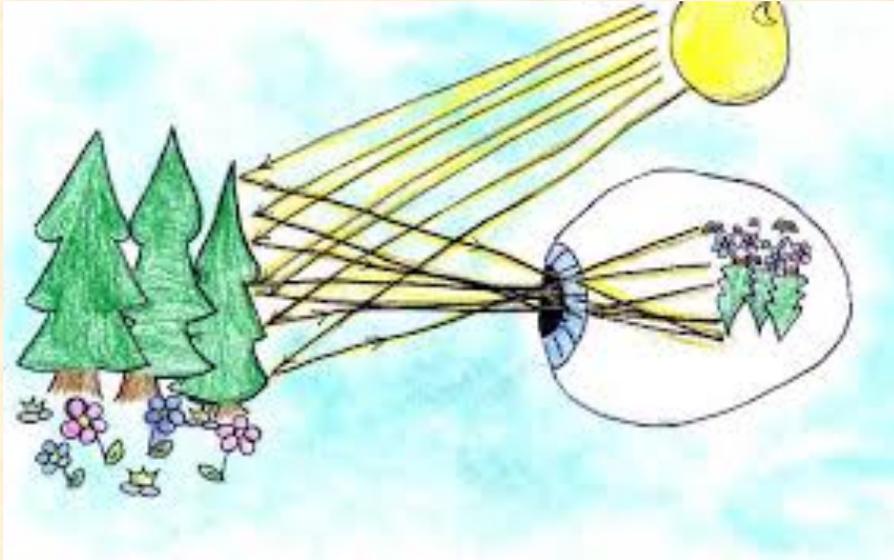


International MasterClasses 2018: Rivelazione di Particelle

Carla Sbarra – INFN Bologna

Un'iniziativa IPPOG (International Particle-Physics Outreach Group) con la partecipazione della sezione INFN di Bologna

“Vedere” con gli occhi



- La luce raggiunge l'albero
- Una parte è assorbita, una rimbalza e arriva ai nostri occhi
- Il cervello analizza i dati e forma un'immagine

Gli occhi (**rivelatore**) vedono le cose come **risultato dell'interazione** tra i fotoni della banda visibile (**sonde**) e gli oggetti che ci circondano (**bersagli**).

Alcuni animali usano come “**sonde**” le **onde sonore** (pipistrelli)

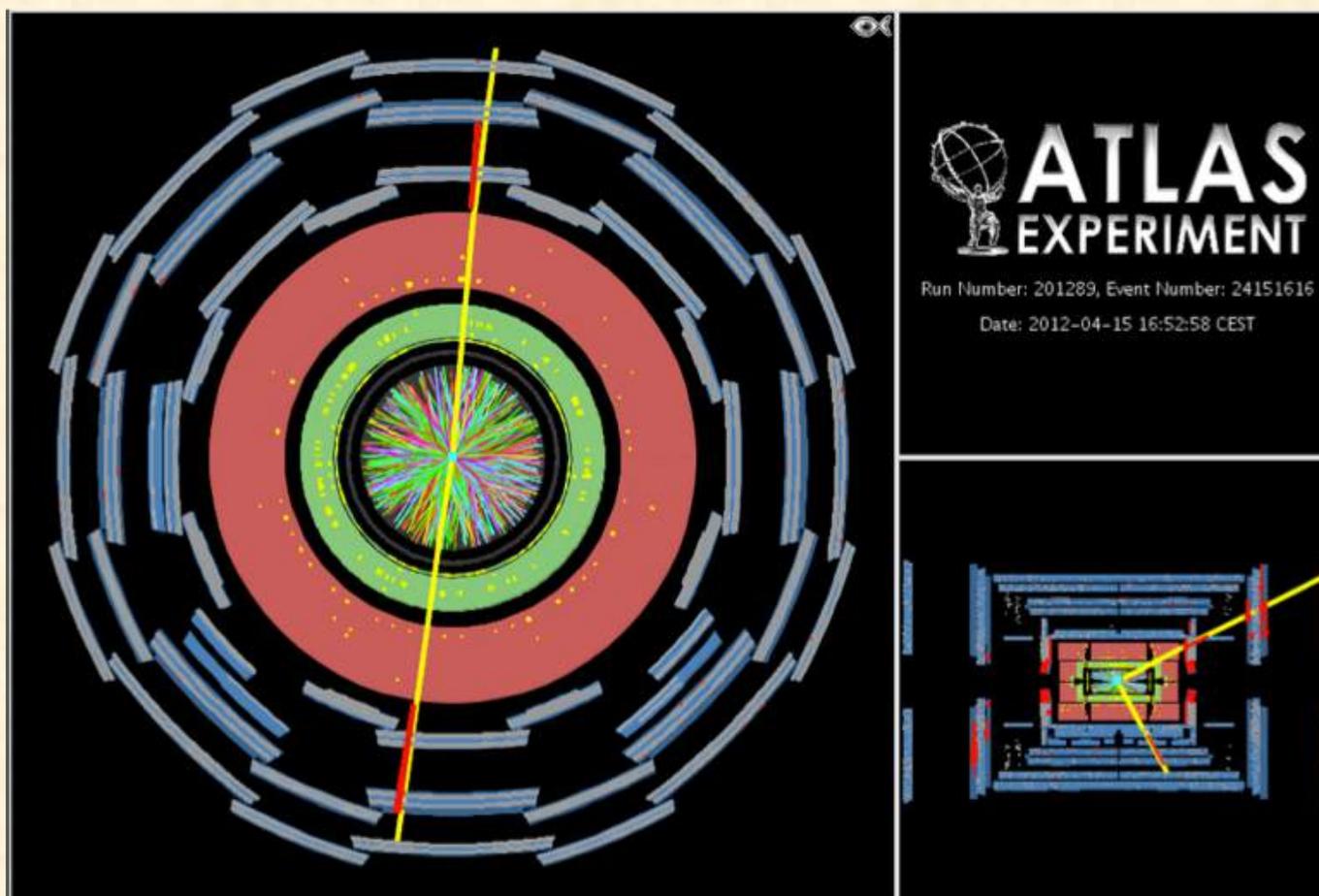
Ogni tipo di “onda” può essere usata come sonda

“Vedere” indirettamente



“Vedere” con i rivelatori di particelle

blocchi di materiale con cui **le particelle interagiscono** producendo **effetti misurabili**
(tipicamente, rilascio di cariche libere in zone ben definite)



Ingrandimento != risoluzione



Quelli di C.S.I. mentono

Potere risolutivo

La lunghezza d'onda "equivale" alla dimensione dei pixel

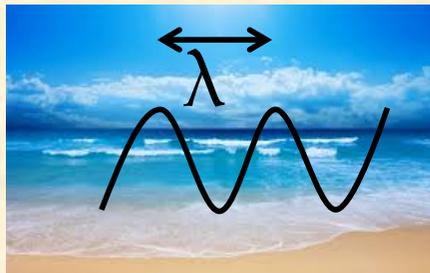
Il microscopio ottico è limitato dalla **lunghezza d'onda λ** della luce visibile (380-760 nm)



1000-10000 é 10^{-9} m
(1 nm = 10^{-9} m)



$5-10 * 10^{-9}$ m

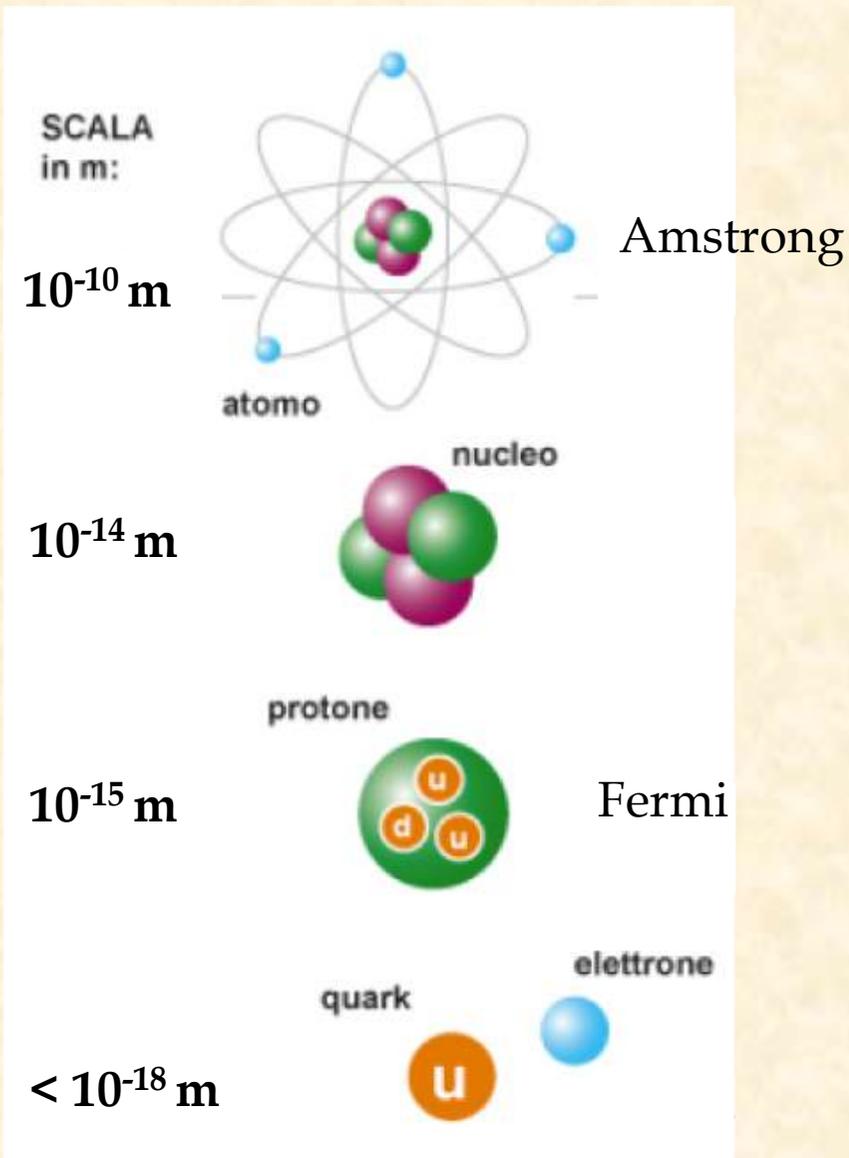


$$p = mv$$

Nel mondo dei Quanti

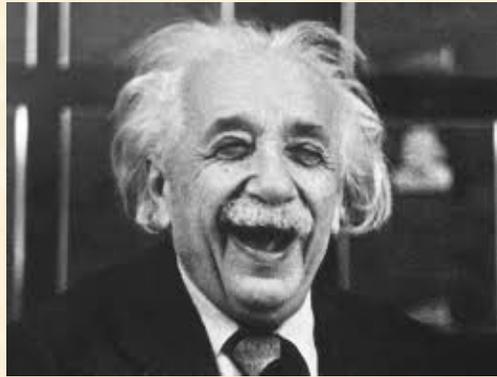
$$\lambda \propto 1/p$$

Dimensioni nucleari e sub-nucleari



Particelle relativistiche con energia dell'ordine di **1 GeV** (un miliardo di eV) hanno lunghezza d'onda di de Broglie dell'ordine di **1 Fermi**.

