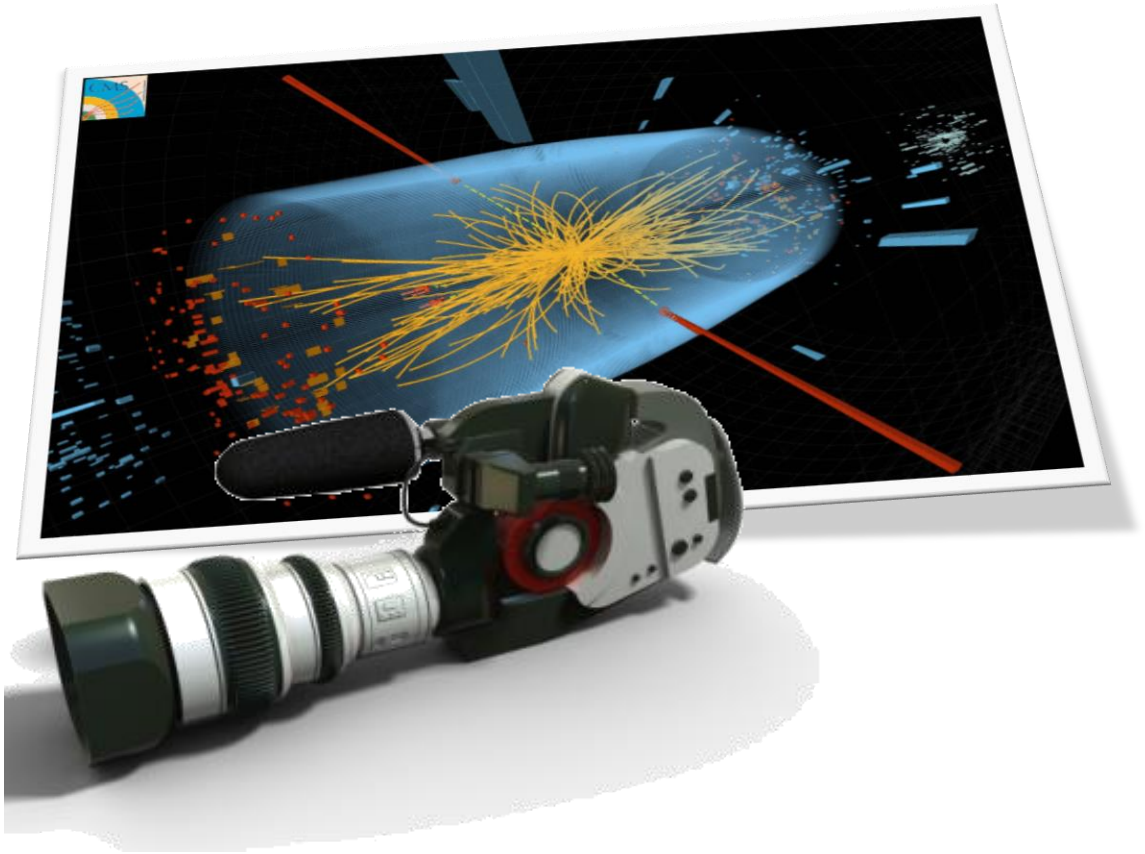
I rivelatori



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

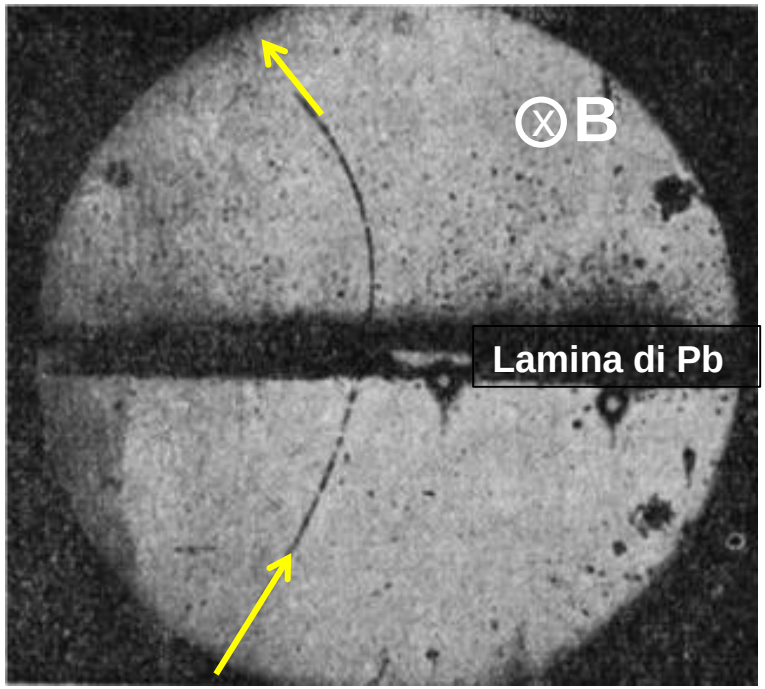
Come si "vedono" le particelle?

Sfruttando i meccanismi con cui interagiscono con la materia

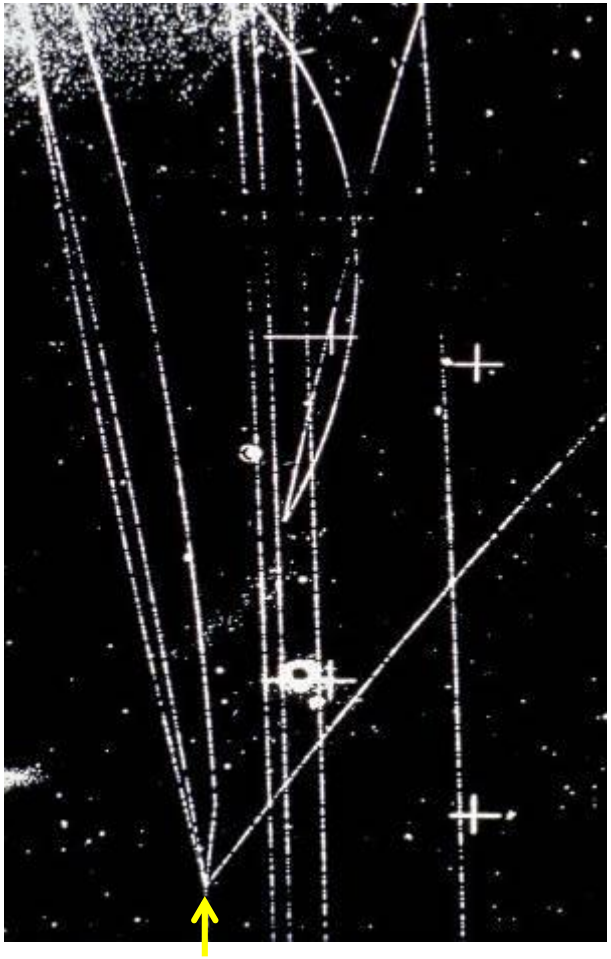
- Esempio: le particelle cariche ionizzano la materia al loro passaggio

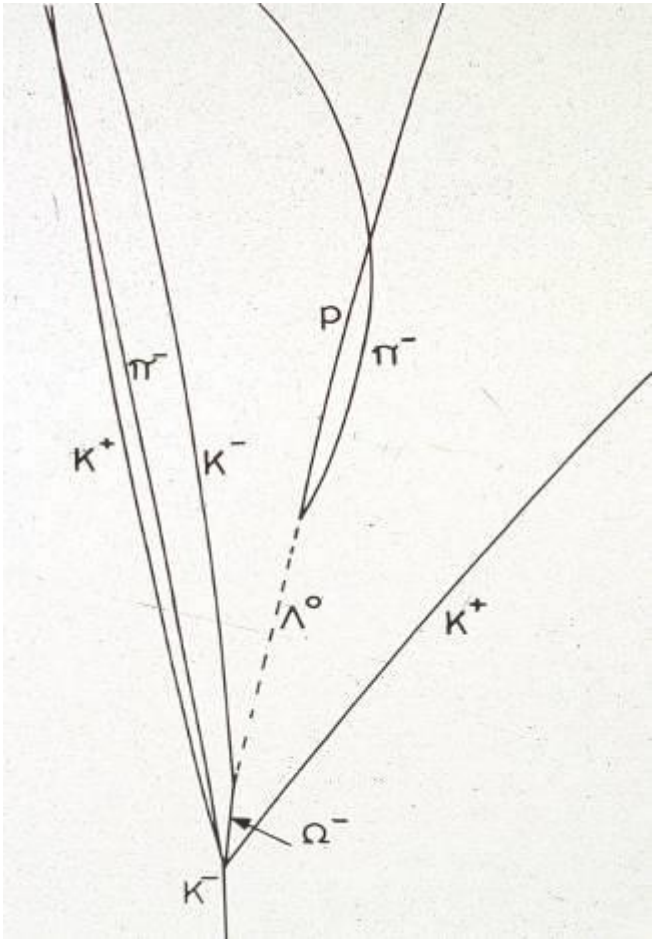
Camera a nebbia (Wilson, 1911; premio Nobel 1927):
Camera riempita di vapore saturo che condensa a seguito della ionizzazione, rendendo visibile la traccia

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)



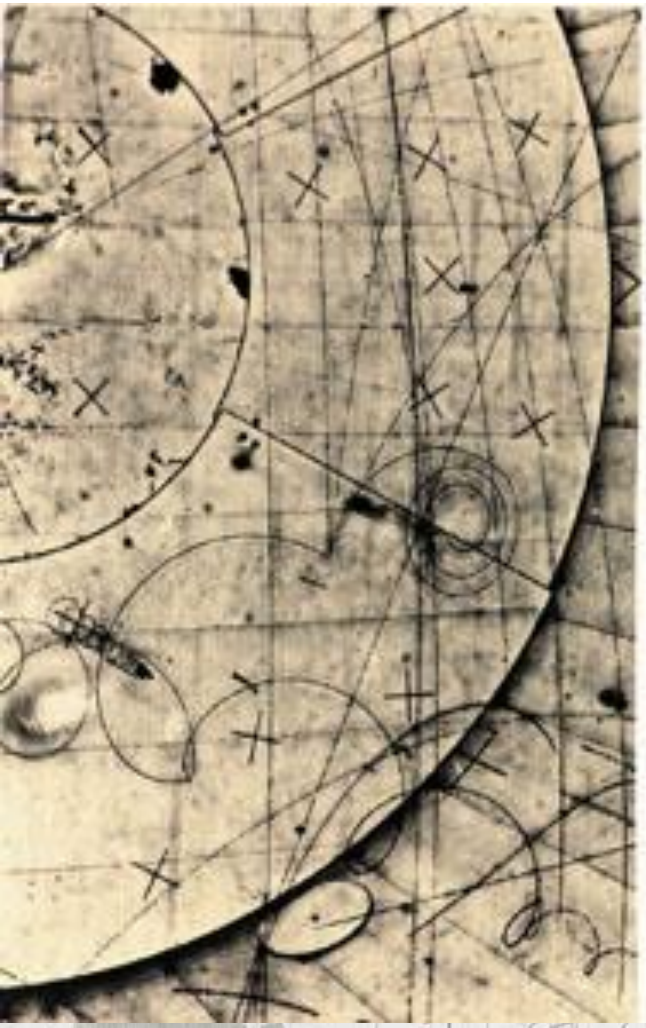
I primi rivelatori: Camere a bolle

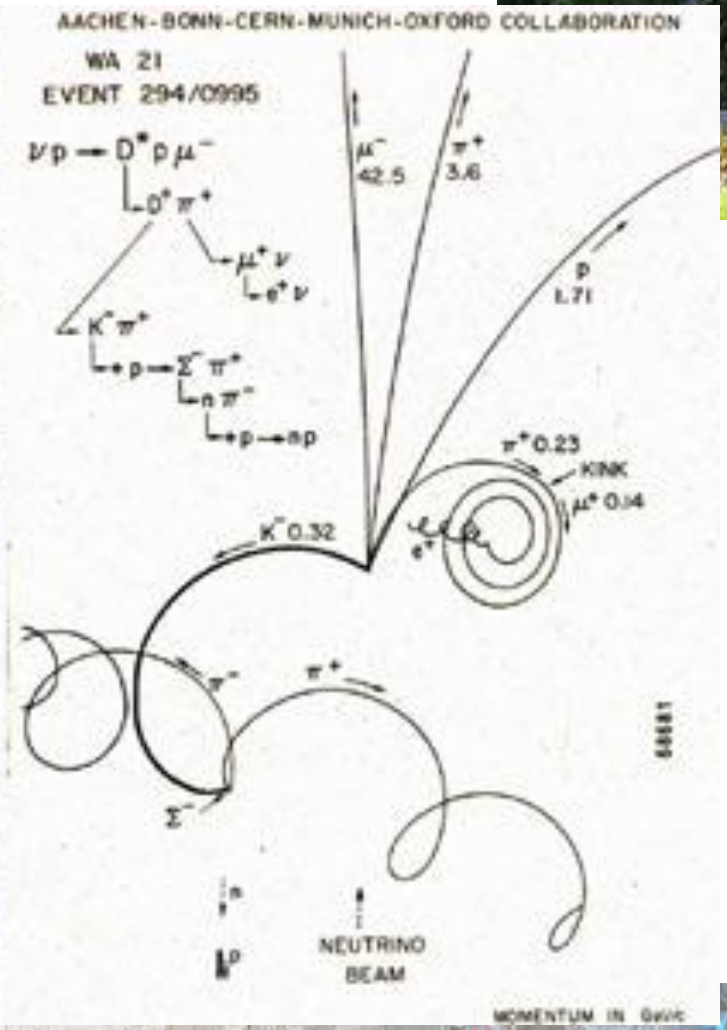




Milioni di collisioni fotografate e studiate una ad una..

Gargamelle

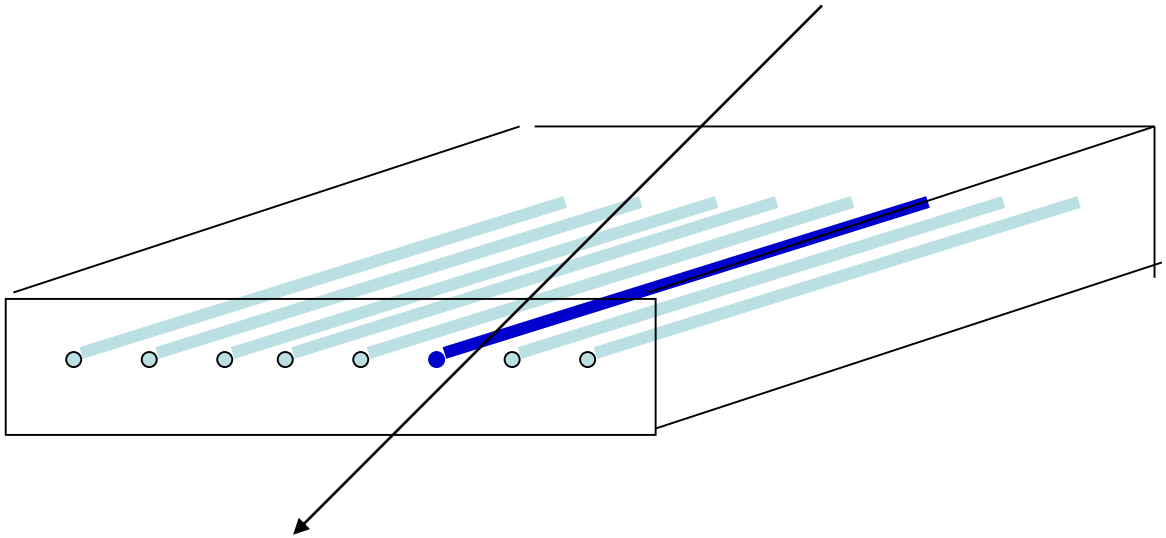



AACHEN-BONN-CERN-MUNICH-OXFORD COLLABORATION
WA 21
EVENT 294/0995
$\nu p \rightarrow D^0 p \mu^-$
$D^0 \pi^+$
$\mu^+ \nu$
$e^+ \nu$
$K^- \pi^+$
$p \Sigma^- \pi^+$
$n \pi^-$
$p \rightarrow np$
μ^- 42.5
π^+ 3.6
p 1.71
π^+ 0.23
KINK
μ^+ 0.14
K^- 0.32
π^-
π^+
Σ^-
n
p
NEUTRINO BEAM
MOMENTUM IN GeV/c

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

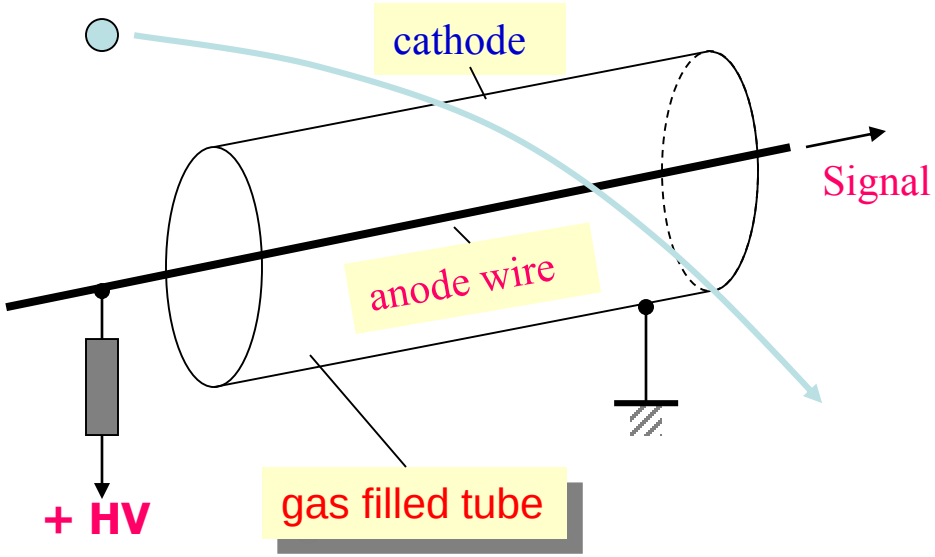


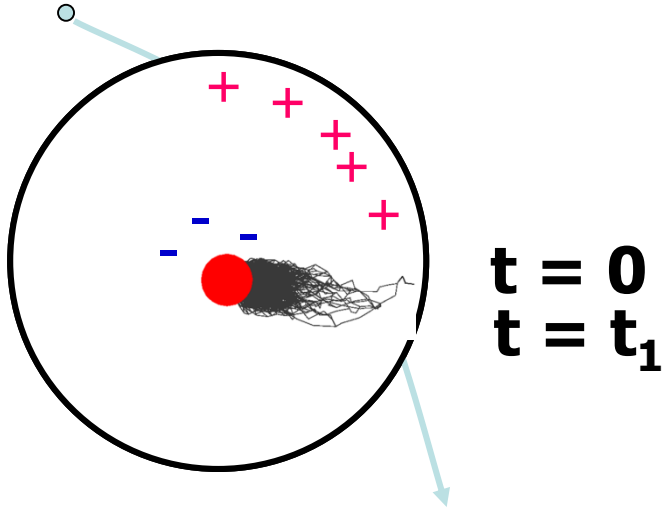
Premio Nobel nel 1992

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

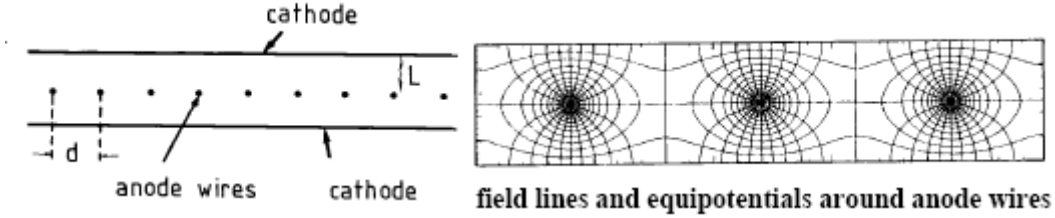
Si passa all'era totalmente elettronica:
- Rapidità di acquisizione e di lettura
- Possibilità di processamento con computer

Rivelatori a gas





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



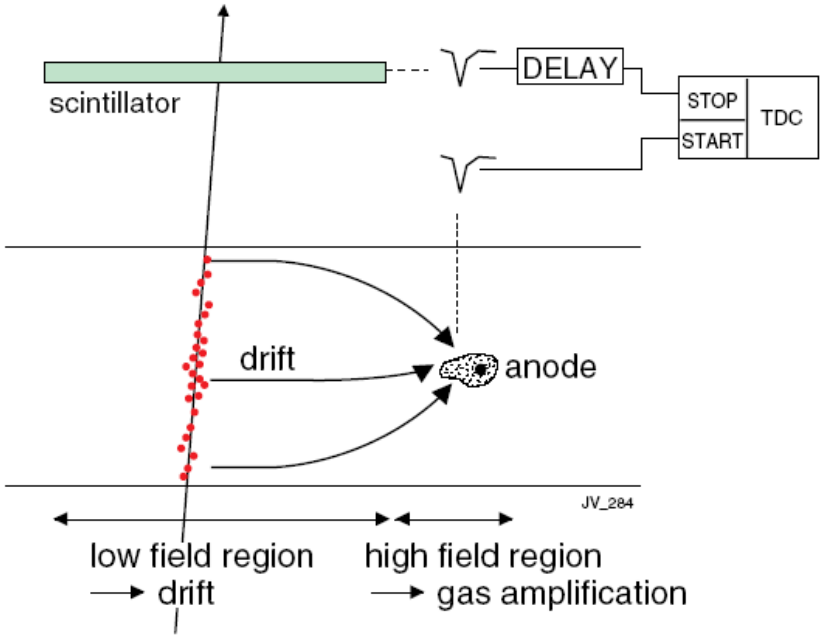
field lines and equipotentials around anode wires

Drift Chamber

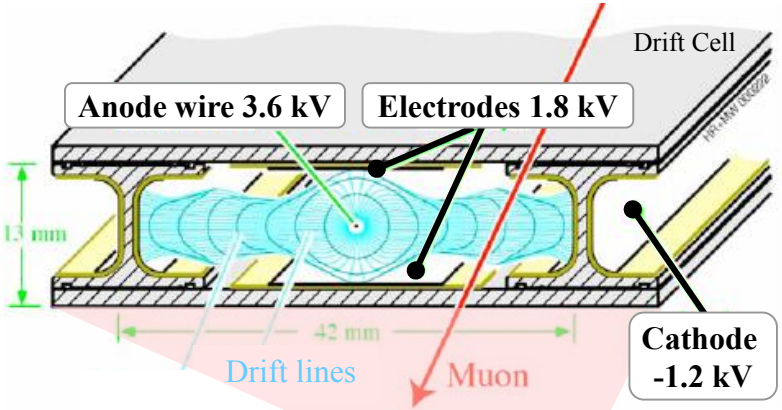
Le camere a fili standard sono limitate nella precisione della misura delle traiettoria dalla distanza tra i fili.

