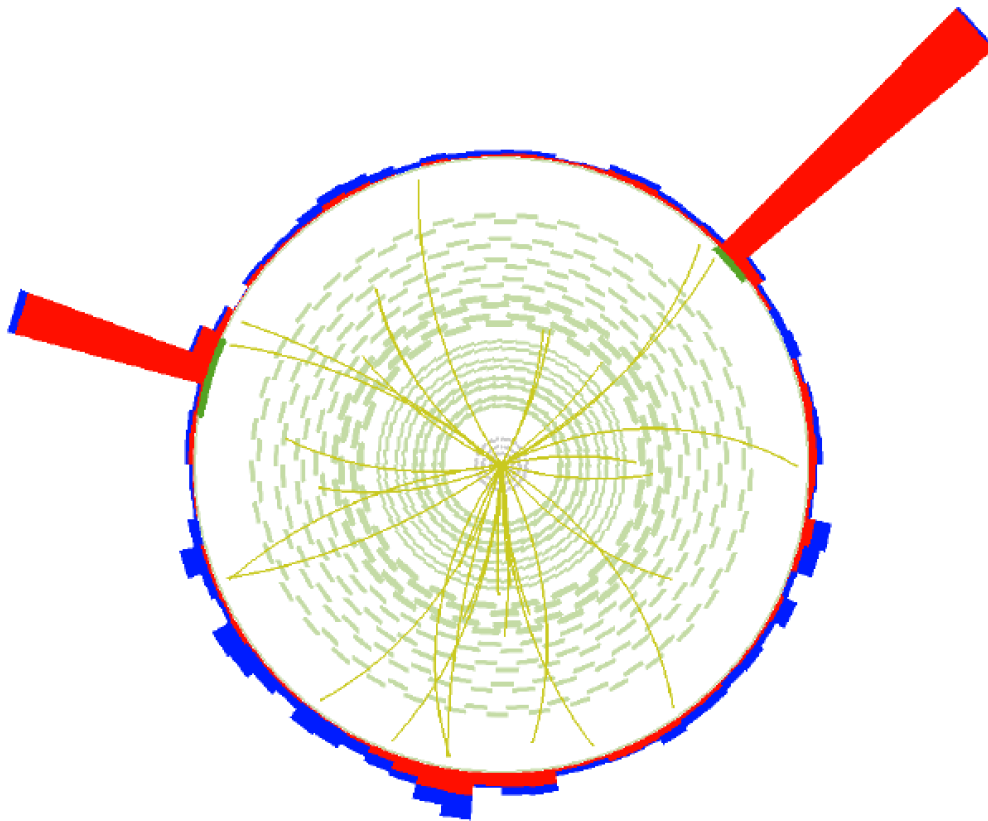
Run Number: 152221, Event Number: 383185