1 eV = energia guadagnata o persa da una carica elementare che si sposta nel vuoto tra due punti con differenza di potenziale di 1 Volt



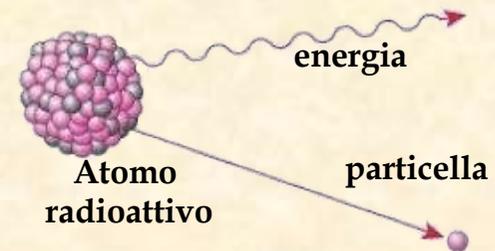
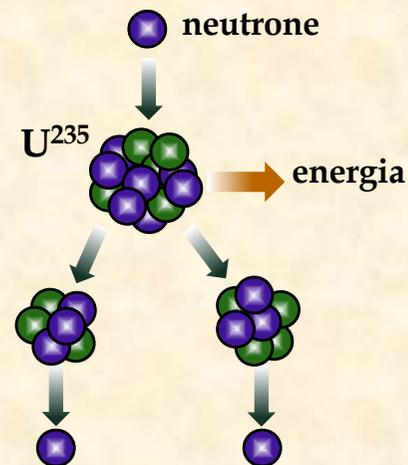
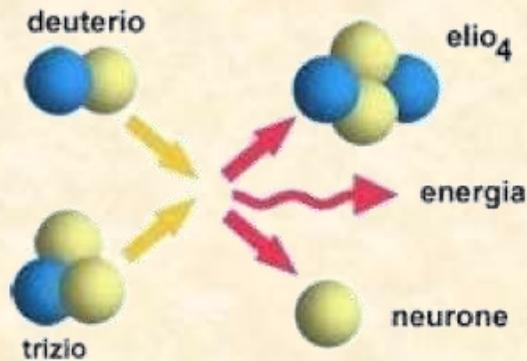
$$E = mc^2$$

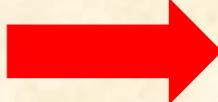


$m = 1 \text{ g}$
 $v = 1 \text{ m/s}$

$$E_{\text{cinetica}} = 0.5 \cdot 10^{-3} \text{ J} = 3.12 \cdot 10^3 \text{ TeV}$$

Massa  Energia



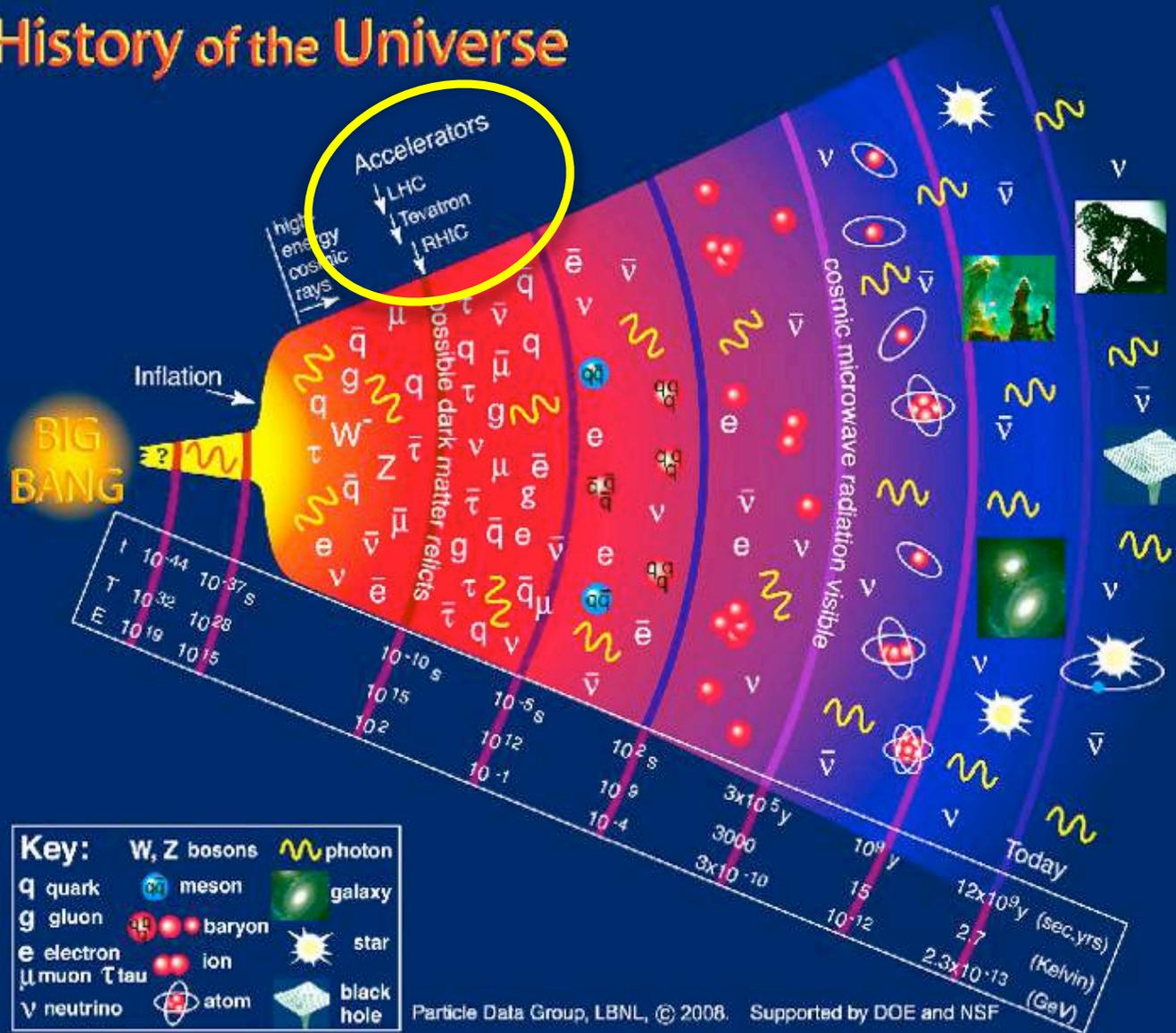
Energia  Massa ???

The Big-Bang Theory



History of the Universe

spazio



tempo

Ciò che conta è la

Densità di energia

(energia/volume)

Accelerando le particelle:

ne aumentiamo l'energia, e quindi il potere risolutivo
→ possiamo indagare dimensioni sempre più piccole

Raggiungiamo grandi densità di energia nella zona in cui interagiscono → possiamo “materializzare” particelle più pesanti (viaggiare indietro nel tempo)

Acceleratori naturali:

I raggi cosmici raggiungono energie molto maggiori di quelle accessibili con gli acceleratori più avanzati

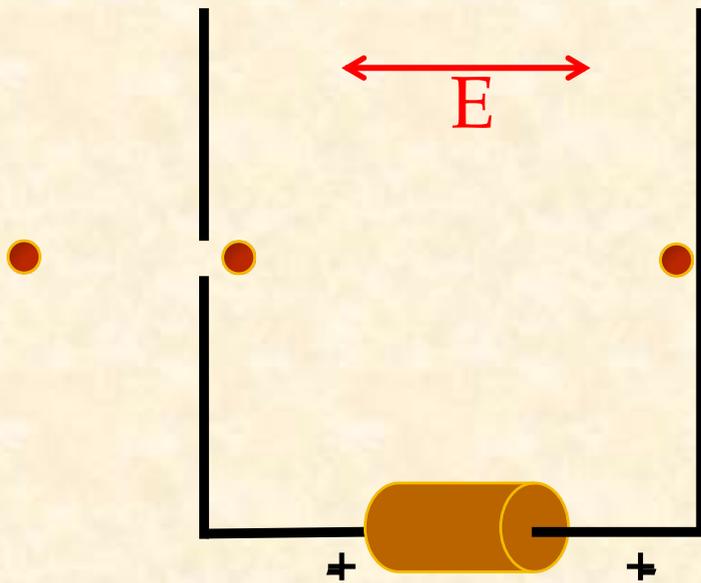


Acceleratori: principi di funzionamento

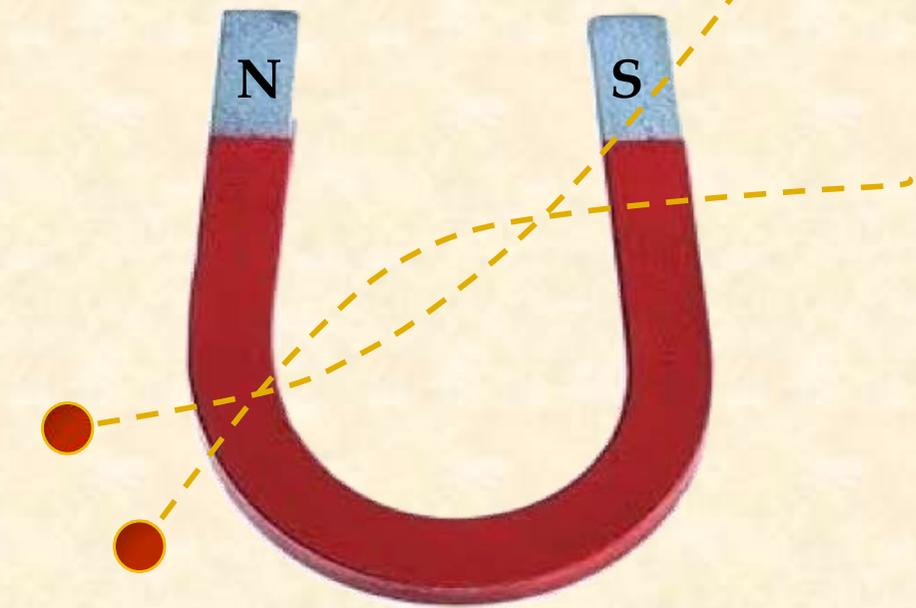
Acceleriamo sempre e solo **particelle cariche**

Campi elettrici per
fornire energia

Campi magnetici per
guidare e focalizzare



$$\vec{F} = q\vec{E}$$



$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

$$r = \frac{mv}{|q|B}$$

Acceleratori

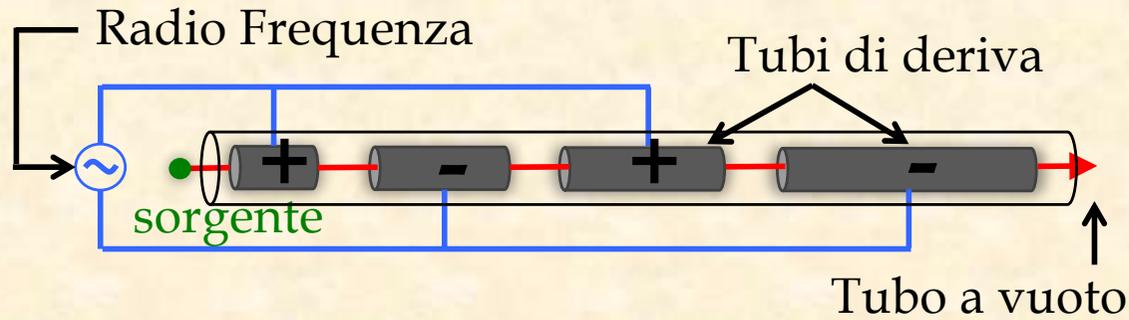
- **Una struttura:**

- Una **sorgente** :  e⁻, p
- Uno o più **tubi a vuoto**;
- Elementi **acceleranti** e di **guida/focalizzazione**;
- Un **bersaglio** (che può essere il fascio stesso);

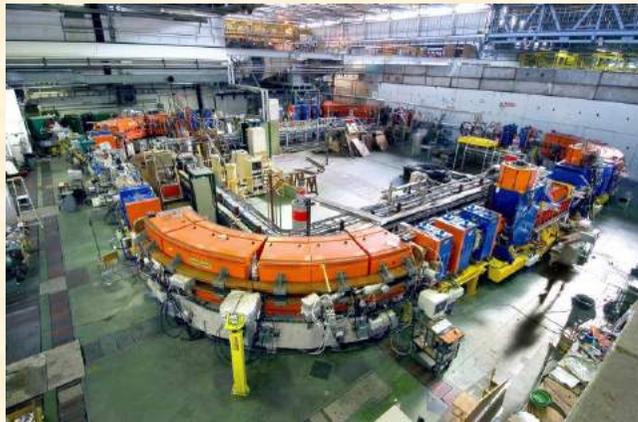
- **Molti tipi** (e diversi limiti su E_{\max} , I_{\max} , )

- Il **tipo di particella** accelerata (elettroni/positroni + protoni/antiprotoni)
- La forma: **lineare**, **circolare** (ciclotroni, sincrotroni ...)
- Il **bersaglio**: fisso, collisionatori
- ...