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

Il tempo di passaggio della particella deve pero‘ essere noto.

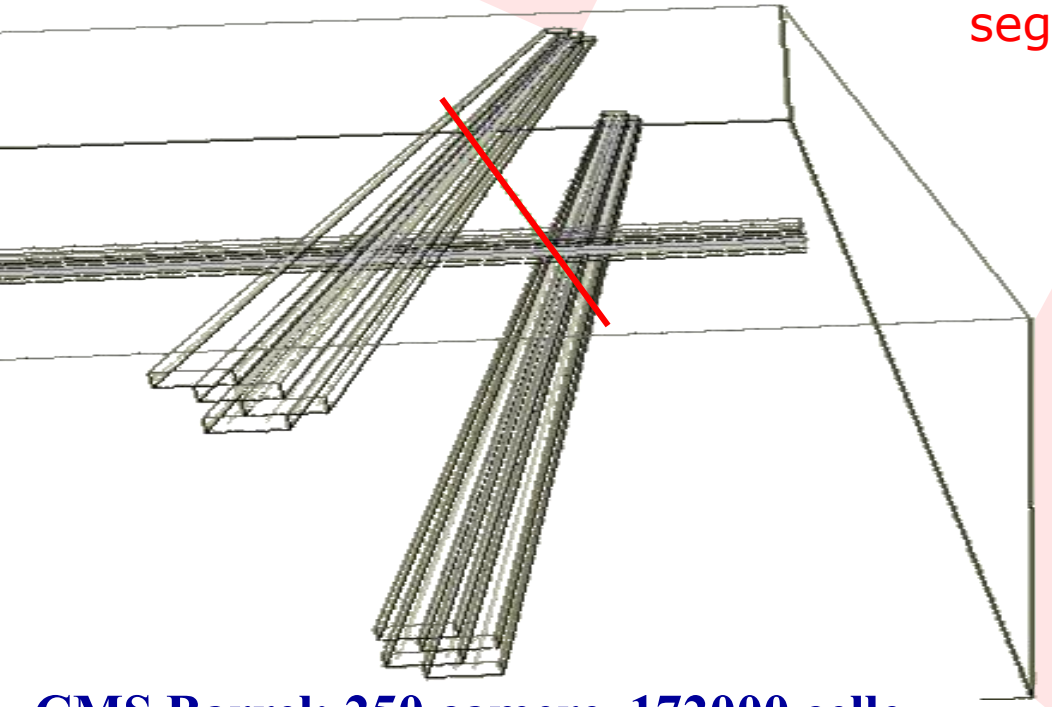


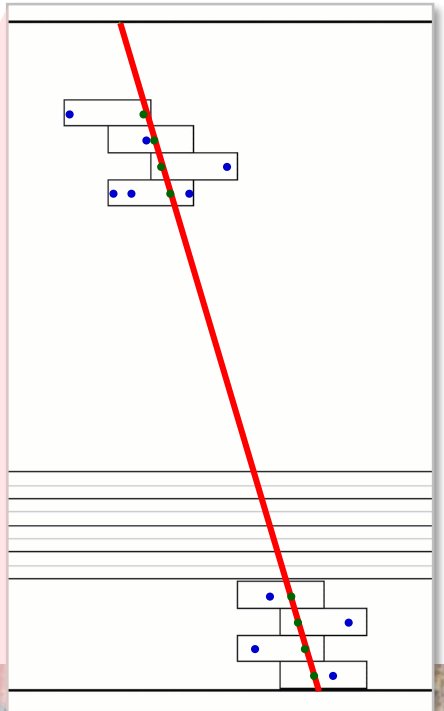
Camere a muoni: es. Drift Tubes



Strati sovrapposti di celle indipendenti

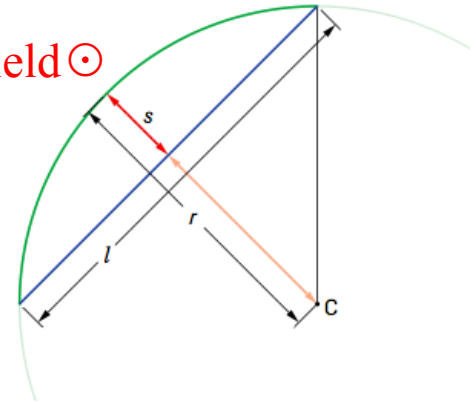
- Misura della posizione dal tempo di drift delle cariche prodotte per ionizzazione
- Risoluzione ~200 μm
- Gruppi di di strati ortogonali permettono la ricostruzione di un segmento 3D





CMS Barrel: 250 camere, 172000 celle

Compact MUON Solenoid

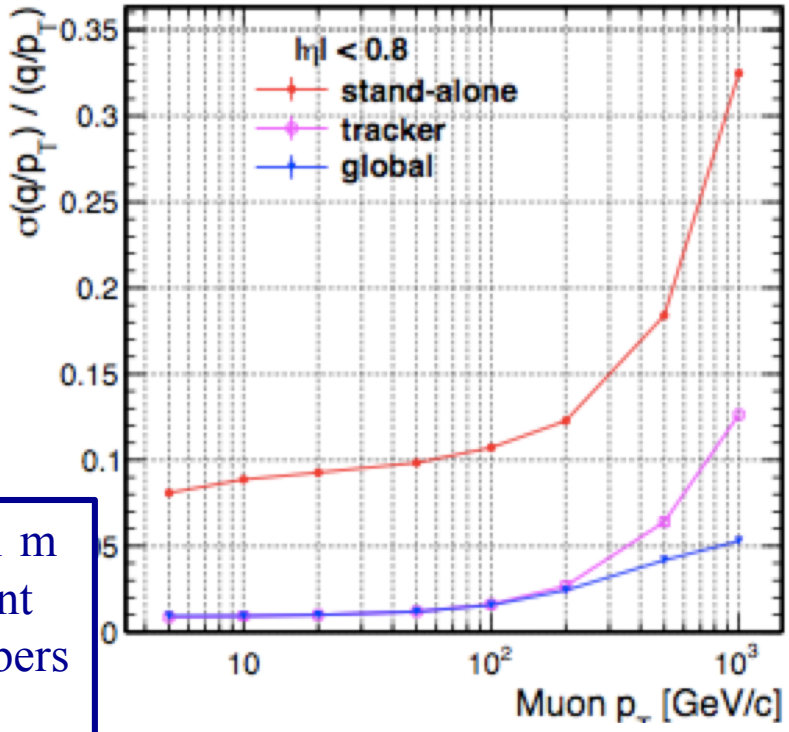


$$r = \frac{\square^2}{8s} + \frac{s}{2} \quad \text{»}_{highP_t} \quad \frac{\square^2}{8s}$$

$$P_t \mu 0.3 \times B \times r$$

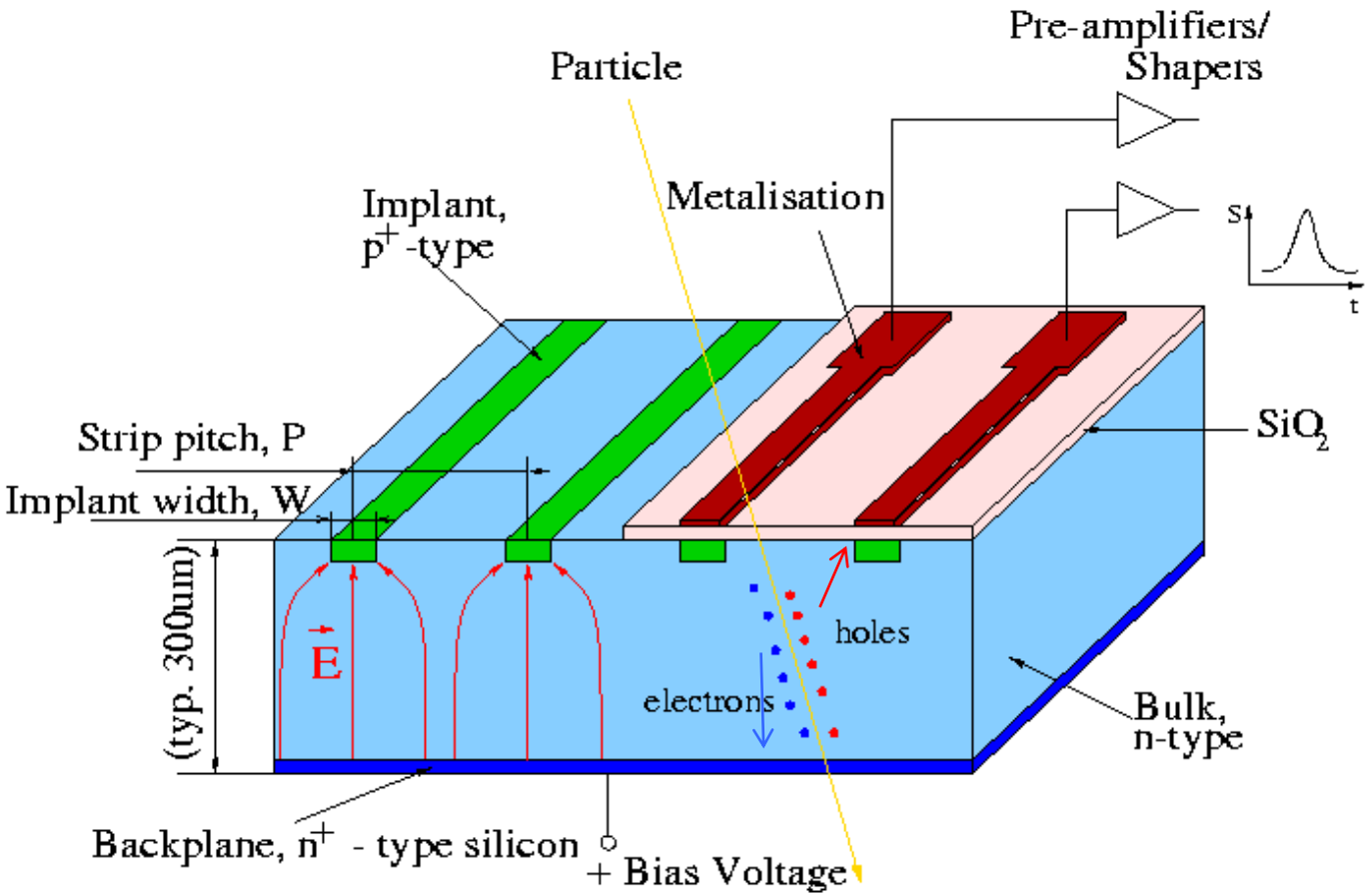
$$\frac{\Delta P_t}{P_t} \propto \frac{\Delta s}{\ell^2} + \ldots$$

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 (~3m)



Rivelatori al silicio

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



Rivelatori al vertice

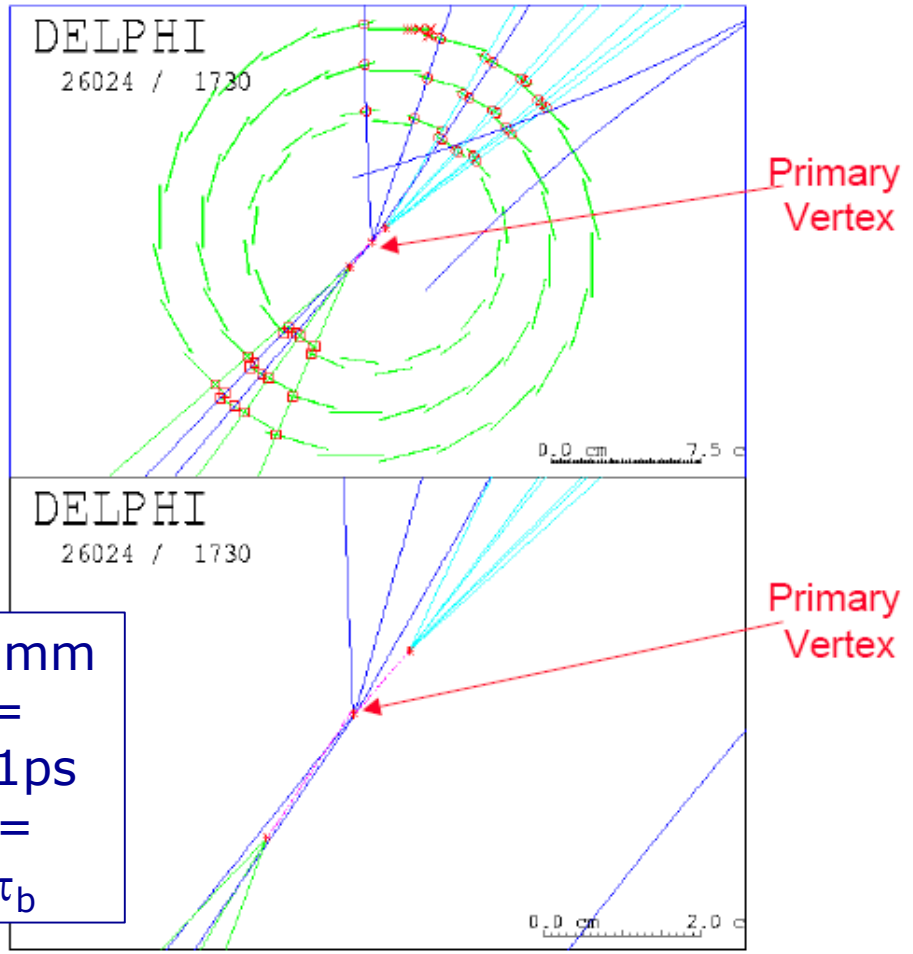
Il rivelatori al silicio permettono misure di posizione con altissime precisioni (~10μm)

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

Sono molto costosi (~8 euro/cm^2) e vengono usati solo nelle zone vicino al vertice dell'interazione.

Reconstructed B-mesons in the DELPHI micro vertex detector

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



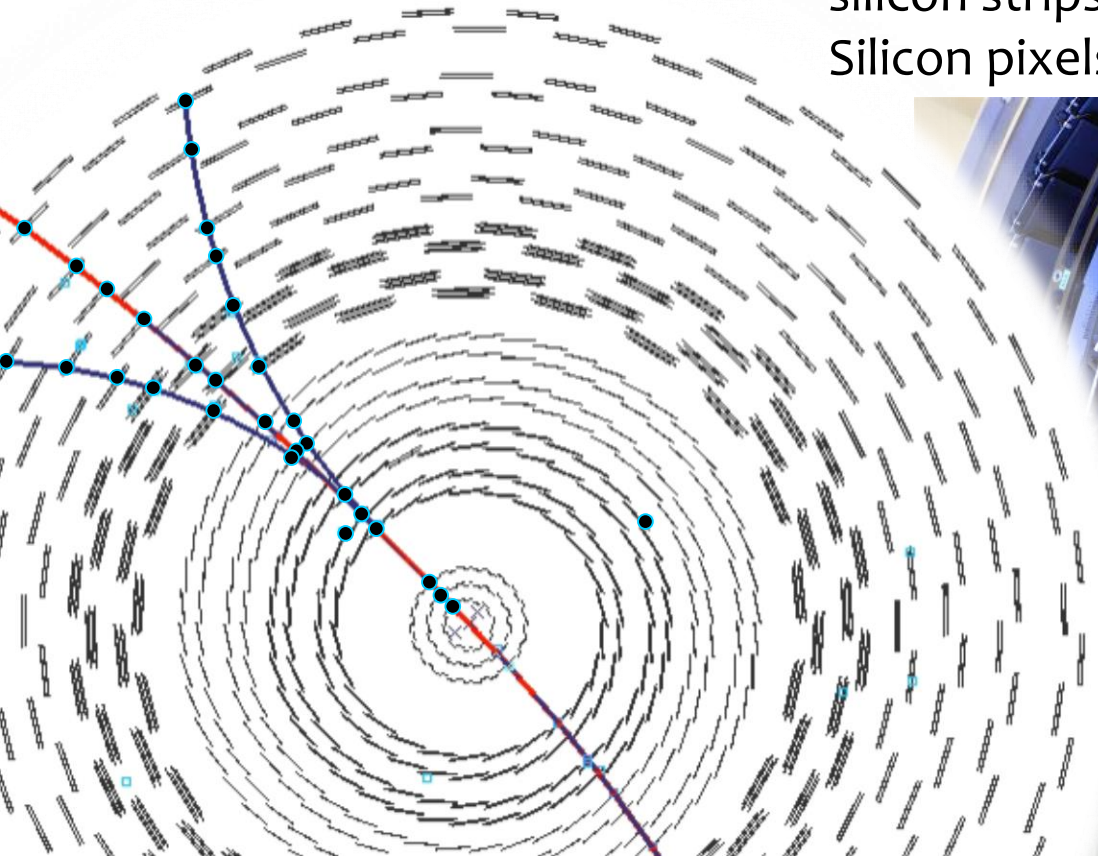
~3 mm
=
~1ps
=
τ_b

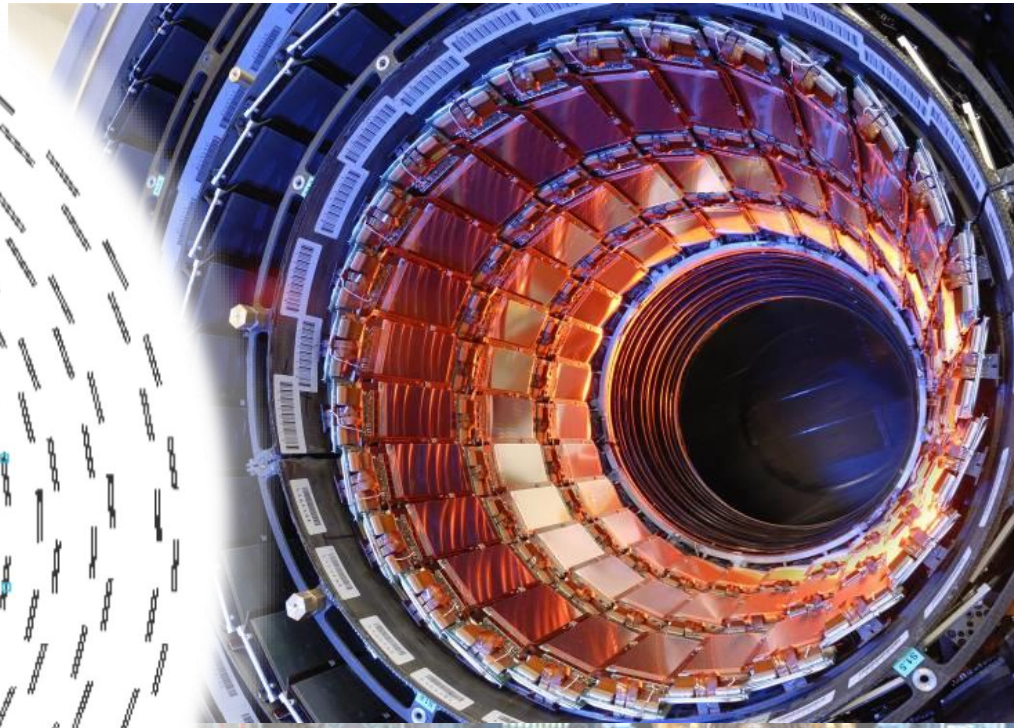
Misura della traiettoria: i tracciatori

Ricostruzione della traiettoria: dai "punti" in strati successivi

Misura della quantità di moto: dalla curvatura nel campo magnetico

CMS Tracker:
silicon strips: 200 m^2, 10M canali, σ = 80-180 μm
Silicon pixels: 16m^2, 66M canali, σ = ~15 μm





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

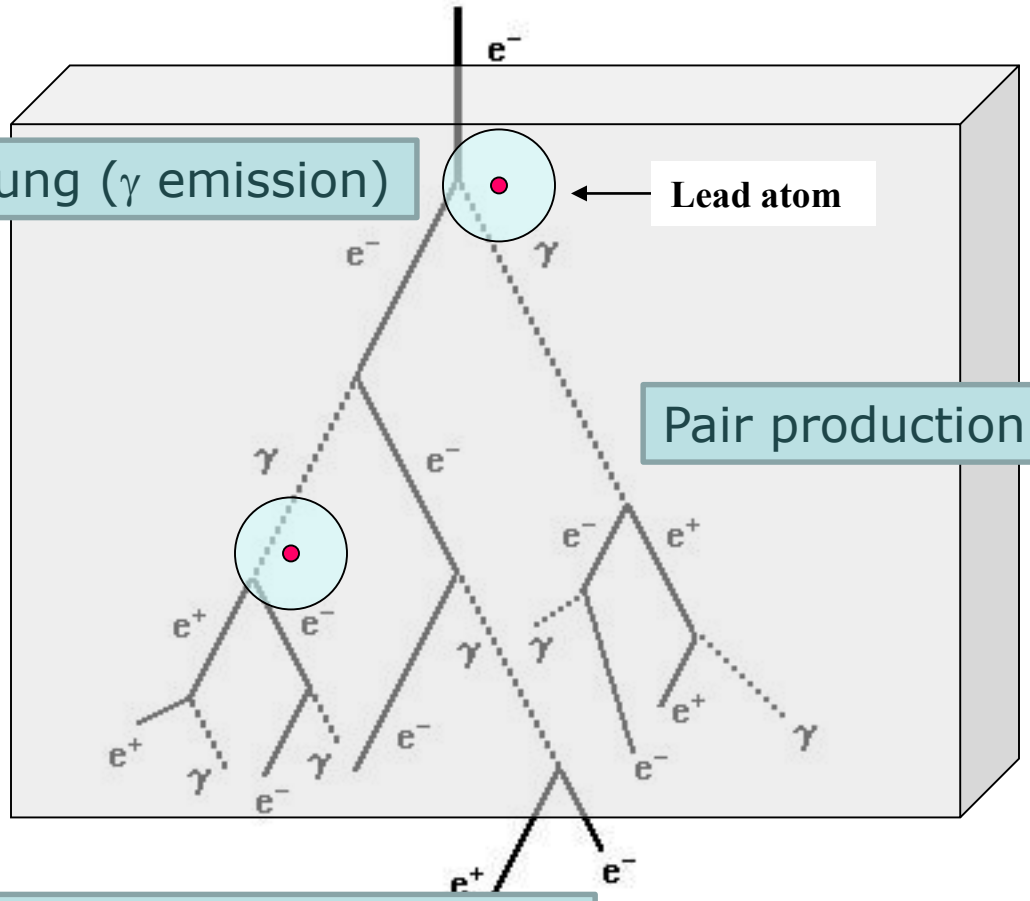
Principio di misura:

- Sciame electromagnetico (interazioni elettromagnetico delle particelle con il materiale)
- Sciame adronico (dominato da interazioni forte delle particelle con il materiale)

Il segnale che leggiamo e' la conversione della ionizzazione o dell'eccittazione - 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



Bremsstrahlung (γ emission)

Pair production (electron-positron)

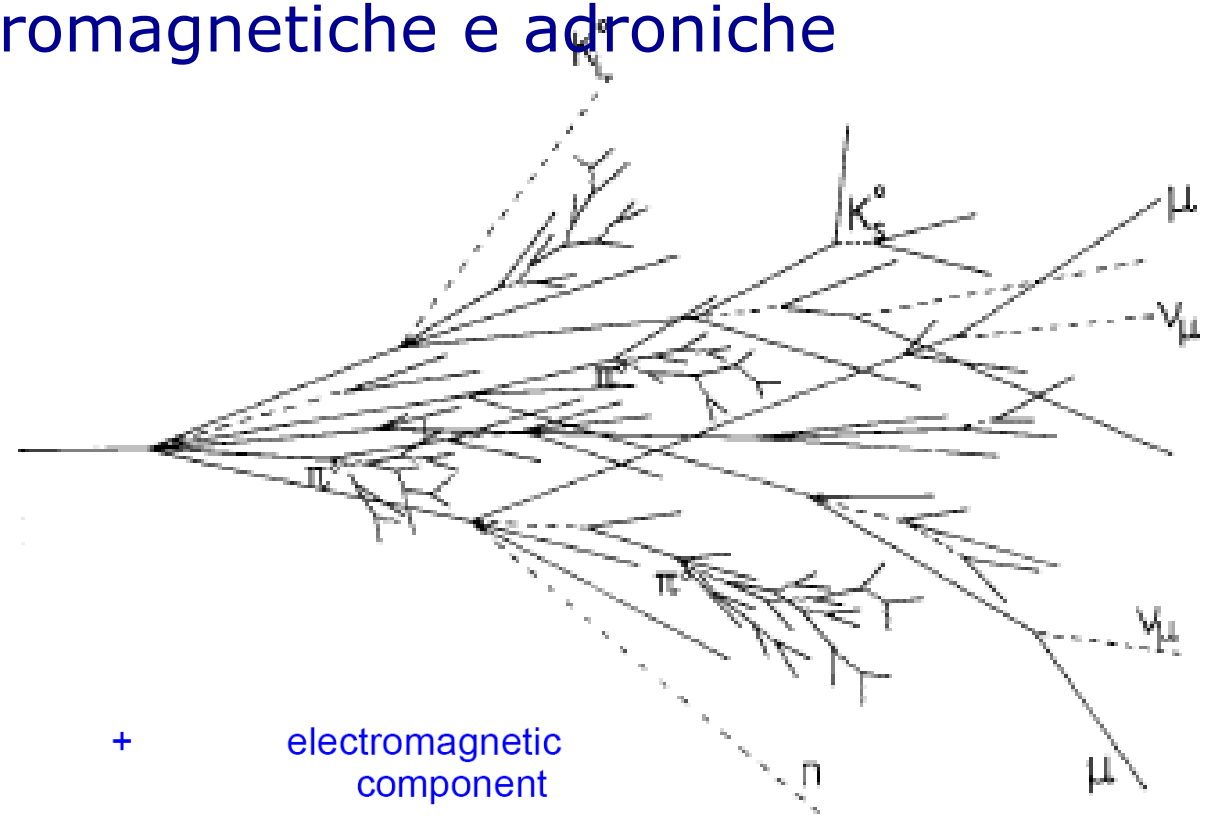
etc.

Until all particle energy is spent ;-)

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

Calorimetro adronico

Cascata di particelle con componenti elettromagnetiche e adroniche



(Grupen)

Hadronic + electromagnetic component

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

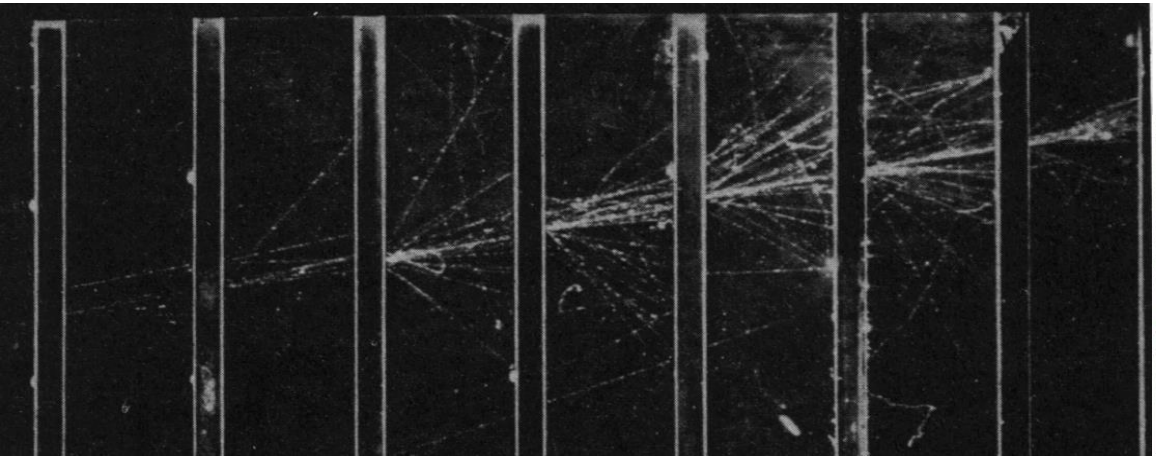
neutral pions → 2γ →
electromagnetic cascade

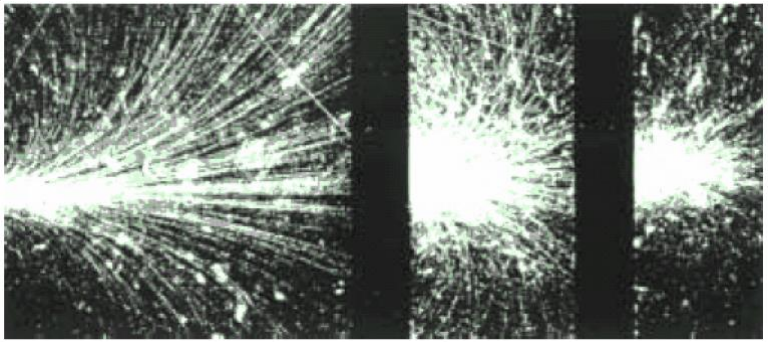
$$n(\pi^0) \approx \ln E(GeV) - 4.6$$

example 100 GeV: $n(\pi^0) \approx 18$

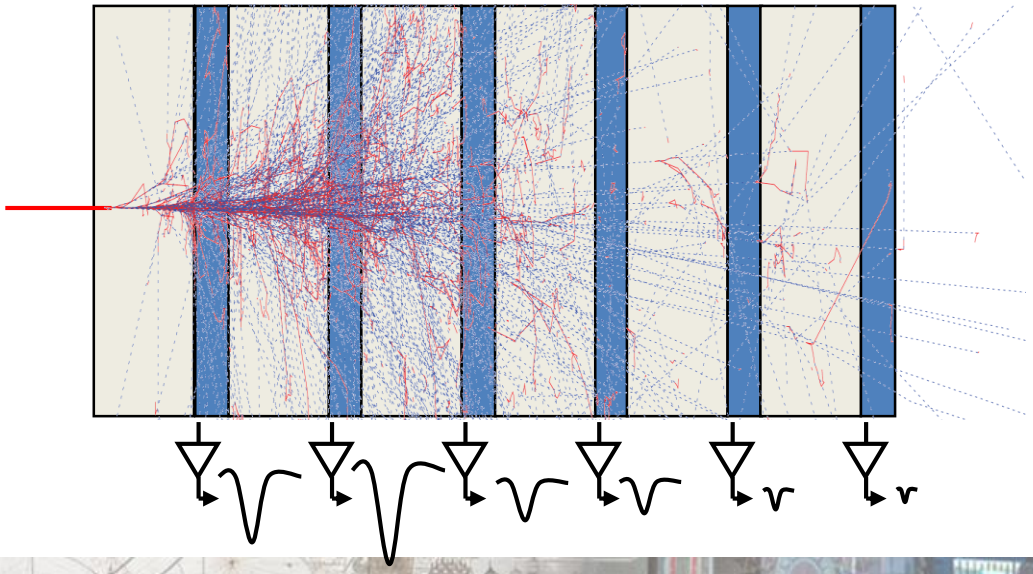
Misura dell'energia e' meno precisa dei calorimetri elettromagnetici, a causa di grandi fluttuazioni negli sciami adronici

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



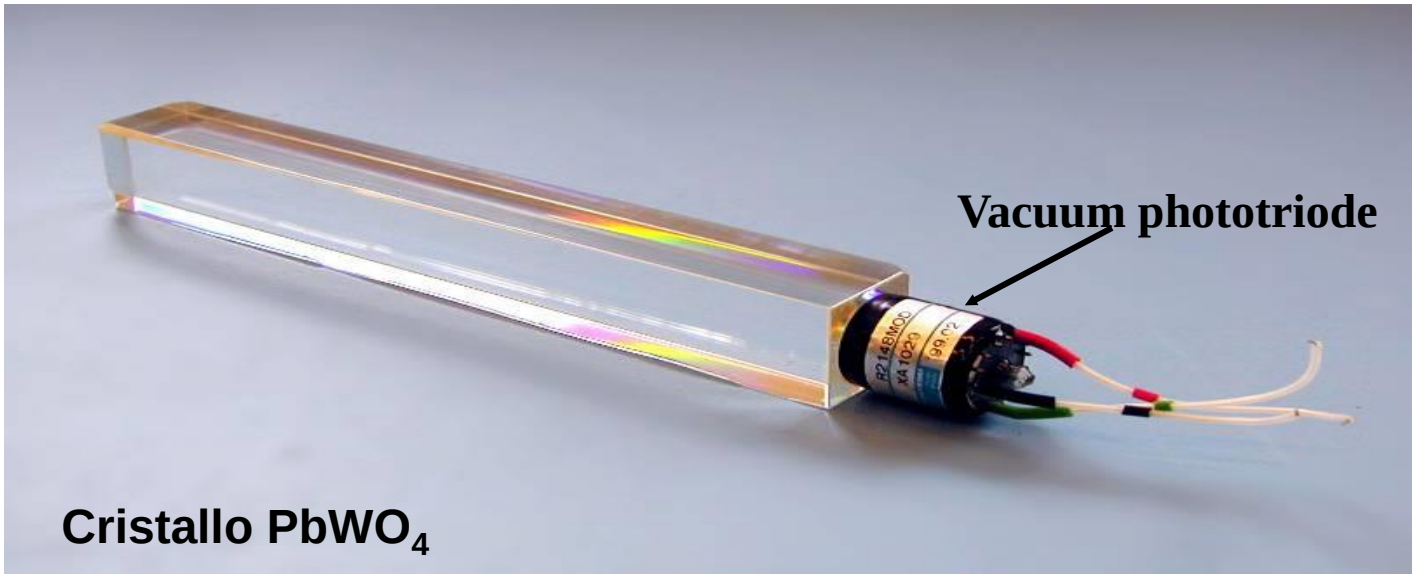


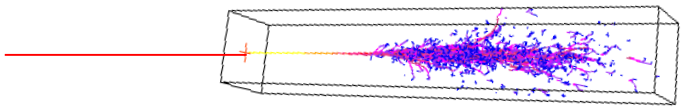
Possono essere composti da assorbitori passivi (che fanno sciamare le particelle) alternati ad elementi sensibili (che permettono di "leggere" la particella…)



… 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 porter permettere alla luce generata da queste di arrivare al fotocatodo.

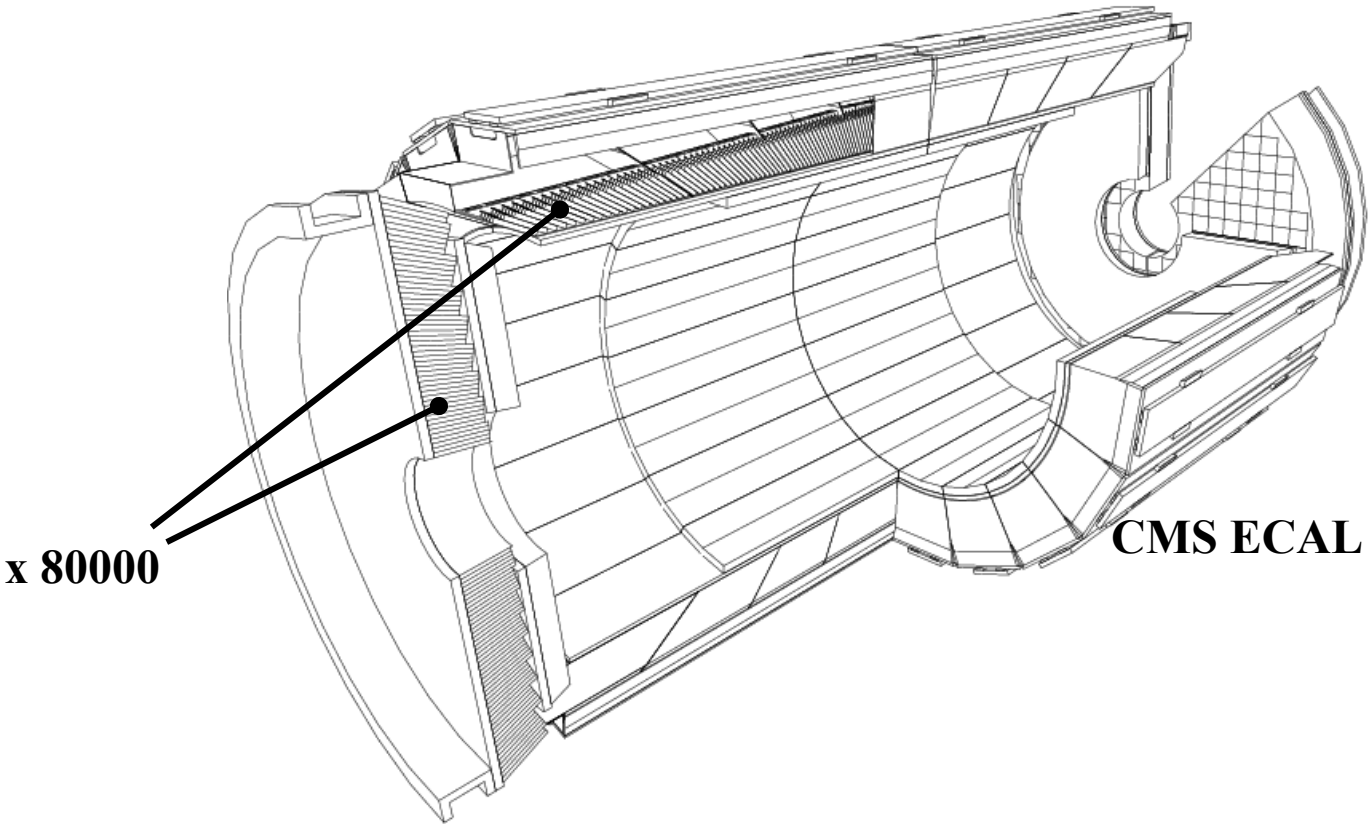




Calorimetro Elettromagnetico di CMS

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 Bremmstrahlung (emissione di fotoni)

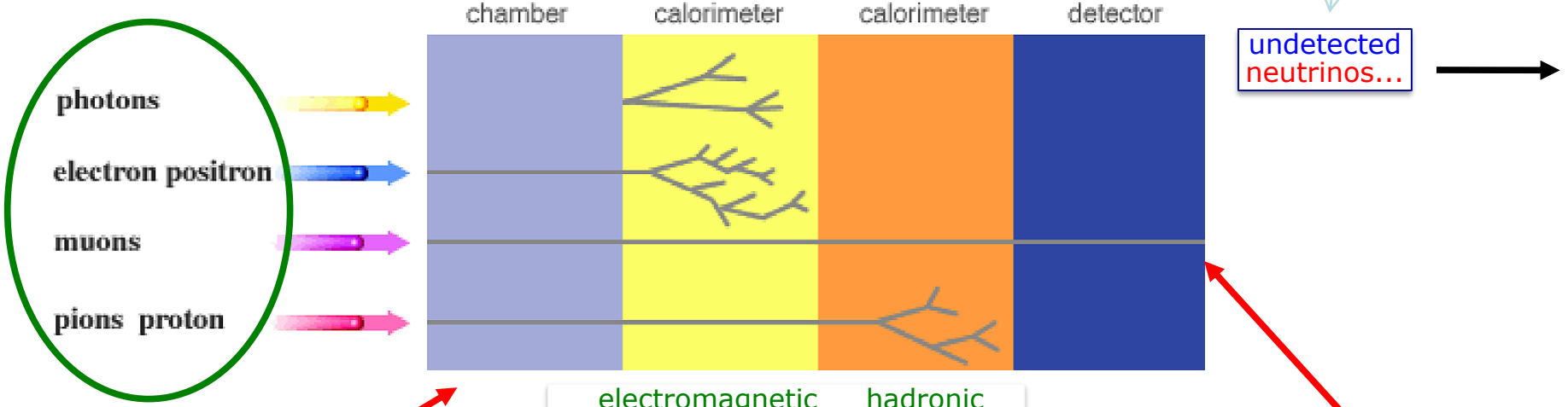
- la sezione d'urto è proporzionale a $1/m^2$

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

  - 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



misura del momento
via curvatura
nel campo magnetico

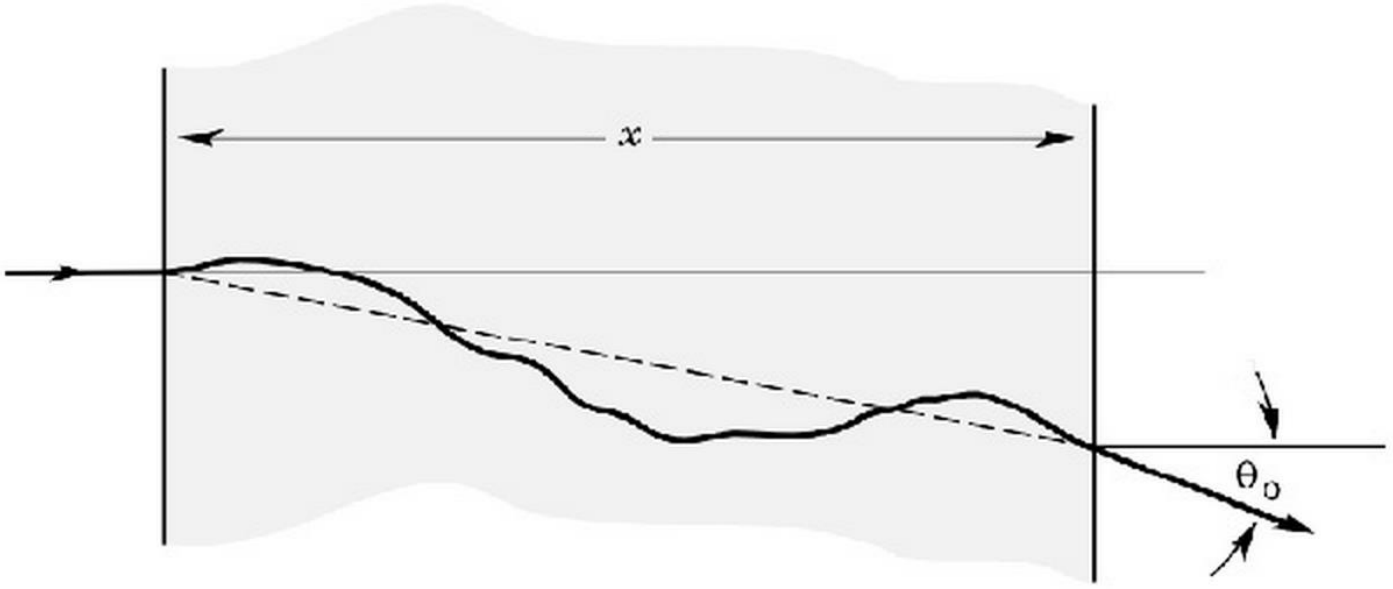
misura dell' energia
via creazione e totale
assorbimento di sciami

rivelazione dei muoni
che hanno attraversato tutto
Il rivelatore.
Lungo braccio di leva:
misura del momento

Lo scattering multiplo

Man mano che ci si allontana dal vertice dell'interazione, si usano rivelatori con minor precisone 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"

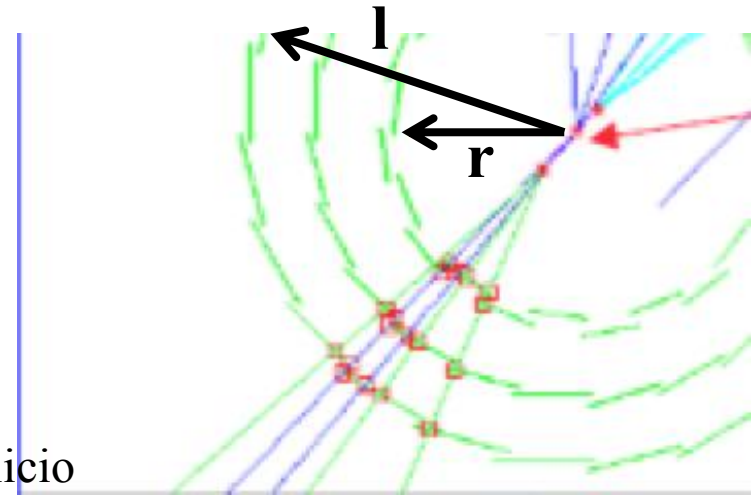


La precisione necessaria

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 ~10μm sono necessarie. Il rivelatore deve essere posizionato a un raggio piu’ piccolo possibile, e avere almeno 3 strati per determinare la traccia…

$$s^2_{res} = s^2_{\text{int}} \cdot \sqrt{1 + 2\frac{r}{l} + 2\frac{r^2}{l^2}} + s^2_{MS}$$