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



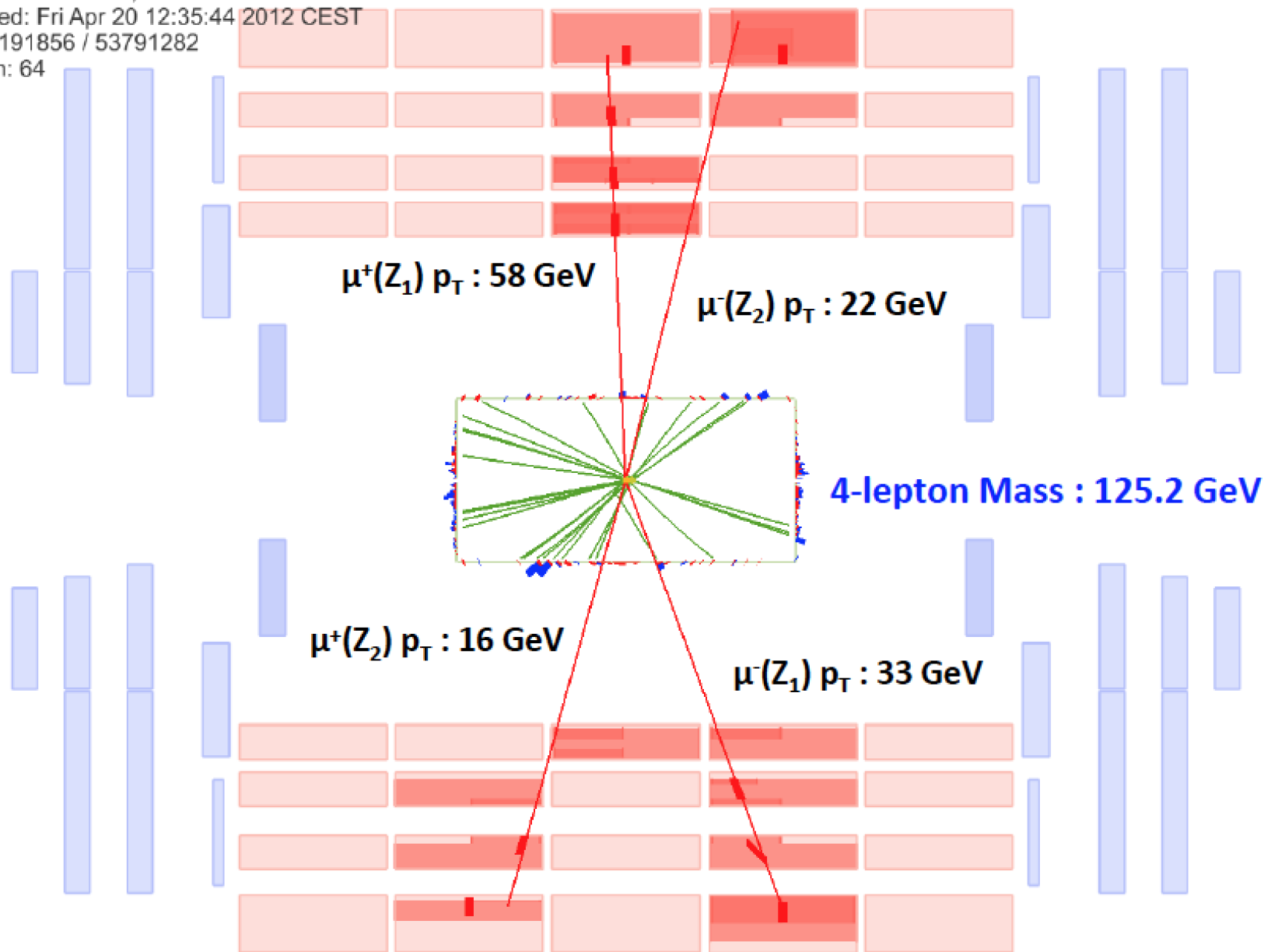
CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Sun May 13 22:08:14 2012 CEST
Run/Event: 194108 / 564224000
Lumi section: 575

CMS Experiment at LHC, CERN

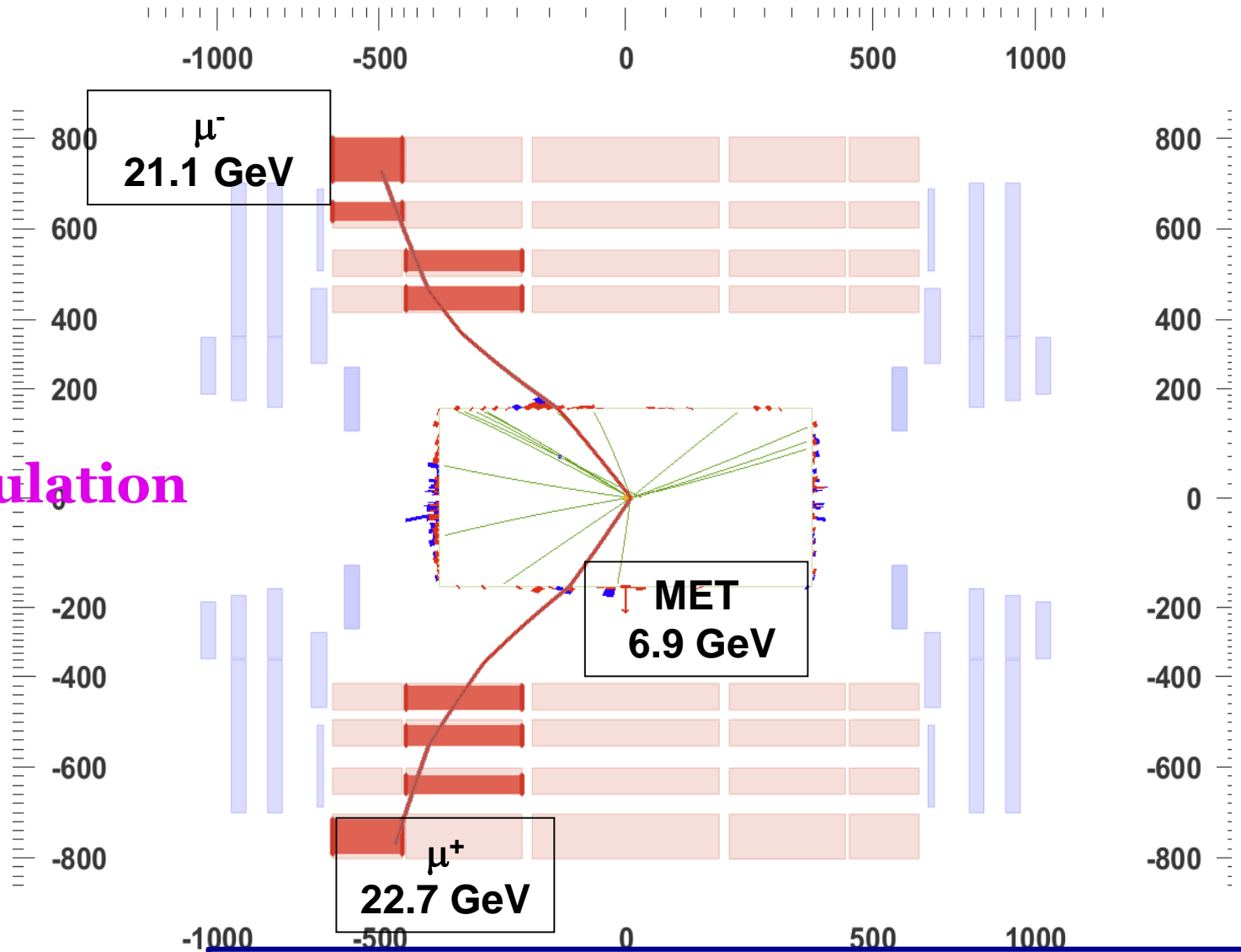
Data recorded: Fri Apr 20 12:35:44 2012 CEST