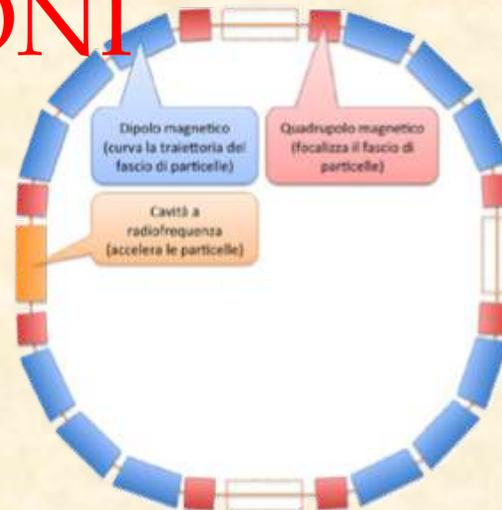
LINAC



SINCROTRONI

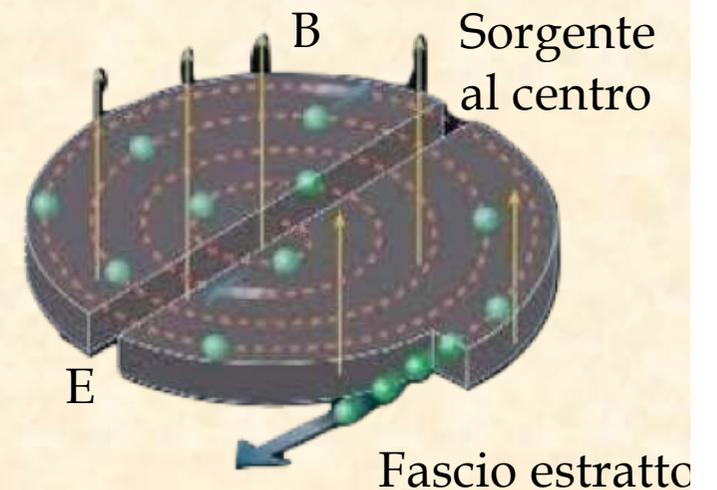


LEIR



CNAO

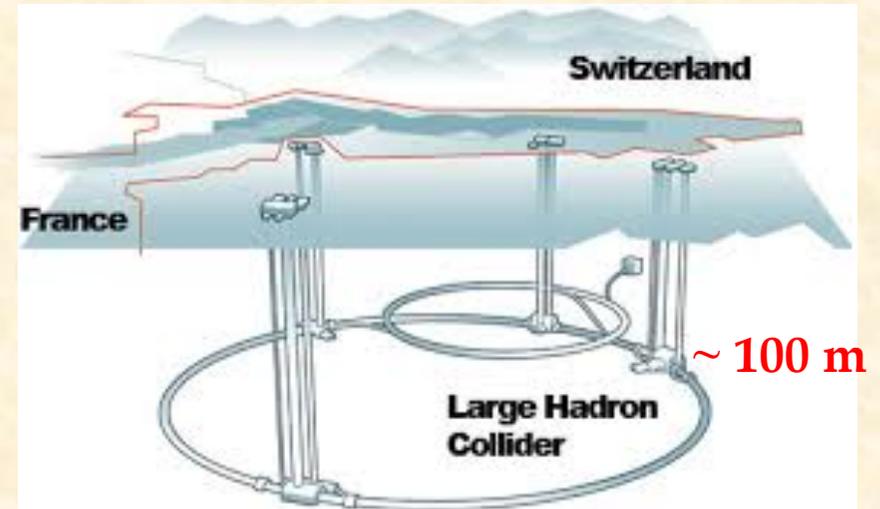
CICLOTRONI



Large Hadron Collider



CERN



LHC

“vagone” con 10^{11} protoni   “vagone” con 10^{11} protoni

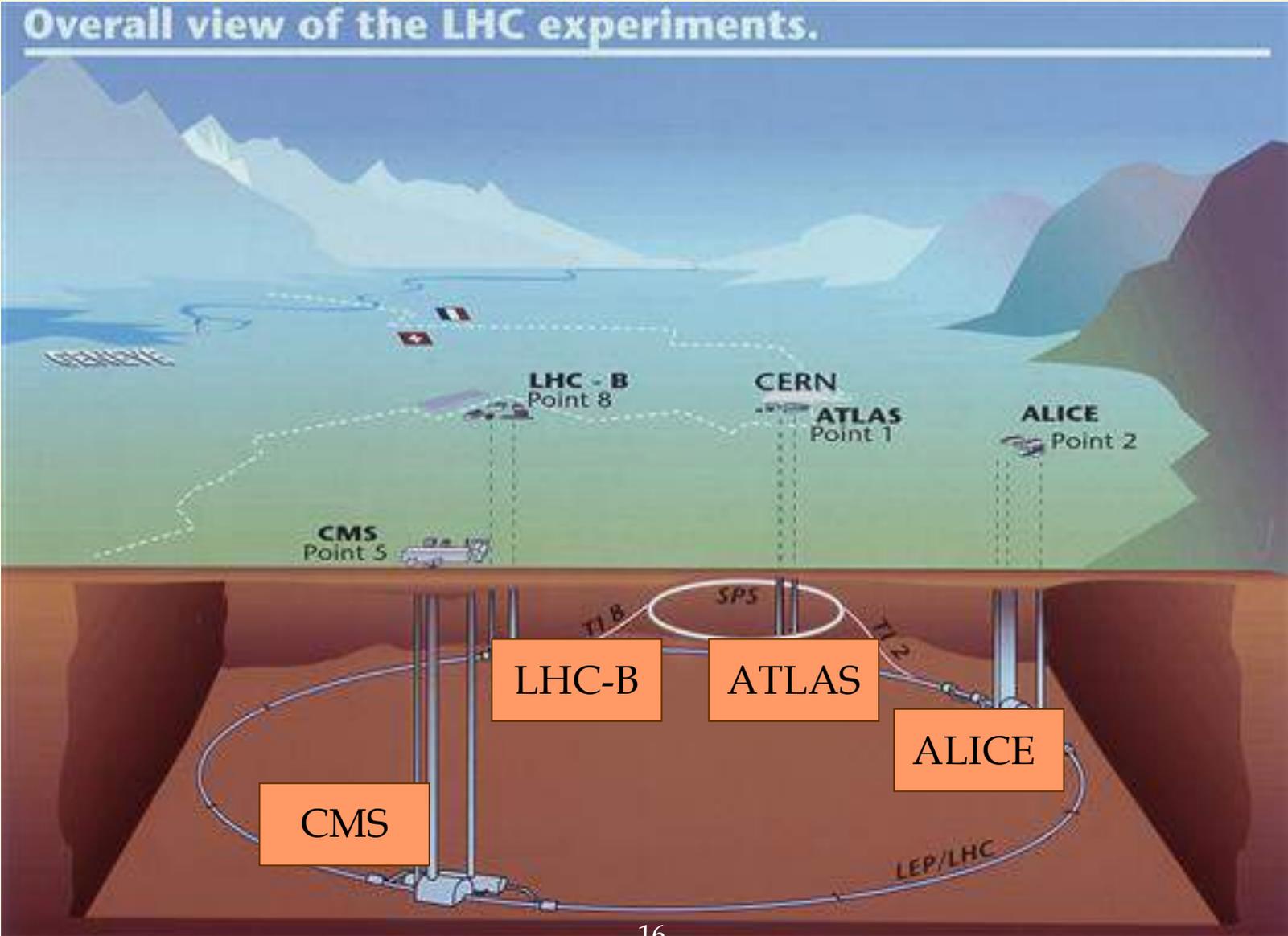
> 2000 vagoni per fascio

$$E_p = 6.5 \text{ TeV}$$

$E_{\text{fascio}} > \text{Eurostar a } 200 \text{ Km/h}$



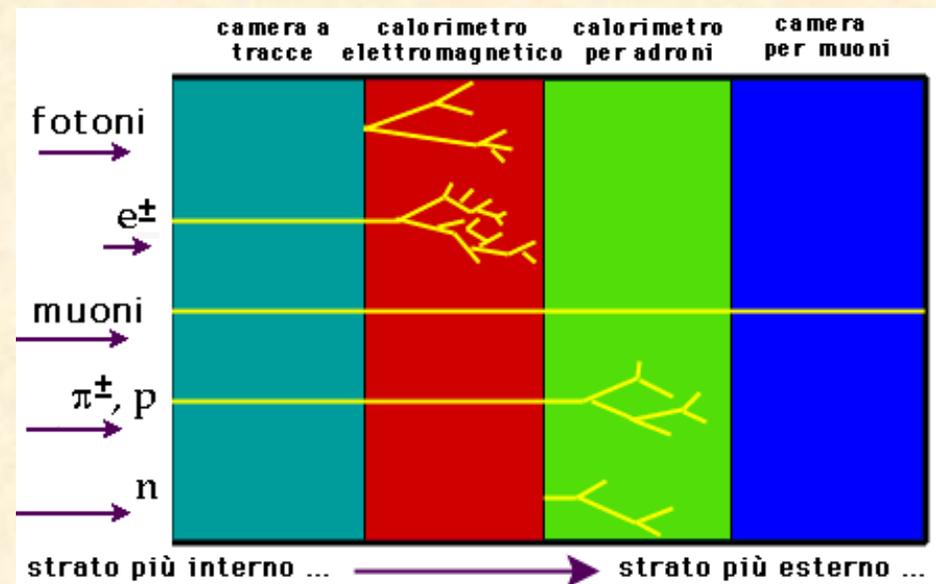
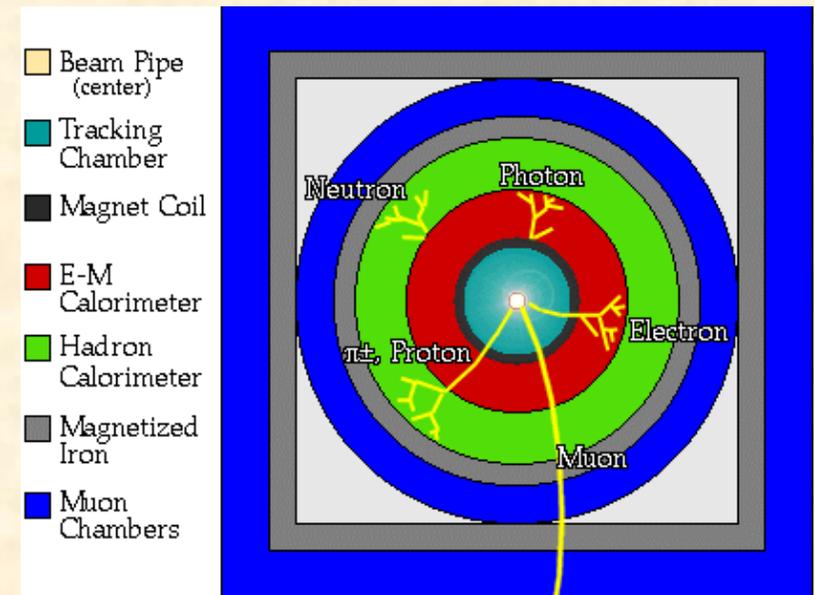
I Rivelatori per LHC



