

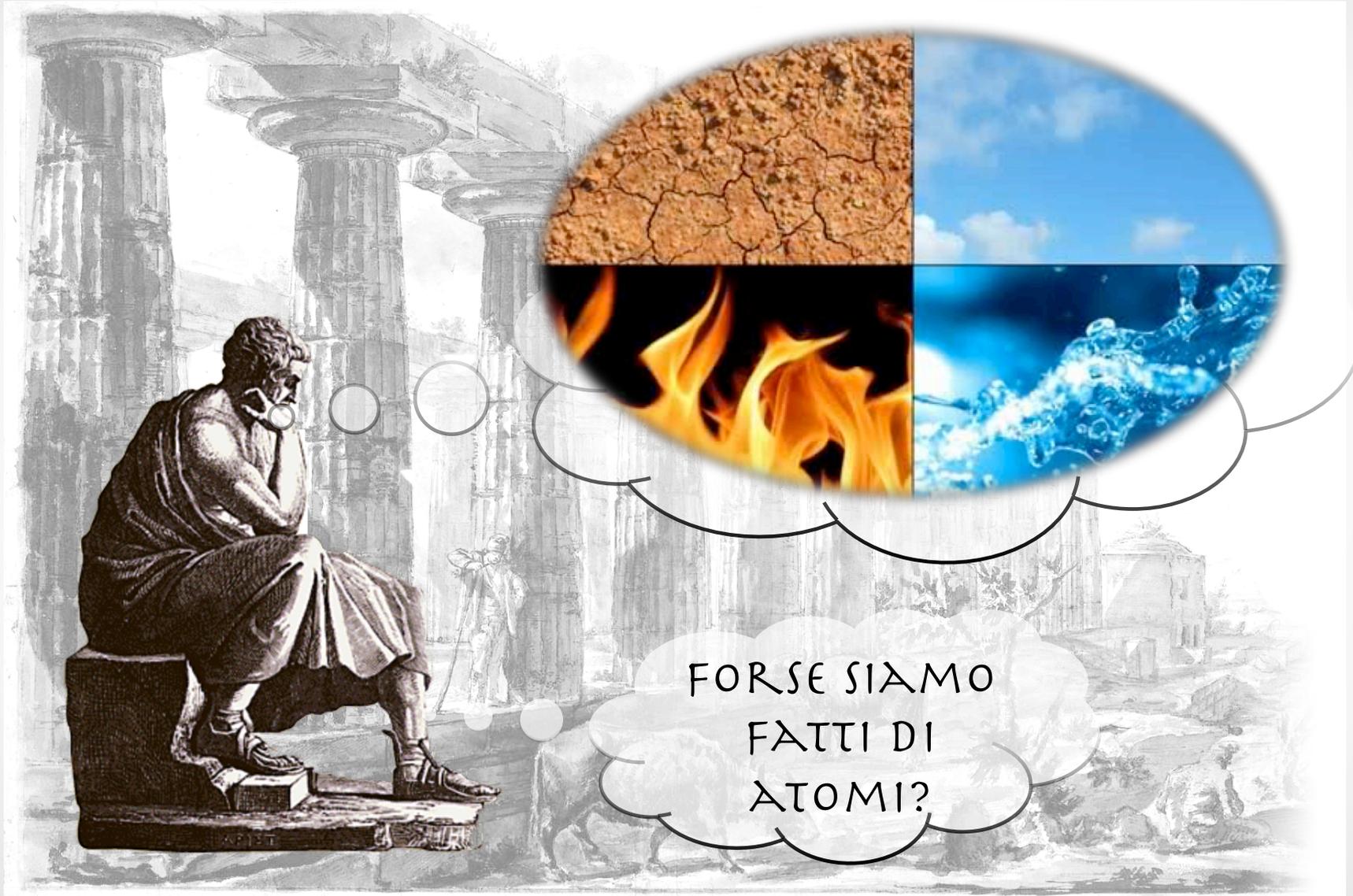
# Il mondo delle particelle elementari: dall'elettrone al bosone di Higgs e.. oltre !



# Perché cerchiamo le particelle elementari ?

- Cerchiamo:
  - i componenti fondamentali della materia (“mattoncini” indivisibili che formano la materia” o se preferite “particelle elementari”)
  - Le forze fondamentali che agiscono tra di loro
- Con le nostre osservazioni costruiamo modelli che mirano a fornire una descrizione completa di tutto quello che ci circonda... fino a spiegare i primissimi istanti dopo il Big Bang !

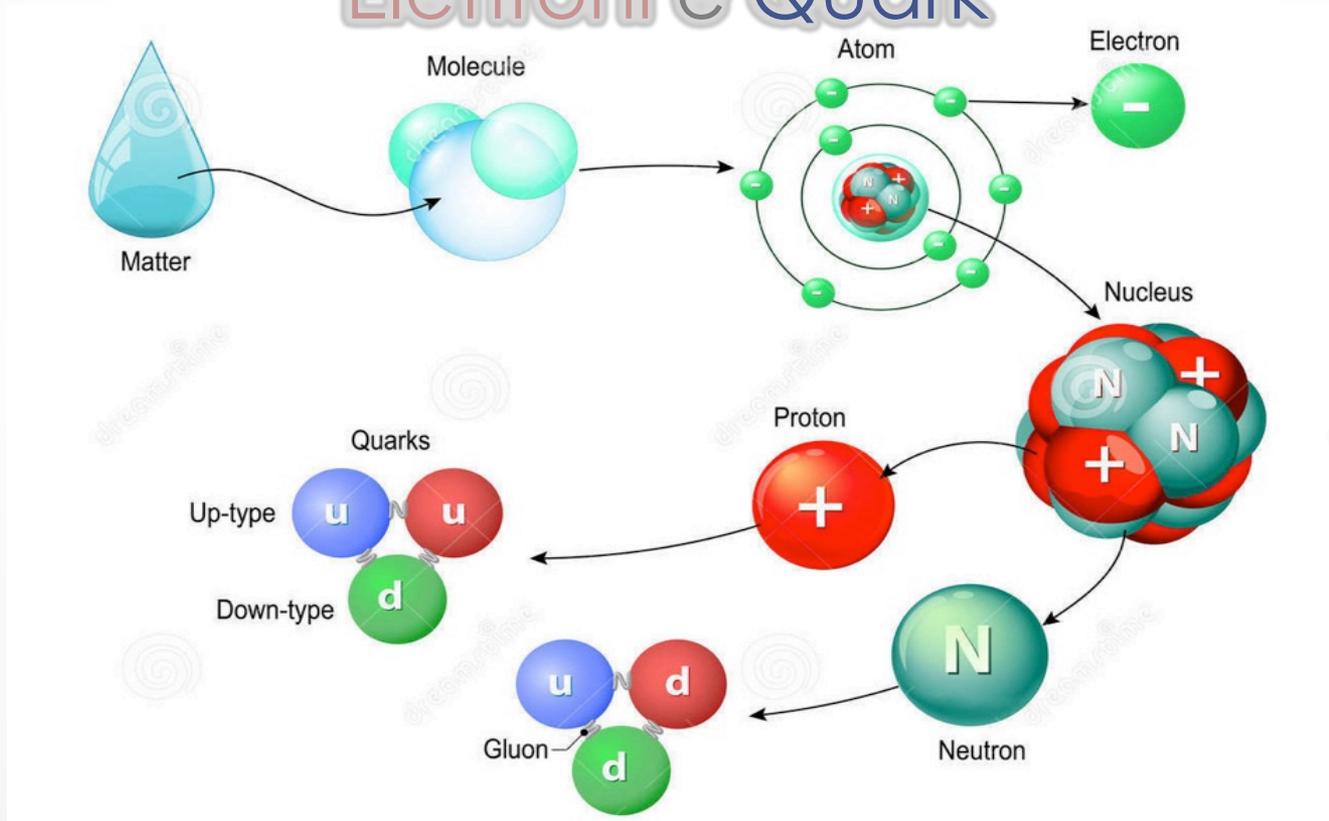
# Democrito: primo concetto di componenti elementari



# Struttura della materia

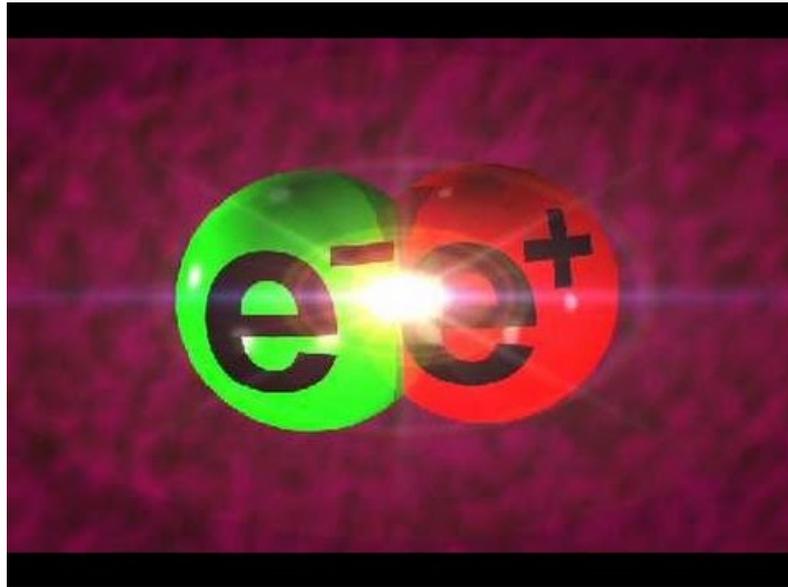
- Lo spazio occupato dalla materia è **soprattutto vuoto**
- Tutta la materia ordinaria che conosciamo è fatta da due tipi di **particelle elementari**:

## Elettroni e Quark



# E l'antimateria ?

- Negli anni abbiamo scoperto (prodotto in laboratorio) particelle identiche a quelle che compongono il nostro mondo ma con carica opposta.
- Materia-antimateria si annichilano producendo energia. Quindi quando anche riusciamo a produrre antiparticelle queste si annichilano con la materia ordinaria in breve tempo.



# Materia-Antimateria

Da dove viene la materia che ci circonda ?

Il **Big Bang** produsse particelle di **materia e di anti-materia** (particelle di stessa massa ma proprietà opposte, come ad esempio la carica elettrica).

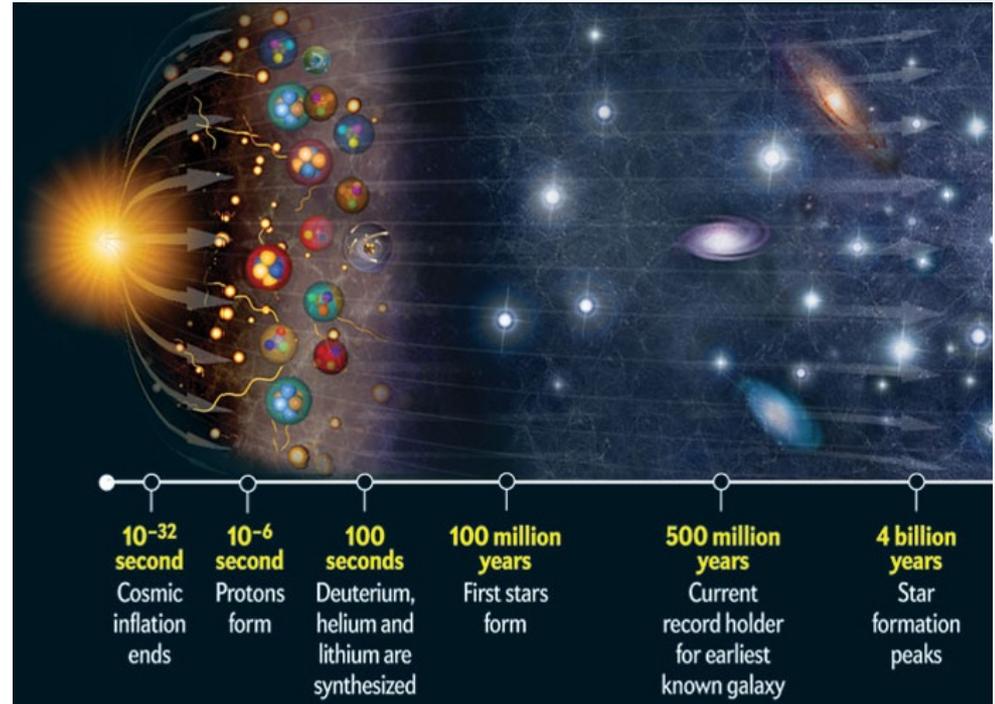
Circa  $10^{-34}$  secondi dopo il Big Bang, si creò un **piccolissimo eccesso** di materia

sull'antimateria: per ogni **1000000000** antiparticelle

si avevano

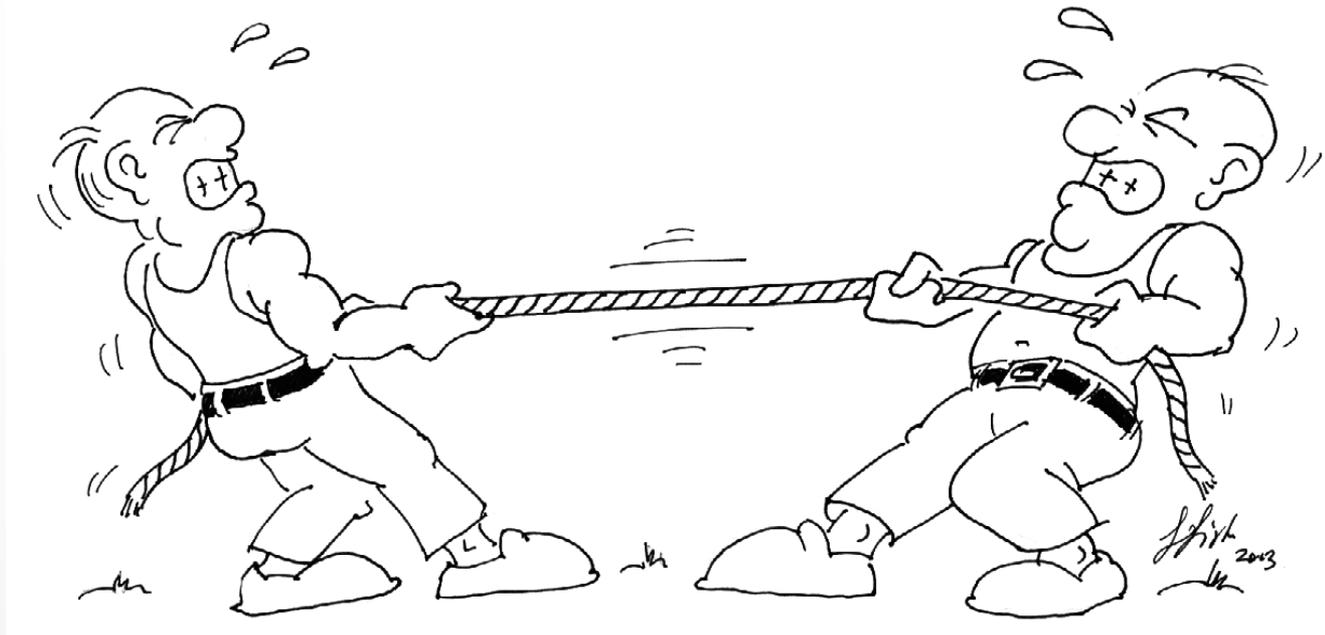
**1000000001** particelle

Dopo  $10^{-5}$  secondi tutte le antiparticelle si annichilarono in collisioni particella-antiparticella; restò solo quel **relativamente piccolo numero di particelle** in eccesso, che rese possibile lo sviluppo **dell'attuale Universo**.



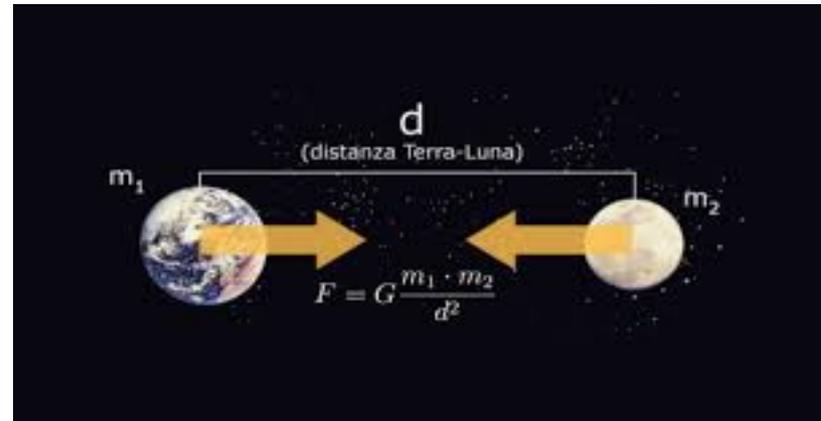
# Forze e interazioni

- La materia, così come le particelle, interagisce attraverso le forze.
- Applicando una forza ad un oggetto si modifica il modo in cui si sta muovendo.



# Forze fondamentali nel mondo macroscopico

- Forza di gravità: corpi con massa si attraggono (intensità va come l'inverso del quadrato della distanza)



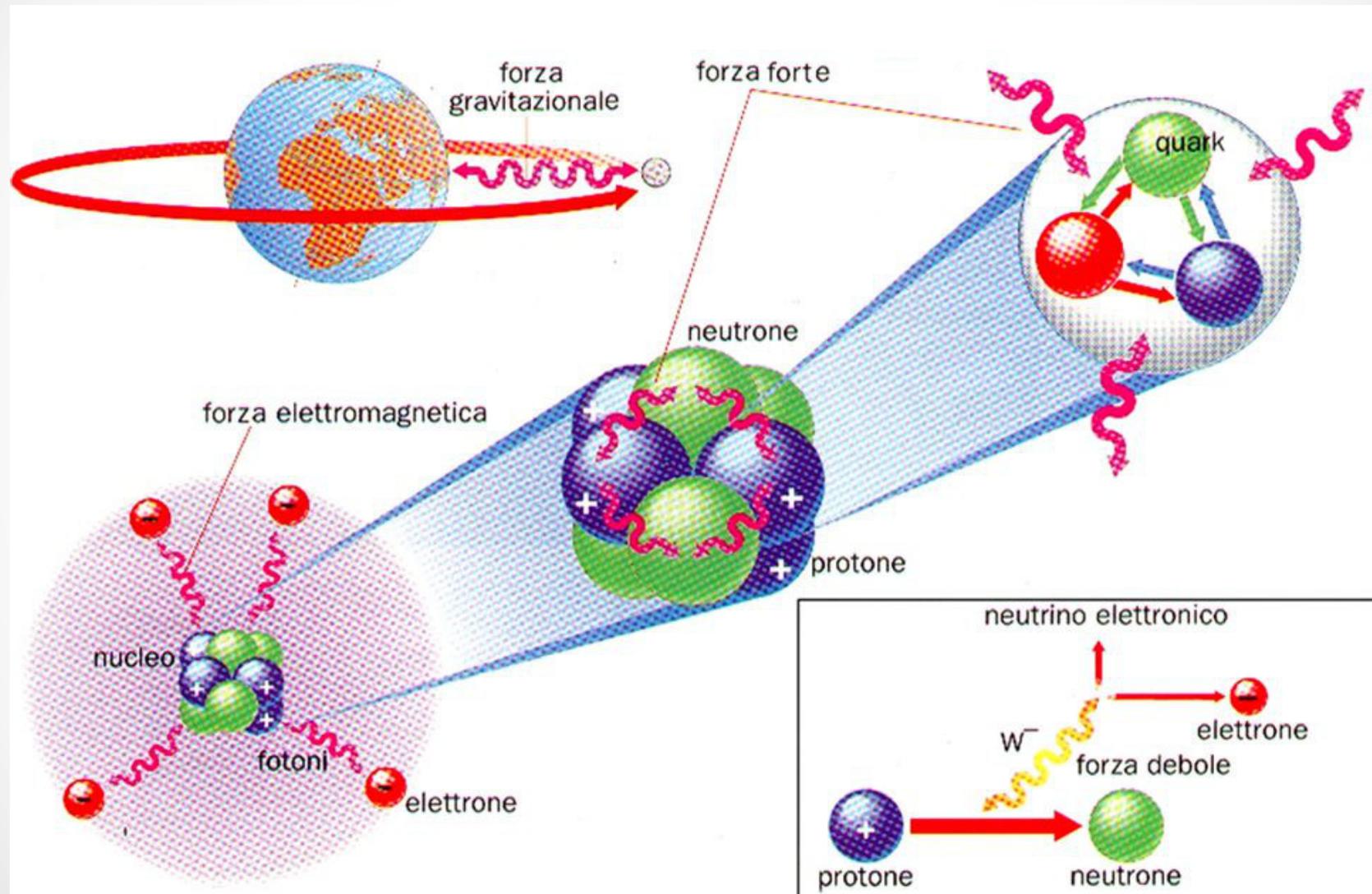
- Forze elettromagnetiche (es. forza elettrostatica)



Cariche opposte si attraggono, stesse cariche si respingono.