σ_{int} e’ data dalla distanza tra le “strisce” attive del silicio

σ_{MS} (multiple-scattering) ~ $a^2 + b^2/p^2 \sin\theta^{3/2}$

La precisione necessaria

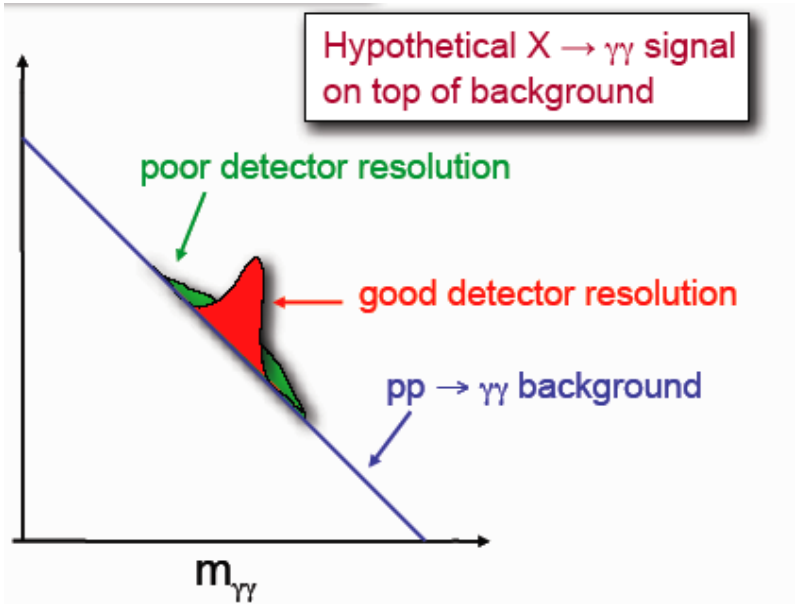
Se vogliamo rivelare H → $\gamma\gamma$ e avere un picco "stretto" in massa, il nostro calorimetro dovra' avere una ottima, e costante nel tempo, risoluzione in energia