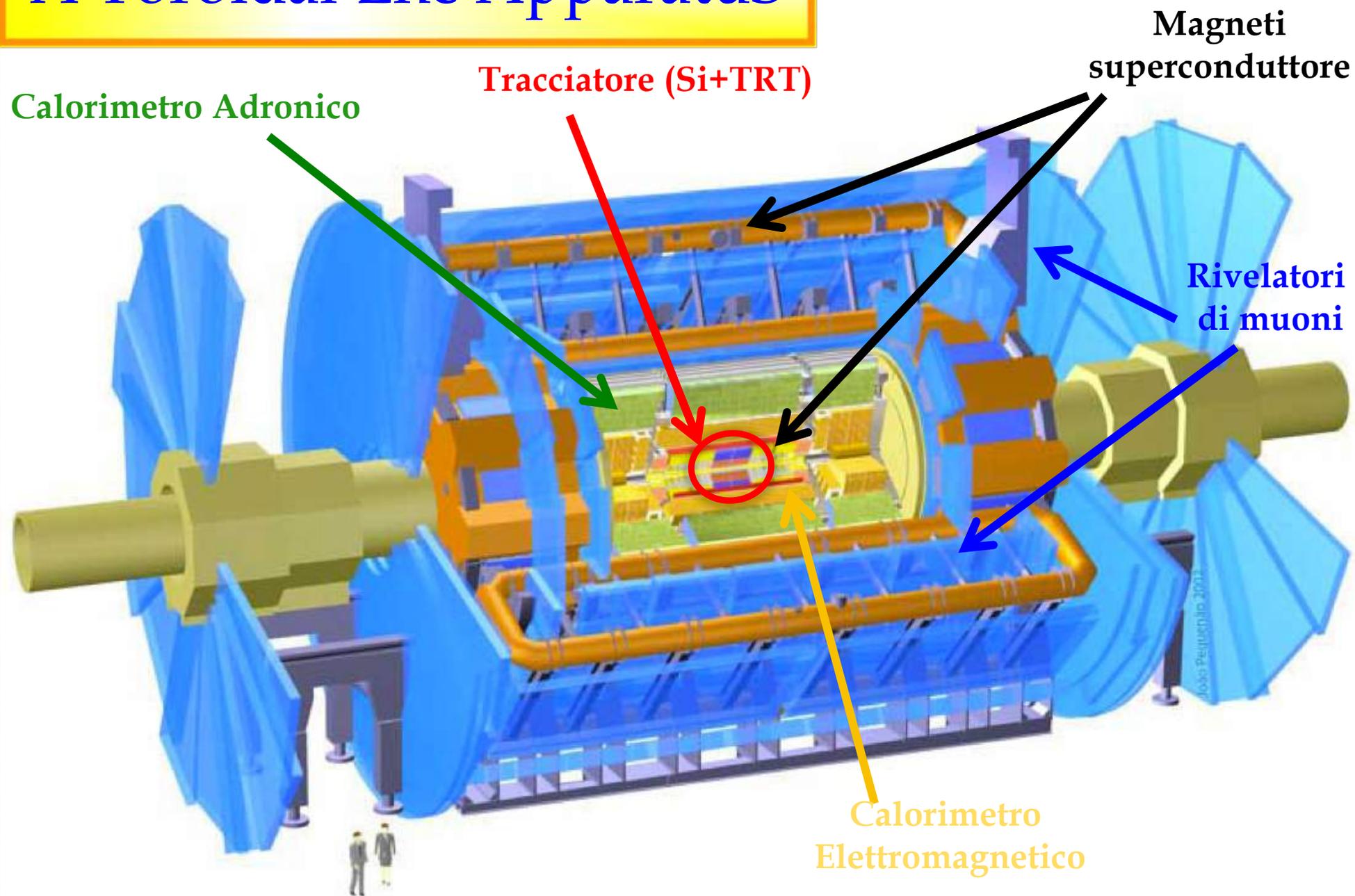
Struttura tipica rivelatore per collider

Tanti “strati” cilindrici. Dal centro verso esterno:

- **Tracciatore** per ricostruire la **traiettoria** delle particelle **cariche**
- **Calorimetro elettromagnetico** per **assorbire** e misurare **energia** di e^\pm e γ
- **Calorimetro adronico** per **assorbire** e misurare **energia** di adroni (n , p , ...)
- **Rivelatore di muoni** (tracciatore esterno)
- **Campo magnetico** per deviare particelle cariche e **misurarne quantità di moto** dal raggio di curvatura



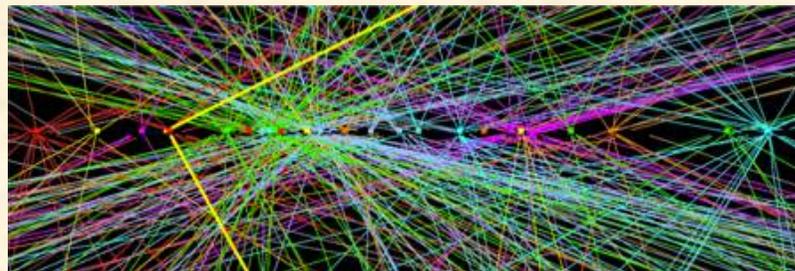
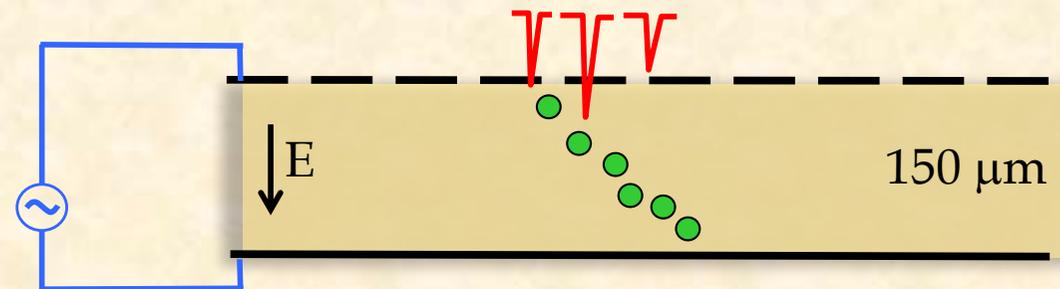
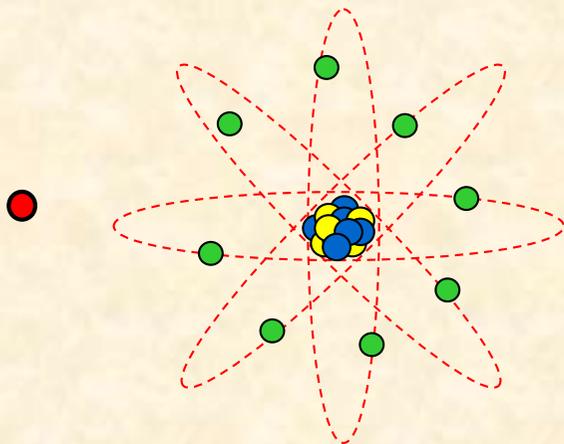
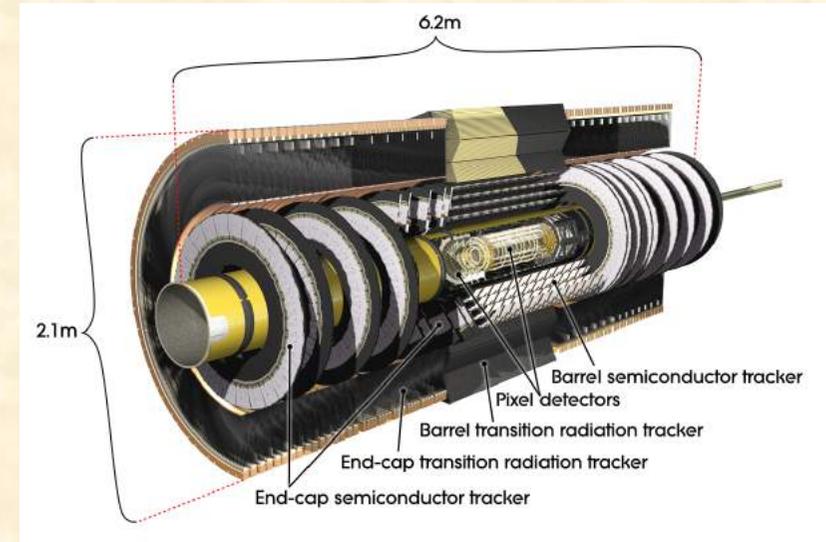
A Toroidal Lhc Apparatus



Il tracciatore

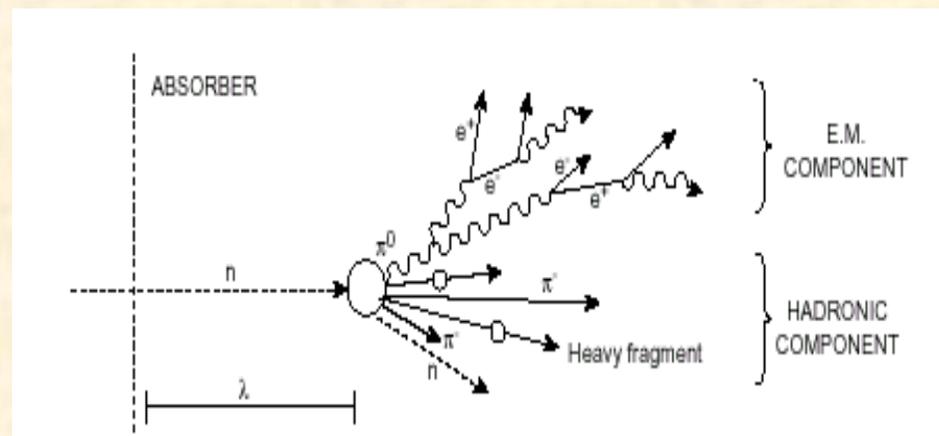
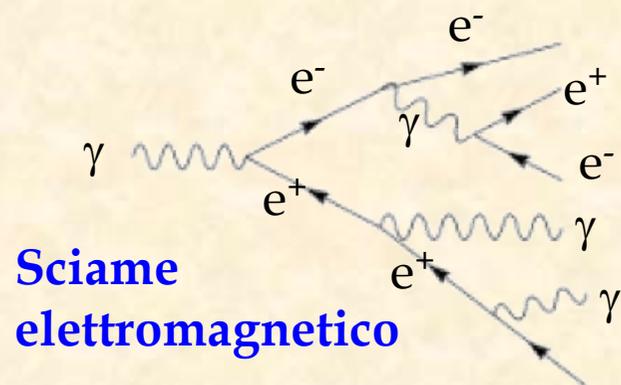
le particelle cariche **ionizzano** il materiale che attraversano; le **cariche libere** sono **raccolte** su **elettrodi** dove si registra un segnale

- Volume cilindrico di ~ 2.0 m di raggio
- **piani più interni di rivelatore al silicio con elettrodi a "pixel" (celle di $100 \times 150 \mu\text{m}$) o "strip" ()**
- Piani esterni con tubi di rivelatore a gas (minima deviazione alle particelle da "tracciare")