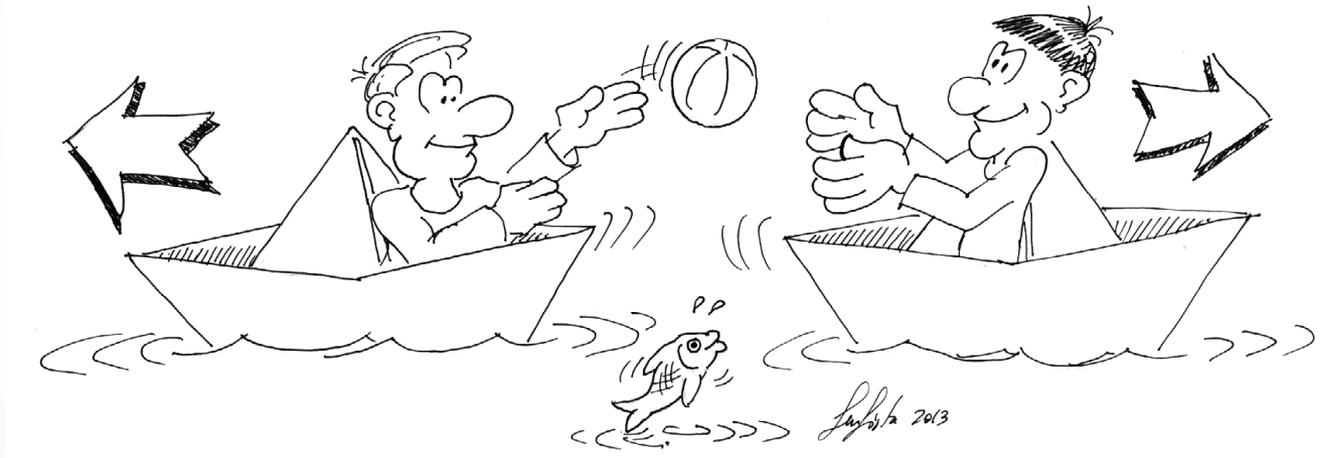
Molte forze macroscopiche sono di natura elettromagnetica.

# Le quattro forze fondamentali



# Forze e mediatori

- Le interazioni possono agire a distanza grazie a **campi** di forza.
  - Il **campo gravitazionale** generato dal **Sole** determina il moto dei **pianeti**.
  - Il **campo elettromagnetico** permette comunicazioni a grandi distanze con la trasmissione di **onde**
- Le forze si possono spiegare su **dimensioni microscopiche** come lo scambio tra due **particelle** di un'altra **particella** che fa da **mediatore**.

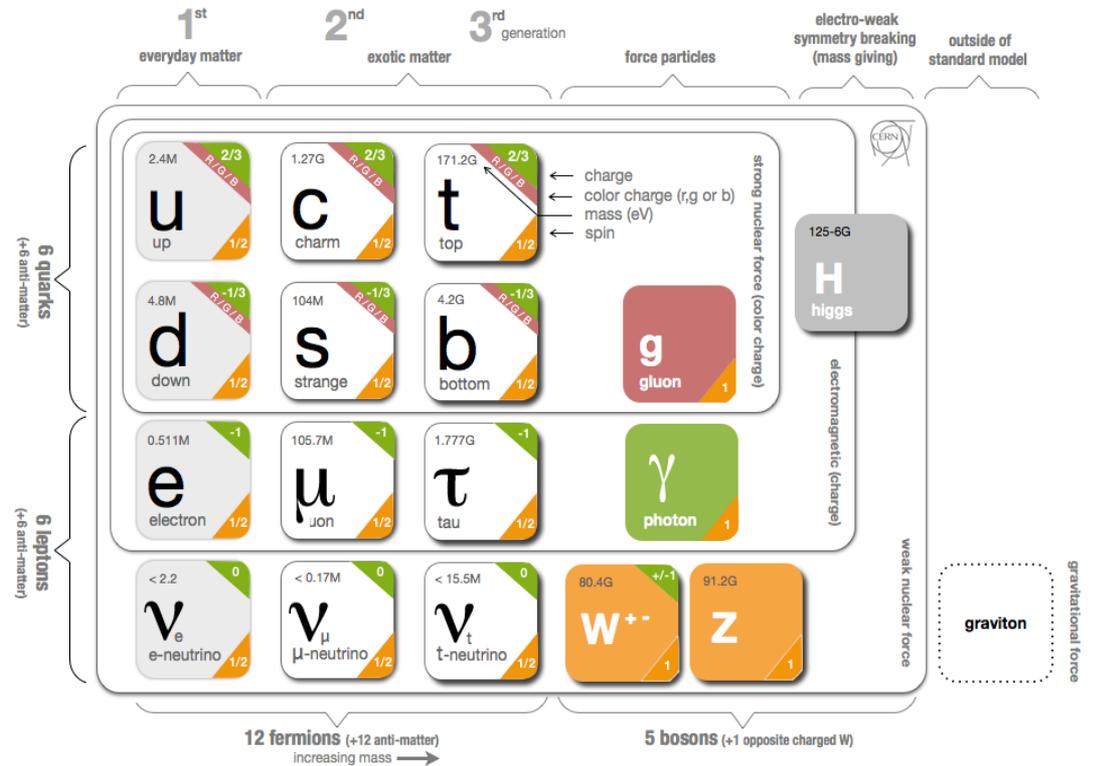


- Il **fotone** è il mediatore della forza (interazione) **elettromagnetica**.

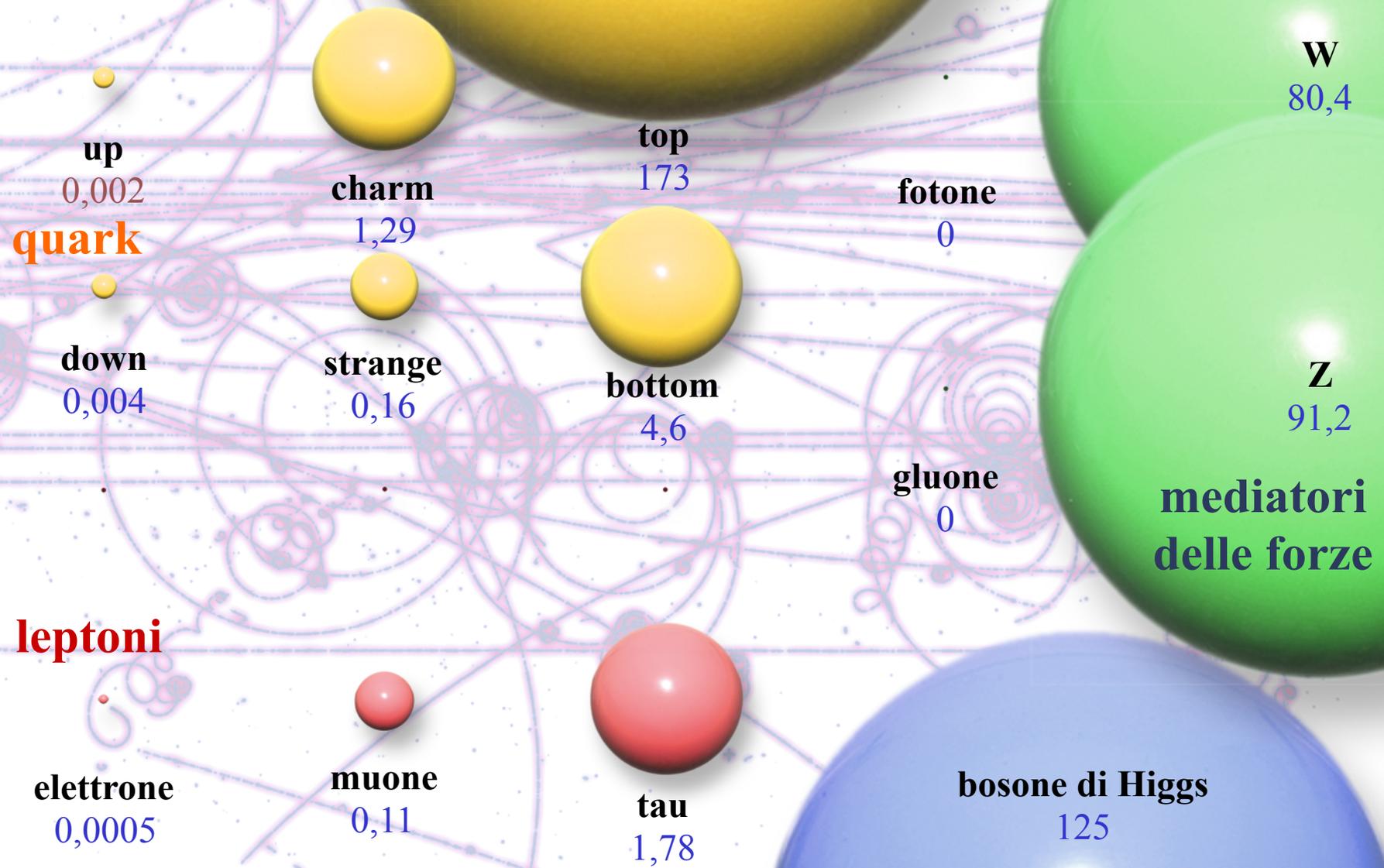
# Modello Standard

- Tutte le **particelle elementari** conosciute e le loro **forze (interazioni)** sono riunite in un'unico **modello teorico**.
- Le particelle che formano la materia ordinaria esistono in **tre repliche**.

- Le forze sono trasportate da mediatori (bosoni)
  - Forza elettromagnetica (**fotone**)
  - Forza nucleare forte (**gluone**)
  - Forza nucleare debole ( **$W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z$** )



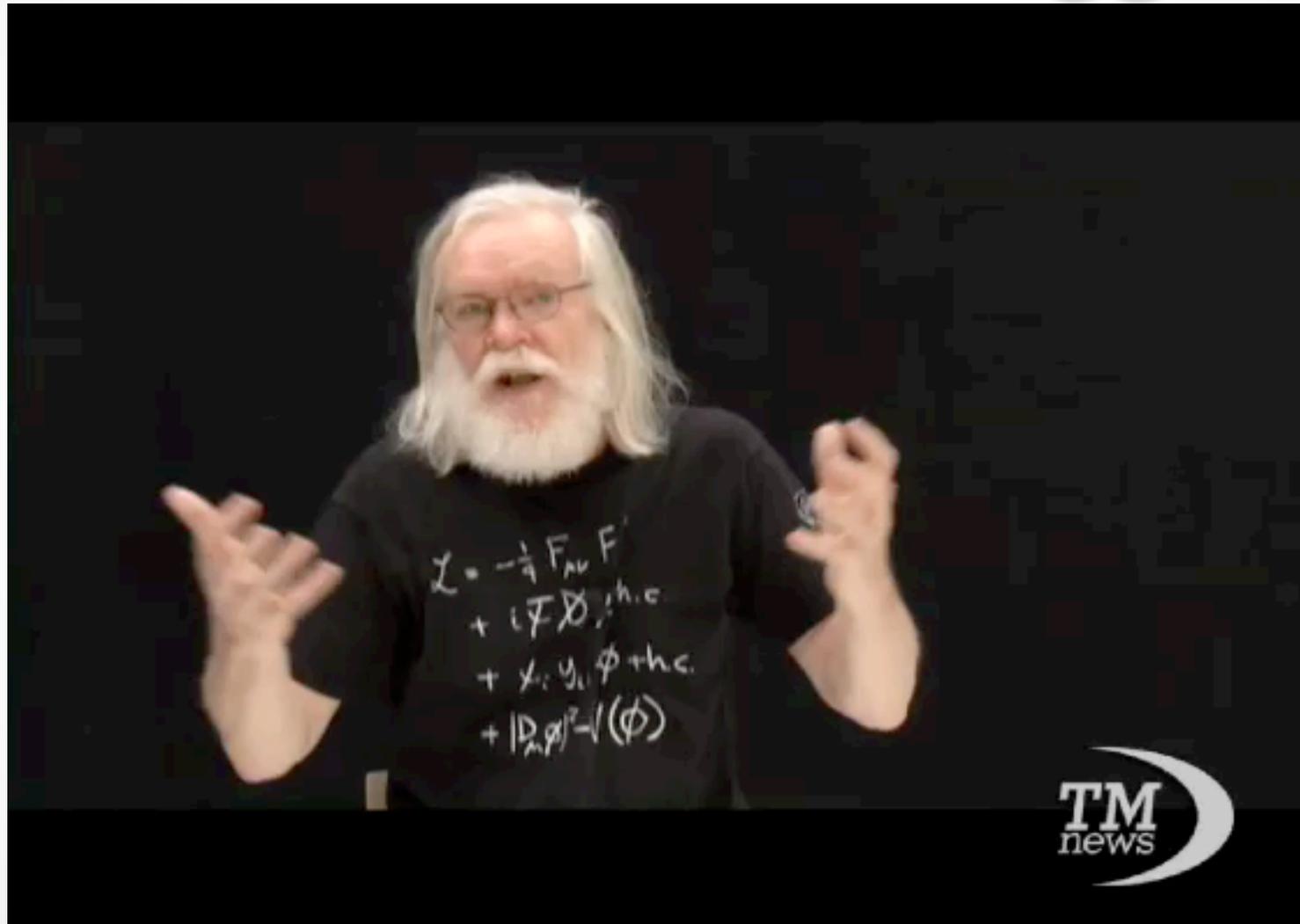
Le particelle elementari hanno masse molto diverse tra di loro, anche se sono tutte "puntiformi"!



# Meccanismo di Higgs

- Nel Modello Standard però, non c'è modo di spiegare perché le particelle hanno massa, e, come il **fotone** dovrebbero avere massa nulla e viaggiare alla velocità della luce. Ma il mondo non è fatto così... Tutto quello che ci circonda ha massa.
- **Peter Higgs** e altri trovarono quasi 50 anni fa un meccanismo che permette di spiegare perché le particelle elementari hanno massa.
- Le particelle che **interagiscono con il campo di Higgs** vengono **rallentate**. Non viaggiano più alla velocità della luce, quindi hanno acquistato **massa**!
- Più una particella “sente” il campo di Higgs, **maggiore è la sua massa** Perciò ci sono particelle più pesanti di altre

# Meccanismo di Higgs



# Scoperta del bosone di Higgs

- ... ma tutto questo resterebbe una **congettura** senza la verifica sperimentale !
- Il bosone di Higgs è stato osservato sperimentalmente il 4 luglio 2012 dagli esperimenti ATLAS e CMS a LHC (CERN).



# Come produciamo le particelle?

Attraverso urti tra particelle si possono creare altre particelle: l'energia delle particelle viene trasformata in materia!

protone

quark

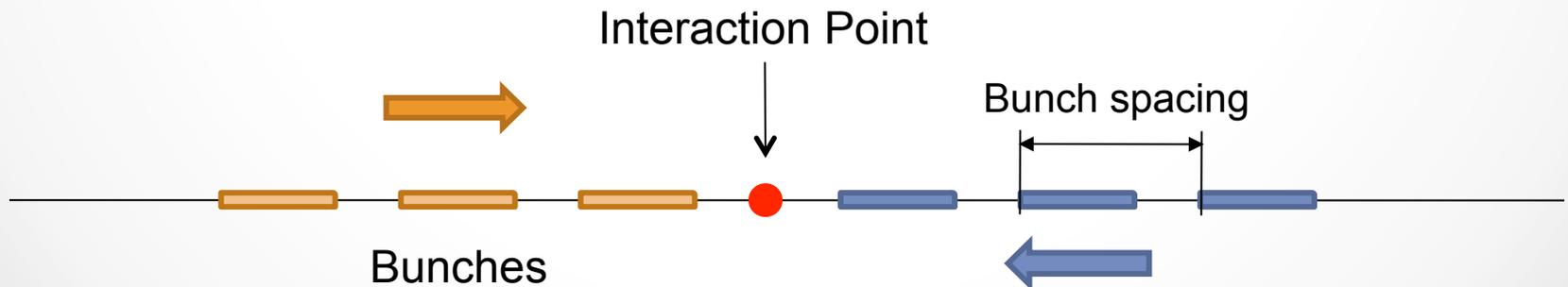
protone

Einstein:

$$E=mc^2$$

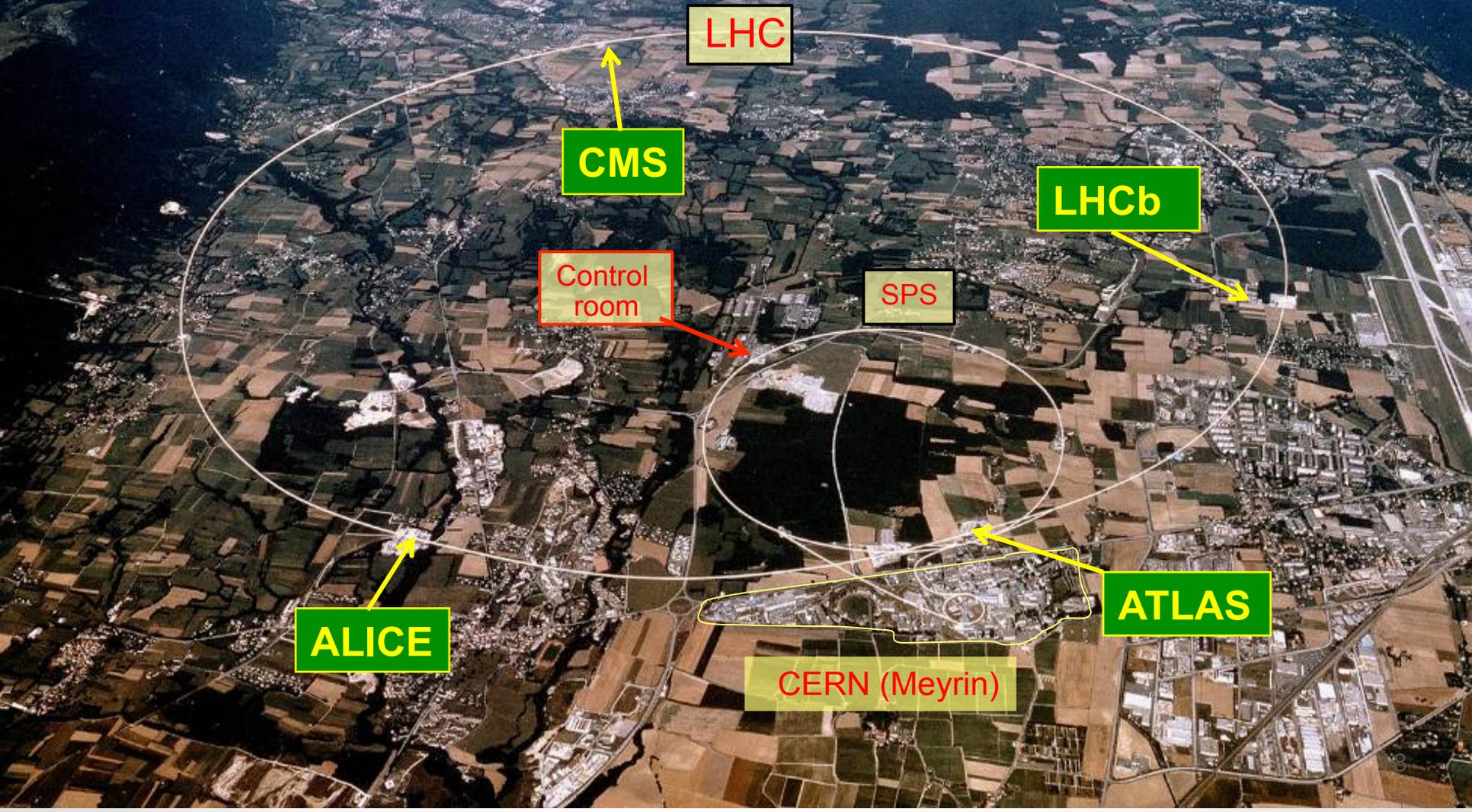
# Acceleratori di particelle

- I parametri chiave per un acceleratore sono l'energia massima e la quantità di collisioni che possono essere generate (luminosità).
- Energia maggiore consente di produrre, negli urti, particelle di massa maggiore.
- Luminosità elevata significa capacità di generare eventi molto rari in tempi ragionevoli.



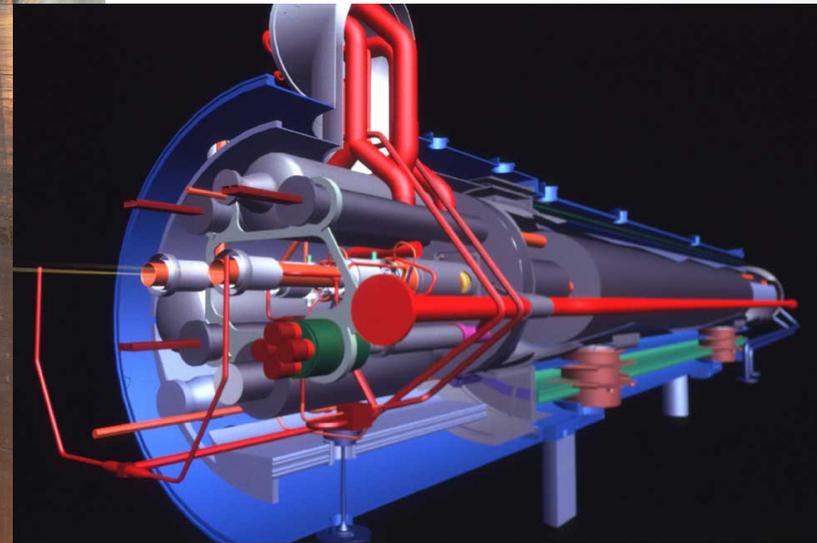
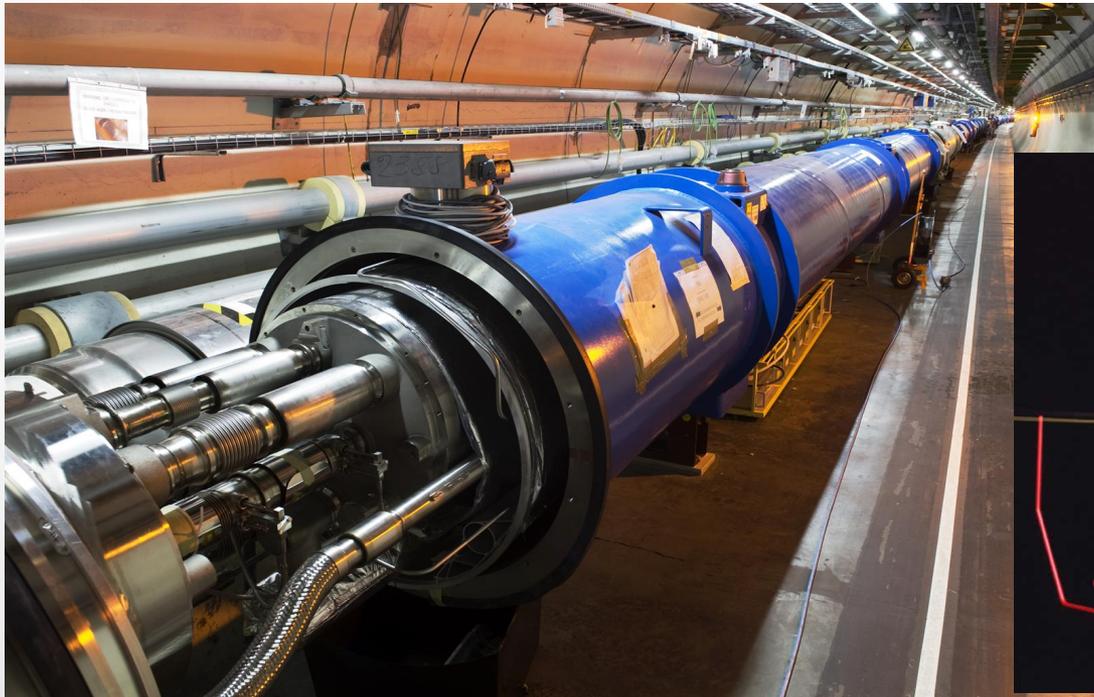
# L'acceleratore LHC al CERN di Ginevra

27 km di circonferenza. A piedi ci mettereste 5/6 ore a fare il giro completo ! Le particelle che girano in un secondo fanno 10 mila giri!!! (in un secondo fanno 10 volte il giro della Terra!)