Run/Event: 191856 / 53791282

Lumi section: 64



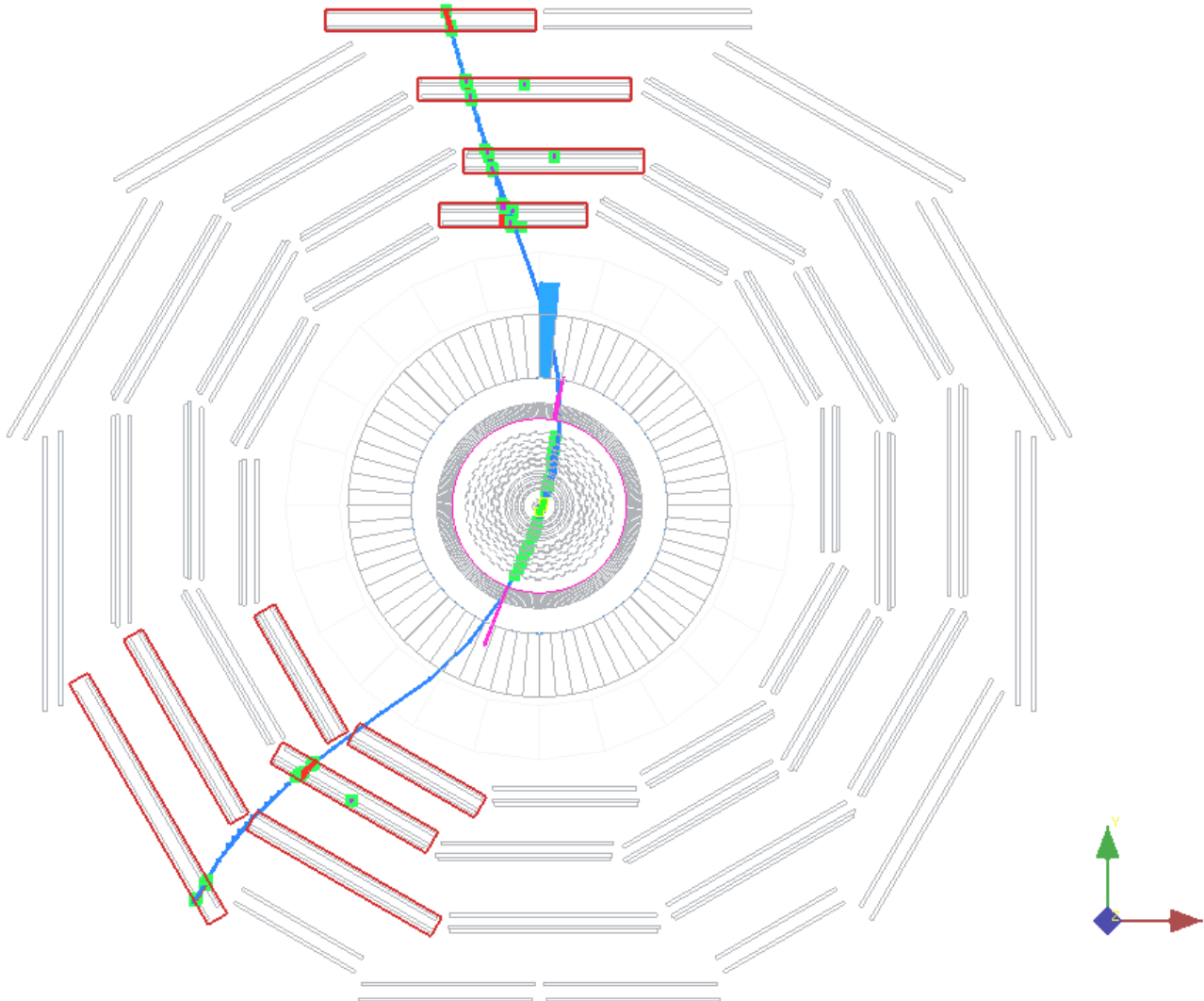
Simulation



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):

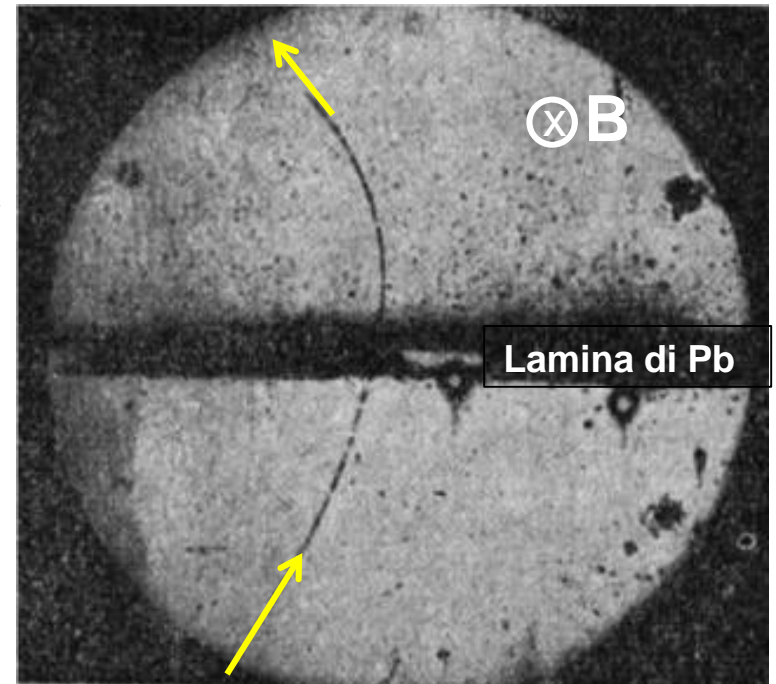
Camera riempita di vapore saturo che condensa a seguito della ionizzazione, rendendo visibile la traccia