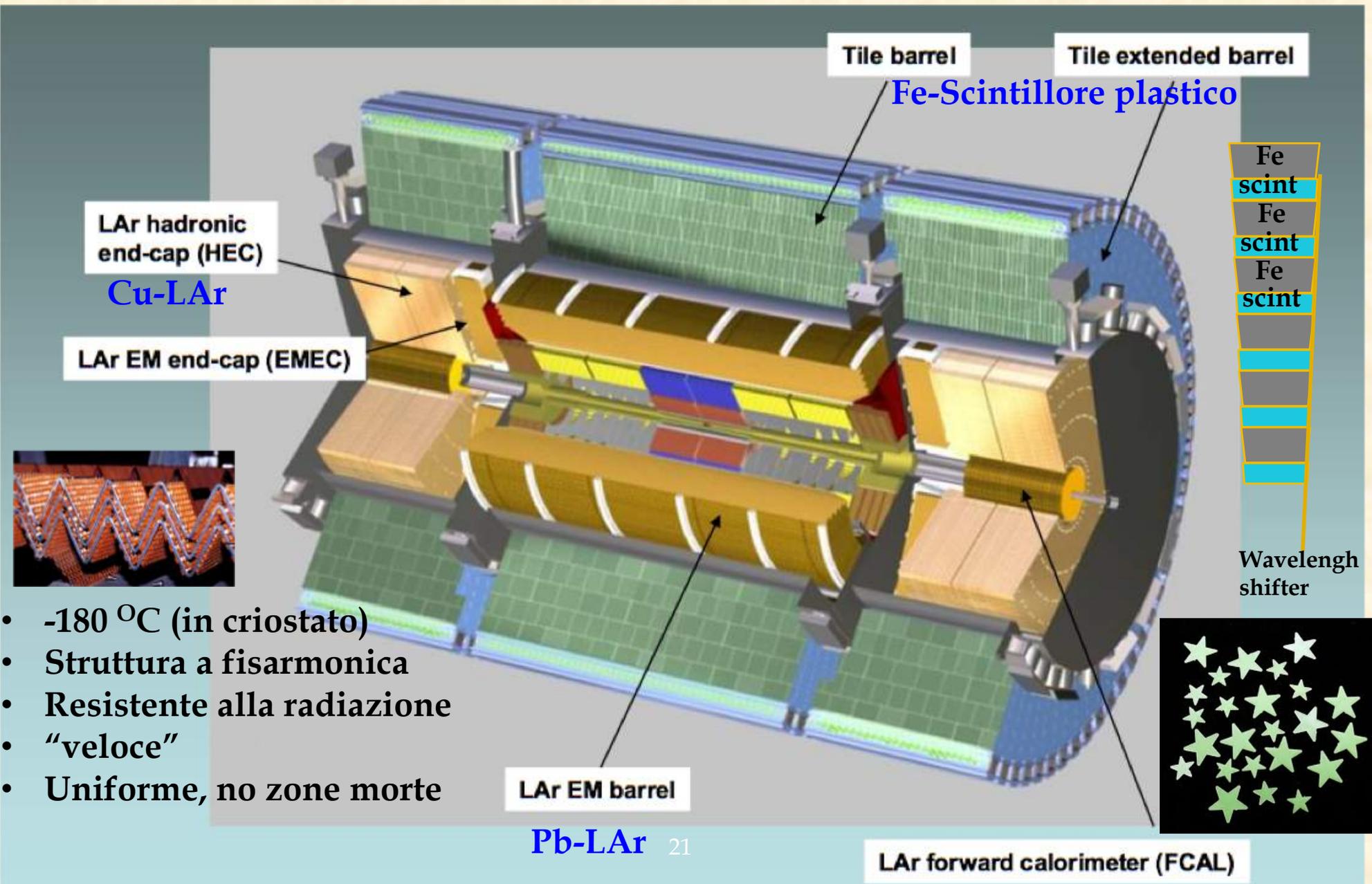


I Calorimetri

- **Assorbono** completamente le particelle per cui sono costruiti, e ne **misurano l'energia**
- Tipicamente composti da strati di **materiale passivo** (assorbitore) e strati di **materiale sensibile** (scintillatori, rivelatori a gas, liquidi, ...)
- Quelli elettromagnetici anche omogenei (cristalli Cherenkov, scintillatori)



Liquid Argon & Tile Calorimeter

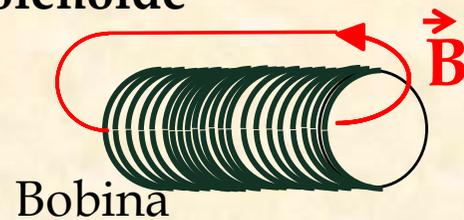


- -180 °C (in criostato)
- Struttura a fisarmonica
- Resistente alla radiazione
- "veloce"
- Uniforme, no zone morte

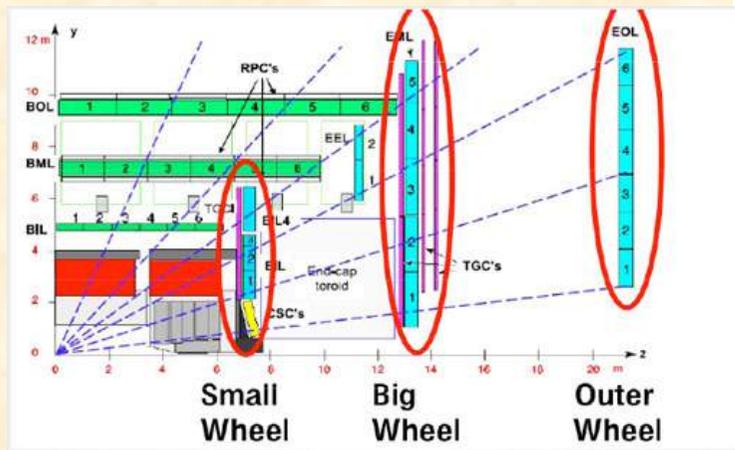
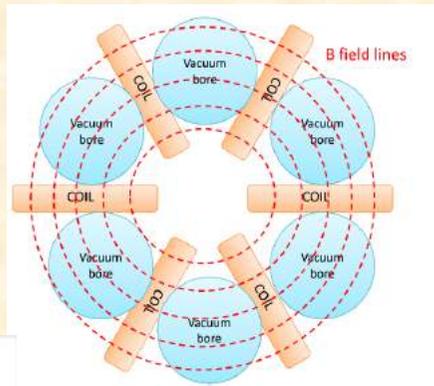
Magneti e Rivelatore per muoni

- Un **magnete superconduttore solenoide** circonda il tracciatore interno
- Magneti **superconduttori** per generare **campo toroidale** all'esterno dei calorimetri
- **Rivelatori a gas** (tubi, a scatola, ...) nelle zone vuote tra i magneti

Solenoide



Toroide

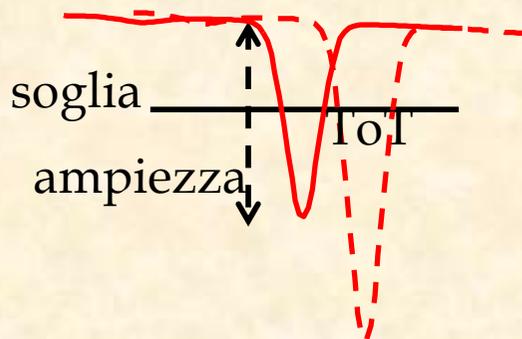


Tubi a deriva
Thin gap chamber
Resistive Plate Chambers
Cathode Strip Chambers

Acquisizione Dati

MOLTI rivelatori, **UN** problema:

estrarre informazioni da un segnale elettrico analogico



- E' passata una particella? (sì/no, 1 bit)
- Quando? (clock)
- Di che energia? (Ampiezza, ToT,...)
- ...

Vantaggi dell'informazione digitale:

- facile da **trasportare** (non si degrada durante la trasmissione)
- facile da **manipolare**
- adatta a essere **immagazzinata** e **distribuita**

DIGITALIZZARE APPENA POSSIBILE

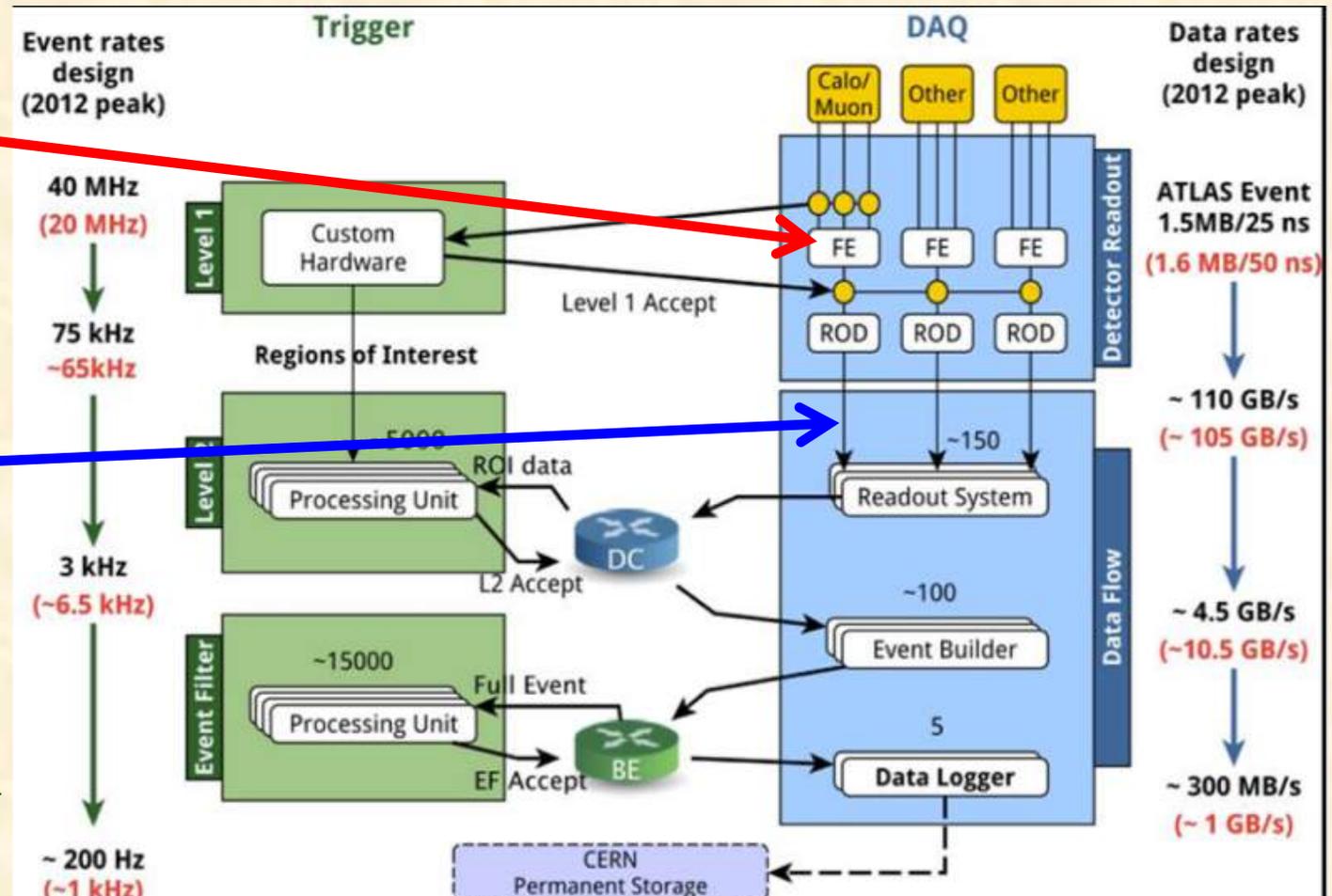
TDAQ

Microelettronica e Digitalizzazione



fibre ottiche
Pipelines
Buffer
Switches
banda

~ 100 milioni di segnali per evento
~ 40 milioni di eventi al secondo

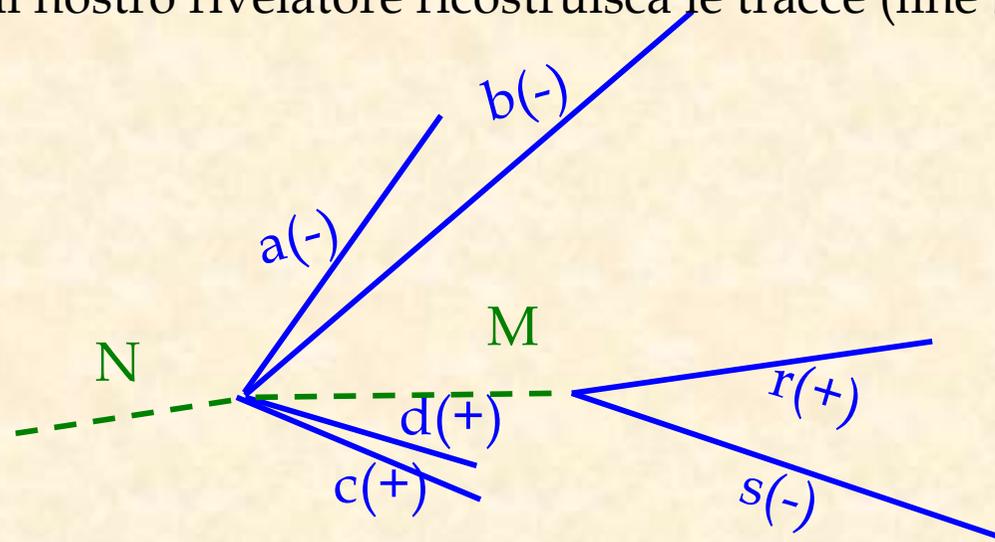


TRIGGER

Centinaia di CPU
Terabytes (TB) di dati

Ricostruzione di particelle a breve vita media

Supponiamo il nostro rivelatore ricostruisca le tracce (linee blu) di alcune particelle cariche