# Caratteristiche di LHC

LHC è stato progettato per produrre eventi molto rari ad energie elevate. Accelera protoni fino a 6.5 TeV per fascio (energia mai raggiunta prima, corrispondente ad una velocità pari al 99.99991% della velocità della luce), e produce fino a 800 milioni di collisioni al secondo.

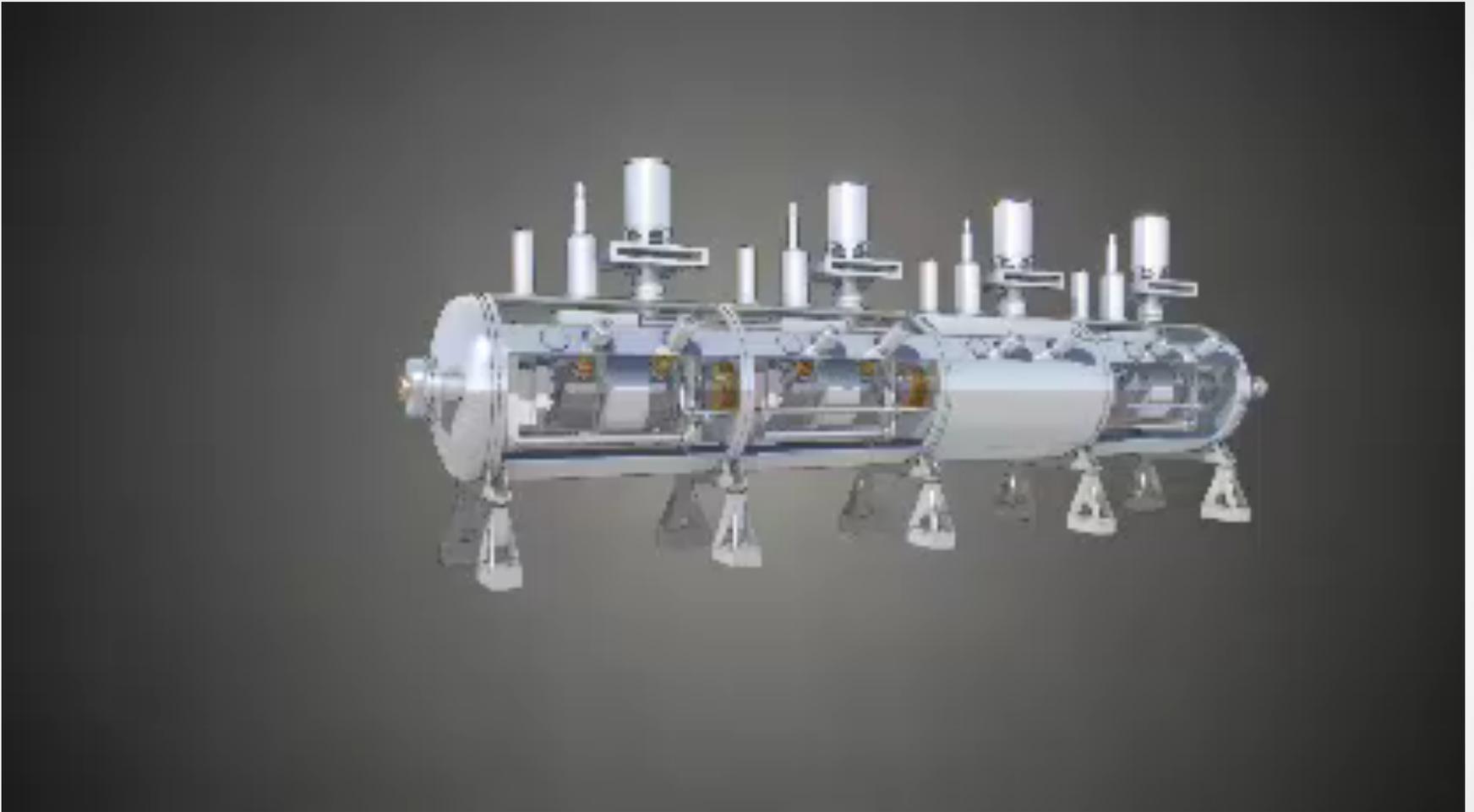


# Dove tutto ha inizio...

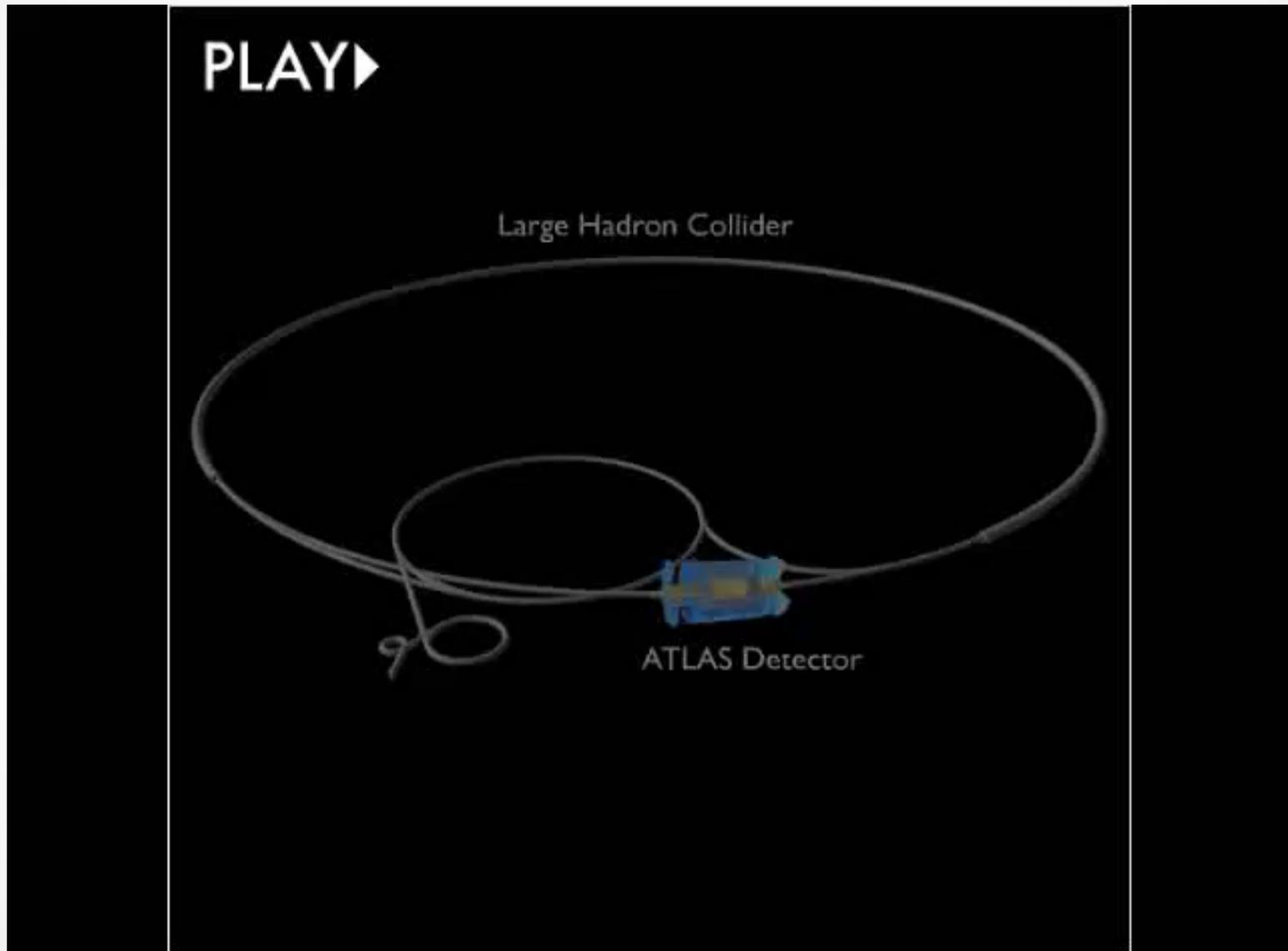
- Da dove escono le particelle che vengono accelerate in LHC ?
- Da una bombola di idrogeno !
- L'atomo di idrogeno è formato da un protone ed elettrone, tramite forze elettriche si strappa l'elettrone ottenendo un insieme di protoni.



# Funzionamento di una cavità

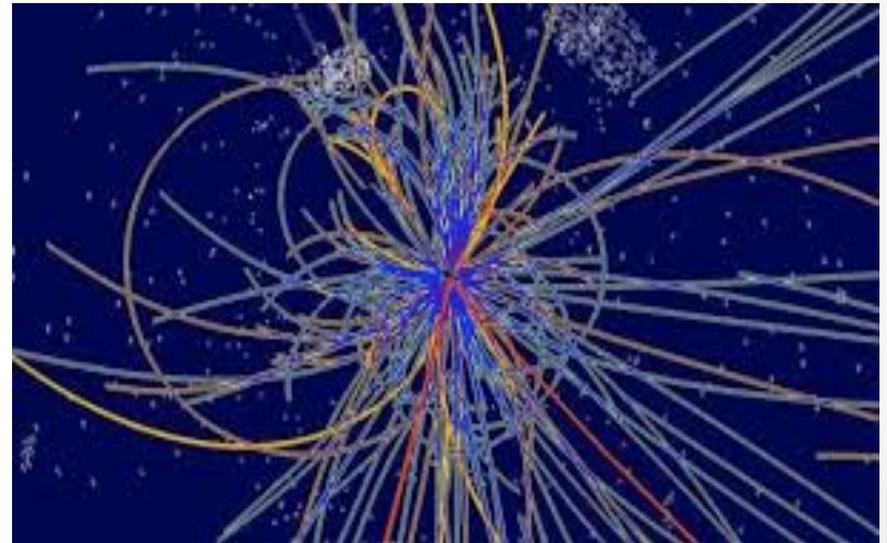


# Funzionamento di un collider



# Dove vanno le particelle prodotte ?

- Le particelle prodotte dalla collisione protone-protone hanno un'esistenza brevissima (da  $10^{-22}$  a  $10^{-12}$  sec) e poi decadono (si trasformano) in particelle "figlie" stabili.
- Le particelle "figlie" lasciano "orme" nel rivelatore.



- Il primo passo consiste quindi nel capire in quali particelle "figlie" si possono trasformare le particelle che vogliamo cercare.

# Più grande l'energia più grande il rivelatore (microscopio)

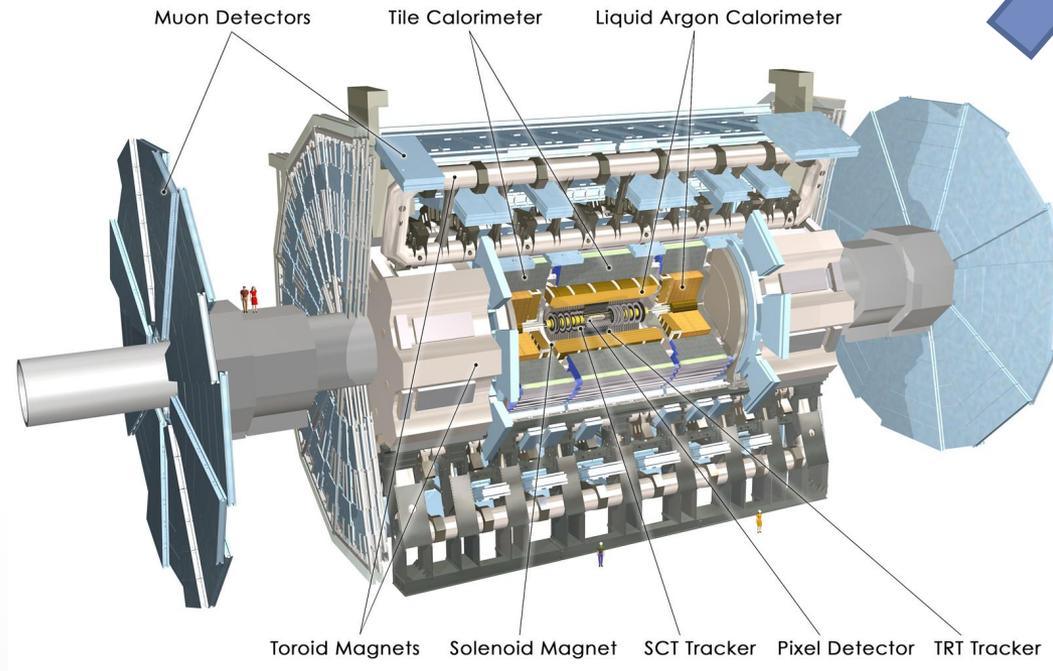


ATLAS vicino ad un edificio di 5 piani: 15 anni per progettare e costruirlo



**45 m**

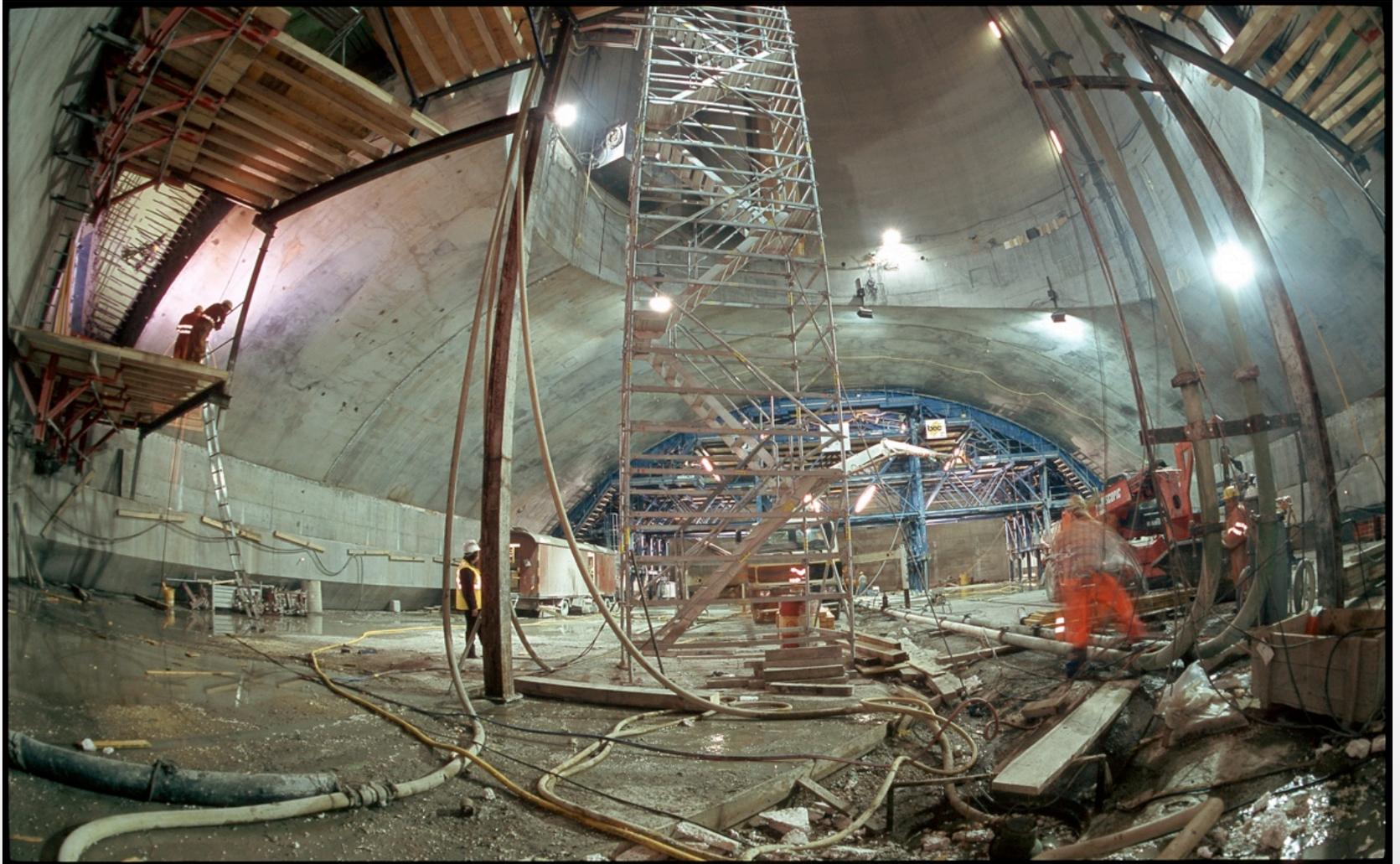
**7000 Tonnellate**

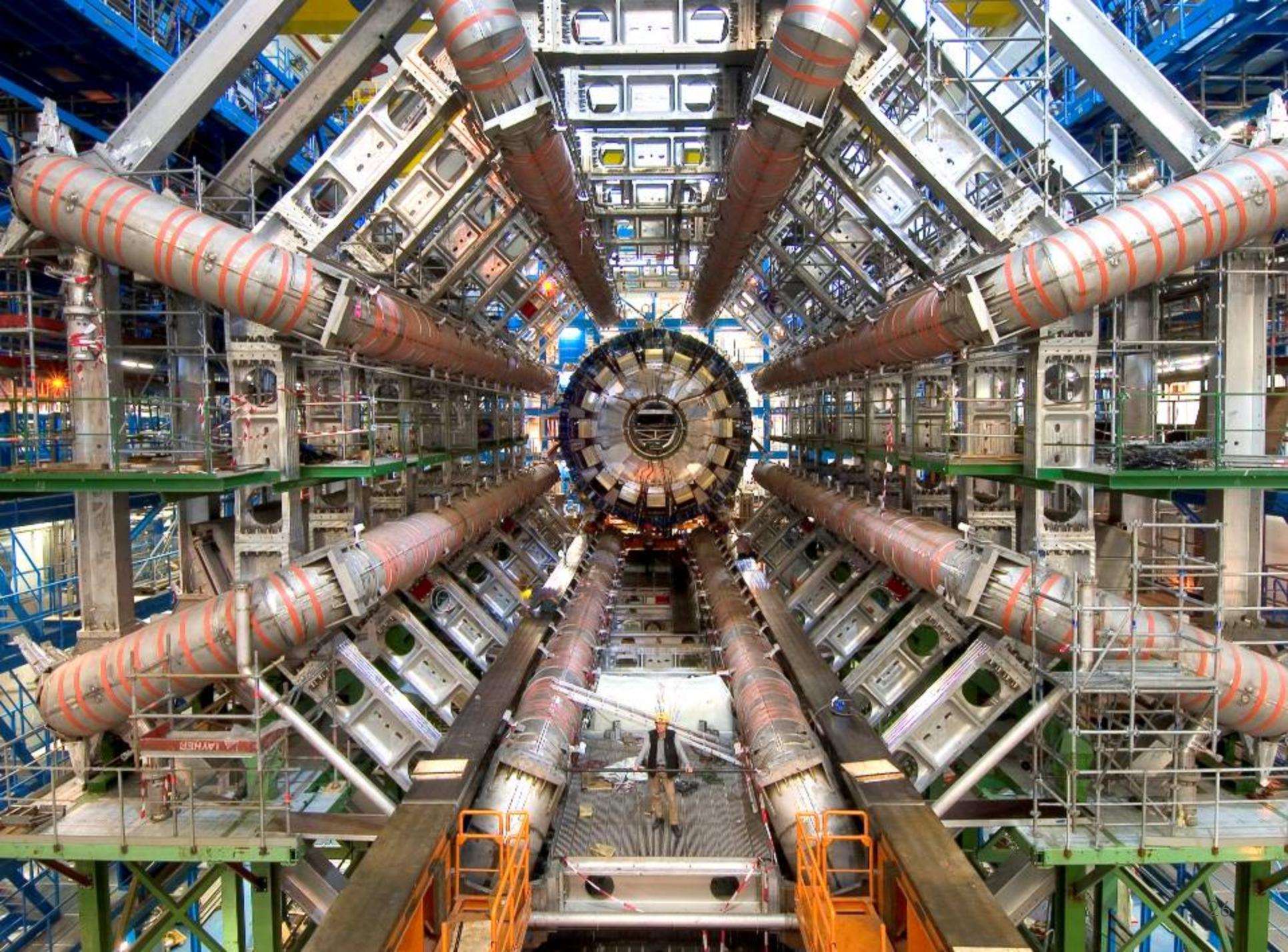


**24 m**

# Preparazione del caverna di ATLAS nel 2000

Come costruire una nave in bottiglia.....