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

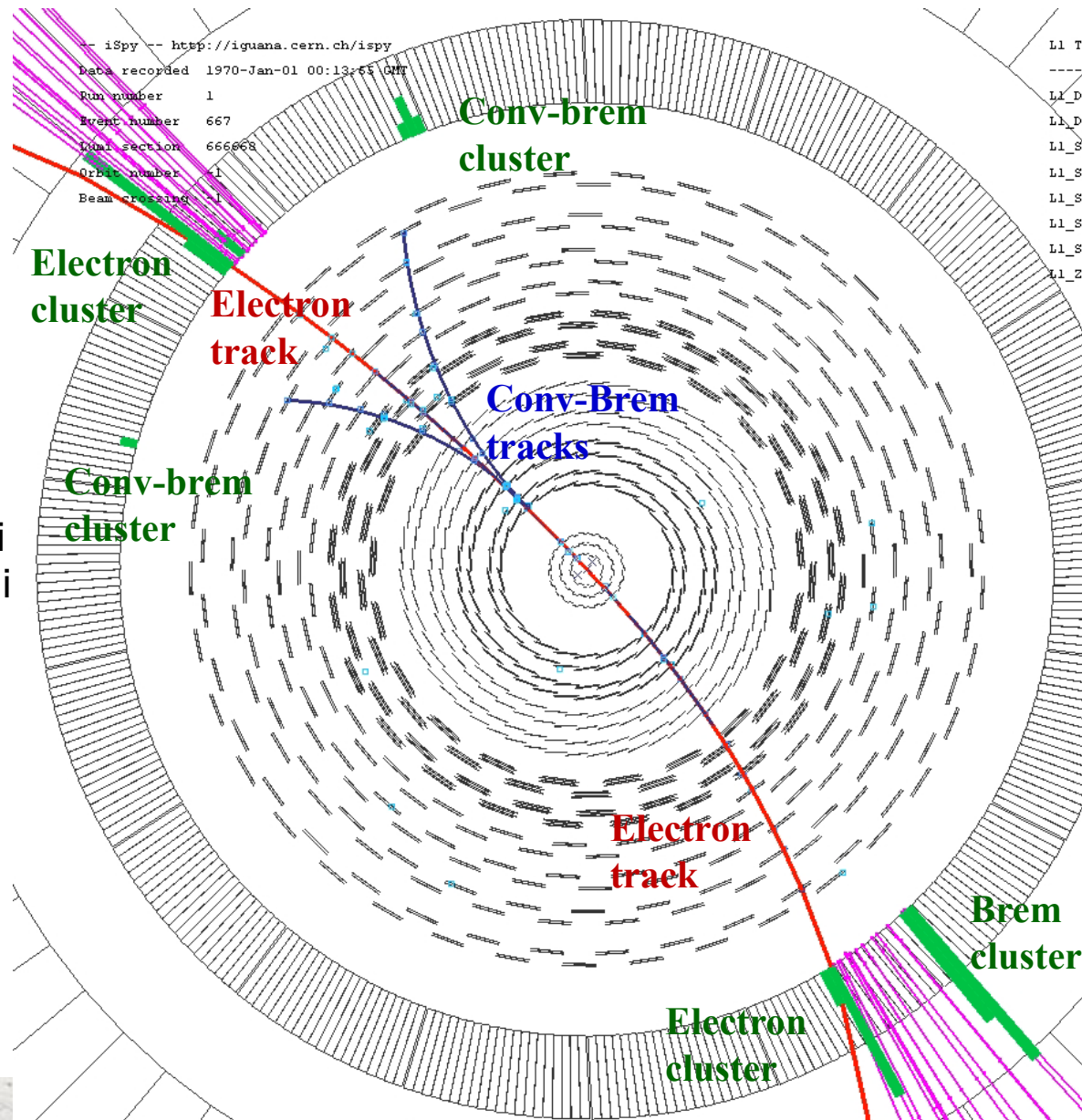
(1928 Dirac introduced the anti-matter)