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

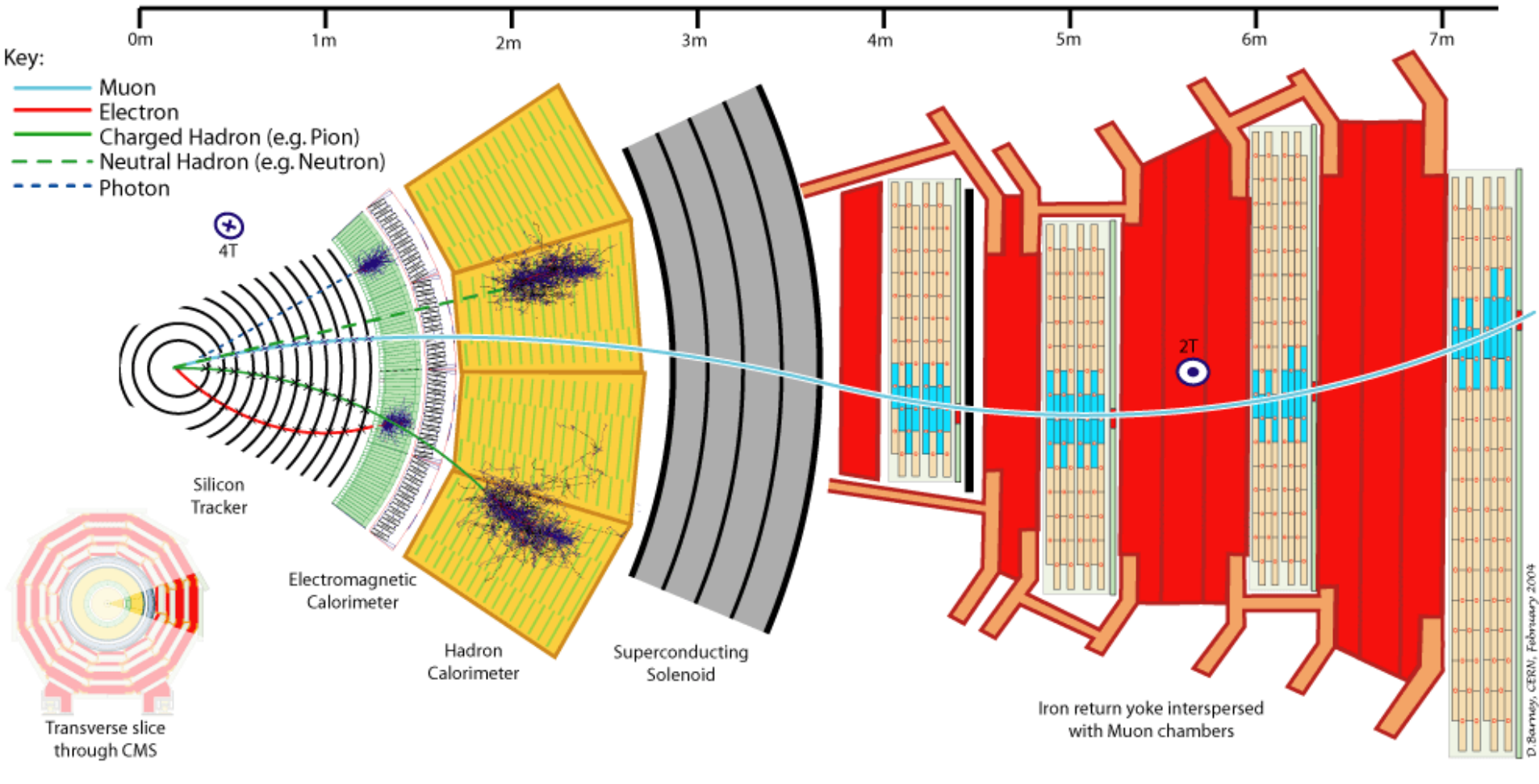
Incertezza su m ←

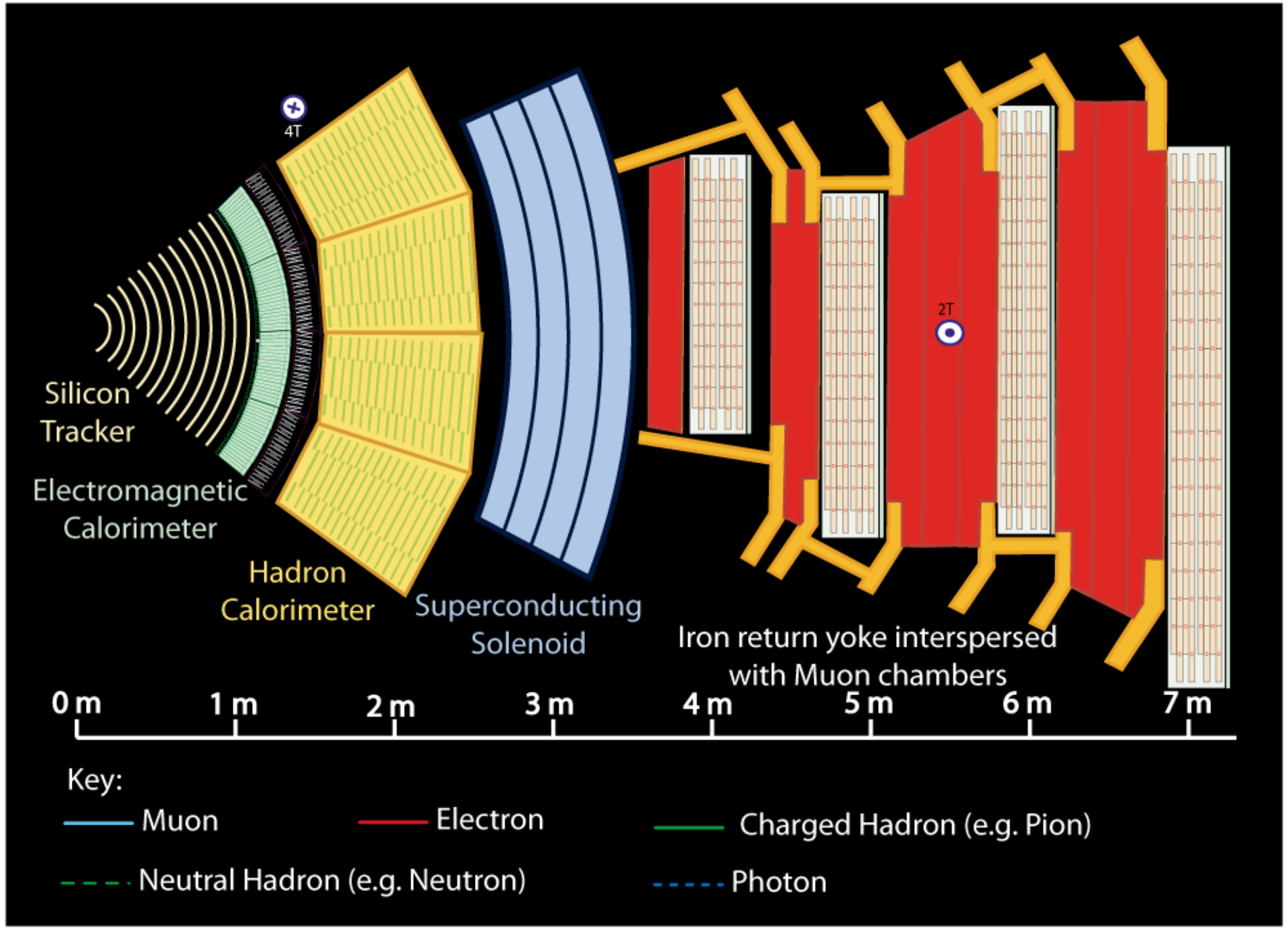
Incertezza su Energia fotoni

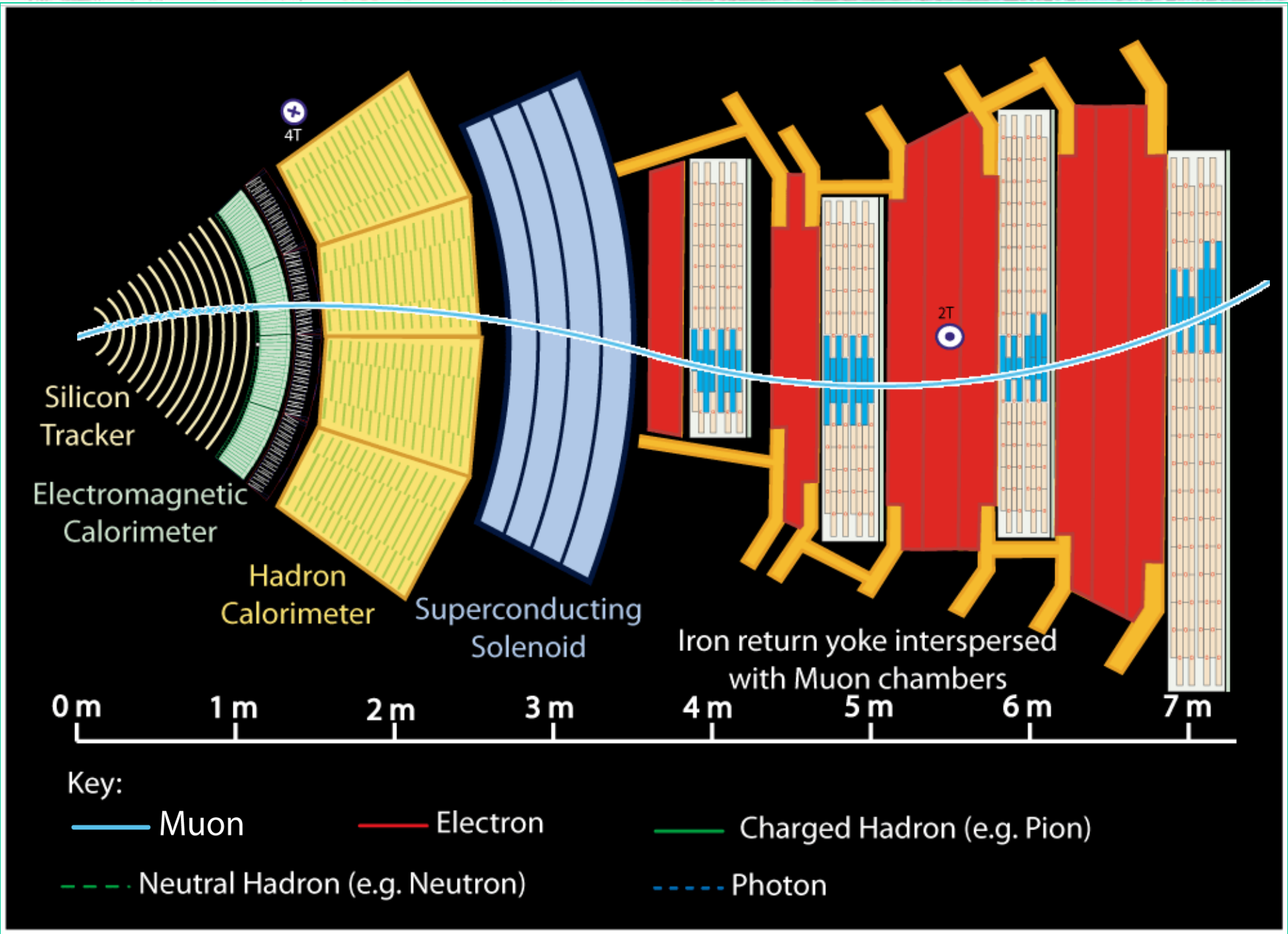
e su direzione dei fotoni

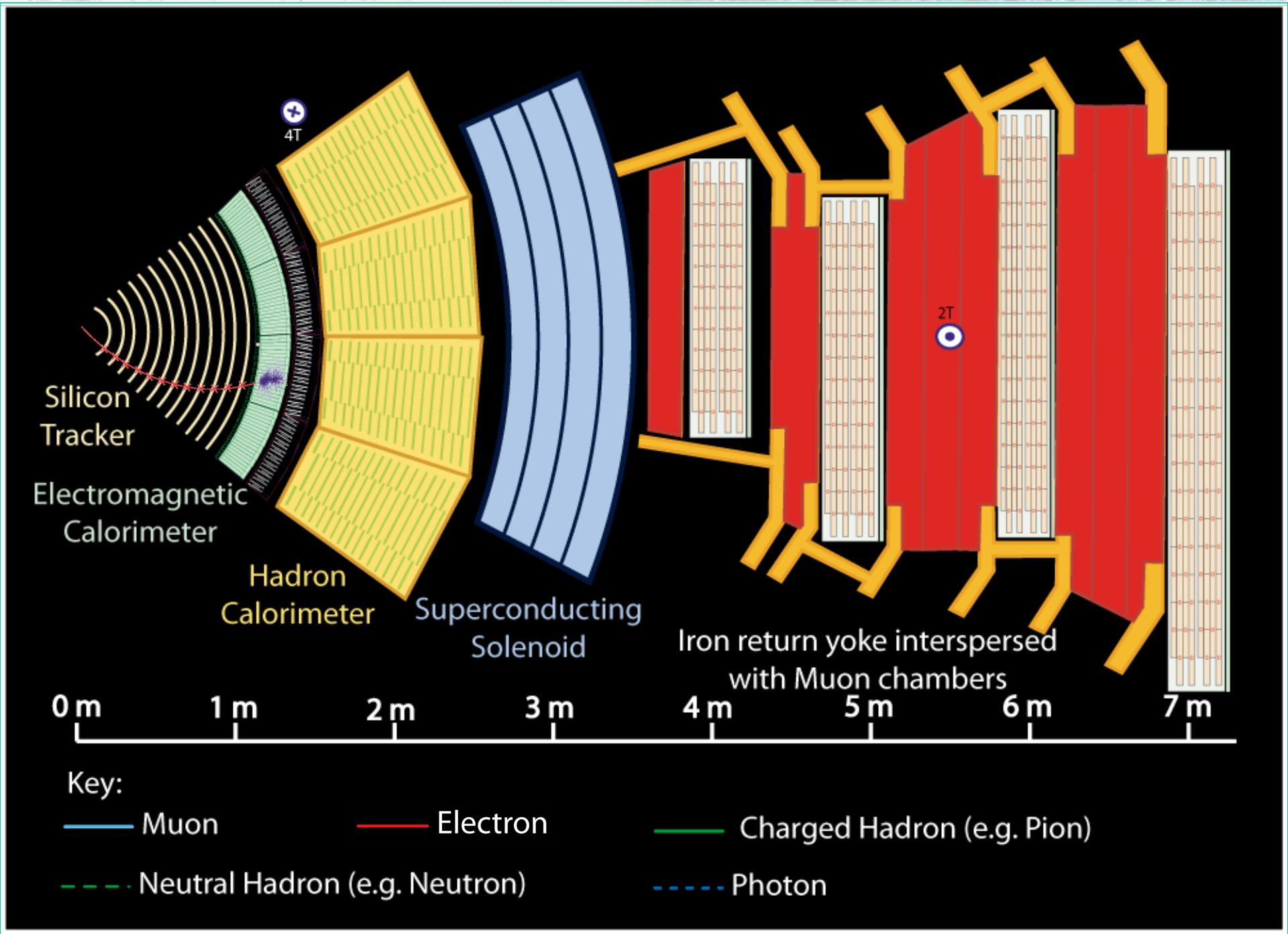


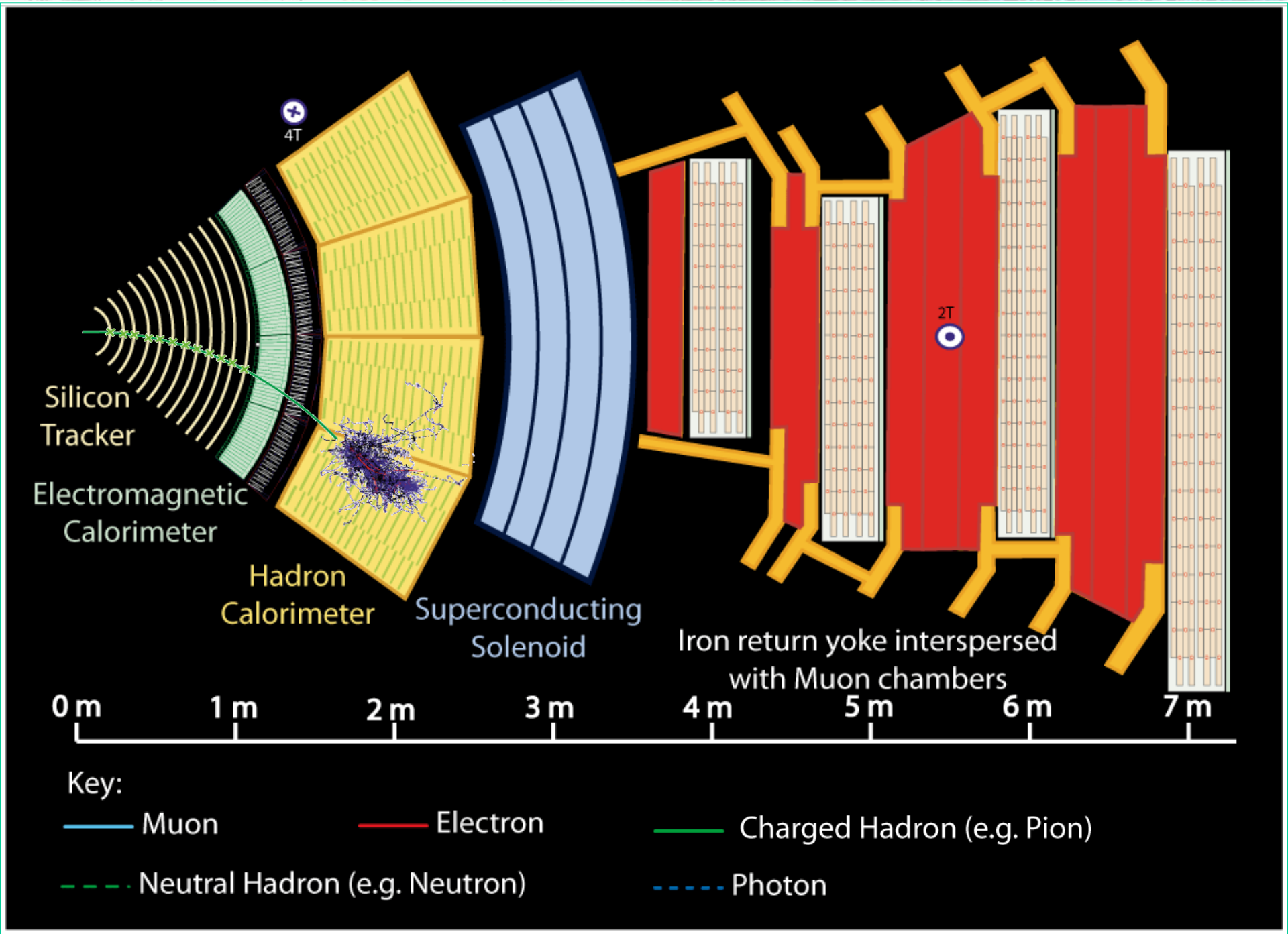
CMS a LHC

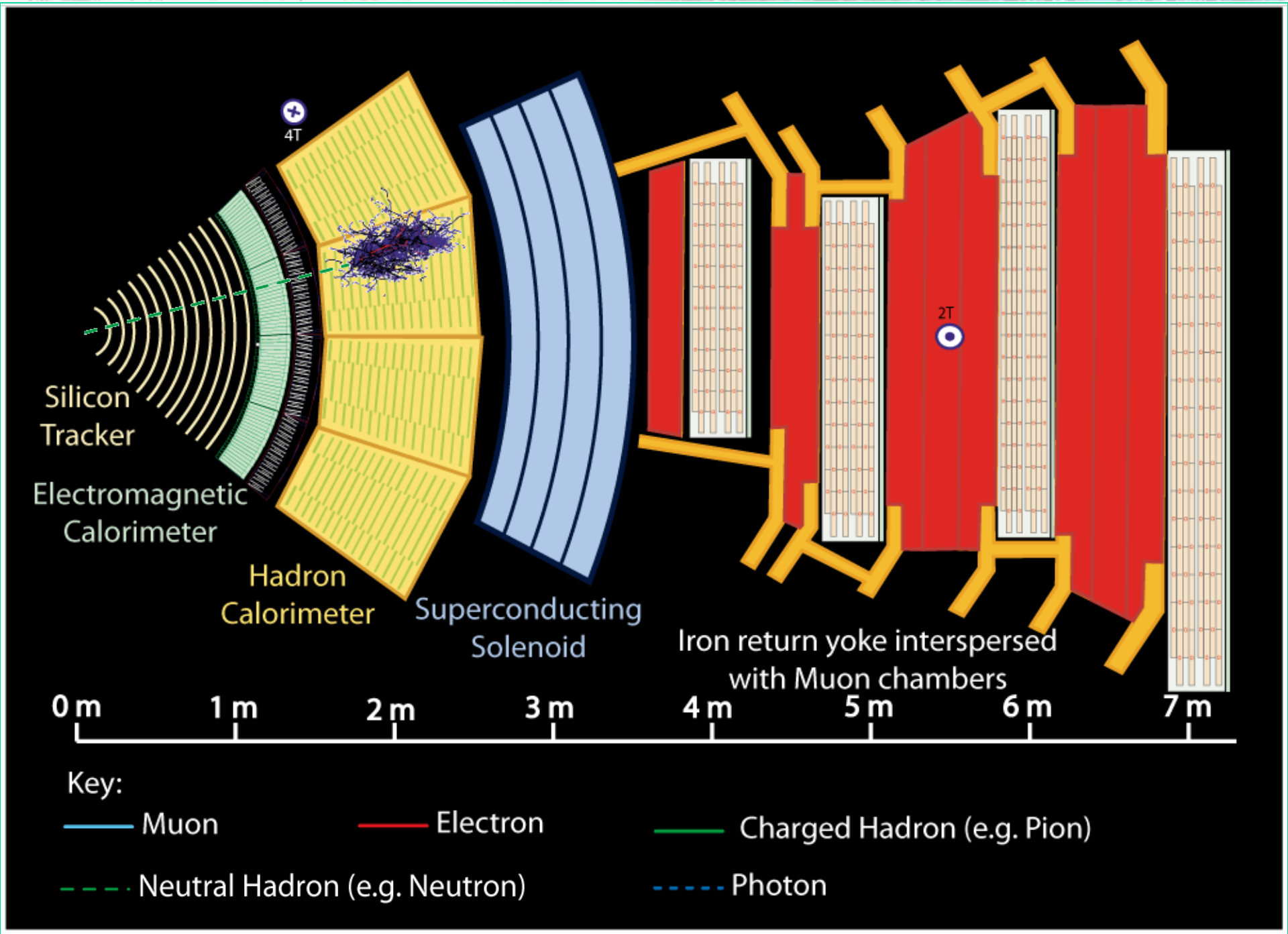

0m
1m
2m
3m
4m
5m
6m
7m
Key:
Muon
Electron
Charged Hadron (e.g. Pion)
Neutral Hadron (e.g. Neutron)
Photon
4T
2T
Silicon Tracker
Electromagnetic Calorimeter
Hadron Calorimeter
Superconducting Solenoid
Iron return yoke interspersed with Muon chambers
Transverse slice through CMS
D.Barney, CERN, February 2004

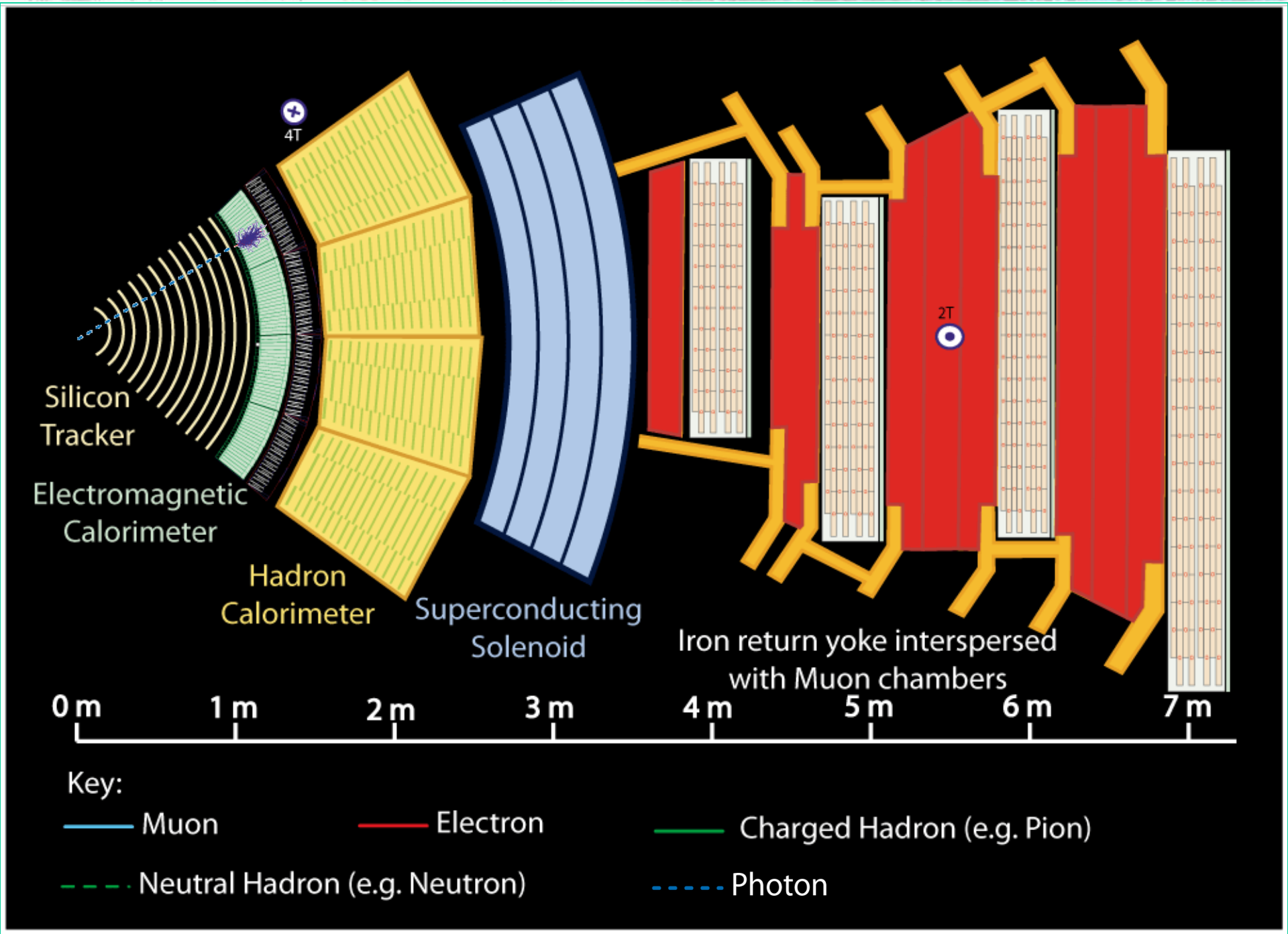

4T
2T
Silicon Tracker
Electromagnetic Calorimeter
Hadron Calorimeter
Superconducting Solenoid
Iron return yoke interspersed with Muon chambers
0 m
1 m
2 m
3 m
4 m
5 m
6 m
7 m
Key:
Muon
Electron
Charged Hadron (e.g. Pion)
Neutral Hadron (e.g. Neutron)
Photon


4T
2T
Silicon Tracker
Electromagnetic Calorimeter
Hadron Calorimeter
Superconducting Solenoid
Iron return yoke interspersed with Muon chambers
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


4T
2T
Silicon Tracker
Electromagnetic Calorimeter
Hadron Calorimeter
Superconducting Solenoid
Iron return yoke interspersed with Muon chambers
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

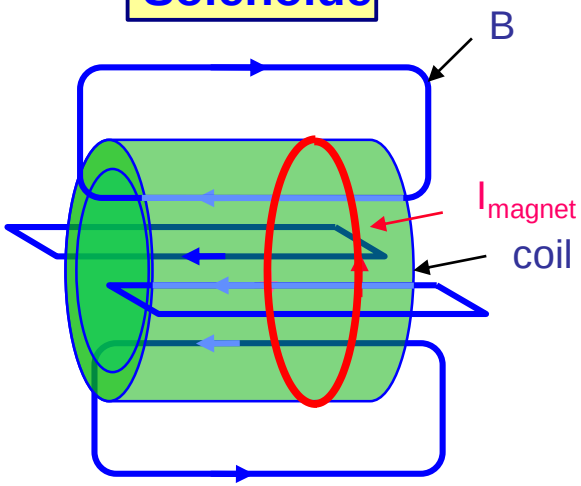

4T
2T
Silicon Tracker
Electromagnetic Calorimeter
Hadron Calorimeter
Superconducting Solenoid
Iron return yoke interspersed with Muon chambers
0 m
1 m
2 m
3 m
4 m
5 m
6 m
7 m
Key:
Muon
Electron
Charged Hadron (e.g. Pion)
Neutral Hadron (e.g. Neutron)
Photon


4T
2T
Silicon Tracker
Electromagnetic Calorimeter
Hadron Calorimeter
Superconducting Solenoid
Iron return yoke interspersed with Muon chambers
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


4T
2T
Silicon Tracker
Electromagnetic Calorimeter
Hadron Calorimeter
Superconducting Solenoid
Iron return yoke interspersed with Muon chambers
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

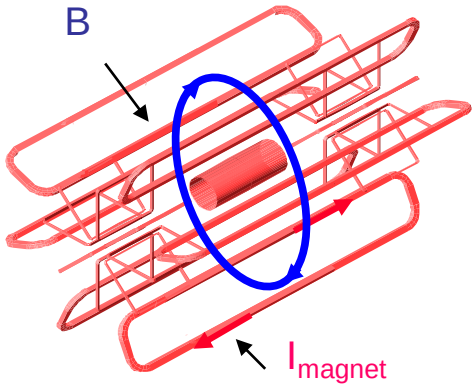
Configurazione dei magneti di ATLAS e CMS

Solenoide



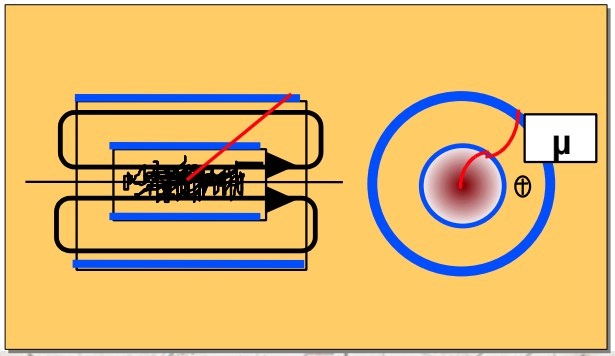
+ strong and homogeneous field in solenoid
- massive iron return yoke necessary
- limited in size (cost)
- solenoid thickness (radiation length)

(air-core) Toroide

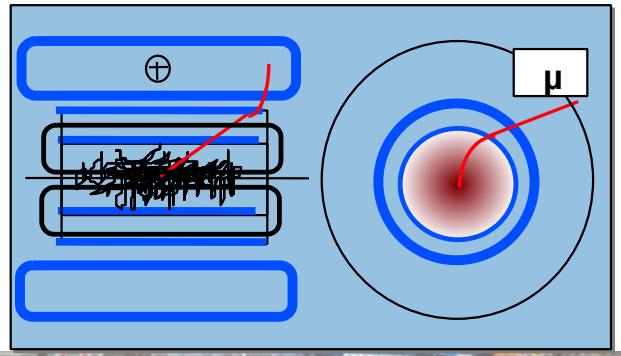


+ large air core, no iron, low material budget
- additional solenoid in the inner parts necessary
-- inhomogeneous field
- complex structure

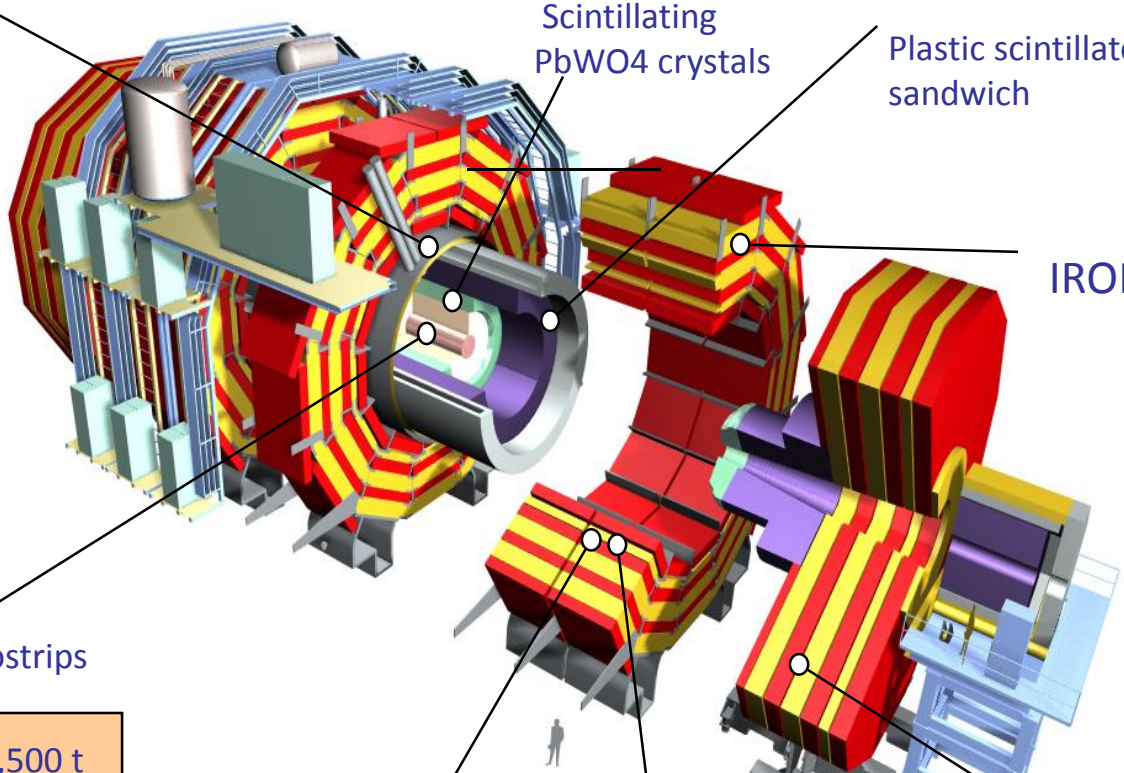
CMS, ALICE, LEP Detectors



ATLAS

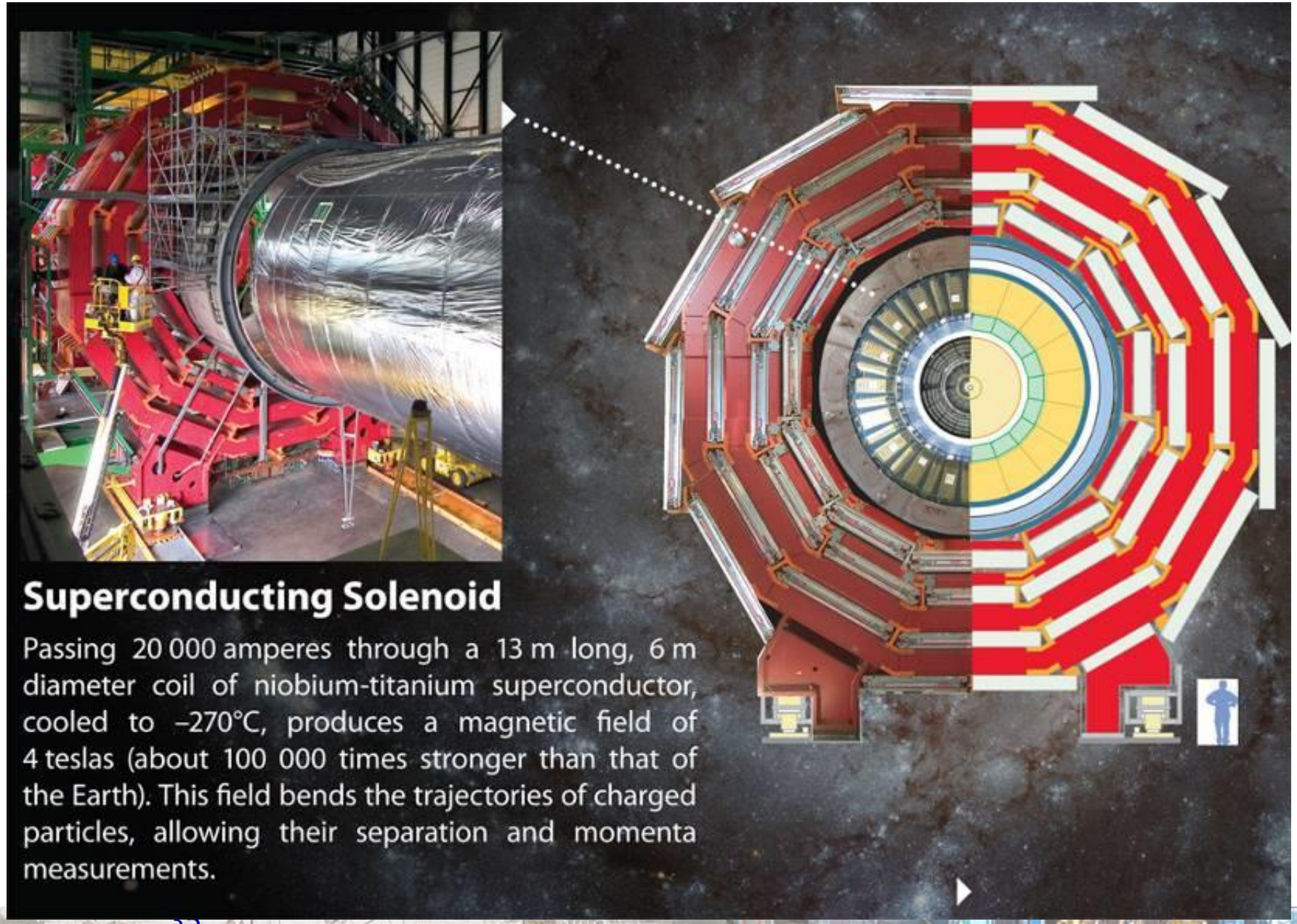


Exploded View of CMS



Total weight : 12,500 t
Overall diameter : 15 m
Overall length : 21.6 m
Magnetic field : 4 Tesla

Il magnete superconduttore di CMS

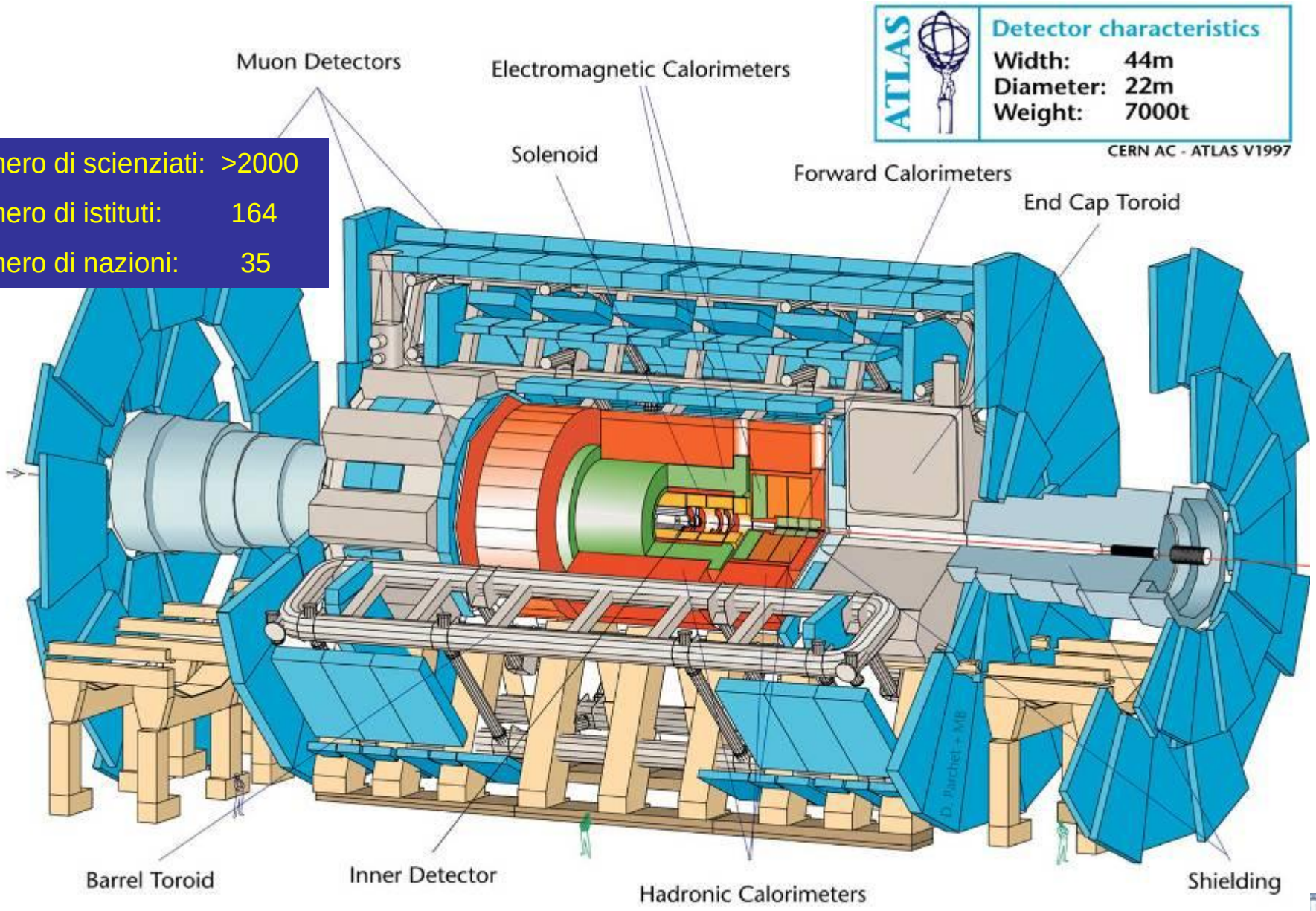


ATLAS

Numero di scienziati: >2000

Numero di istituti: 164

Numero di nazioni: 35



Gli apparati sperimentali ATLAS e CMS

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.