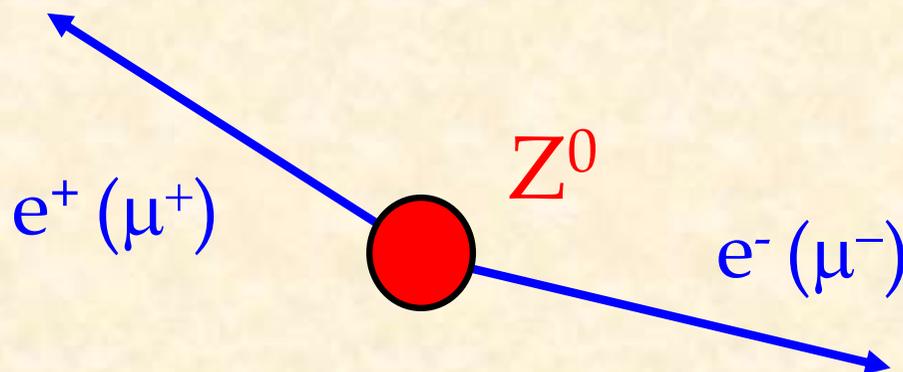


- Possiamo facilmente dedurre che r, s provengono da una particella M neutra, e che a, b, c, d hanno un genitore N
- E' possibile che M, a, b, c, d siano prodotte da un unico "genitore"
- Ciascuna combinazione $(a, c), (b, d), (a, b, c), \dots$ potrebbe a sua volta derivare da una particella a brevissima vita media

Ricostruzione Z^0

$M_Z \approx 91 \text{ GeV}$
vita media $\tau \approx 3 \times 10^{-25} \text{ s}$

Consideriamo **SOLO** i decadimenti in coppie e^\pm, μ^\pm
Il decadimento è immediato: $c\tau_Z \approx 10^{-16} \text{ m}$



Segnatura stato finale:

2 muoni segno opposto

2 elettroni segno opposto

Conoscendo **energia e impulso dei prodotti** di decadimento **si può calcolare la massa del "genitore"** (leggi di conservazione + cinematica relativistica).

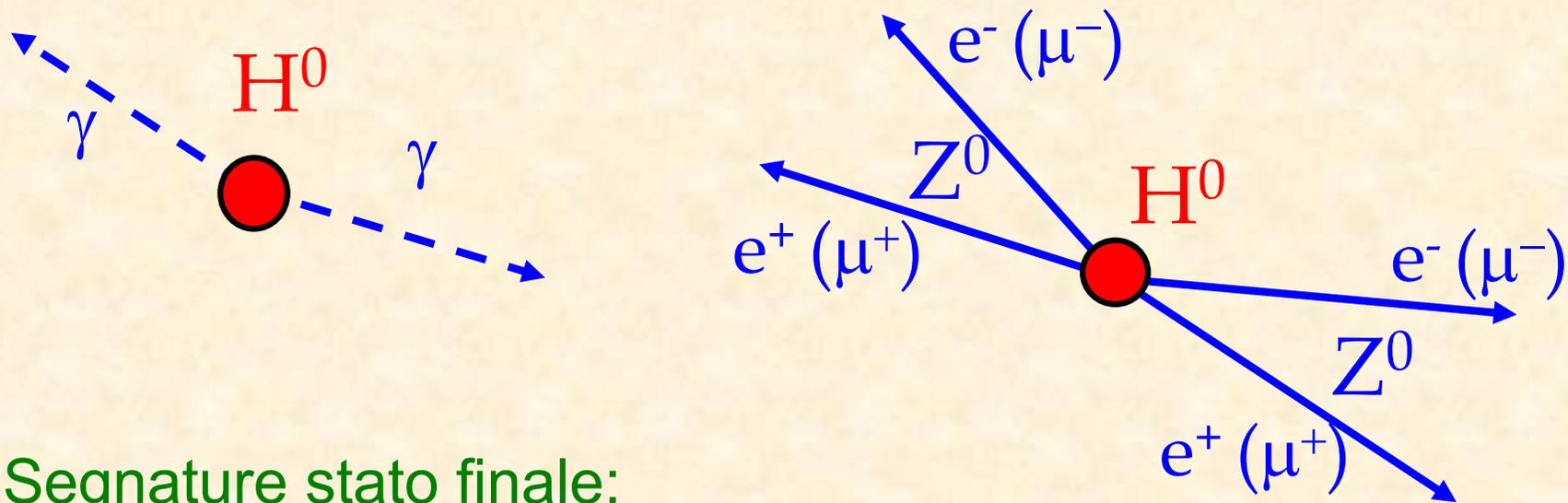
Se decade in una coppia di muoni (idem per elettroni):

$$M_{Z^0} = \sqrt{\left(\frac{E_{\mu^+}}{c^2} + \frac{E_{\mu^-}}{c^2}\right)^2 - \left(\frac{\vec{p}_{\mu^+}}{c} + \frac{\vec{p}_{\mu^-}}{c}\right)^2}$$

Ricostruzione Higgs

$M_H \approx 125 \text{ GeV}$
vita media $\tau \approx 10^{-21} \text{ s}$

Consideriamo **SOLO** i decadimenti in $ZZ\ell\ell\gamma\gamma$
Il decadimento è immediato



Segnature stato finale:

- 2 fotoni di alta energia
- 4 leptoni di alta energia con la giusta combinazione di carica ($e^+e^- \mu^+\mu^-$, $4e$, 4μ)

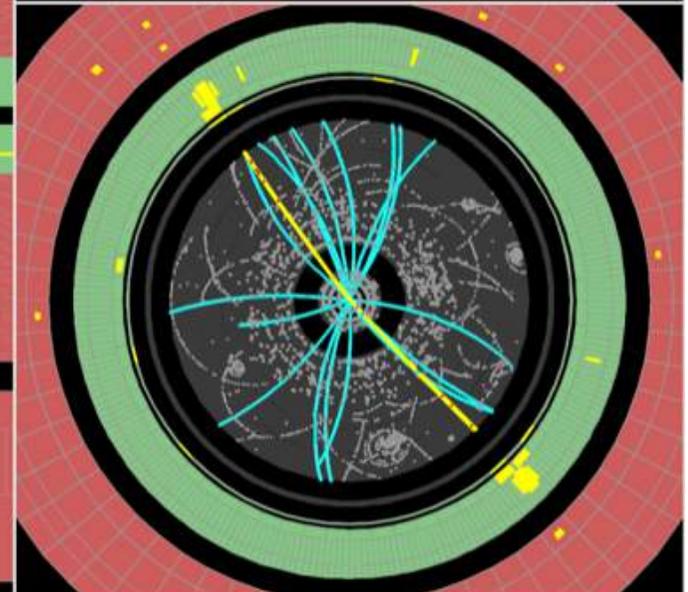
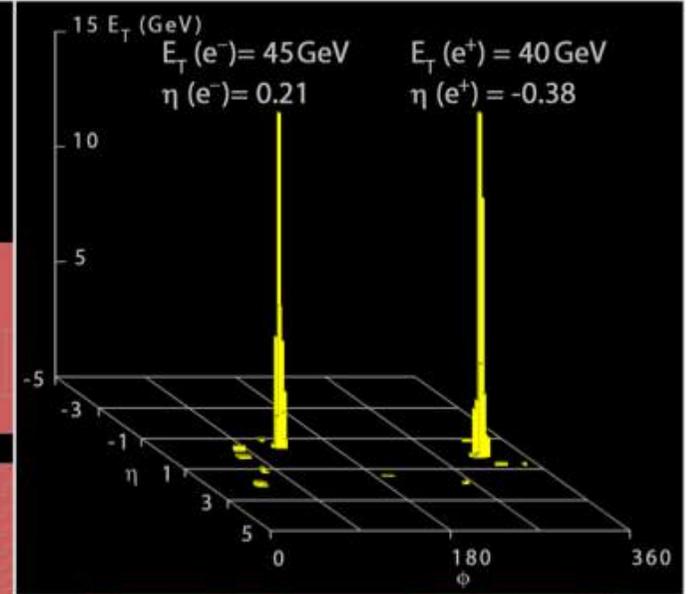
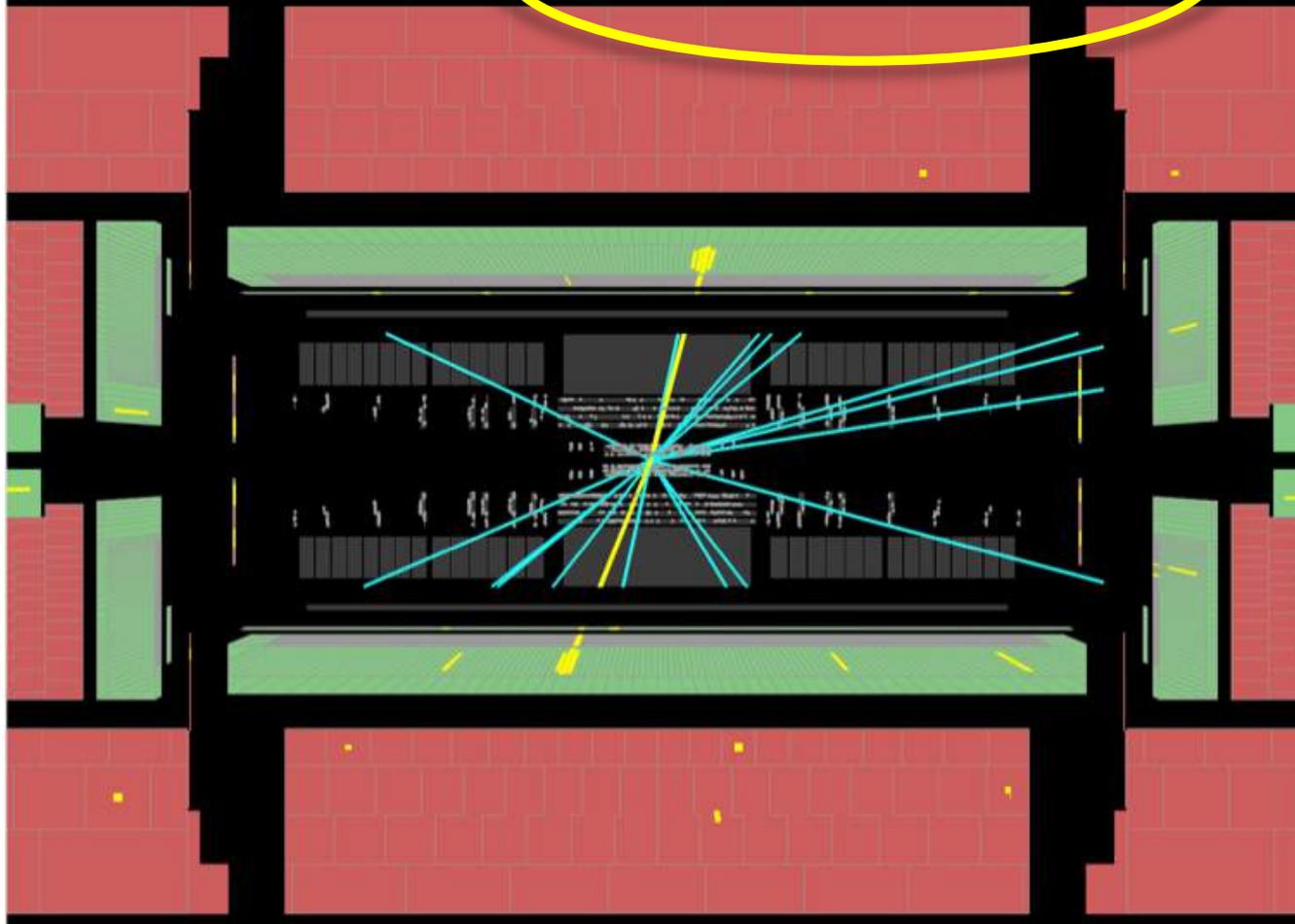