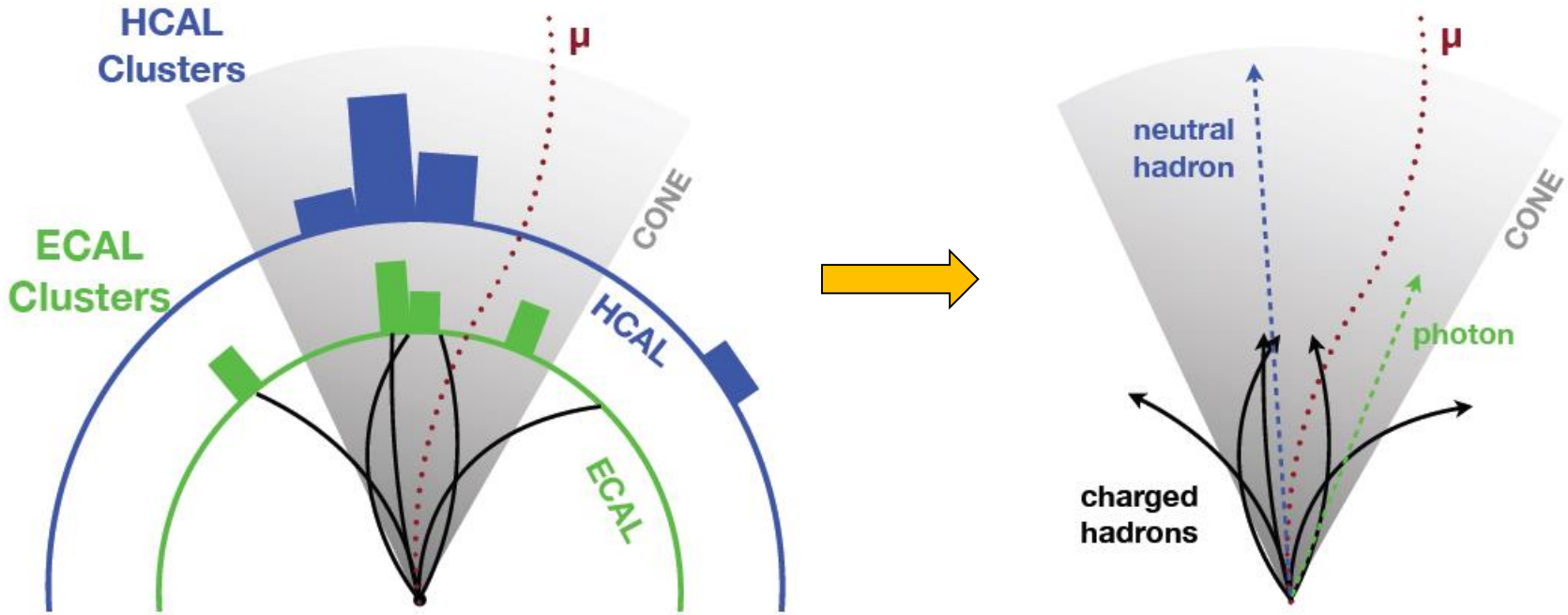
Algoritmi di Ricostruzione

Algoritmi sofisticati per **ricostruire gli oggetti presenti nell'evento** a partire da migliaia di singole misure indipendenti

- Pattern recognition
- Track fitting
- Clustering
- associazione di informazioni di diversi rivelatori, risoluzione di ambiguità
- Stima delle quantità fisiche



Descrizione globale dell'evento