# Installazione del rivelatore ATLAS: 2003-2008

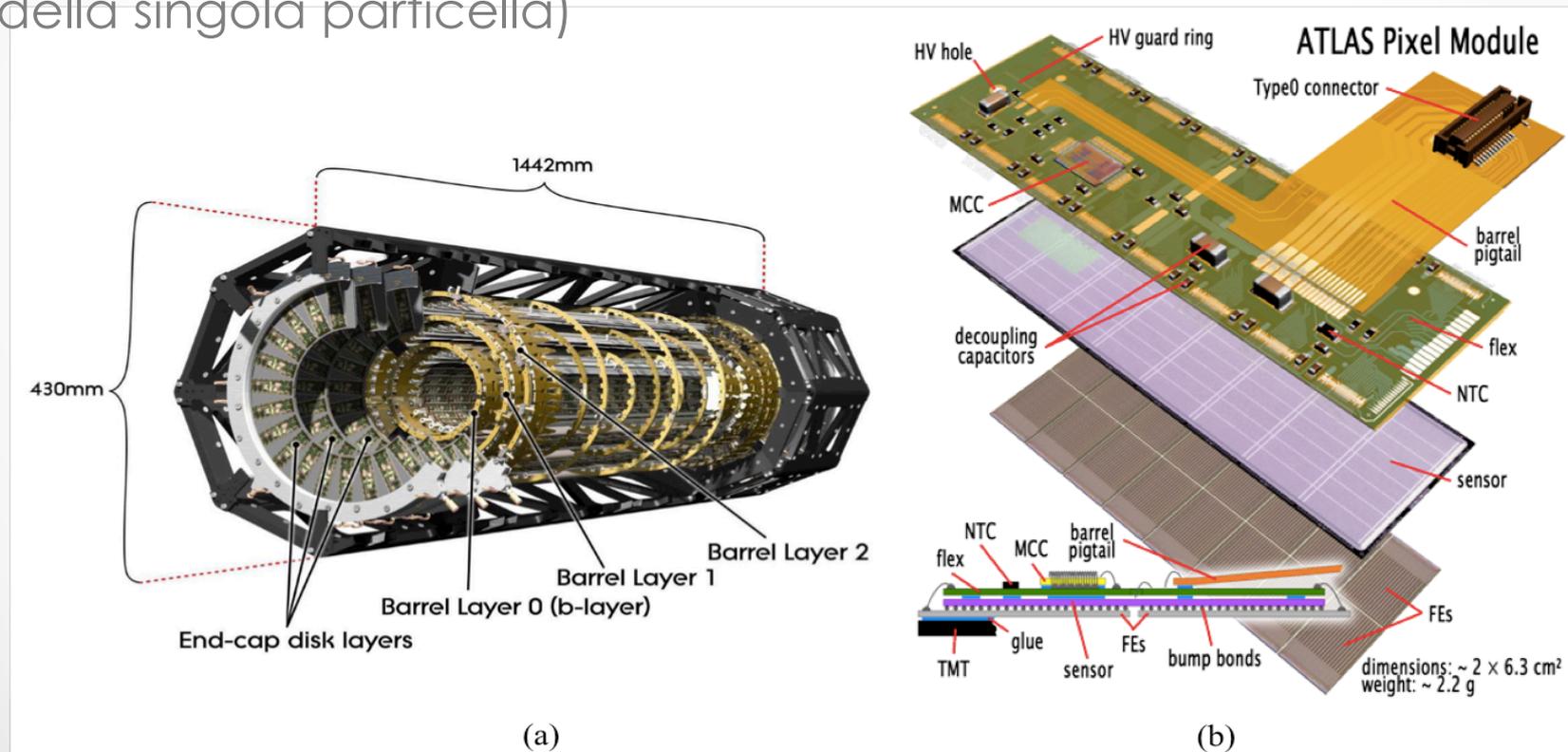




# Rivelatore più interno: Pixel detector

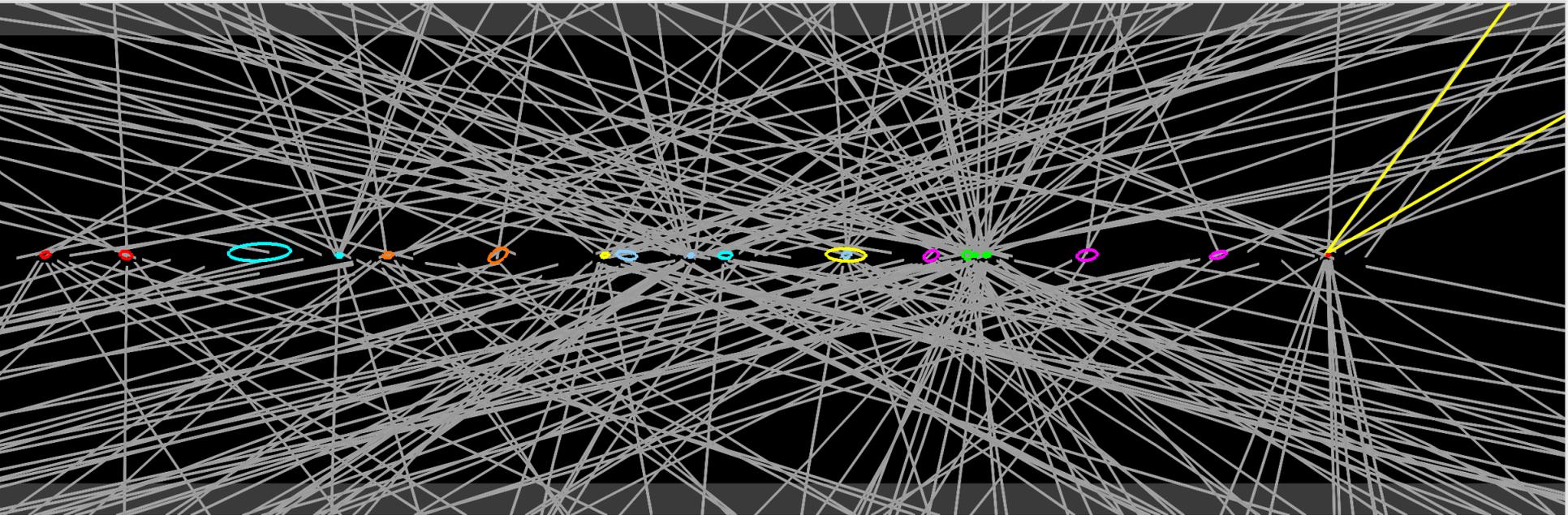
Rivelatore più vicino al punto di collisione, costruito per un terzo a Genova

- Una specie di macchina fotografica a 80M pixel capace di scattare 40 milioni di fotografie al secondo (sensibile al passaggio della singola particella)



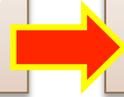
# Quasi fatto...

Però i dati che escono dai rivelatori sono grezzi, difficili da decifrare ad occhio. In più se ne producono **milioni al secondo...**



# Selezione dei dati di LHC

Elaborazione dati veloce  
sul rivelatore

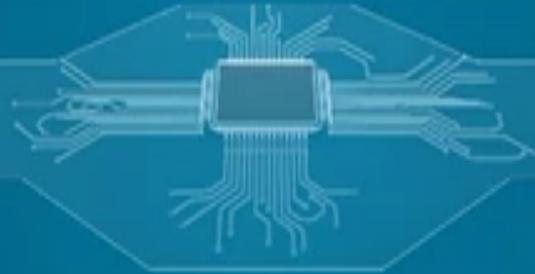


Selezione finale su Farm  
di computers



Trasferimento al centro  
di calcolo

s ms  $\mu$ s ns  
0.000 000 000s



# Elaborazione dei dati di LHC



Computing Grid

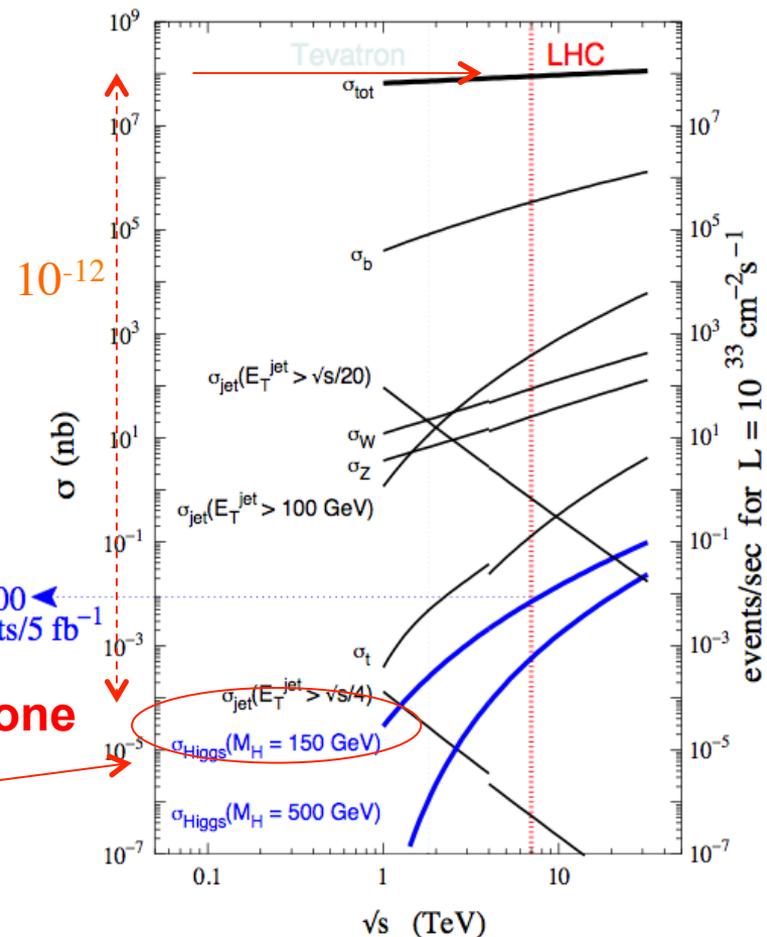
# Che probabilità ha di crearsi un bosone di Higgs?

Si riesce a fare un bosone di Higgs una volta ogni  $10^{12}$  urti...

Nel modo in cui funziona LHC adesso, si fa circa un Higgs ogni ora (secondo la teoria attuale).

## Urto protone-protone

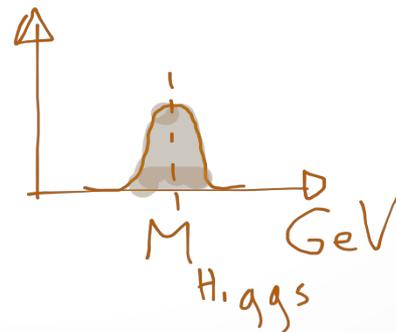
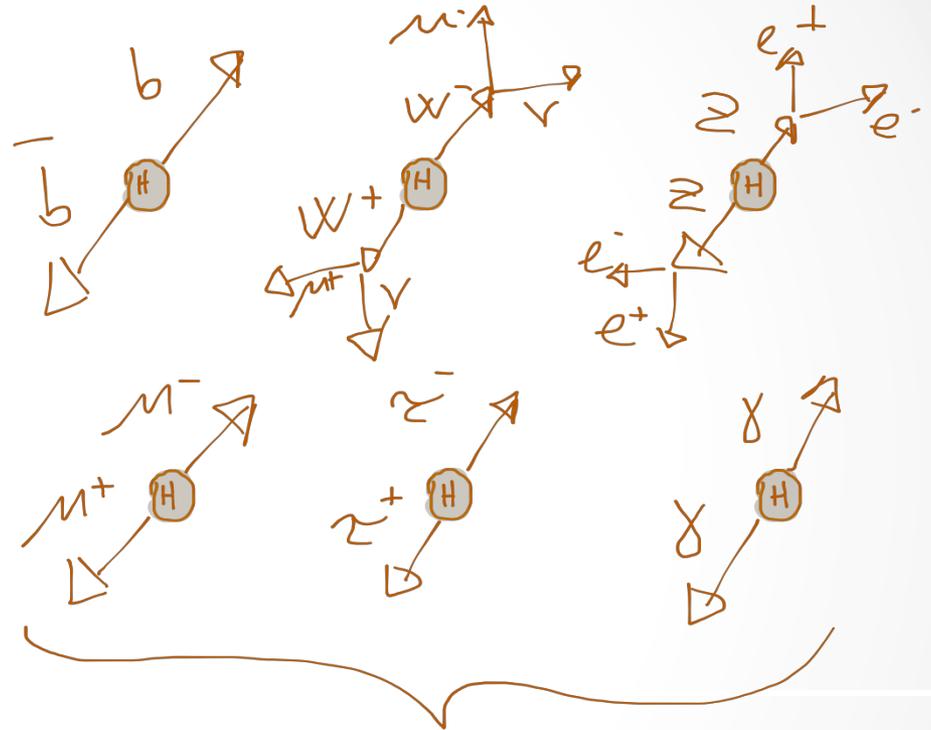
**Urto protone-protone che fa un Higgs**



# Come facciamo a vederlo?

Il bosone di Higgs non vive abbastanza a lungo per essere misurato, ma decade subito in altre particelle.

Dobbiamo misurare la massa di coppie  $bb$ , oppure  $WW$ ,  $ZZ$ , ...,  $gg$ , e vedere se è la stessa.



Tutte le combinazioni hanno la stessa massa!

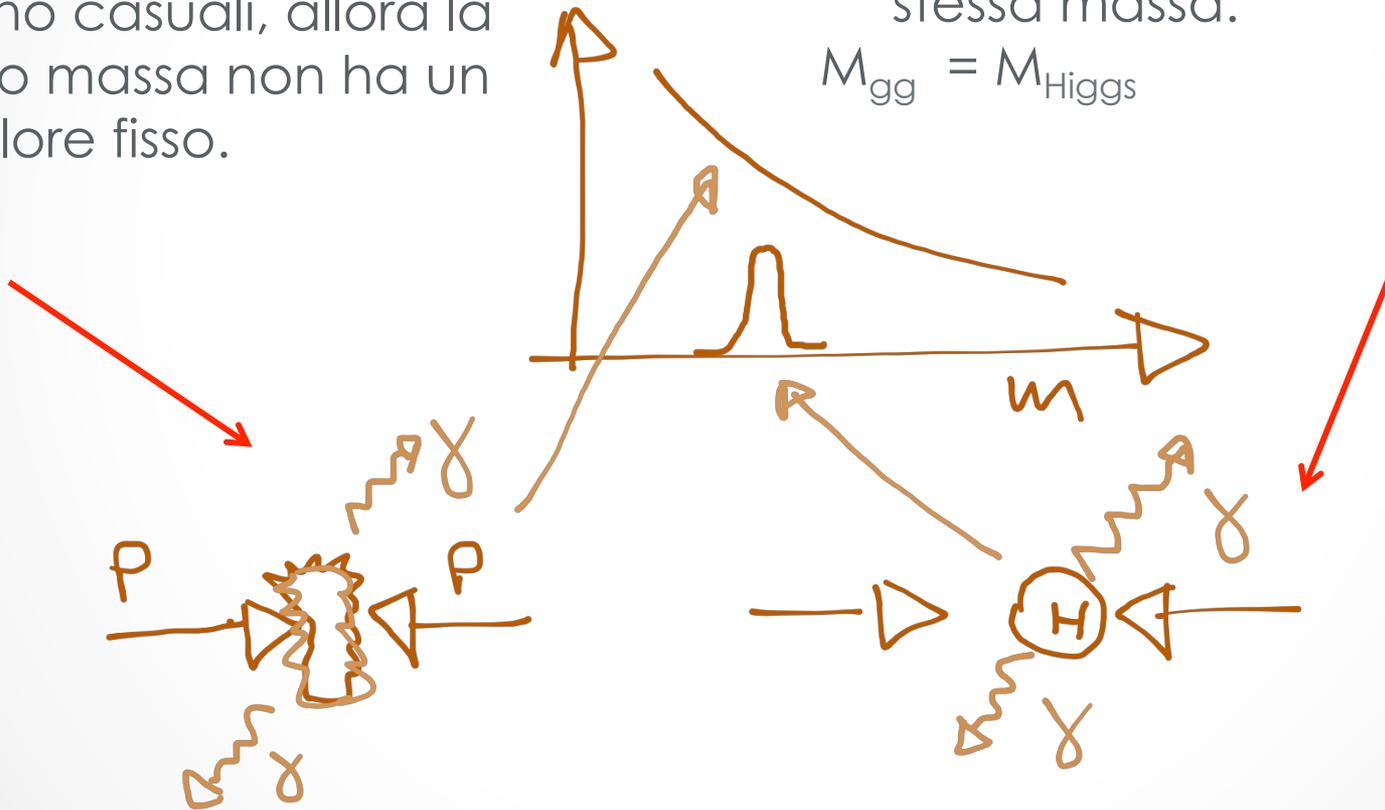
# Coppie di fotoni

## Se le coppie di fotoni:

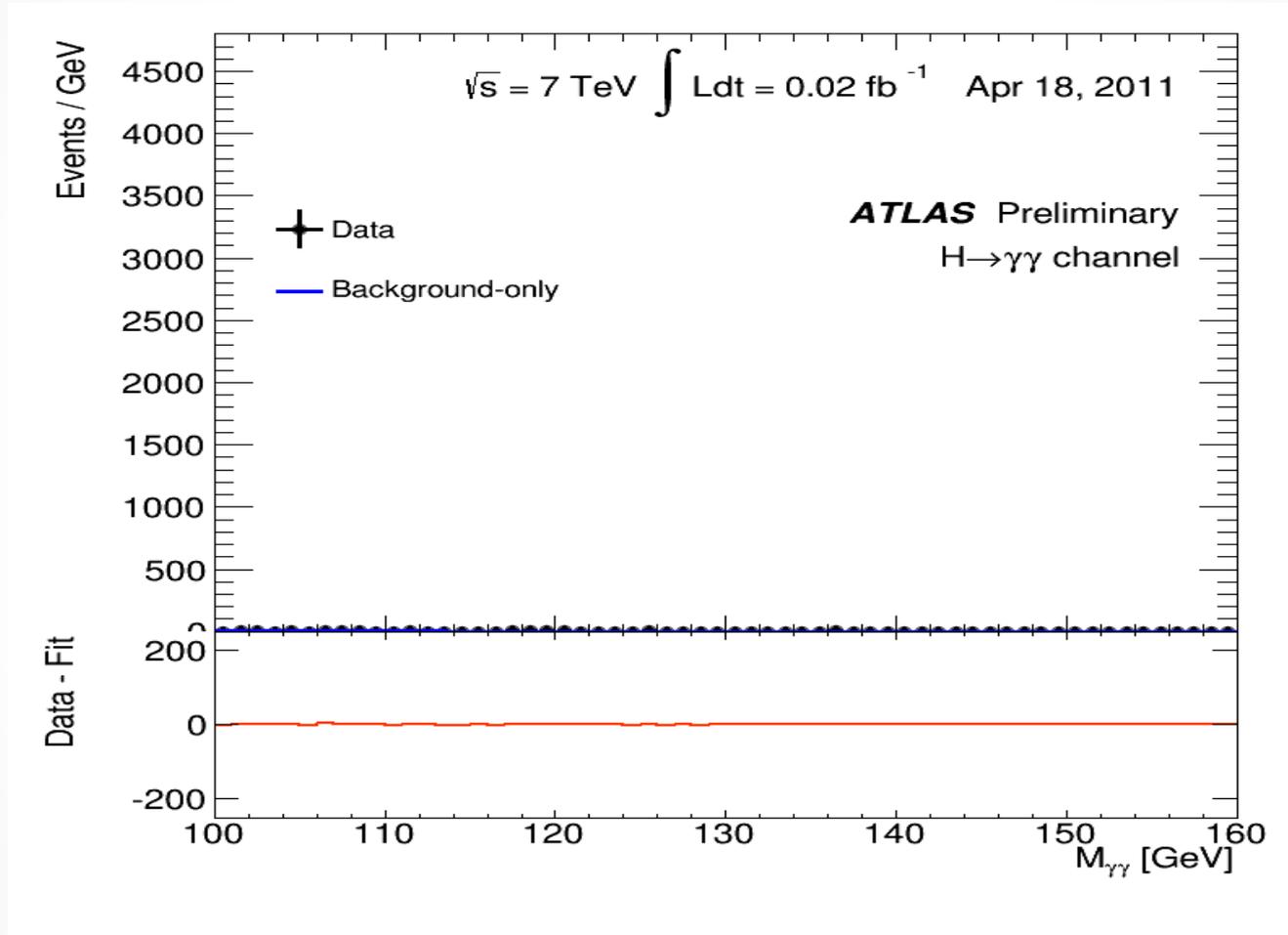
- sono casuali, allora la loro massa non ha un valore fisso.