$$E(protone - protone) = \sum Energia(particelle)$$

$$Pz(protone - protone) = \sum Pz(particelle)$$

$$Px(protone - protone) = \sum Px(particelle) = 0$$

$$Py(protone - protone) = \sum Py(particelle) = 0$$

$$E(neutrino) = E(protone - protone) - \sum Energia(particelle)$$

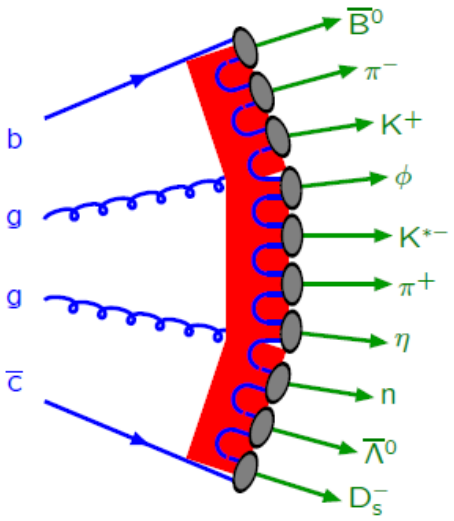
$$Px(neutrino) = 0 - \sum Px(particelle)$$

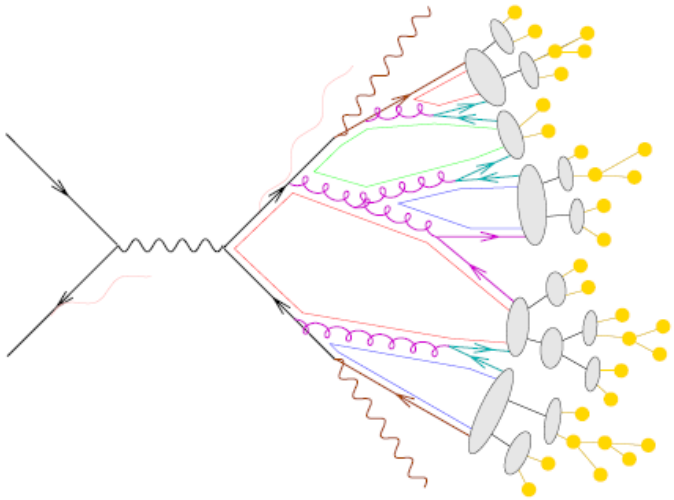
$$Py(neutrino) = 0 - \sum Py(particelle)$$

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 comporte 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:

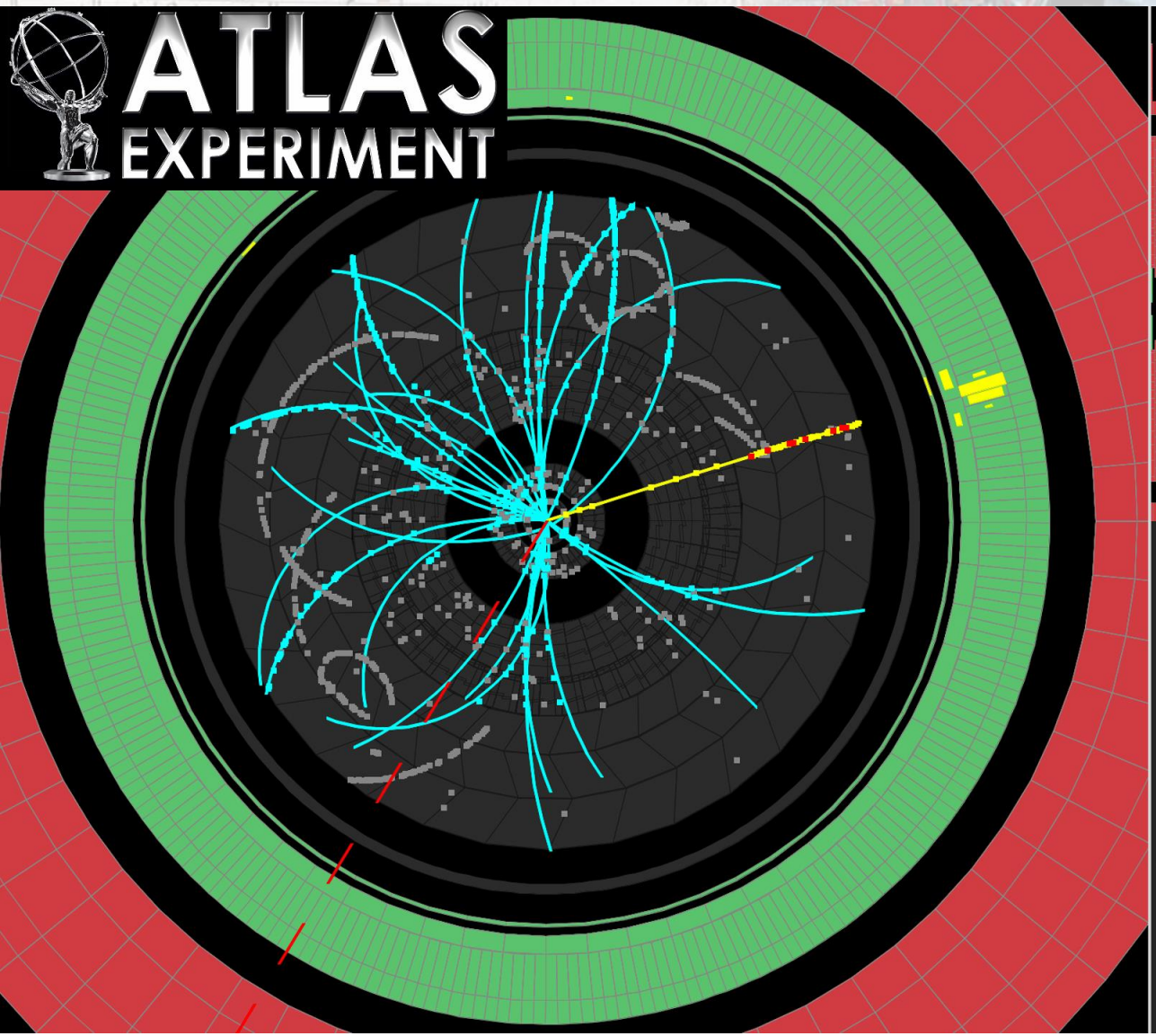


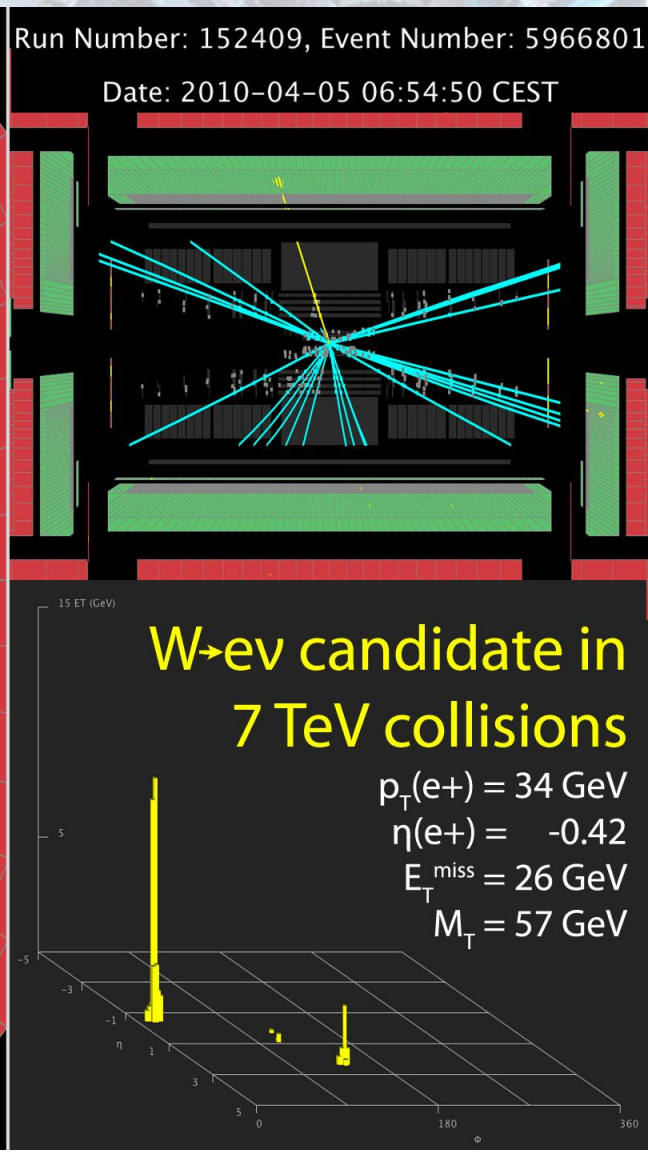


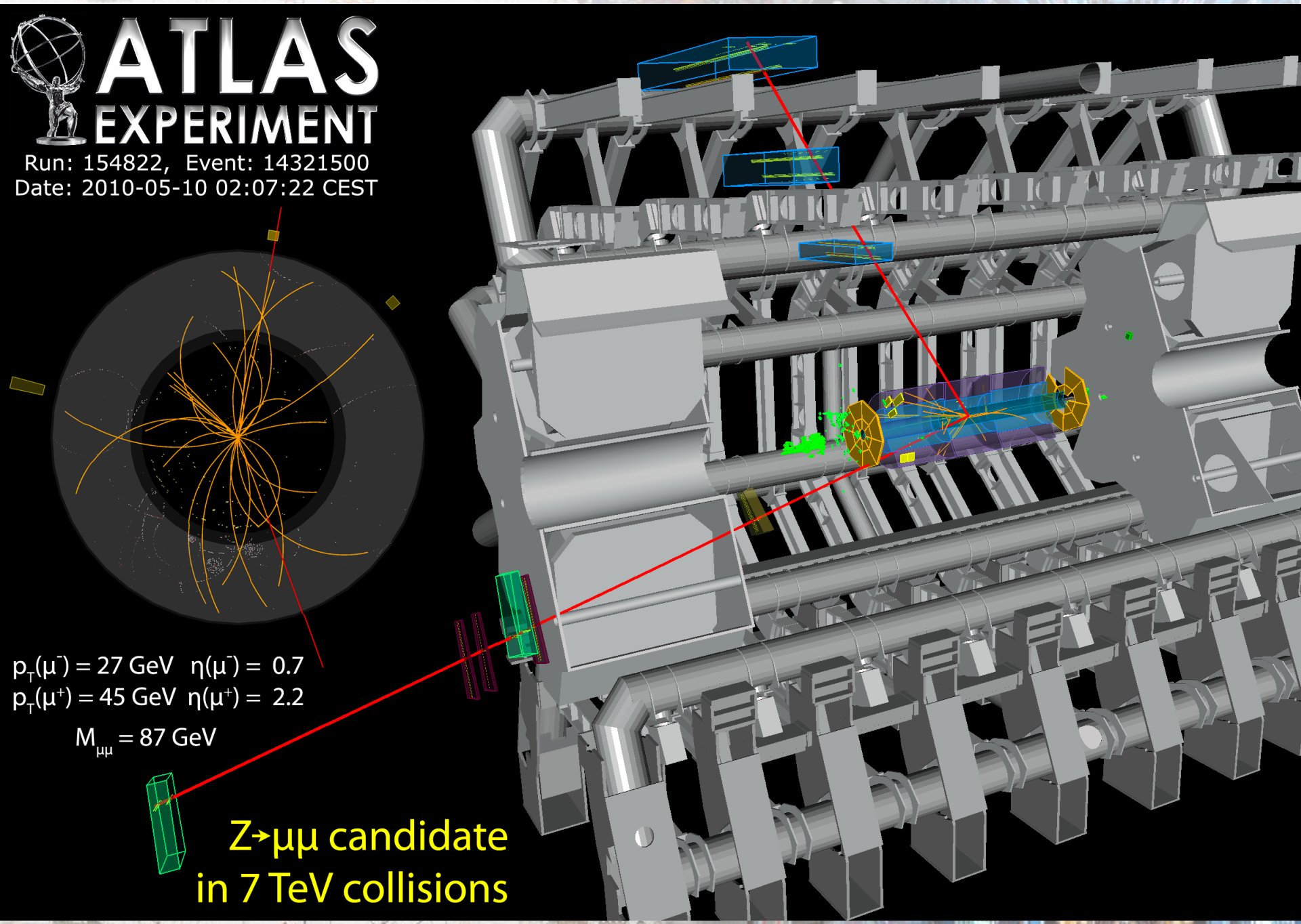
Gli adroni che provengono da un quark iniziale, tendono ad andare nella stessa direzione e dunque a associarsi in "jetti" di particelle.
I JET sono dunque formati da adroni, elettroni, muoni, neutrini, fotoni etc…

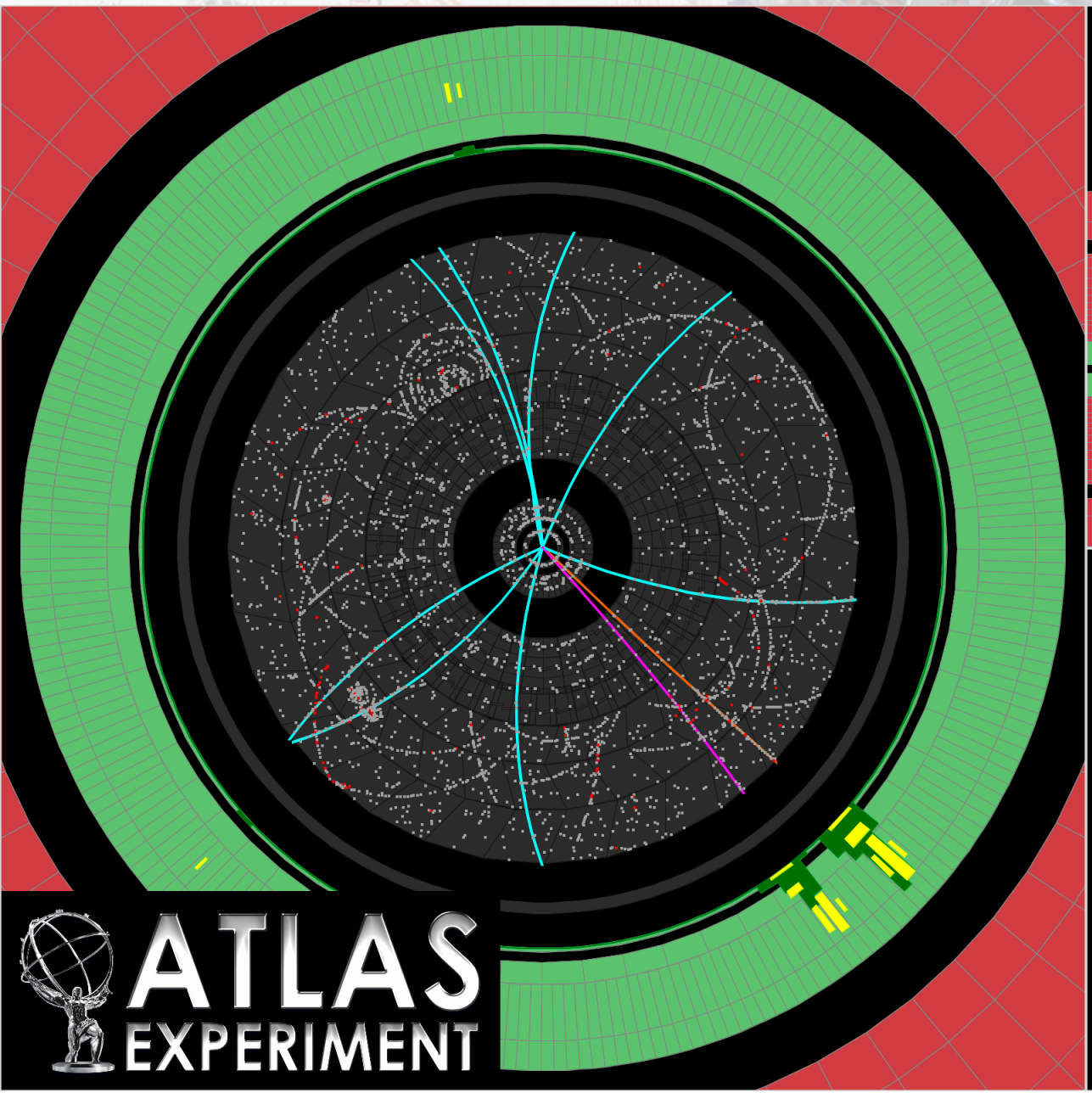
Esercizio: riconoscere le diverse particelle negli eventi seguenti

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
15 ET (GeV)
W→eν candidate in
7 TeV collisions
$p_T(e+)$ = 34 GeV
η(e+) = -0.42
E_T^{miss} = 26 GeV
M_T = 57 GeV
η
Φ


ATLAS
EXPERIMENT
Run: 154822, Event: 14321500
Date: 2010-05-10 02:07:22 CEST
$p_T(\mu^-) = 27$ GeV $\eta(\mu^-) = 0.7$
$p_T(\mu^+) = 45$ GeV $\eta(\mu^+) = 2.2$
$M_{\mu\mu} = 87$ GeV
Z→μμ candidate
in 7 TeV collisions



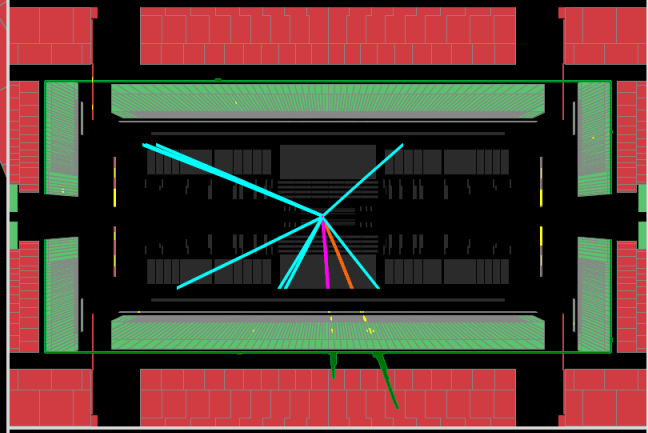
ATLAS EXPERIMENT

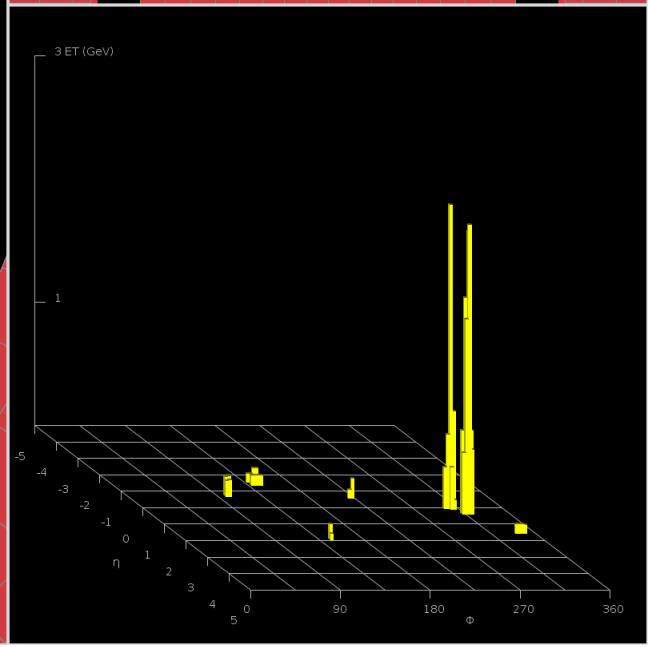
Run Number: 160736, Event Number: 3446804

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

J/ψ→ee candidate in 7 TeV collisions

M_{ee} = 3.17 GeV

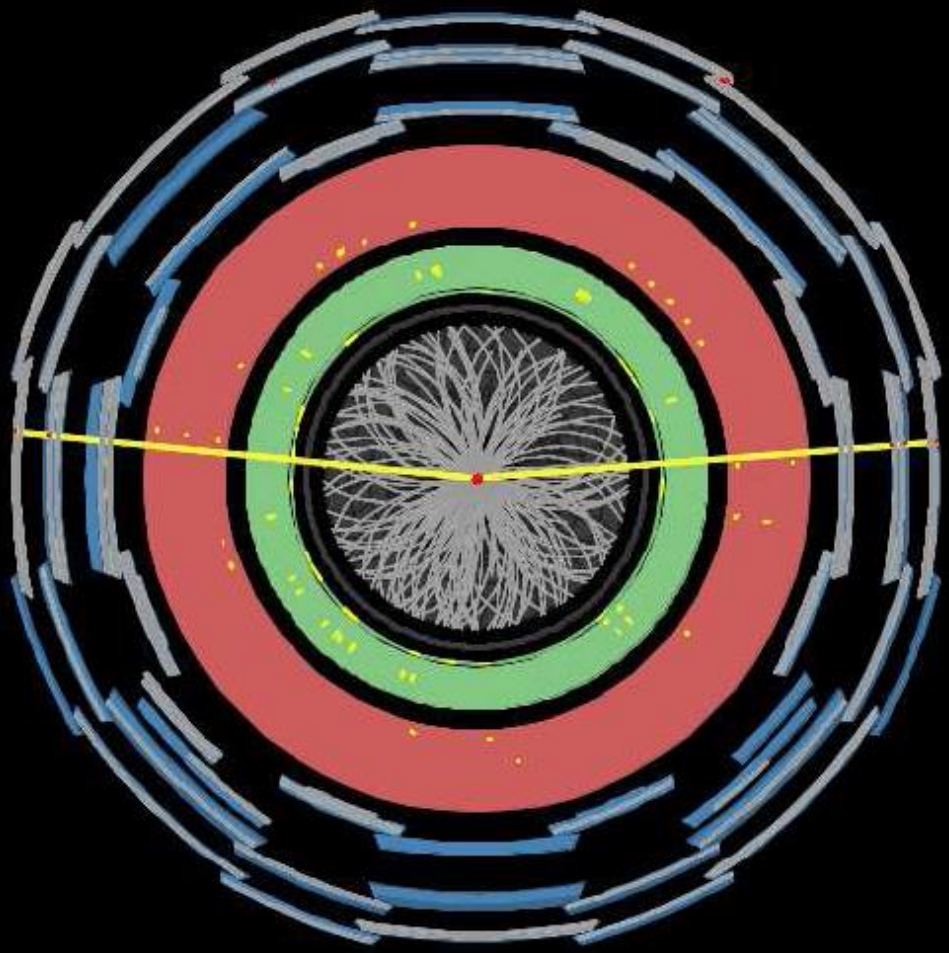


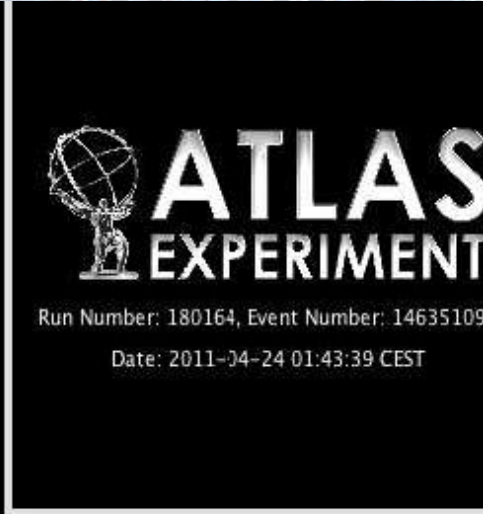


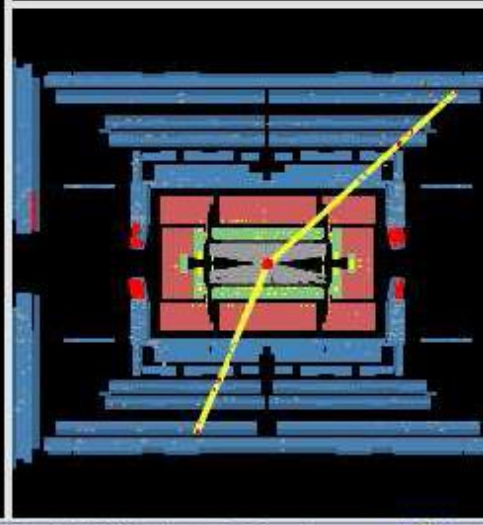
$Z \to \mu\mu$ candidate with 10 additional soft "pile-up" interactions.