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

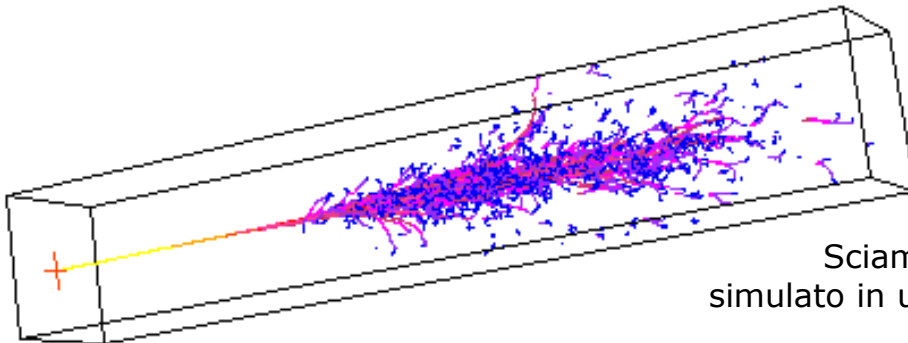
- Lista di **hit** → lista di **tracce/cluster** → Lista di **muoni, elettroni, fotoni, adroni carichi e neutri** → **jets e missing energy**

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



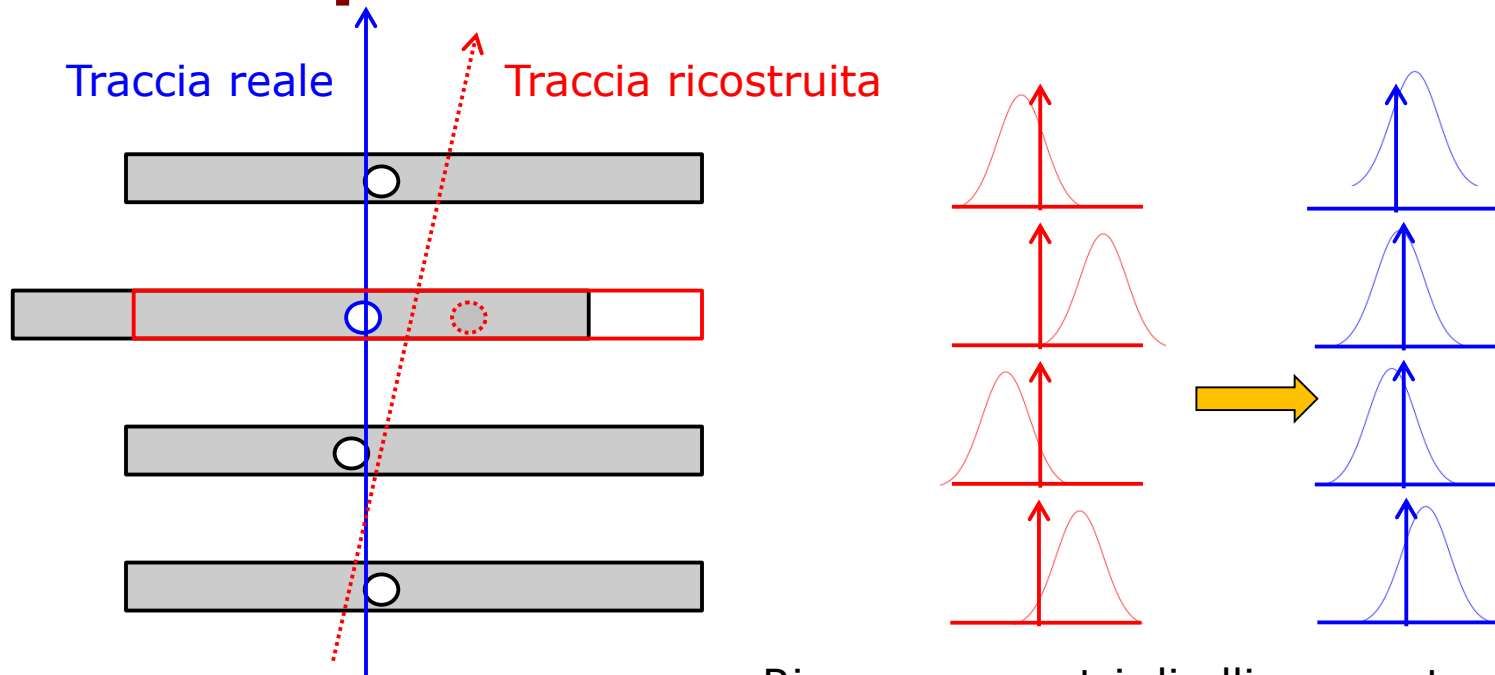
Sciame elettromagnetico
simulato in un cristallo di PbWO_4