- vengono dal decadimento dell'Higgs, allora hanno tutte la stessa massa:

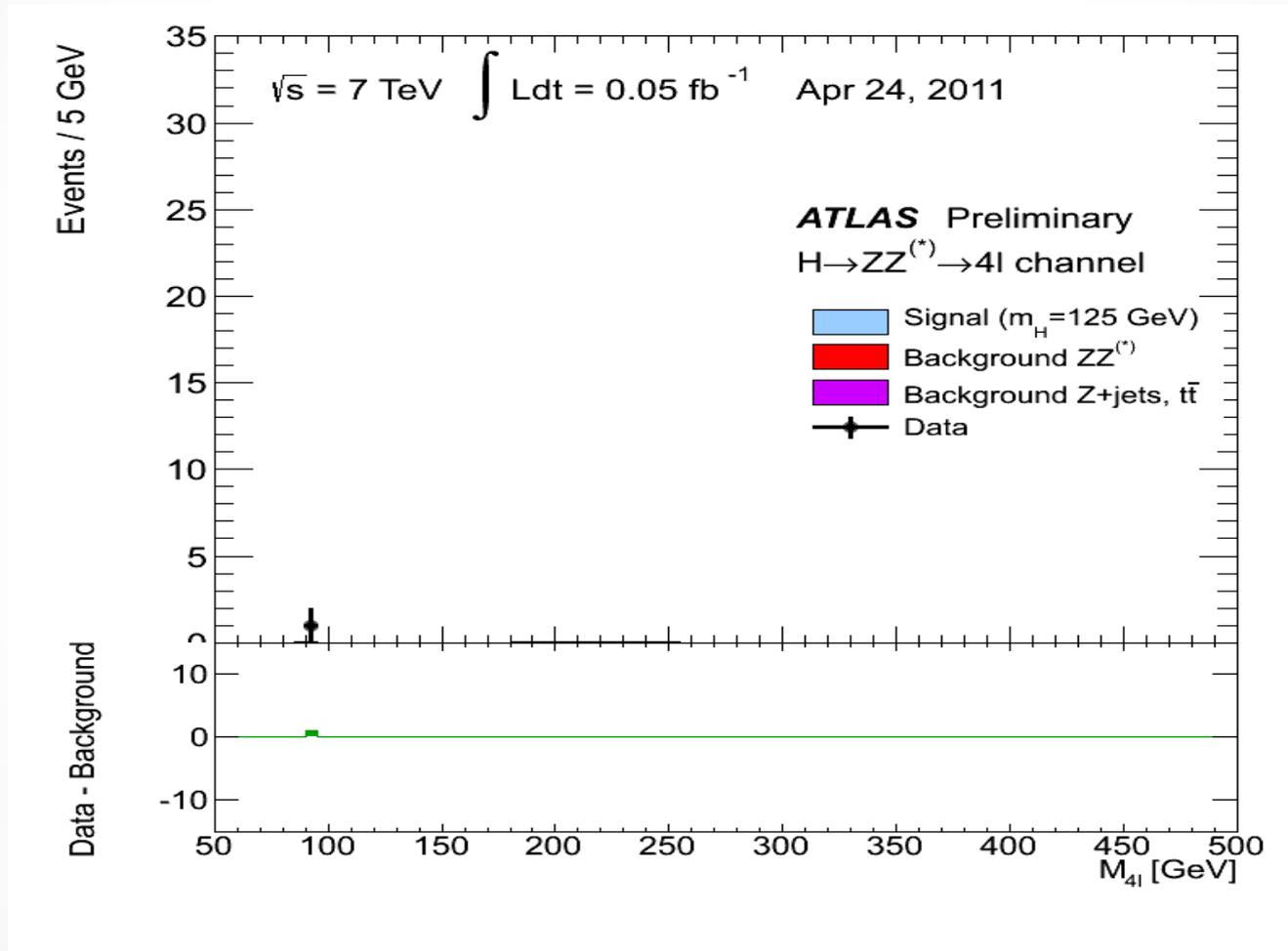
$$M_{\gamma\gamma} = M_{\text{Higgs}}$$



# Higgs in coppie di fotoni (ATLAS)

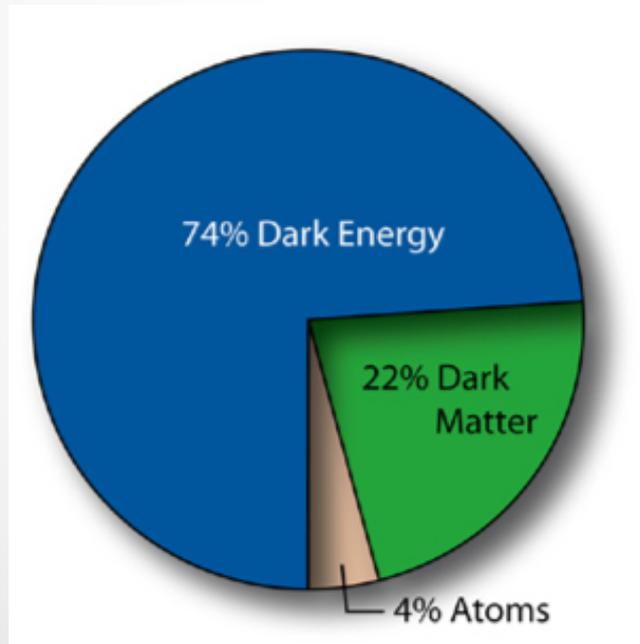


# Higgs in coppie di Z (ATLAS)



# E dopo il bosone di Higgs ?

Nonostante il suo successo del modello costruito nel descrivere la natura molte cose sono ancora da spiegare:



- Come includere la **gravità** nel Modello Standard ?
- Perché le particelle hanno **una determinata massa** ?
- Di cosa è fatta **l'energia del nostro universo** ?
  - la materia nota ne rappresenta solo il 4% .. cos'è il restante **96%?**

# E adesso...?

- La scoperta dell'Higgs è stata una pietra miliare nella fisica delle particelle ma ci sono molte cose ancora da capire
- LHC è ripartito nel 2015 e ha raggiunto un'energia di 13 TeV (il doppio del Run I).
  - Prima di questa presa dati abbiamo installato un quarto layer del rivelatore a Pixel, nome in codice IBL (maggiori dettagli mercoledì mattina!).
- Il Run II (2015-2018) è stato un periodo di presa dati fantastico. Abbiamo accumulato molti più dati rispetto alle previsioni.
- La prossima presa dati partirà nel 2021 (Run III)
- Stiamo esplorando energie mai raggiunte prima! Speriamo di trovare indizi che diano risposte alle domande finora emerse, raggiungendo una più profonda conoscenza della struttura della materia e dell'interazione.

# Quanto ci è costato LHC ?

- LHC circa 3 miliardi di euro + altri 3 miliardi di euro per gli esperimenti. Ma, attenzione:
- Spesa distribuita su molti anni e molti paesi
- Facendo un conto sugli ultimi 10 anni LHC (e tutti i suoi esperimenti) è costato a ciascun europeo circa



..... un caffè all'anno !

# Sono soldi ben spesi ?

- La ricerca al CERN è finanziata con soldi pubblici, i risultati, le scoperte e le invenzioni sono anche pubbliche (ne beneficiamo tutti)
  - WWW (linguaggio di internet) inventato al CERN nel 1991
  - Primo touch screen usato in una sala controllo del CERN nel 1976
  - L'adroterapia (cura basata su acceleratori adronici) rappresenta una realtà importante per la cura dei tumori
  - Molte delle tecnologie di punta che sviluppiamo per la costruzione dei rivelatori trovano poi applicazioni in altri campi
  - La rete internazionale di calcolo distribuito GRID si è sviluppata anche e soprattutto grazie a LHC
- Senza dimenticare che la conoscenza non ha prezzo !

# E ora tocca a voi: cerchiamo insieme W/Z e ... Higgs

- Dovrete analizzare un certo numero di eventi e dire se vedete traccia della produzione di
  - un bosone W o Z
  - o di un bosone di Higgs !
- Cercheremo le seguenti signature:

$$\mathbf{Z} \rightarrow \mu^+ \mu^-$$

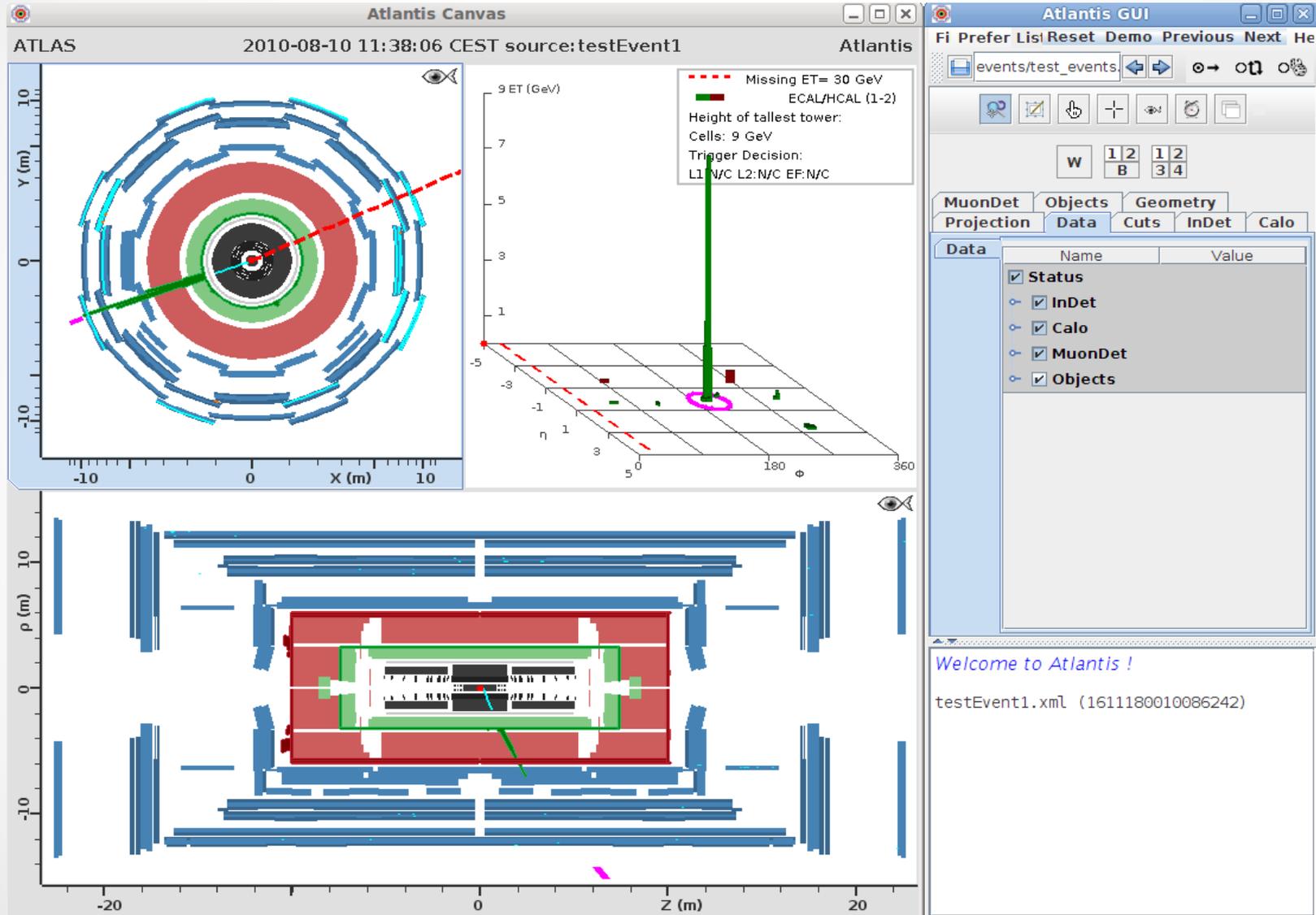
$$\mathbf{Z} \rightarrow e^+ e^-$$

$$\mathbf{W}^{+/-} \rightarrow \mu^{+/-} \nu_\mu$$

$$\mathbf{W}^{+/-} \rightarrow e^{+/-} \nu_e$$

$$\begin{aligned} \mathbf{H} \rightarrow \mathbf{ZZ} &\rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^- \\ &\rightarrow e^+ e^- e^+ e^- \\ &\rightarrow e^+ e^- \mu^+ \mu^- \end{aligned}$$

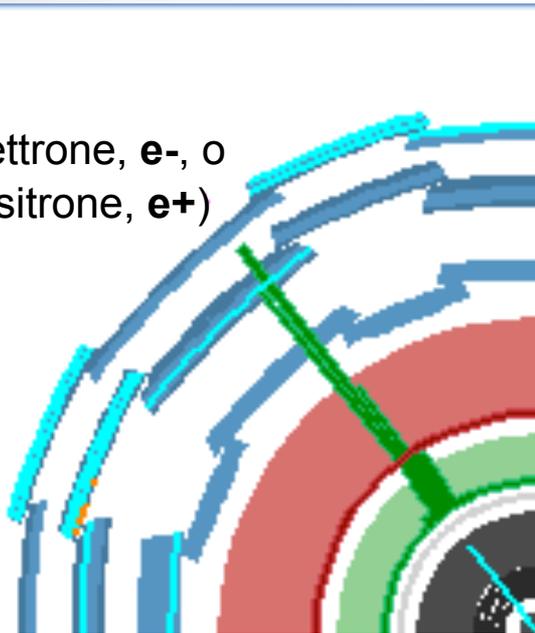
# Strumento di analisi grafica



# “Orme” da cercare

**e**

(elettrone,  $e^-$ , o positrone,  $e^+$ )



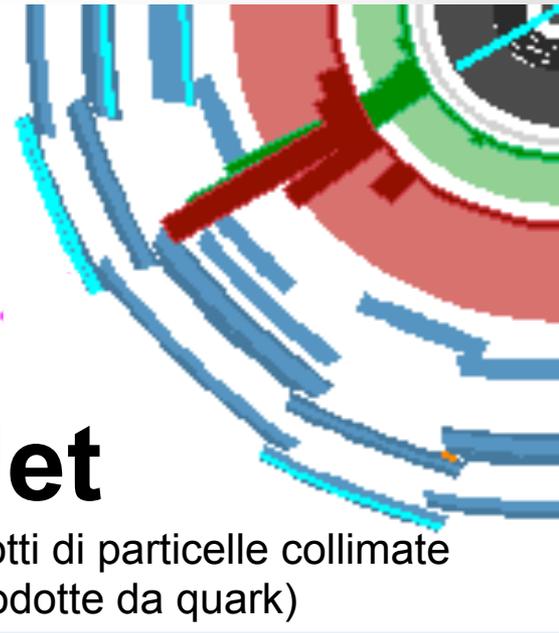
**$\mu$**

( $\mu^-$  o  $\mu^+$ : cugini pesanti di elettrone e positrone)



**Jet**

(fiotti di particelle collimate prodotte da quark)



Rivelatori Traccianti

**e**



**$\mu$**



**Jet**



Calorimetro elettromagnetico



Calorimetro adronico

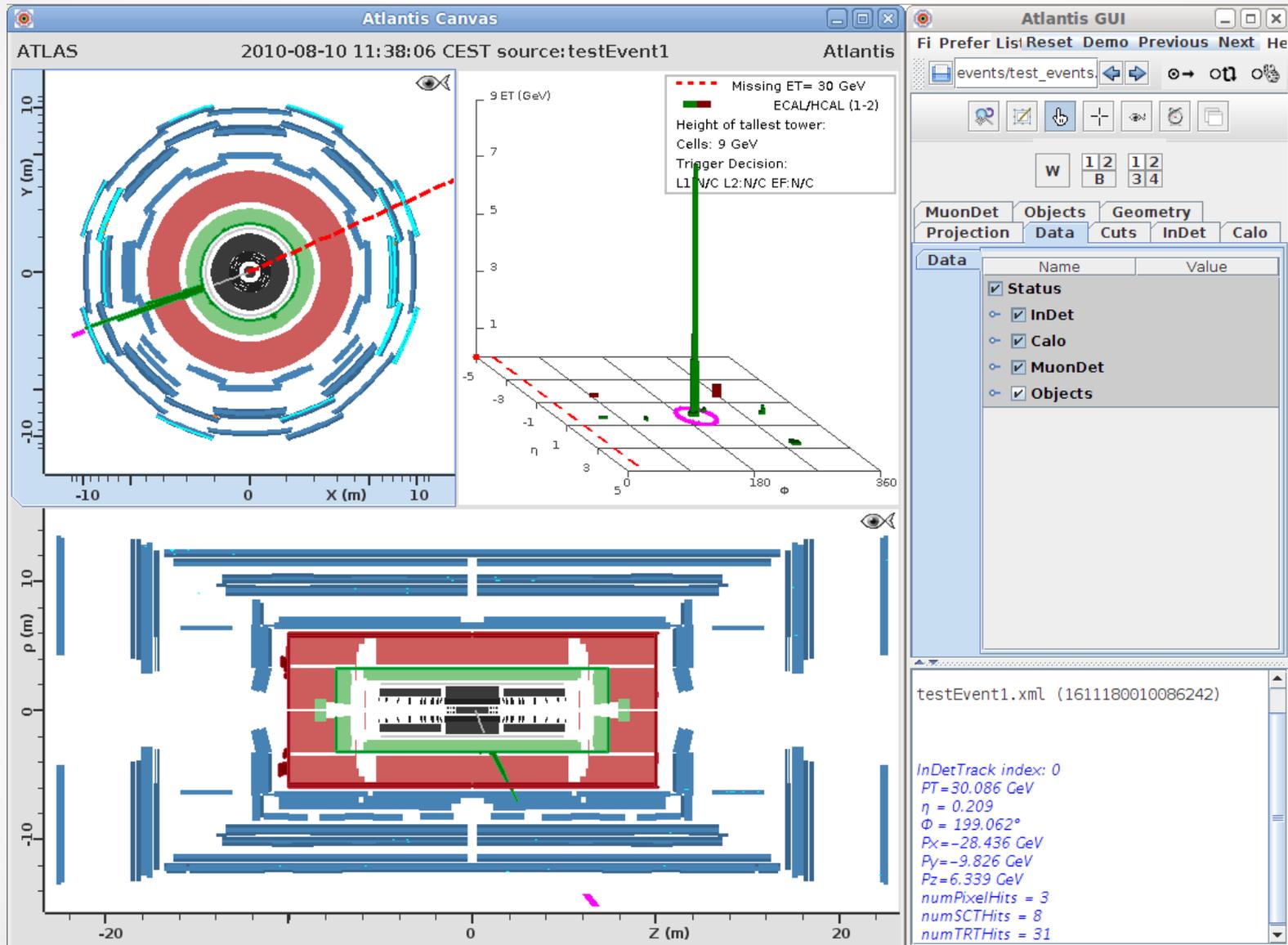


Camere a muoni

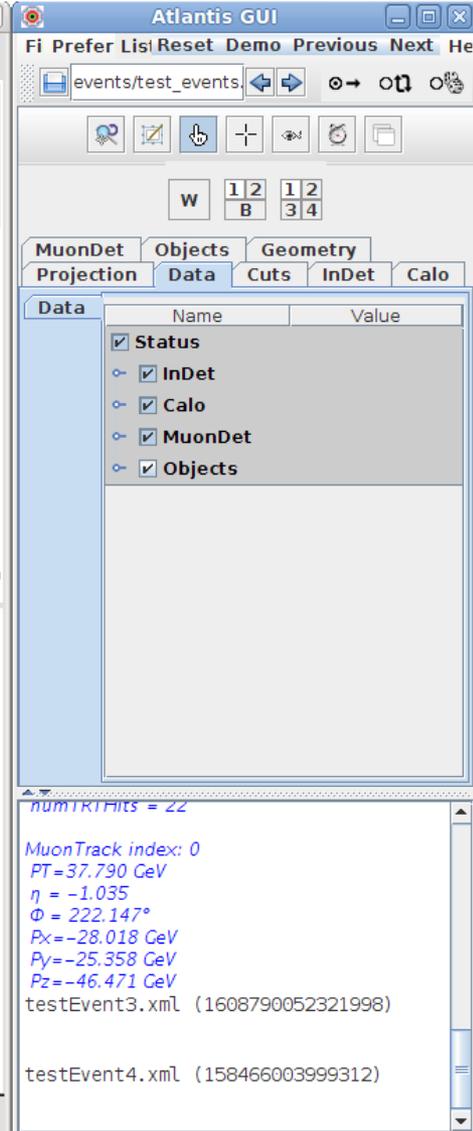
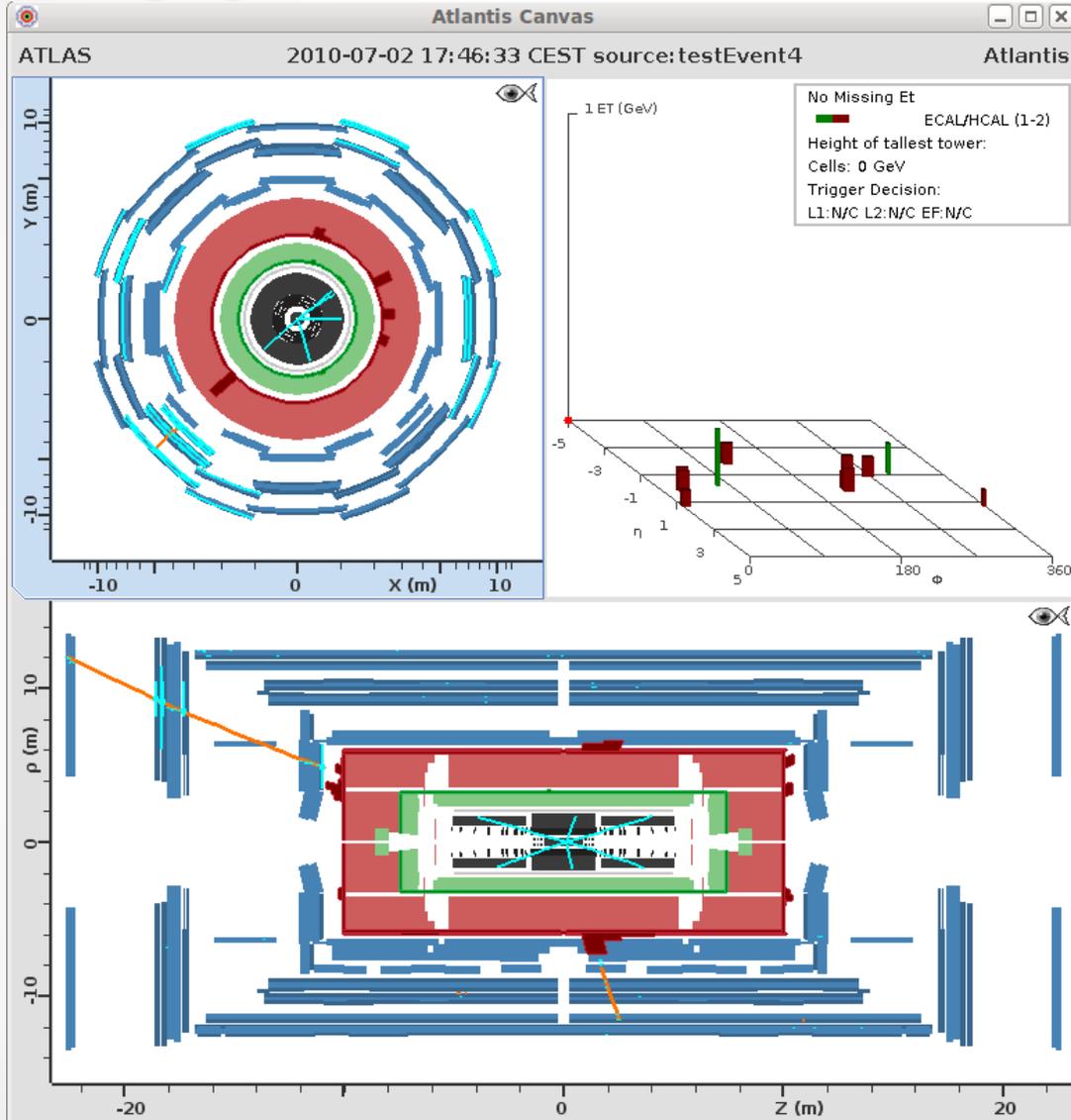