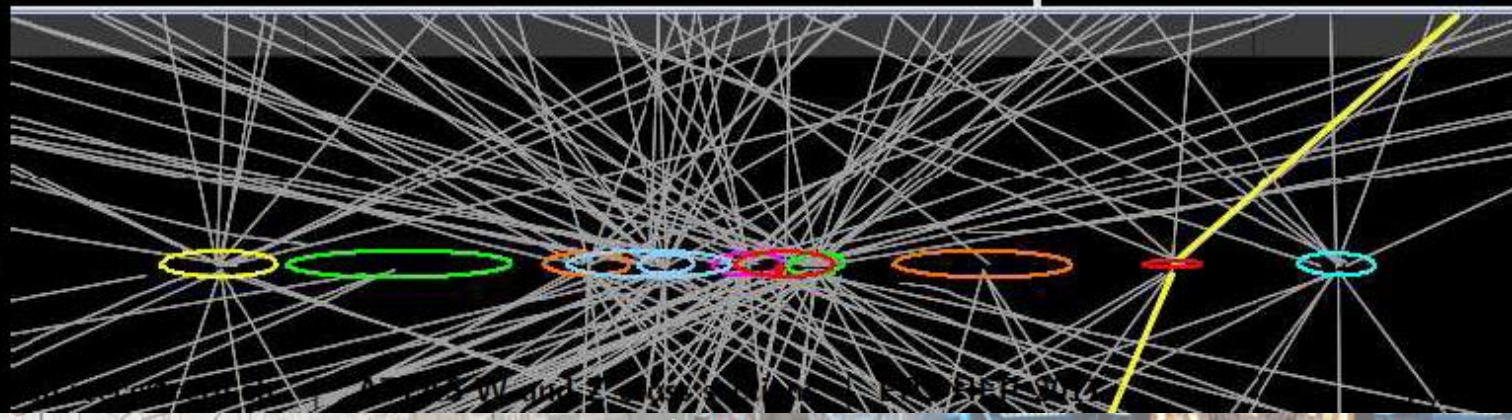
High p_{T} leptons allow us to select the interesting EW events.

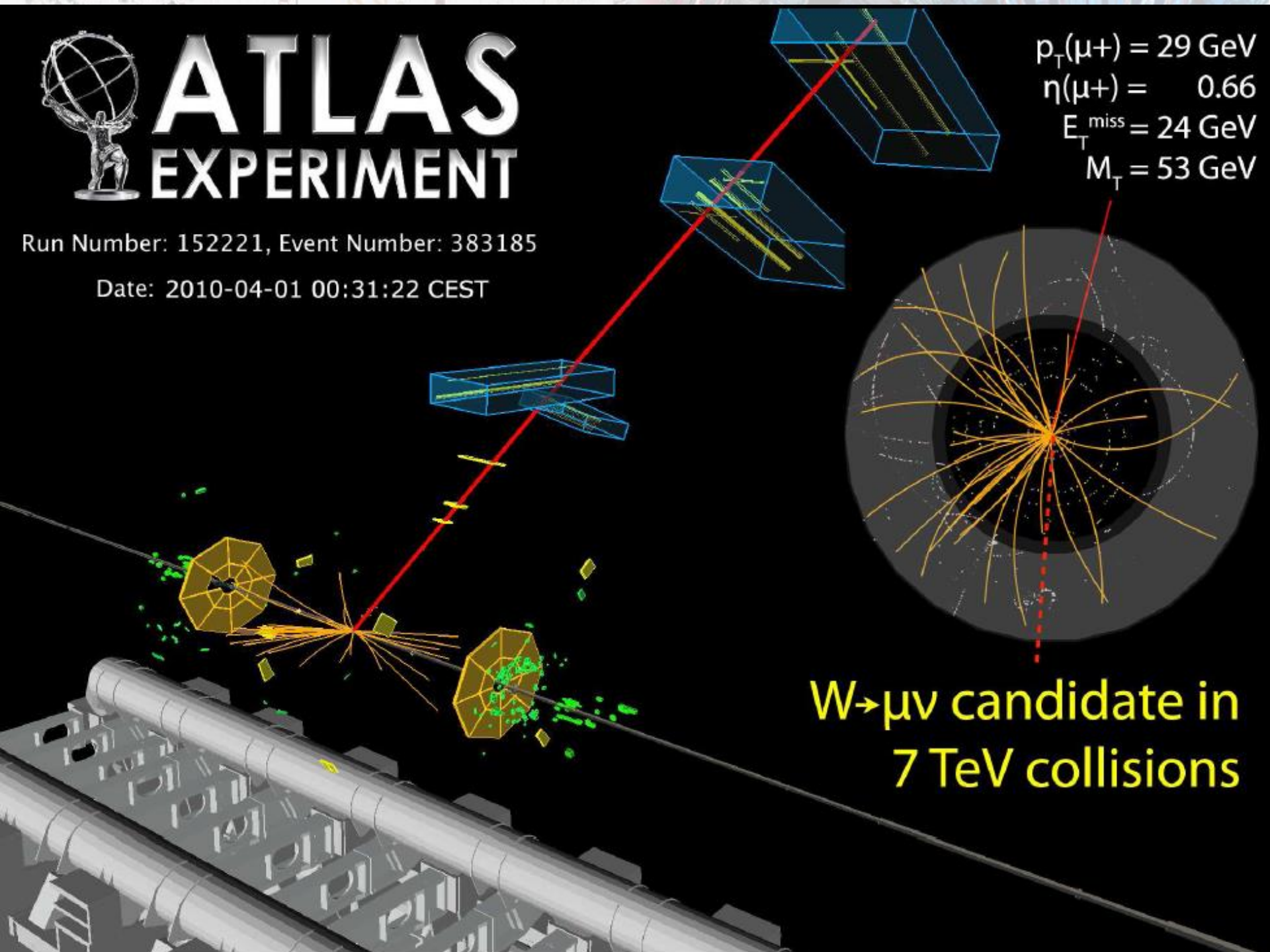
Conversely, W/Z provide events for understanding high p_{T} lepton performance.

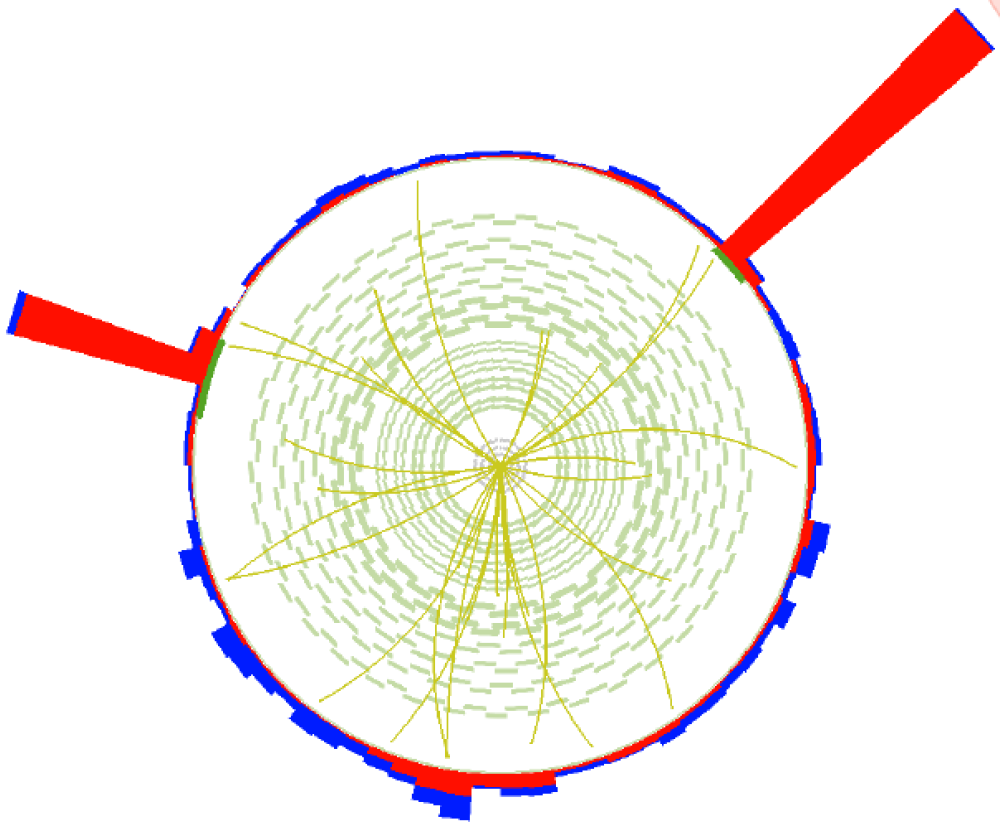




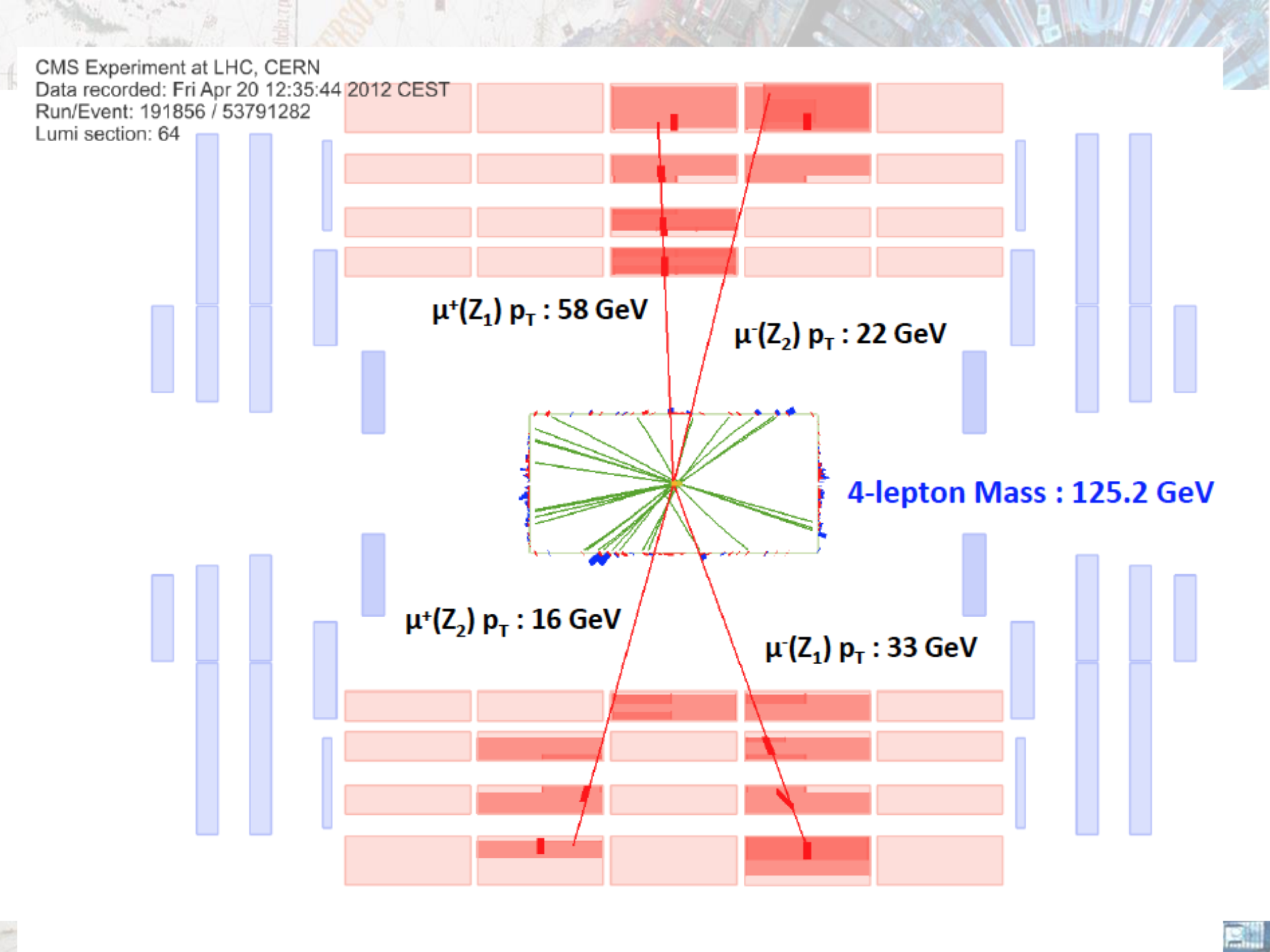


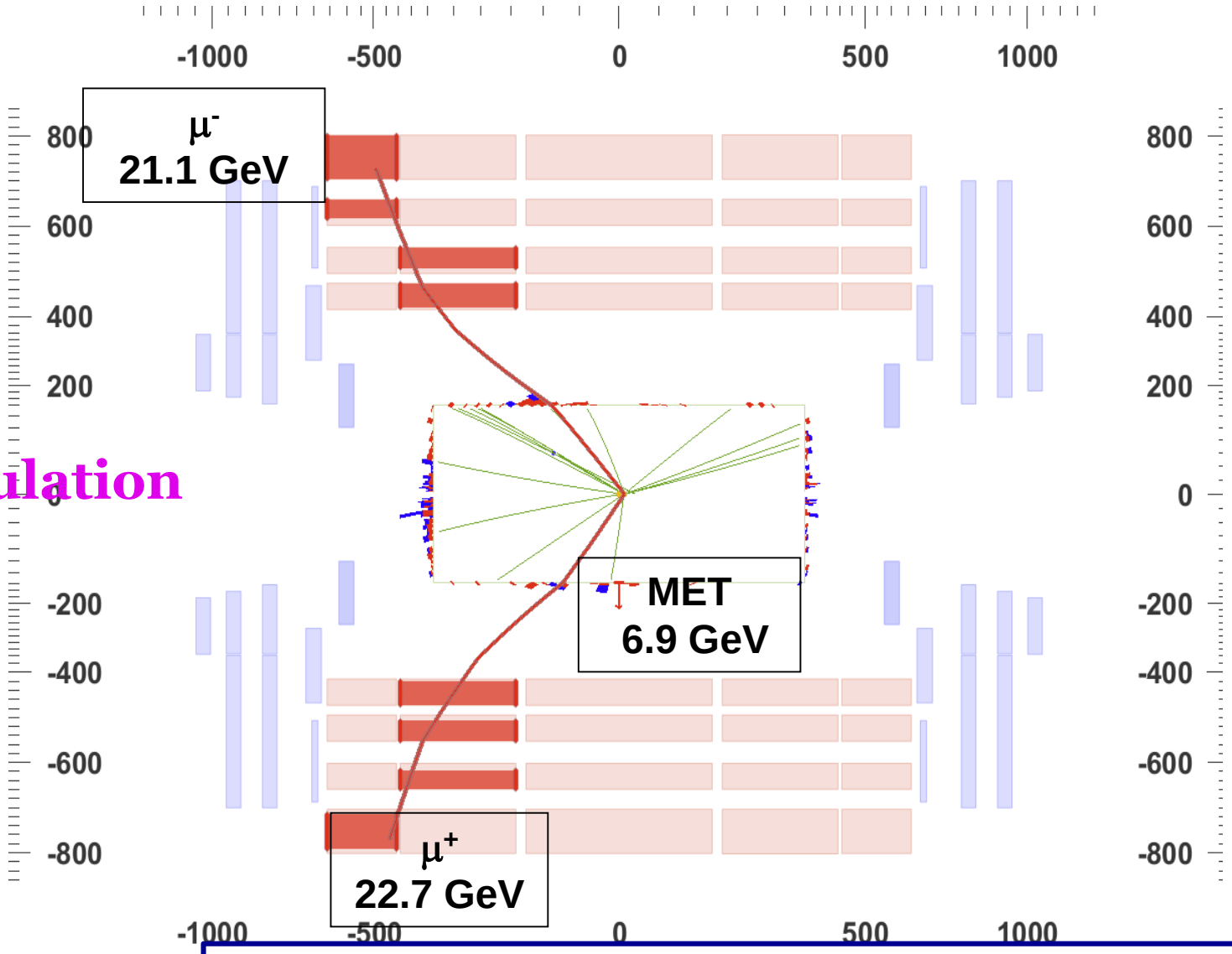



ATLAS
EXPERIMENT
Run Number: 152221, Event Number: 383185
Date: 2010-04-01 00:31:22 CEST
$p_T(\mu+)$ = 29 GeV
$\eta(\mu+)$ = 0.66
E_T^{miss} = 24 GeV
M_T = 53 GeV
W→μν candidate in
7 TeV collisions



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

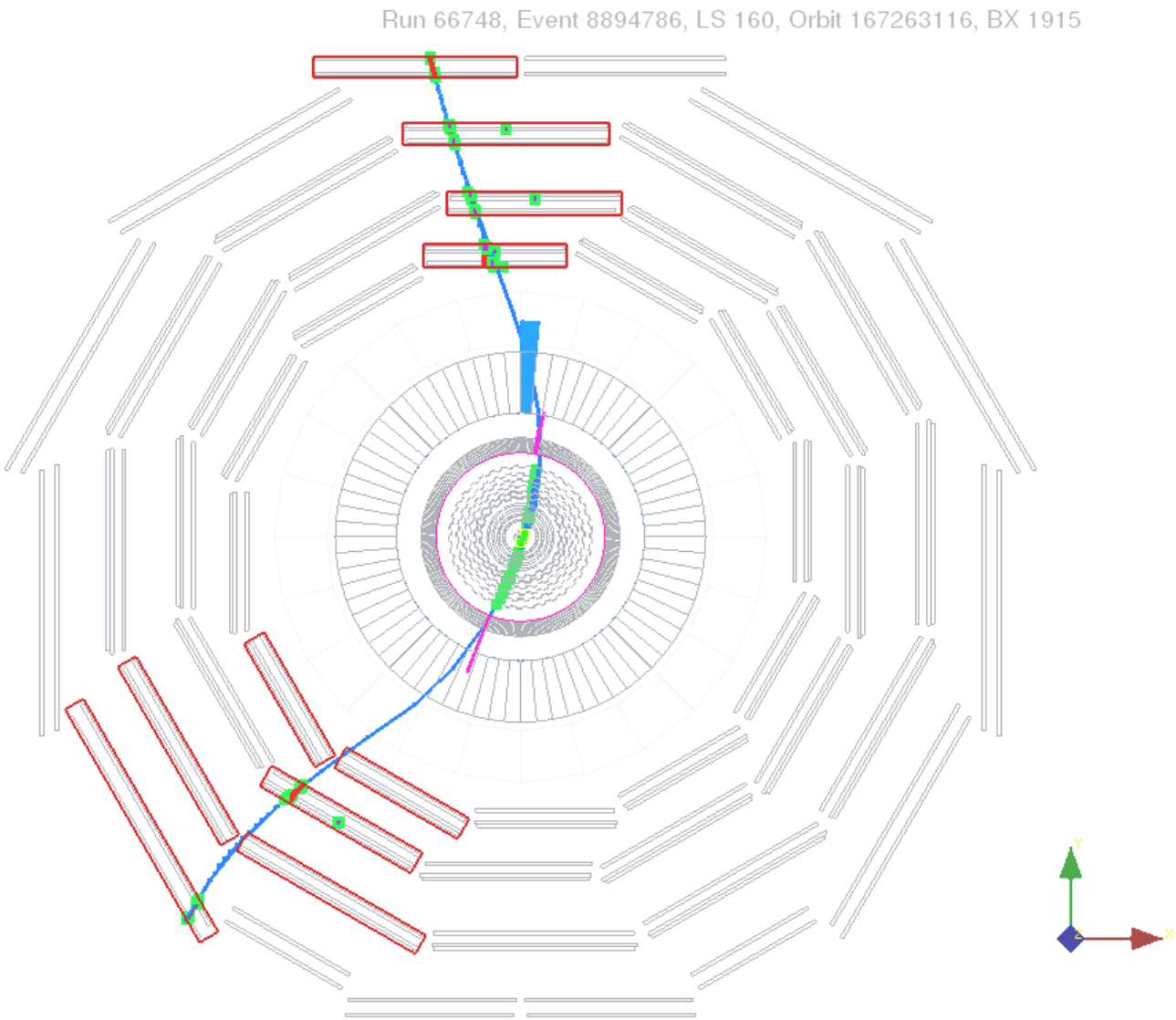

CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Fri Apr 20 12:35:44 2012 CEST
Run/Event: 191856 / 53791282
Lumi section: 64
μ+(Z1) pT : 58 GeV
μ-(Z2) pT : 22 GeV
4-lepton Mass : 125.2 GeV
μ+(Z2) pT : 16 GeV
μ-(Z1) pT : 33 GeV



Simulation

drastically reduced by requiring MET in the event

CRAFT event Cosmic Ray Four Tesla



Before start of LHC beams

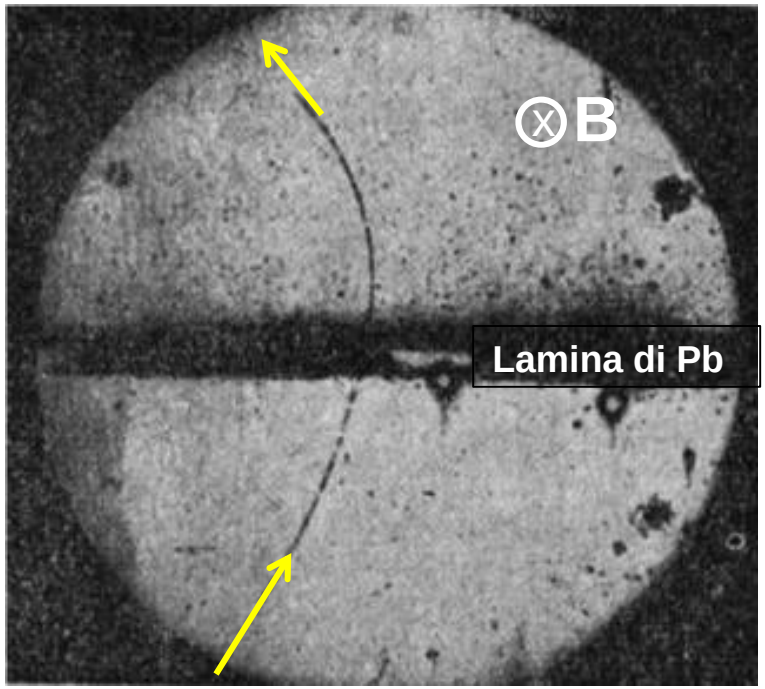
Come si "vedono" le particelle?