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

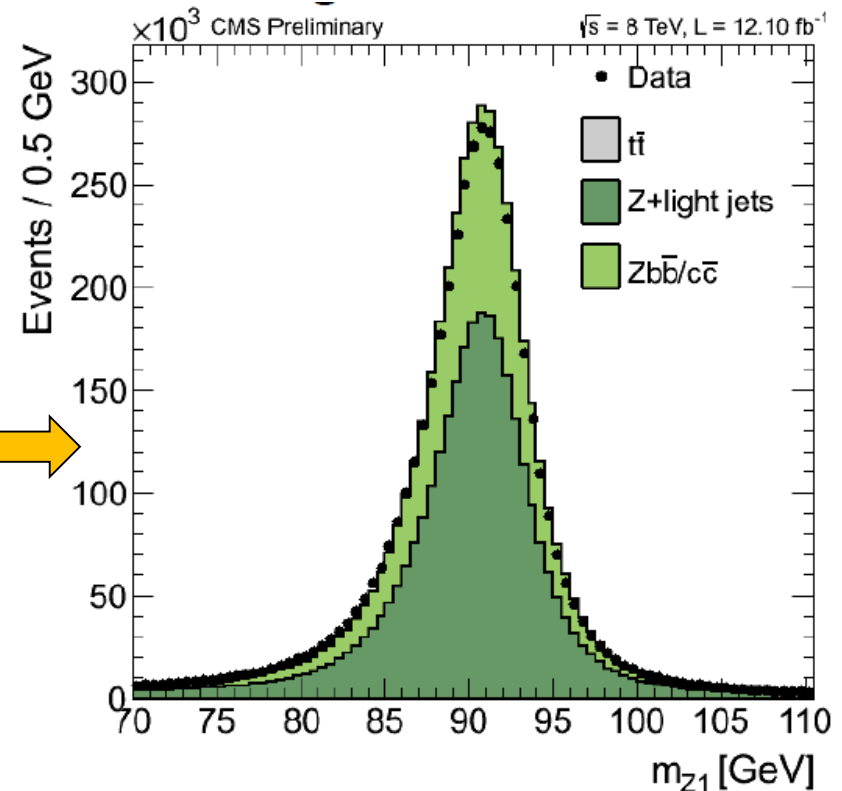
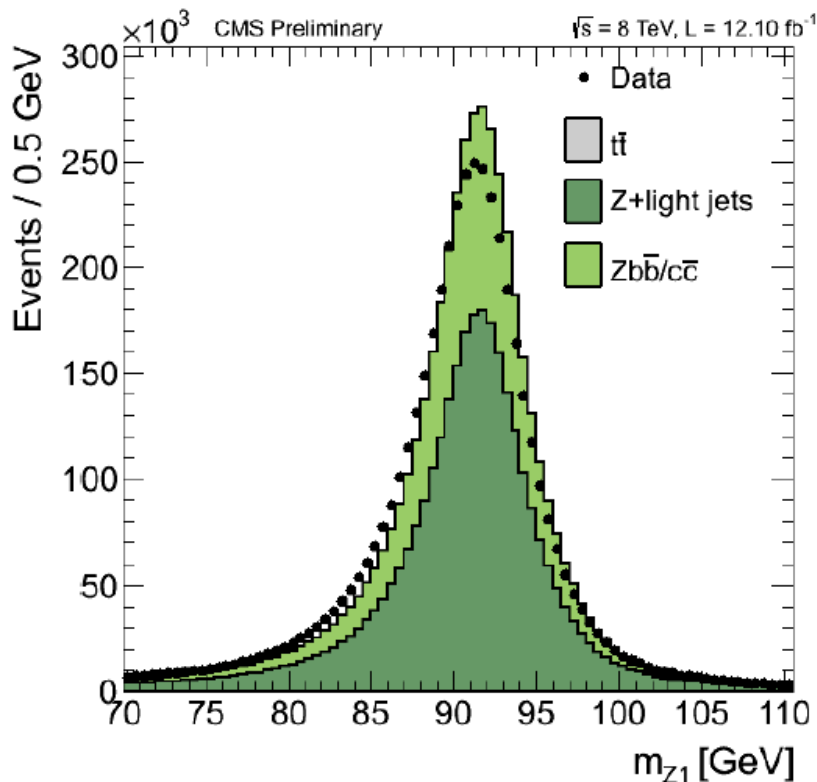
Mass $m = 91.1876 \pm 0.0021$ GeV [a]