Run Number: 154817, Event Number: 968871

Date: 2010-05-09 09:41:40 CEST

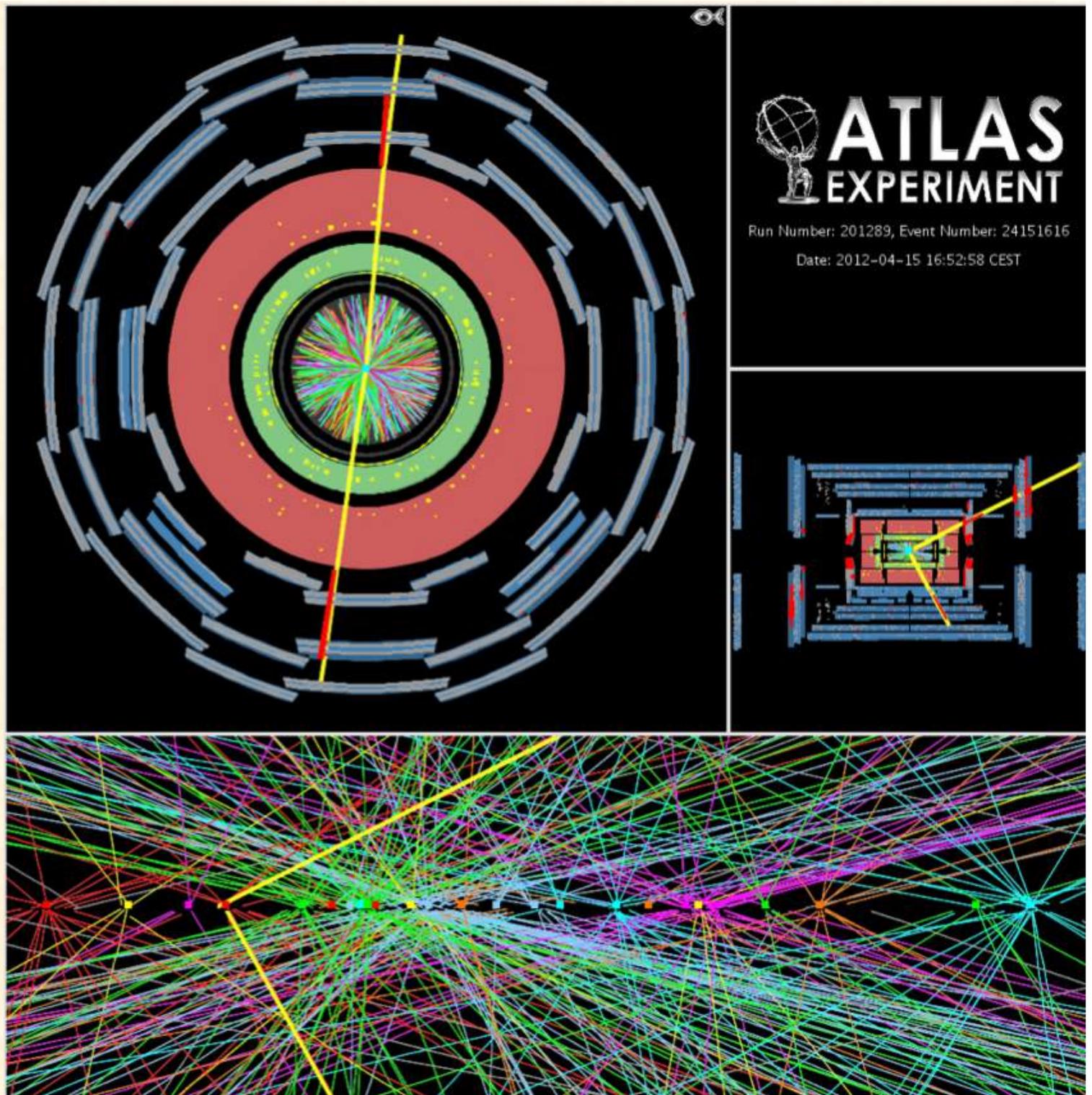
$M_{ee} = 69 \text{ GeV}$

$Z \rightarrow ee$ candidate in 7 TeV collisions



Candidato

$Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$
con pileup

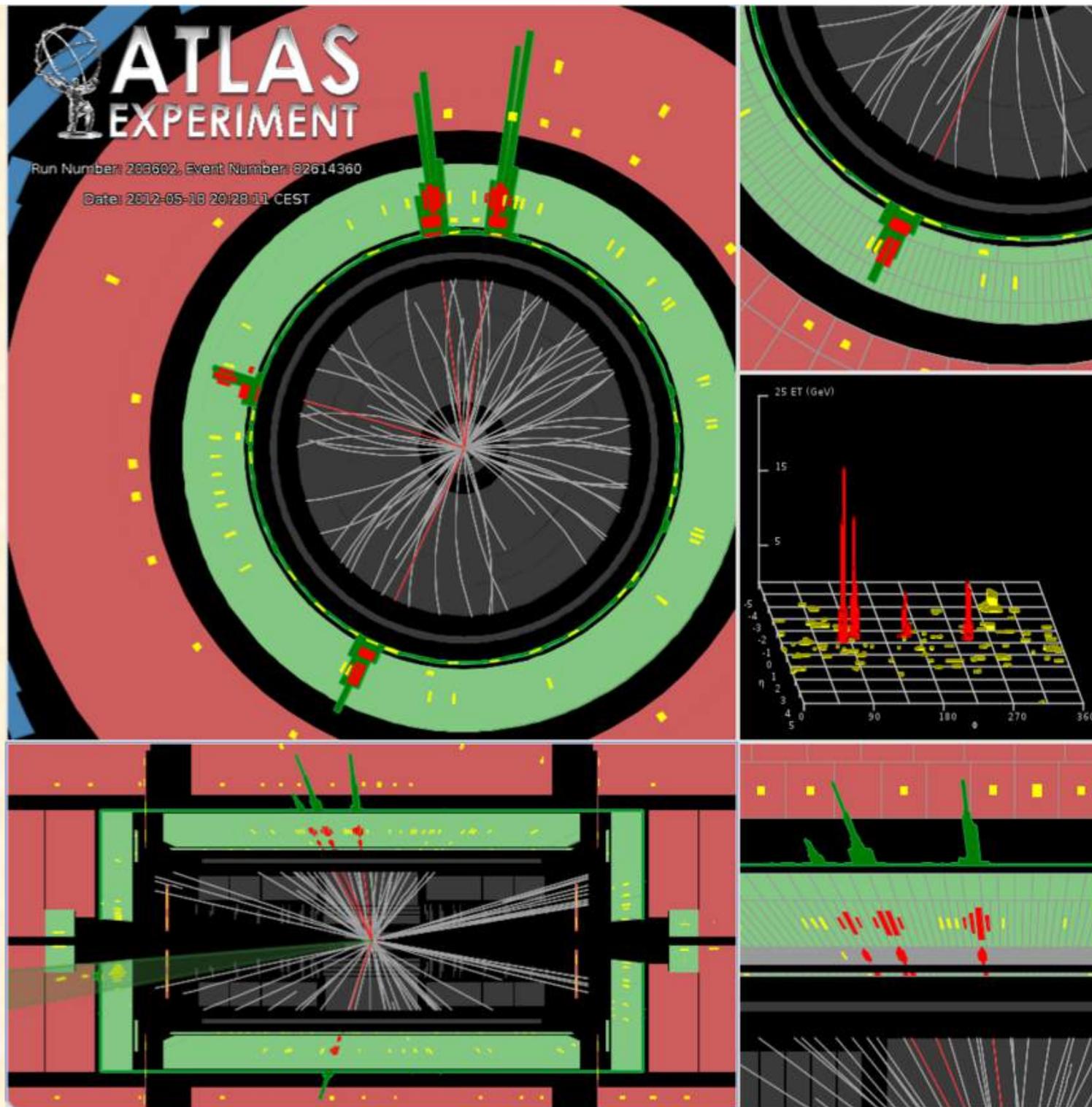


Candidato

$H \rightarrow ZZ$

e^+e^-

e^+e^-



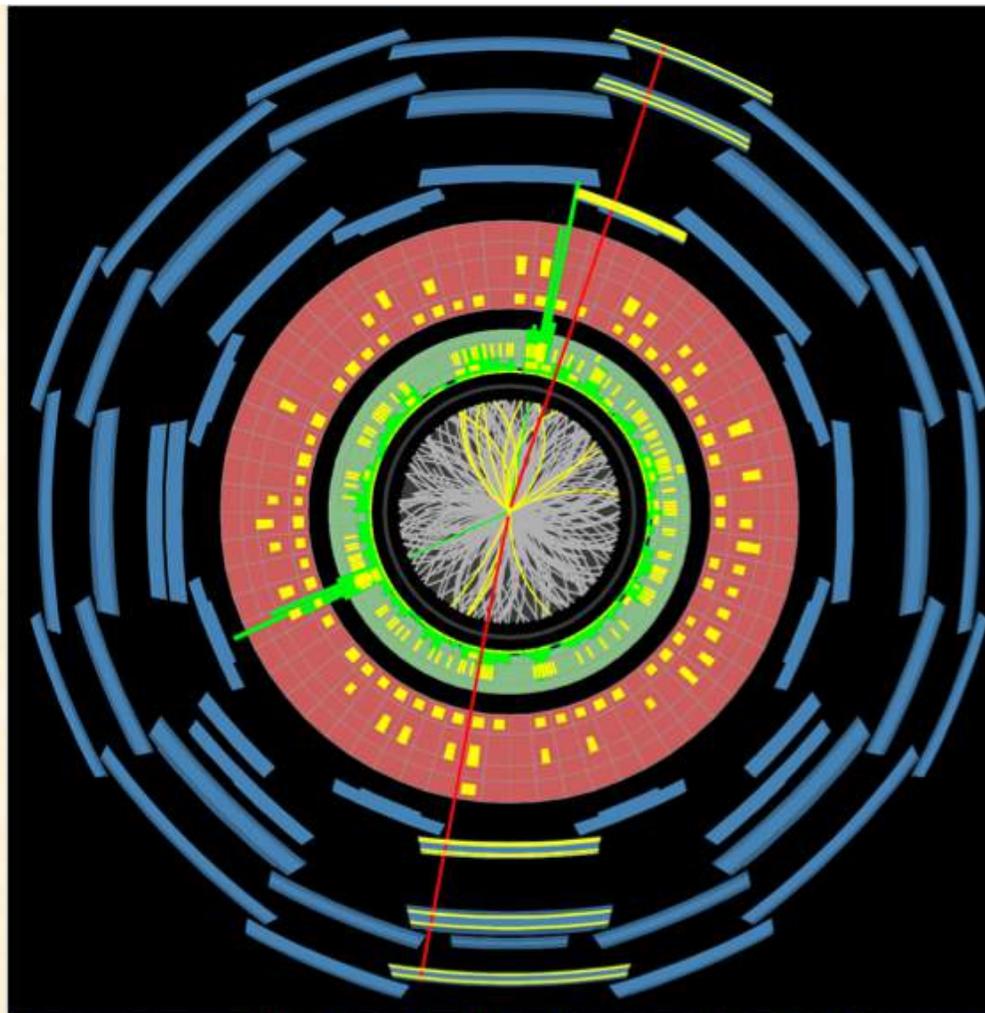