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

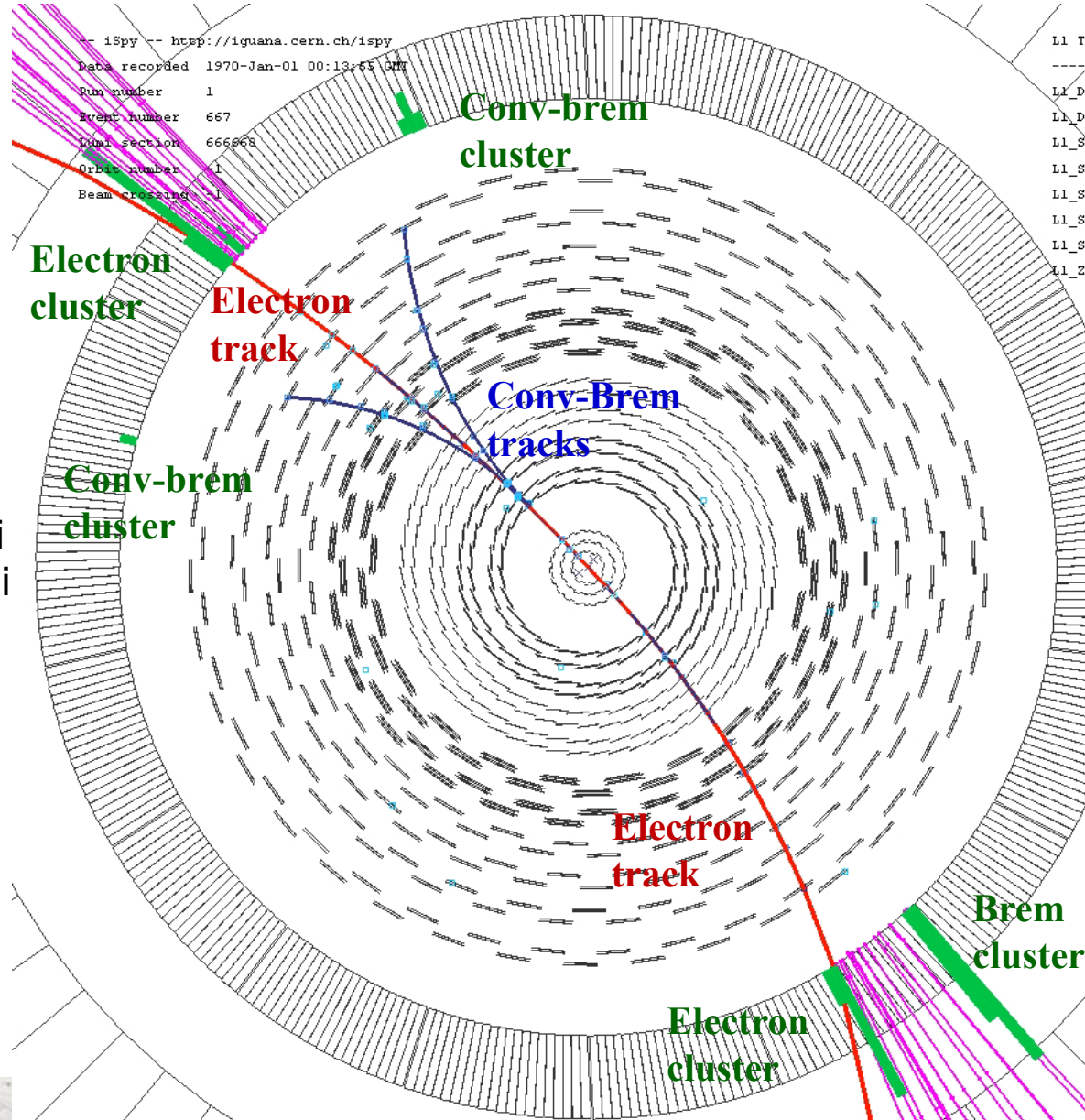
Scoperta del positrone (e^+)
(Anderson, 1932; premio Nobel 1936):
Osservando *raggi cosmici* attraverso una camera a nebbia immersa in un campo magnetico che ne curva la traiettoria, con una lastra di piombo per assorbire parte dell'energia
(1928 Dirac introduced the anti-matter)



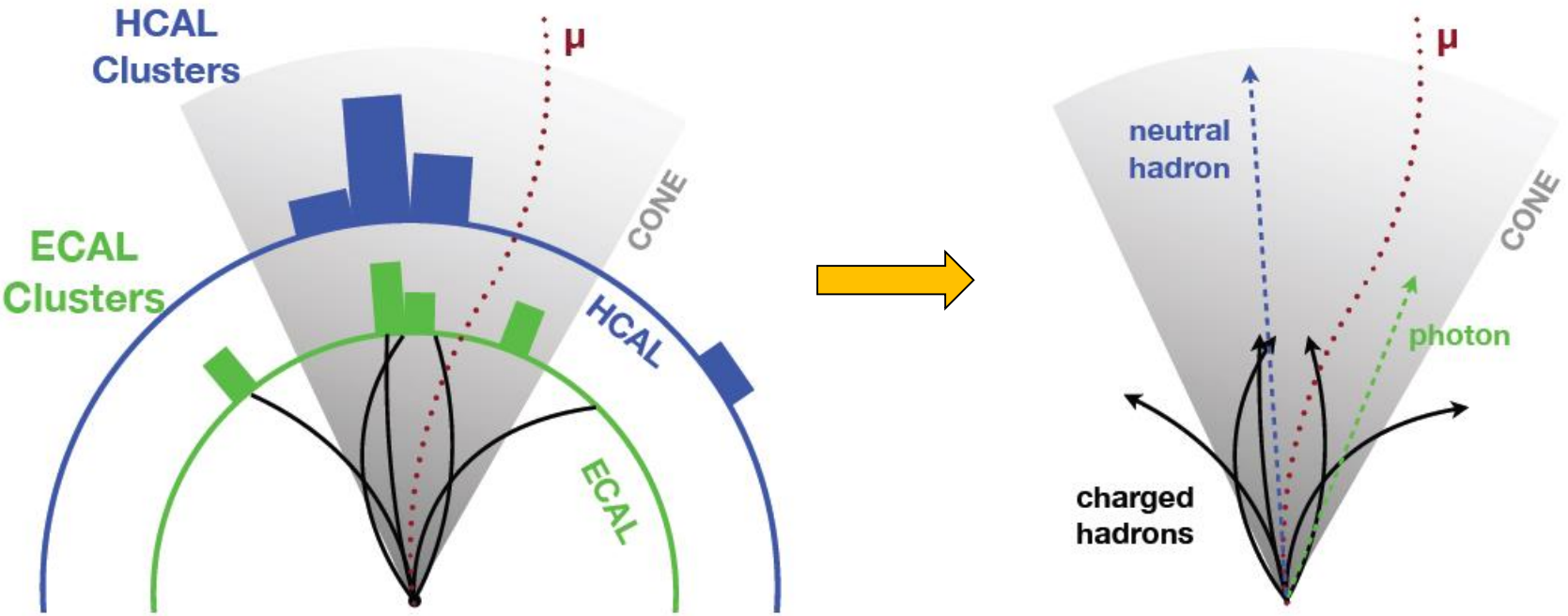
Algoritmi di Ricostruzione

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

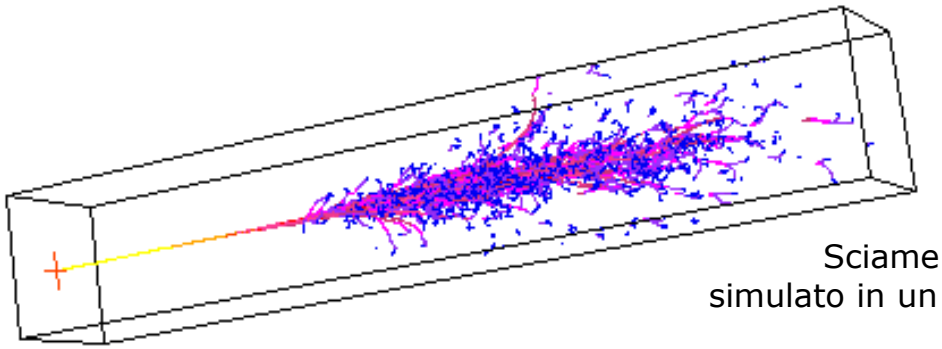
- Lista di **hit** → lista di **tracce/cluster** → Lista di **muoni, elettroni, fotoni, adroni carichi e neutri** → **jets e missing energy**

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



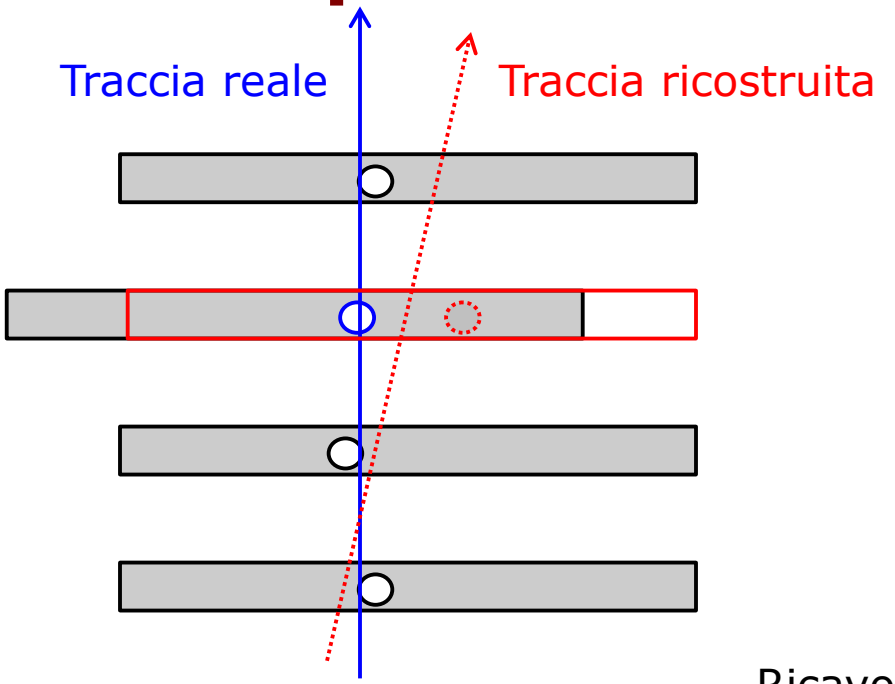
Sciame elettromagnetico simulato in un cristallo di $PbWO_4$

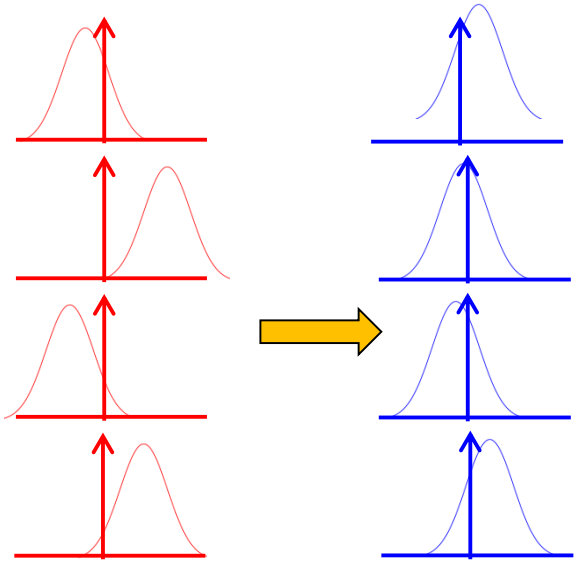
Capire il rivelatore con i dati

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)

$J = 1$

Z

Charge $= 0$

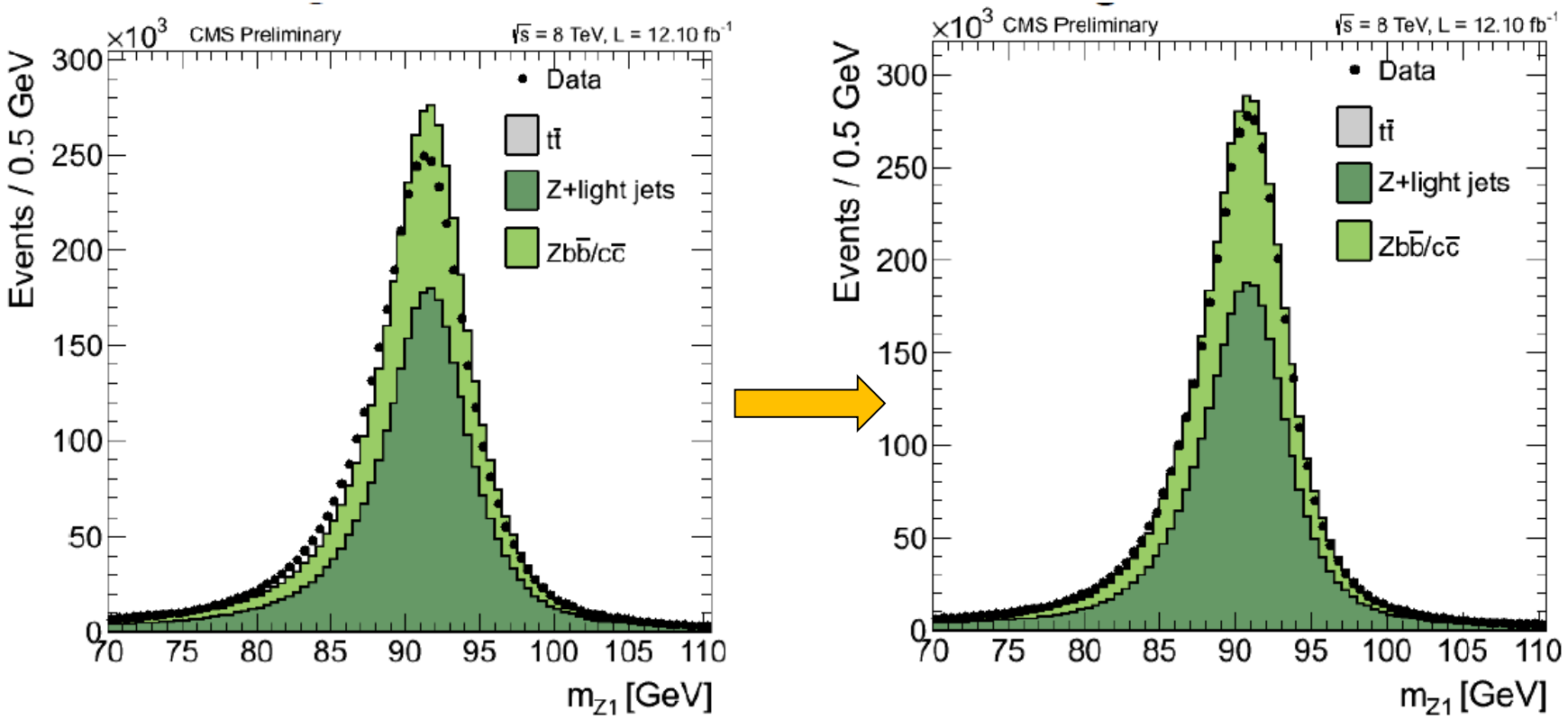
Mass $m = 91.1876 \pm 0.0021$ GeV [a]

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

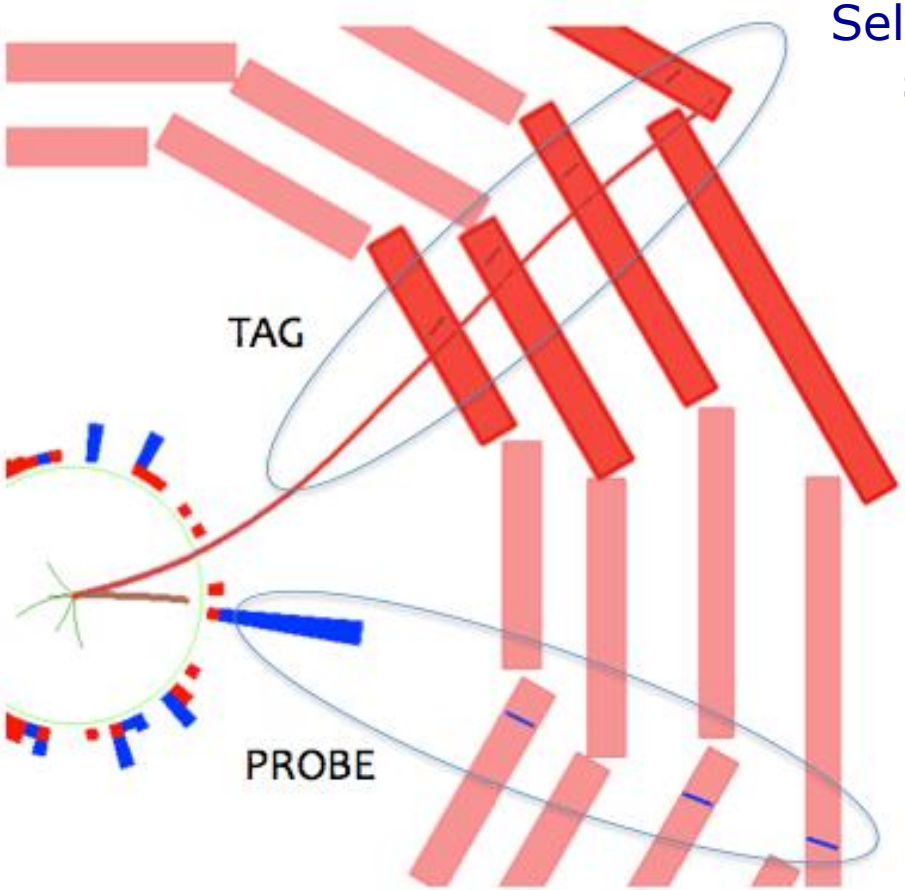
$\Gamma(\ell^+\ell^-) = 83.984 \pm 0.086$ MeV [b]

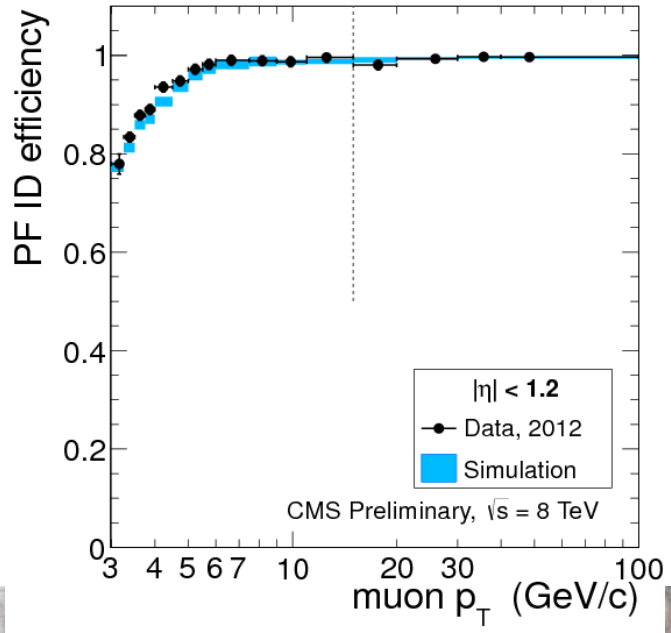
Γ(invisible) $= 499.0 \pm 1.5$ MeV [e]

Uso Eventi Z→ee per costringere la scala in energia degli eletroni



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



Seleziono risonanze note (Z, J/ψ, $\Upsilon \to \ell\ell$) 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")