**L'energia mancante, segnata come una riga tratteggiata rossa (- - - - -), può segnalare la presenza di neutrini ( $\nu$ )**

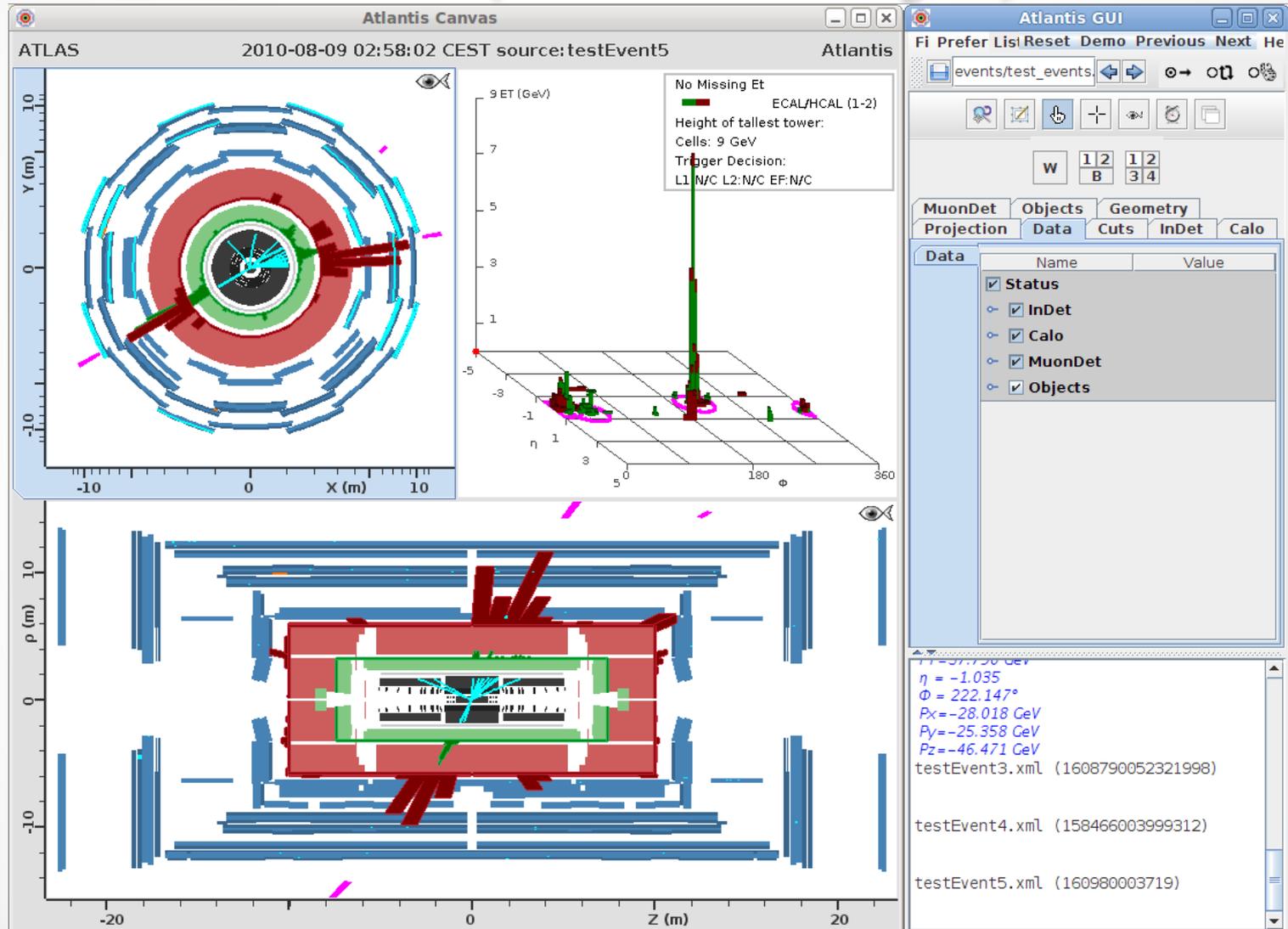
# $W \rightarrow e \nu$



$Z \rightarrow \mu\mu$

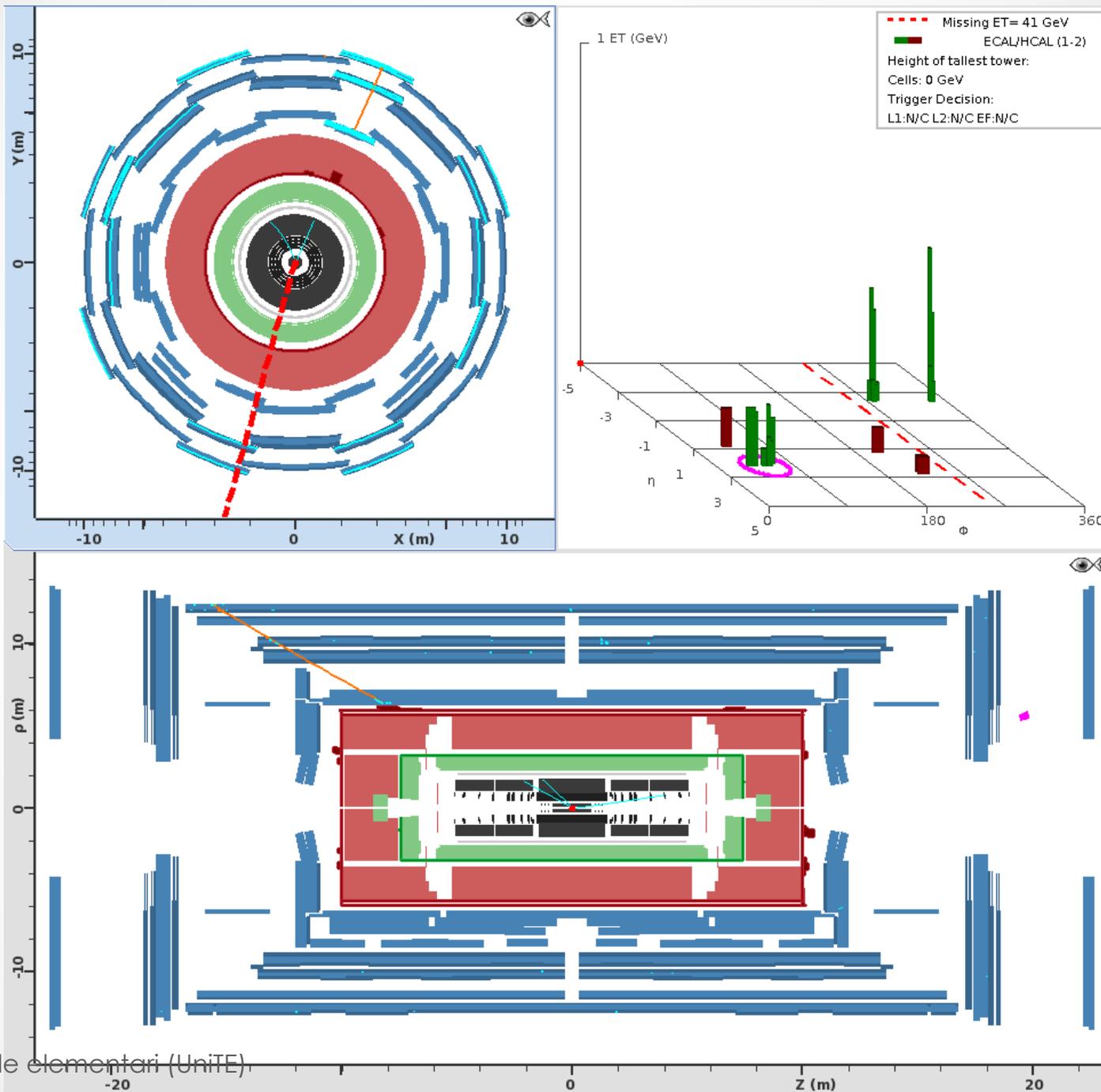


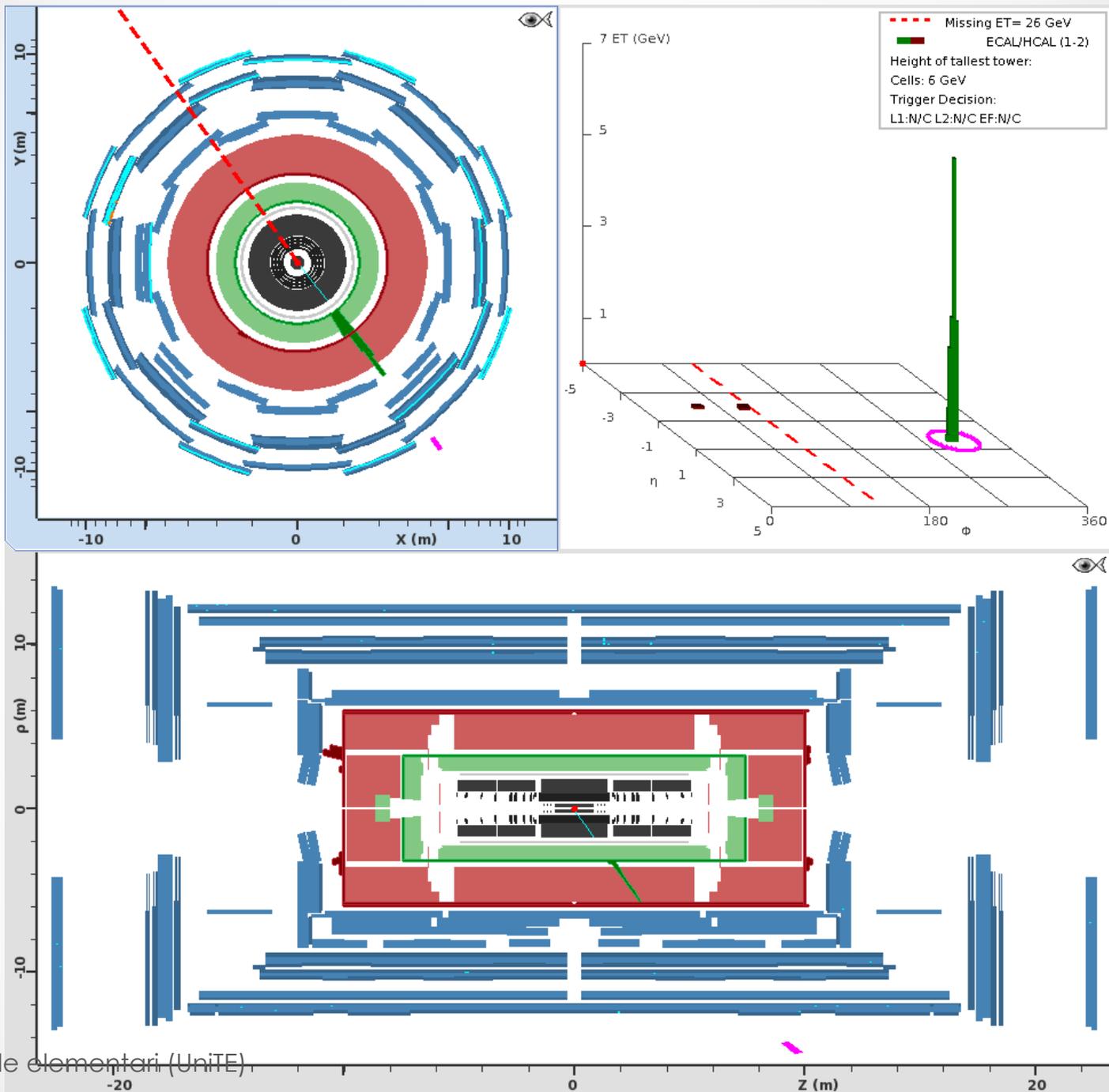
# Evento 1 non interessante per questa ricerca (almeno un jet)



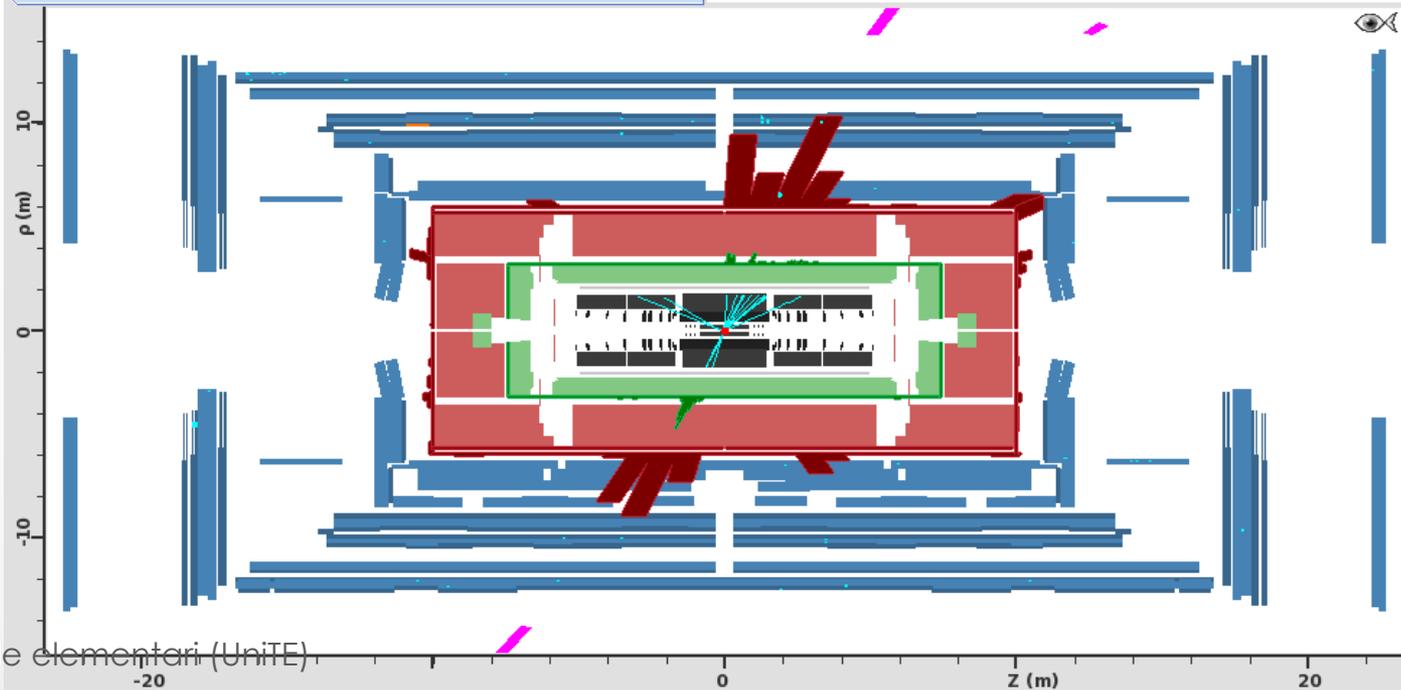
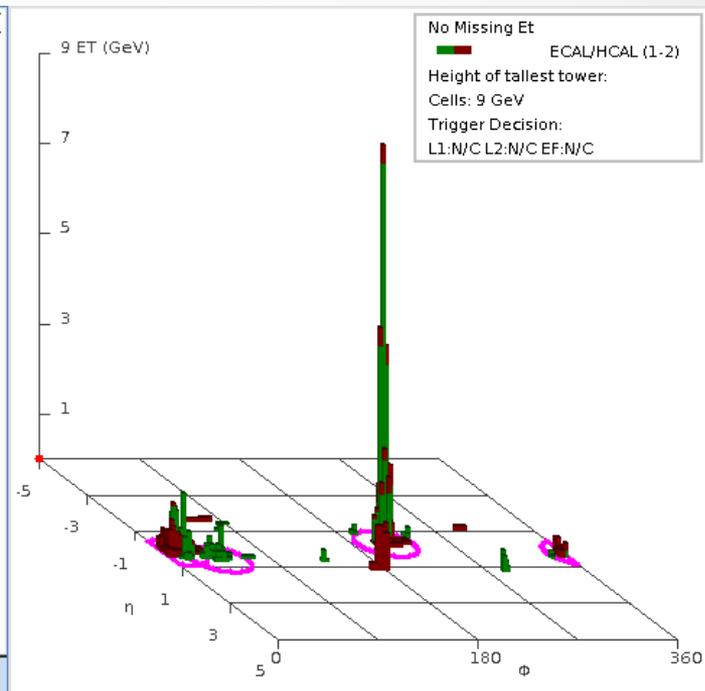
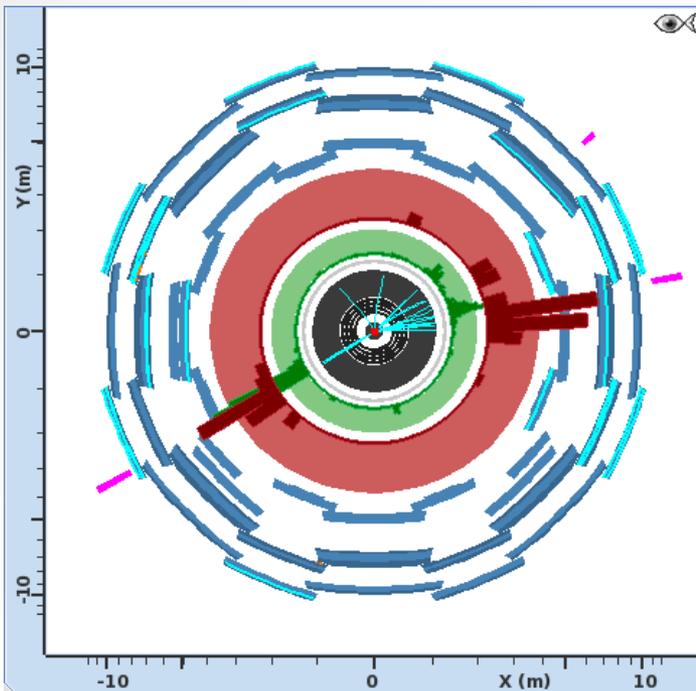
01

$W \rightarrow \mu\nu$

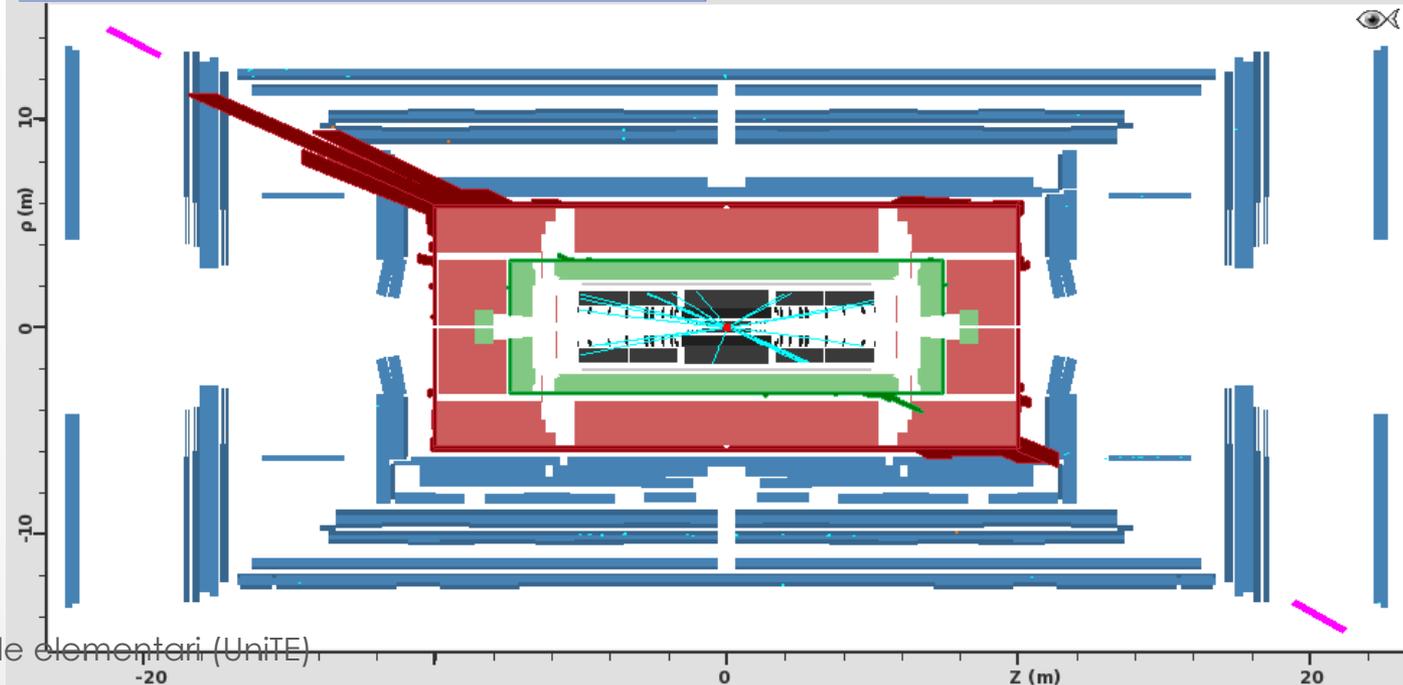
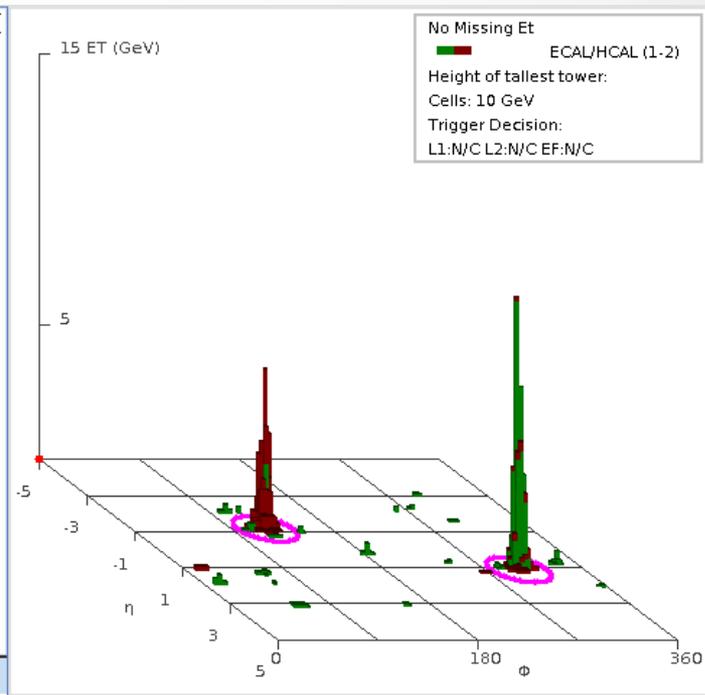
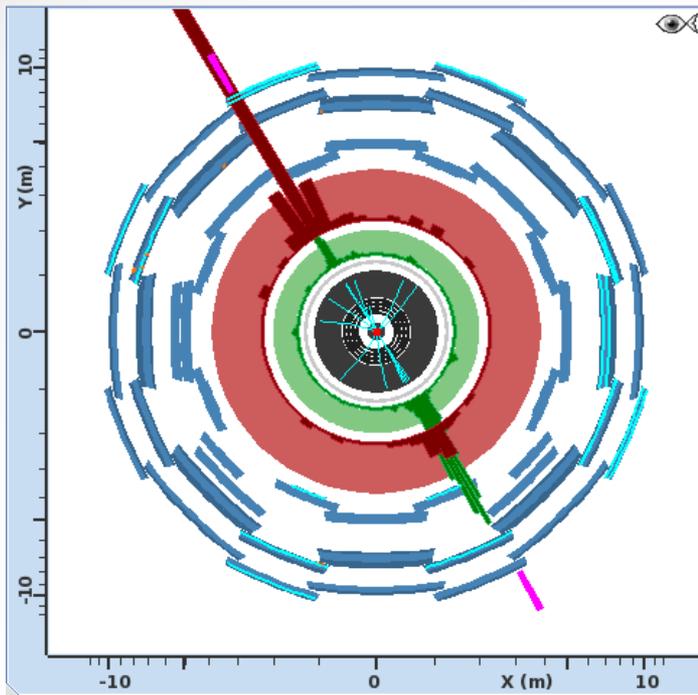