Candidato

$H \rightarrow ZZ$

e^+e^-

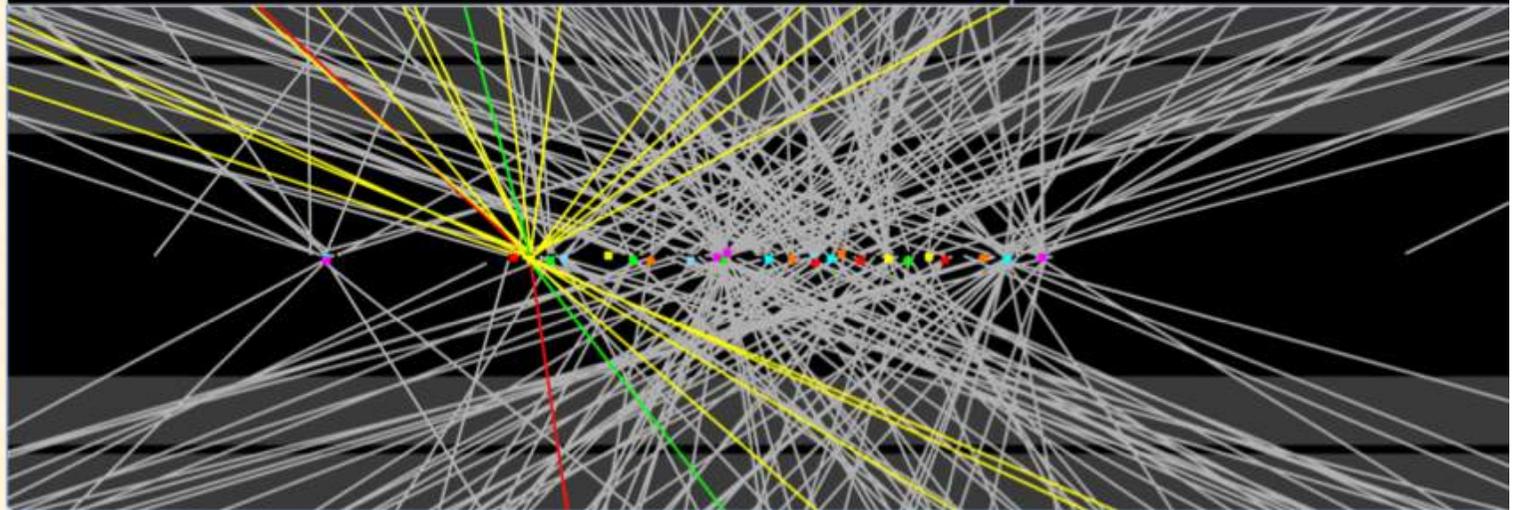
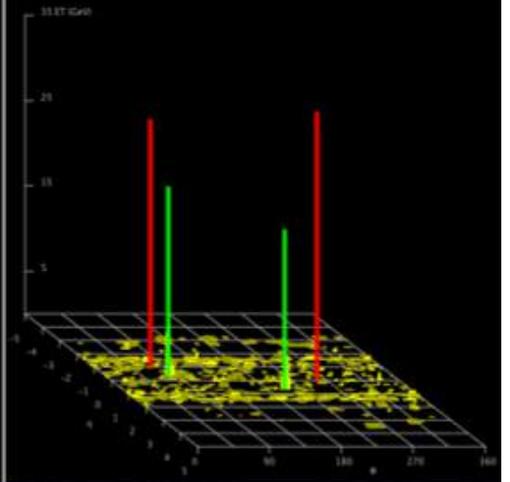
$\mu^+\mu^-$

con pileup



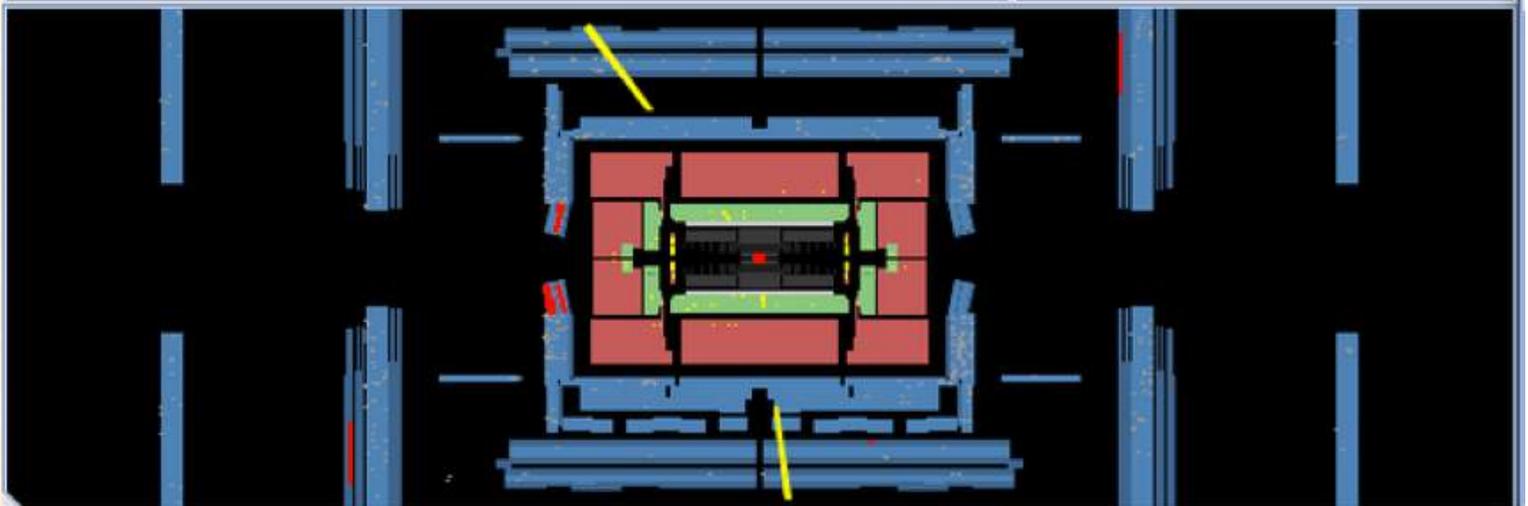
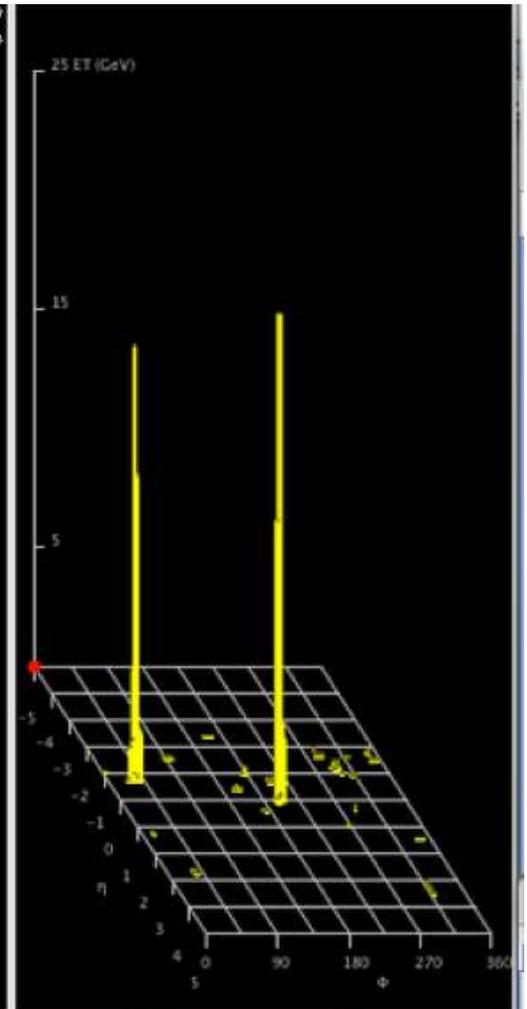
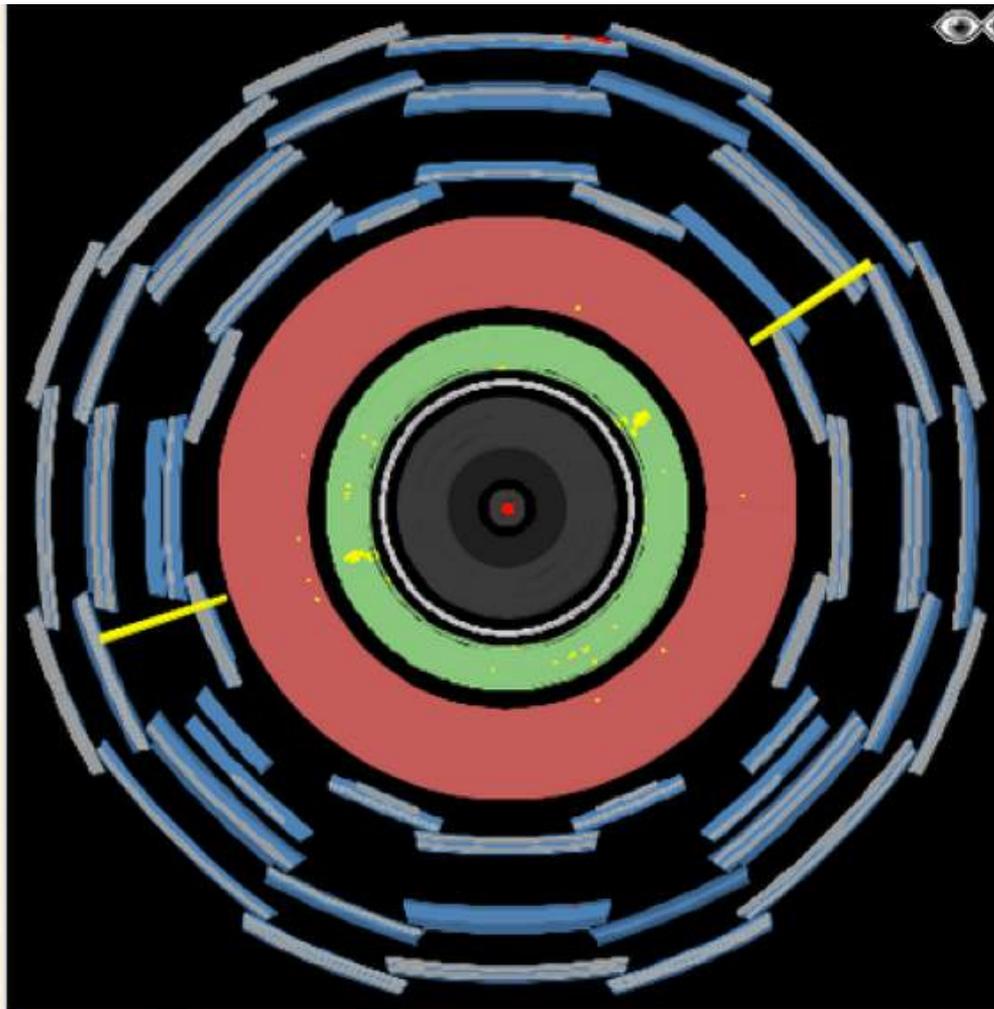
Run Number: 304431, Event Number: 2206548301

Date: 2016-07-25 05:01:07 UTC



Candidato

$$H^0 \rightarrow \gamma\gamma$$



**ORA TOCCA
A VOI**