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

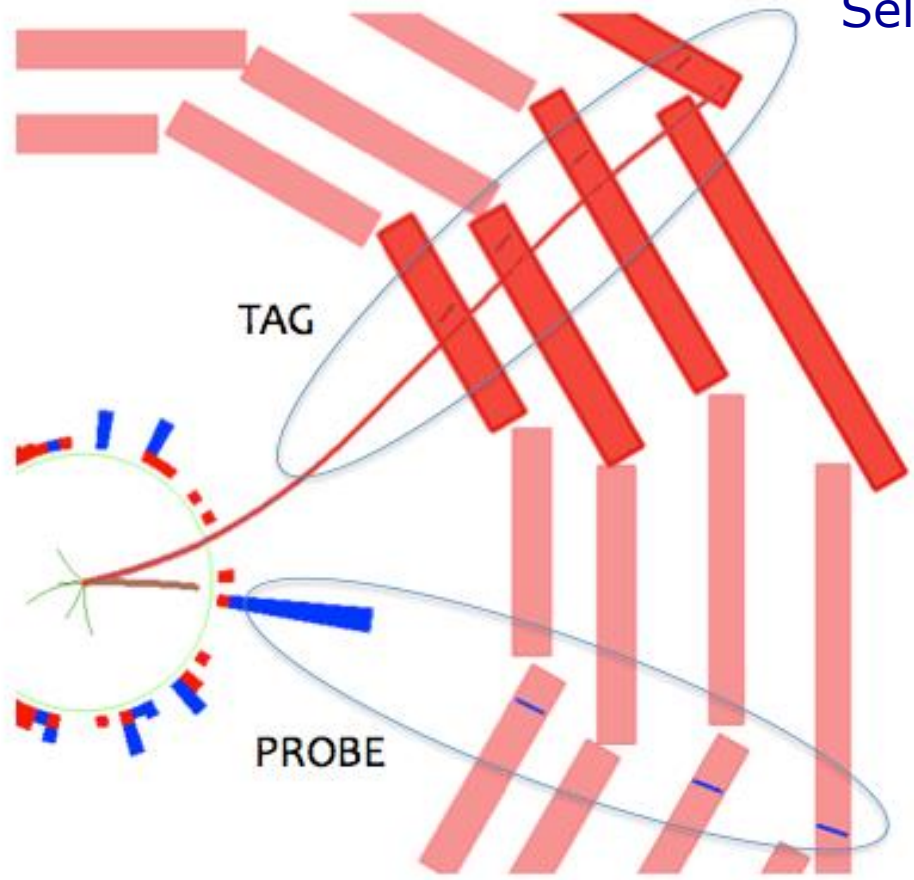
$\Gamma(\ell^+\ell^-) = 83.904 \pm 0.080$ MeV [b]

$\Gamma(\text{invisible}) = 499.0 \pm 1.5$ 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")