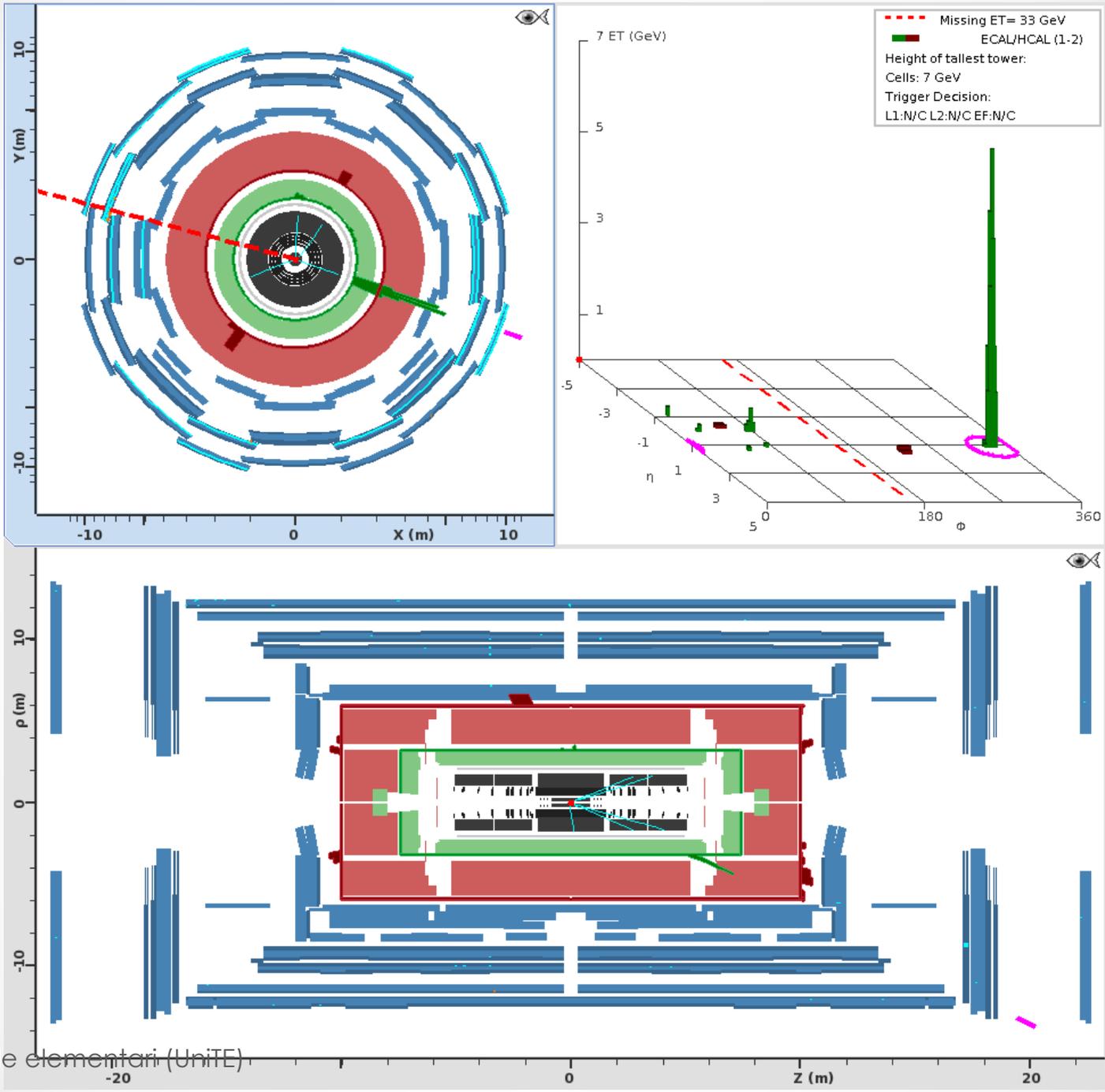
# Fondo (jet)

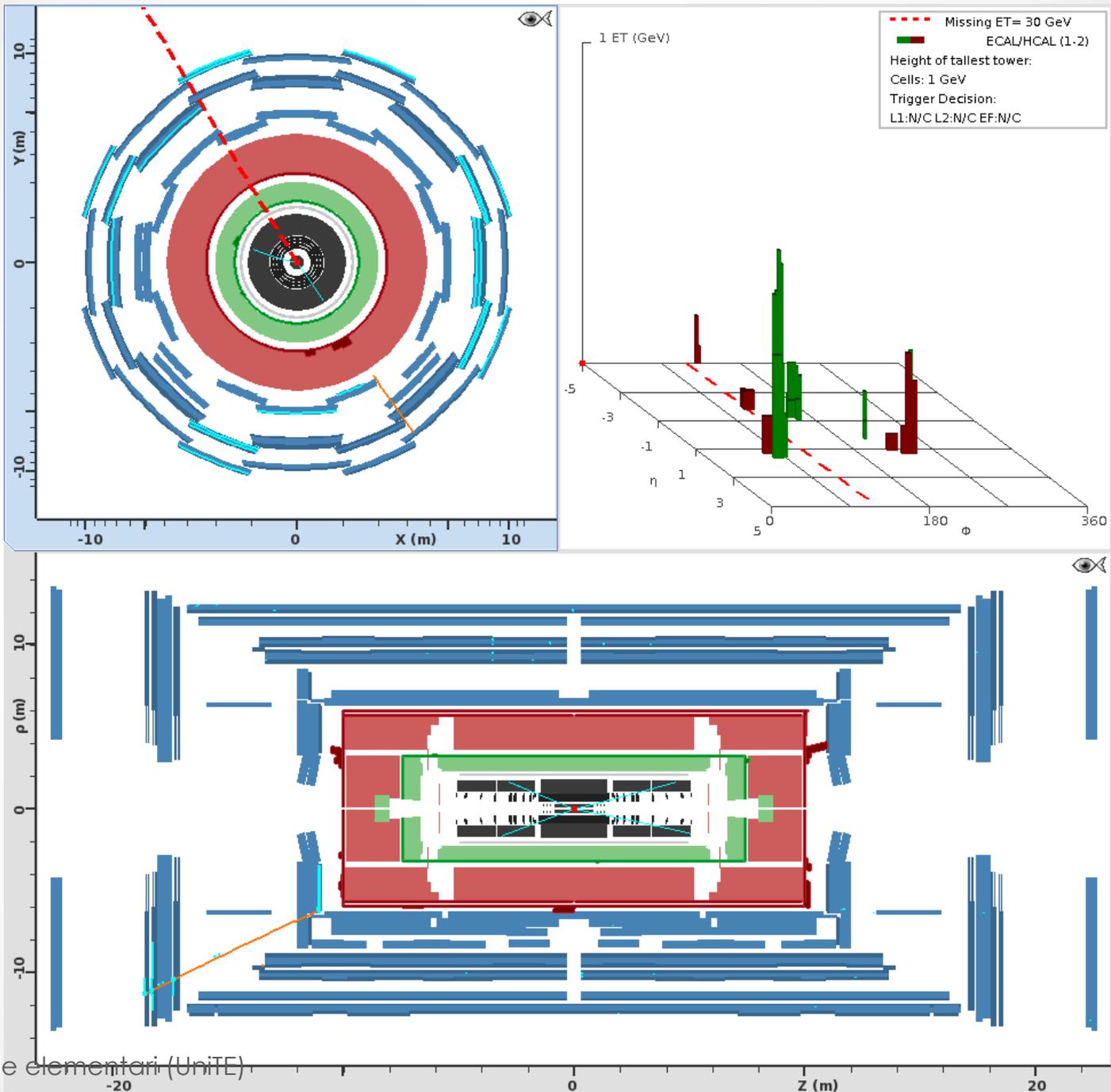


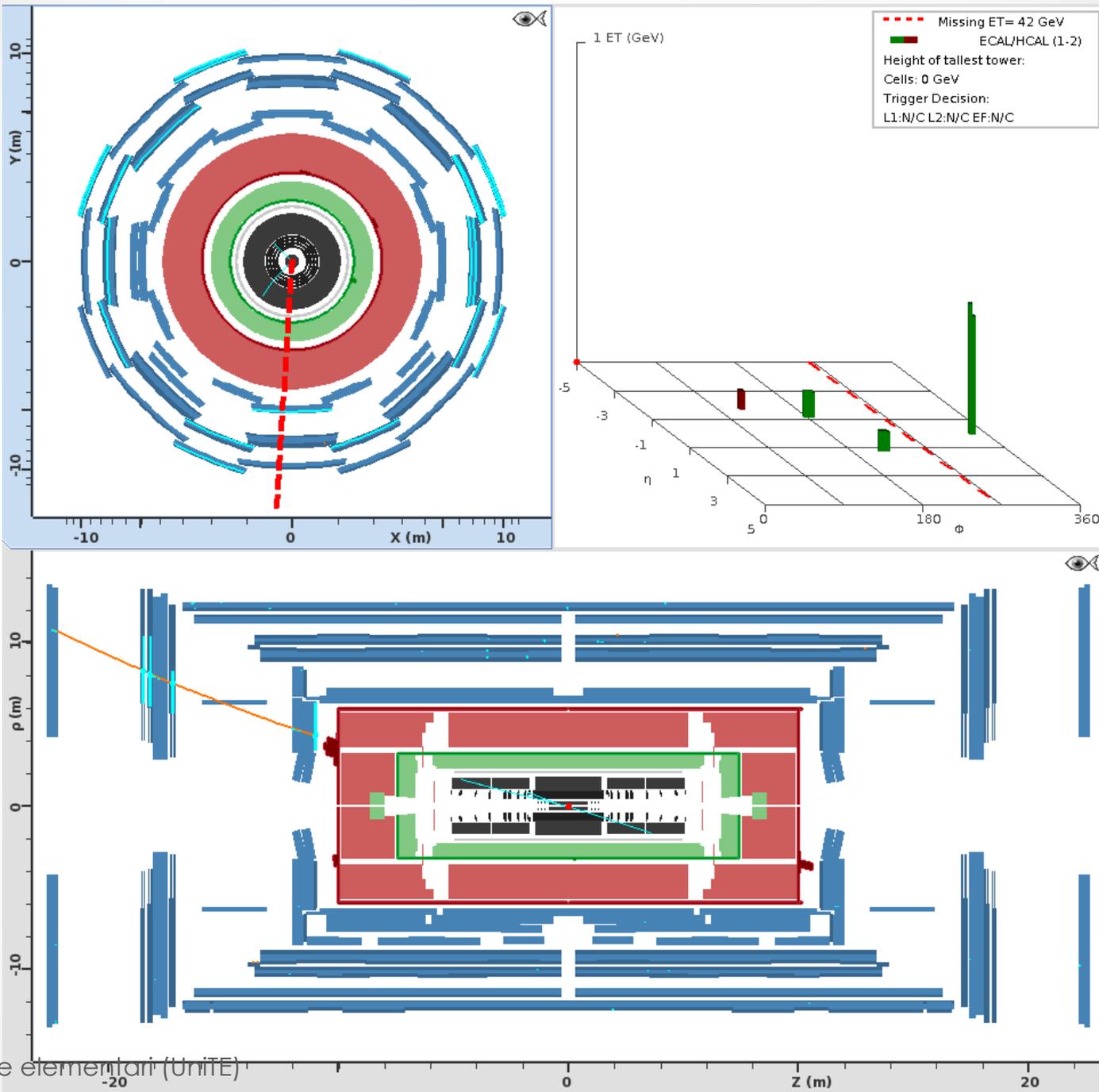
Fondo (jet)



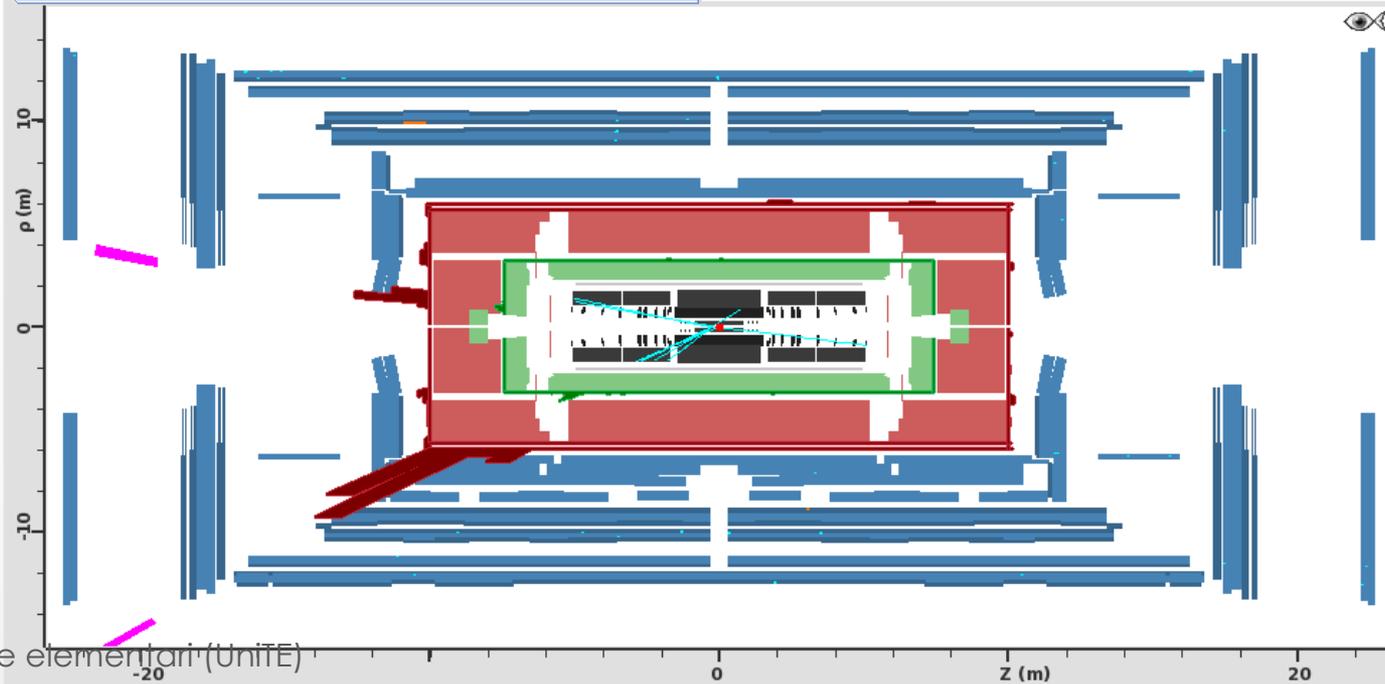
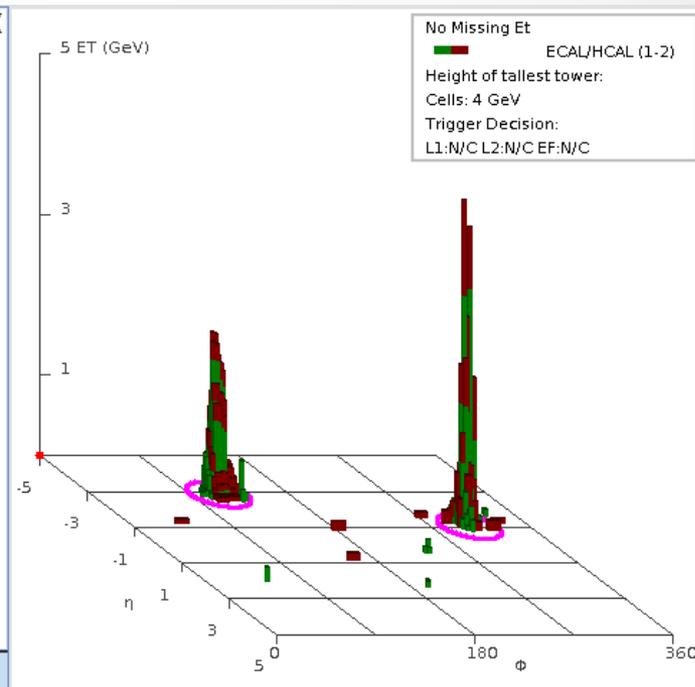
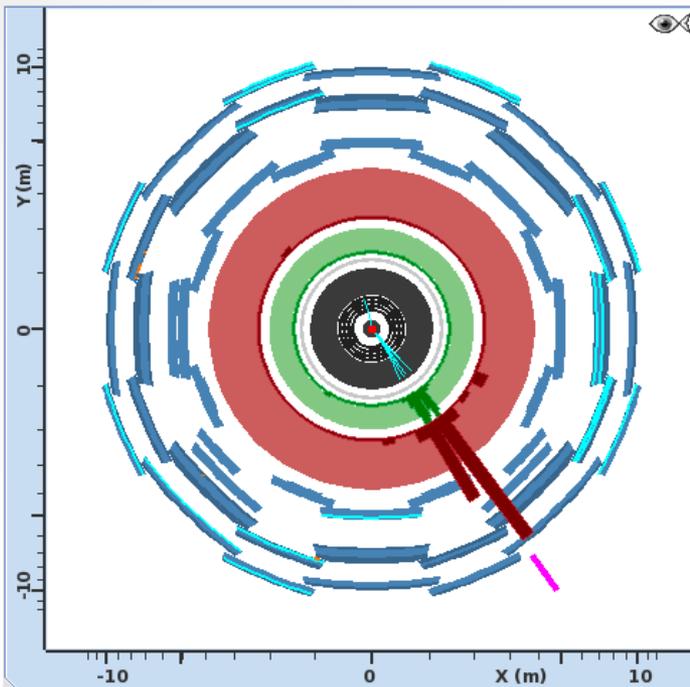
$W \rightarrow e\nu$



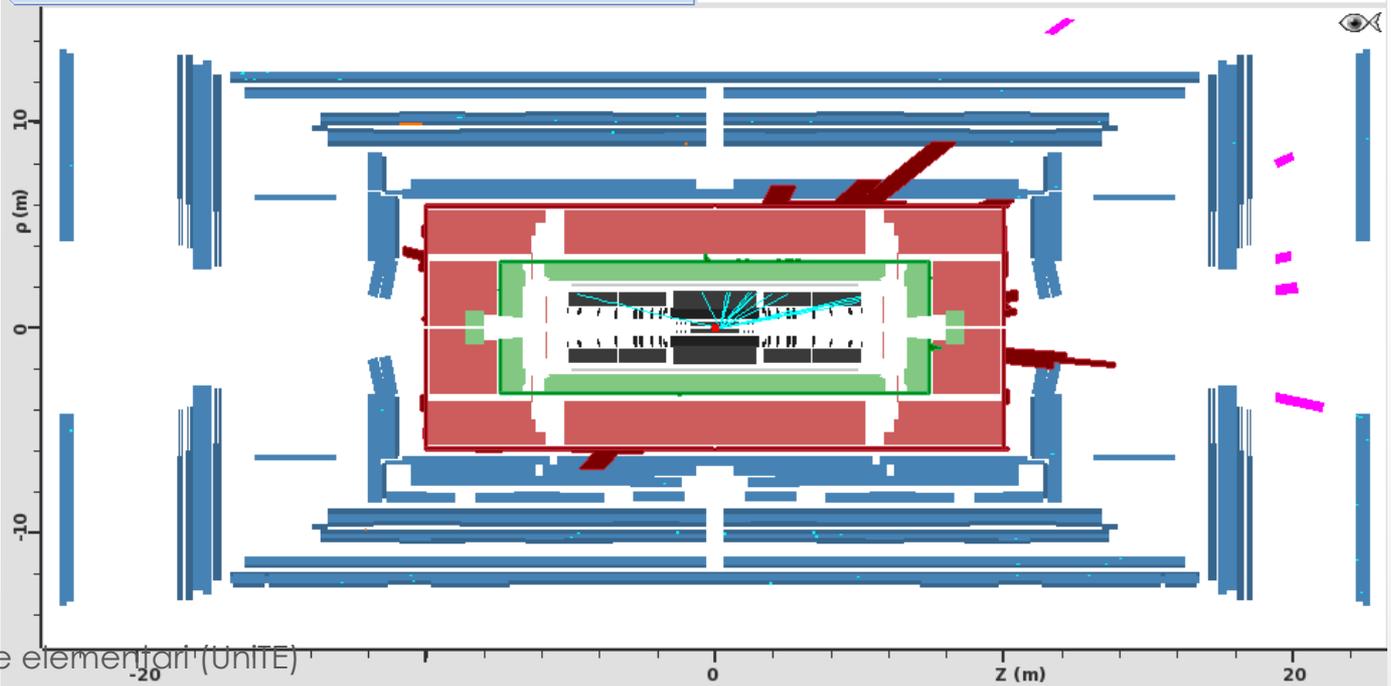
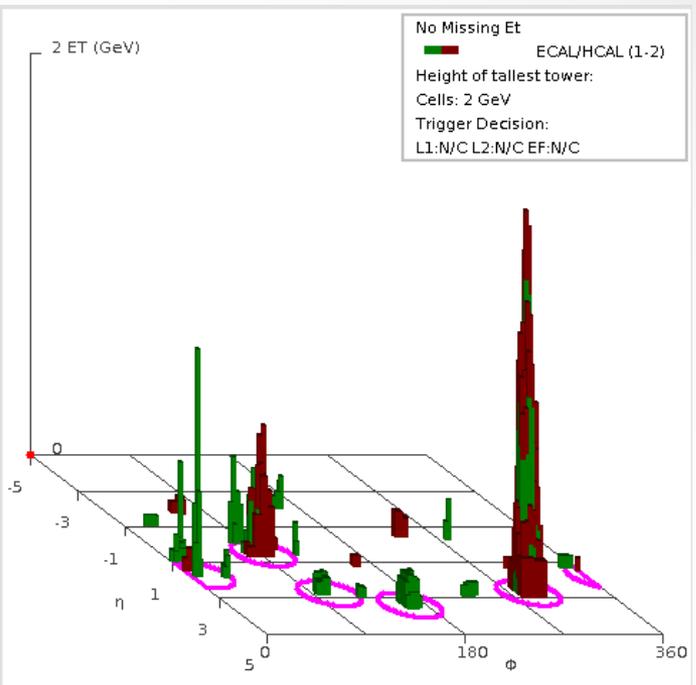
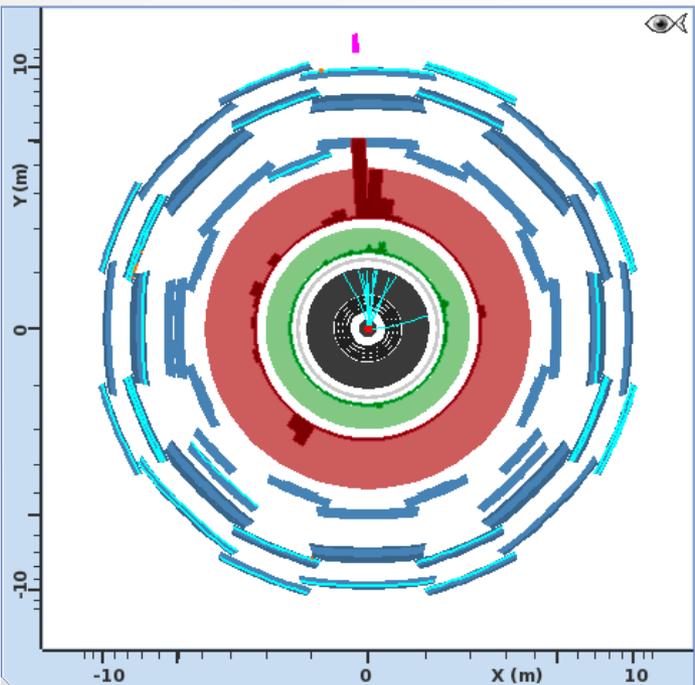


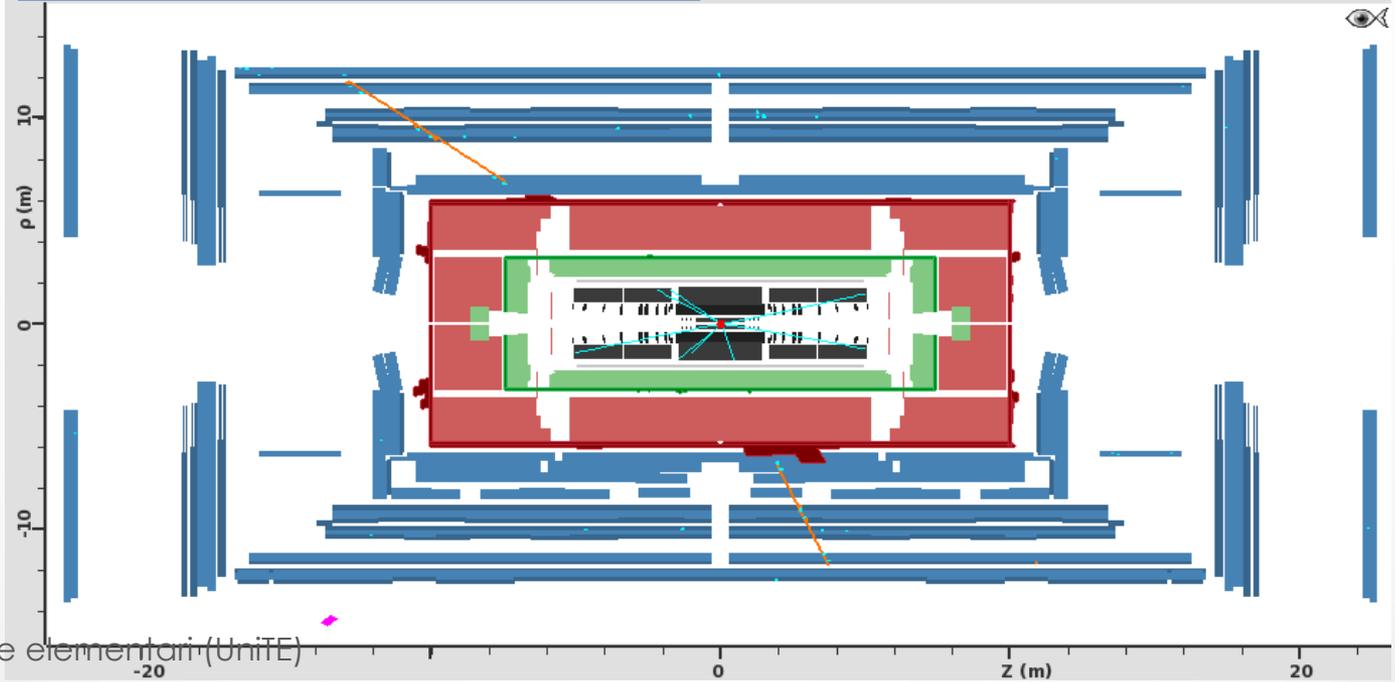
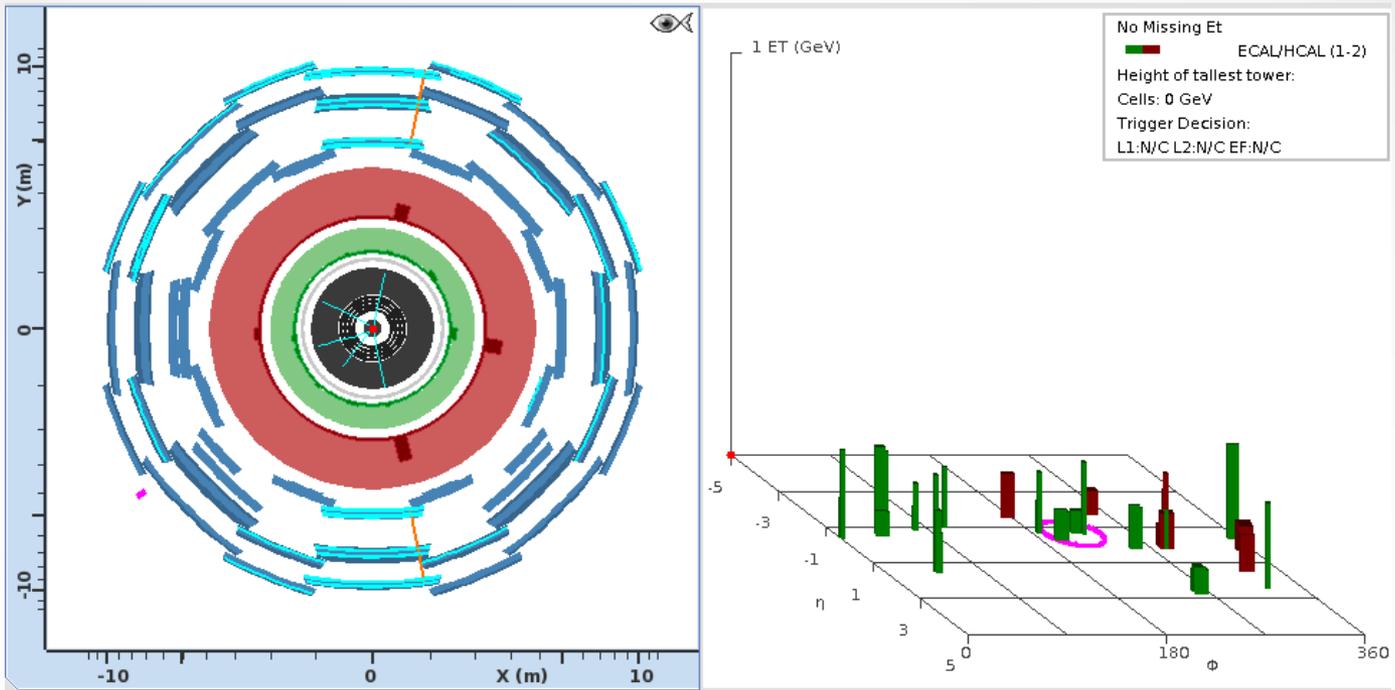


# Fondo (jet)



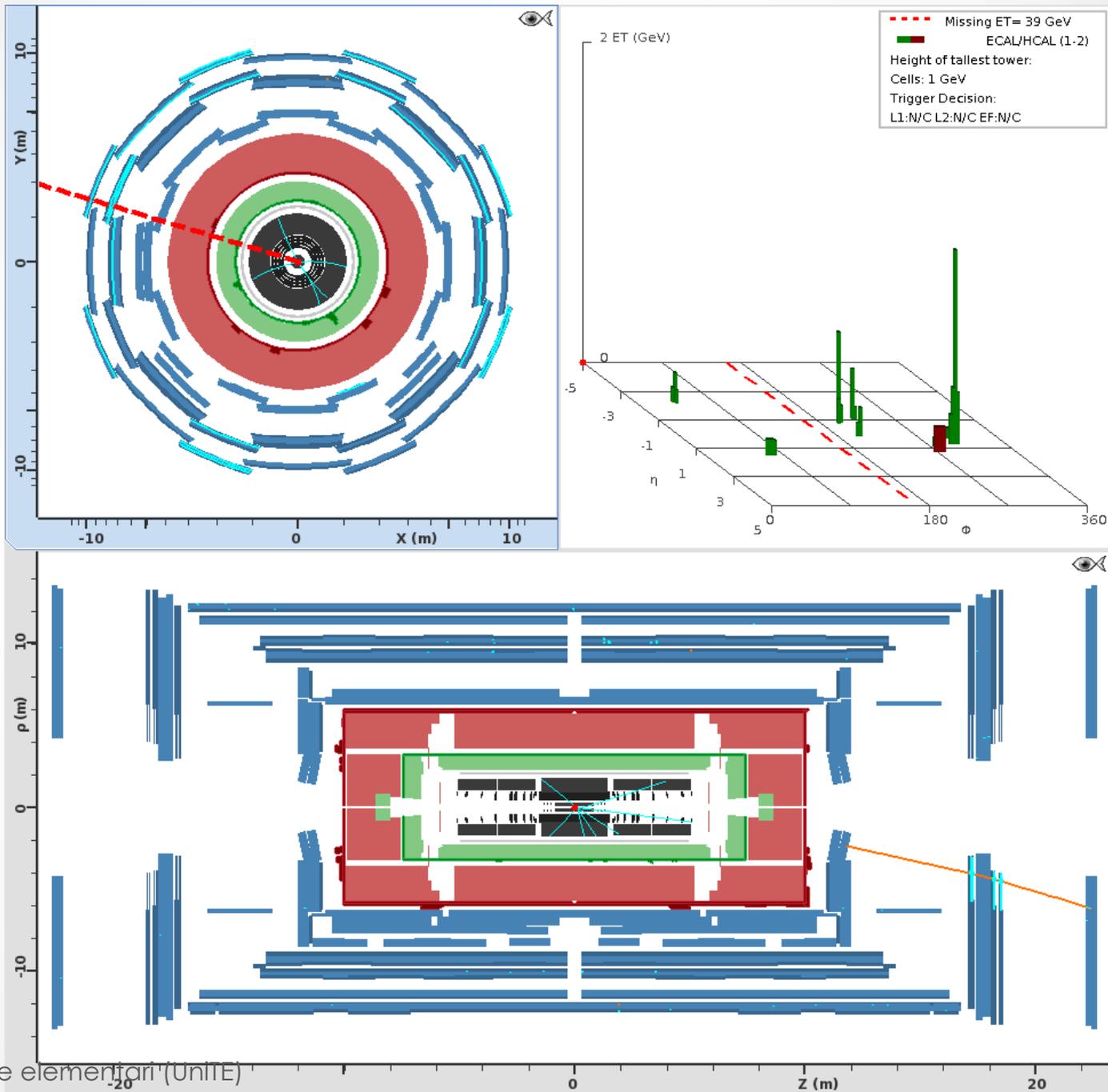
# Fondo (jet)





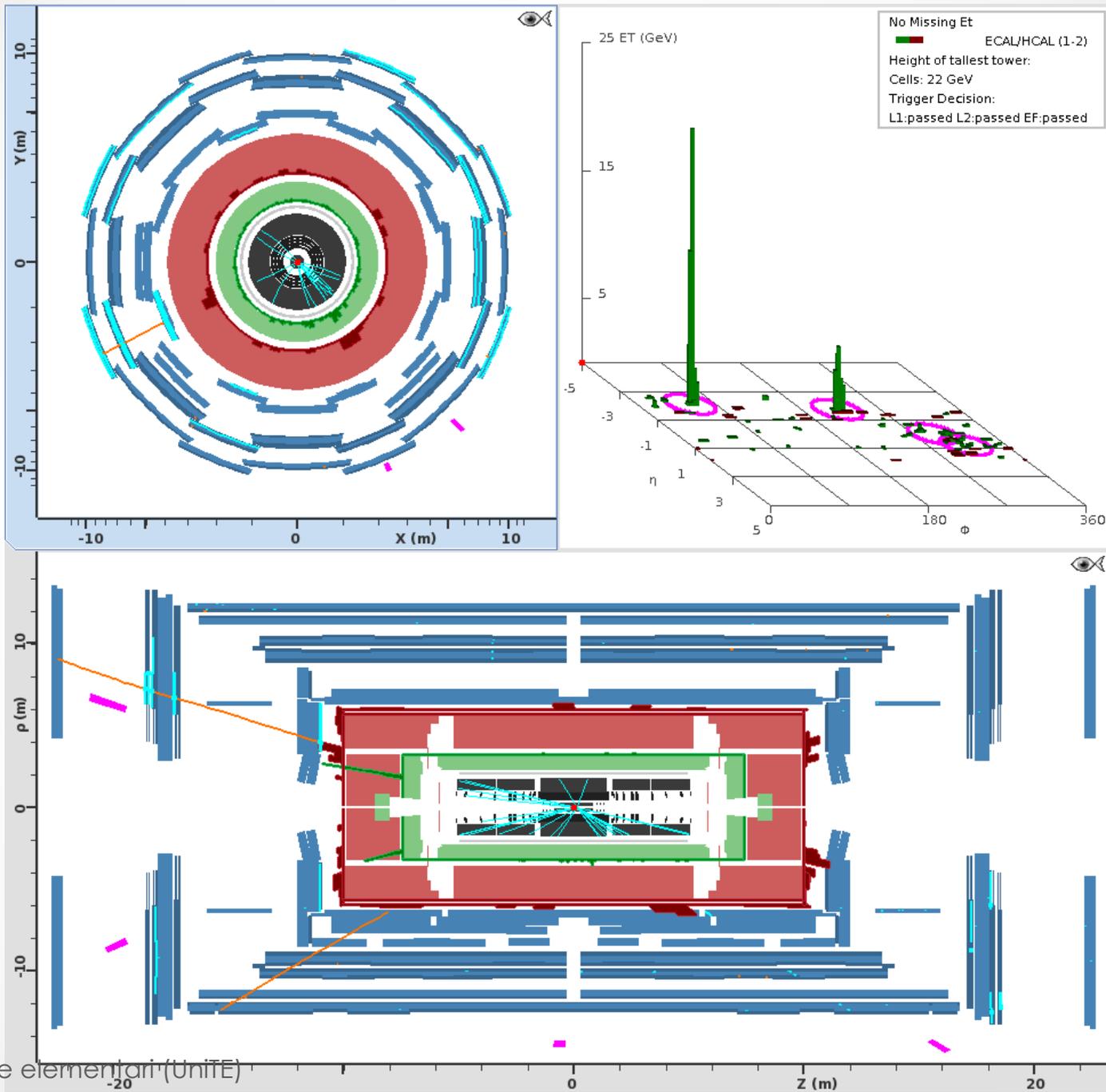
11

$W \rightarrow \mu\nu$



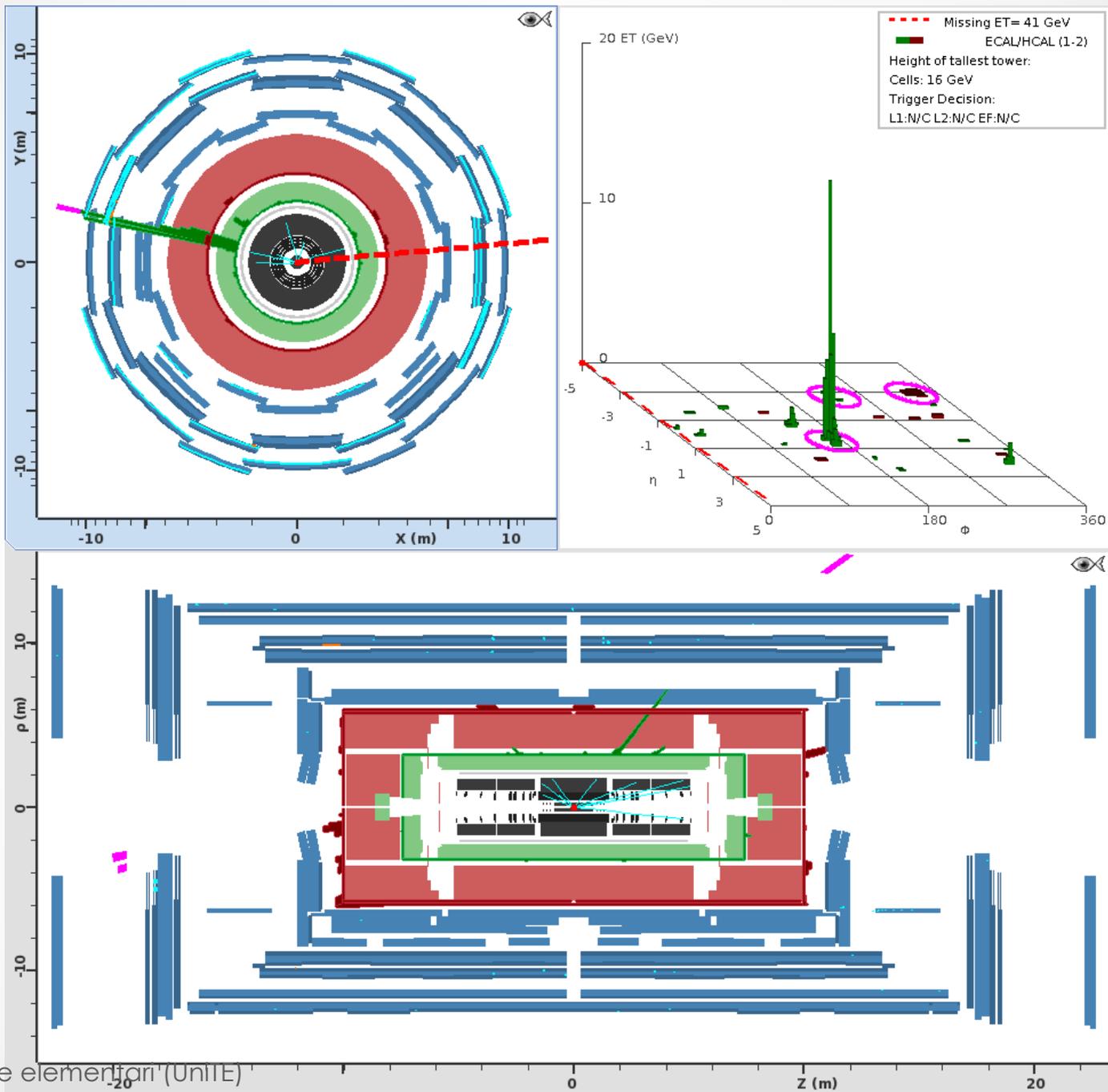
# 12

# $H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu\mu ee$



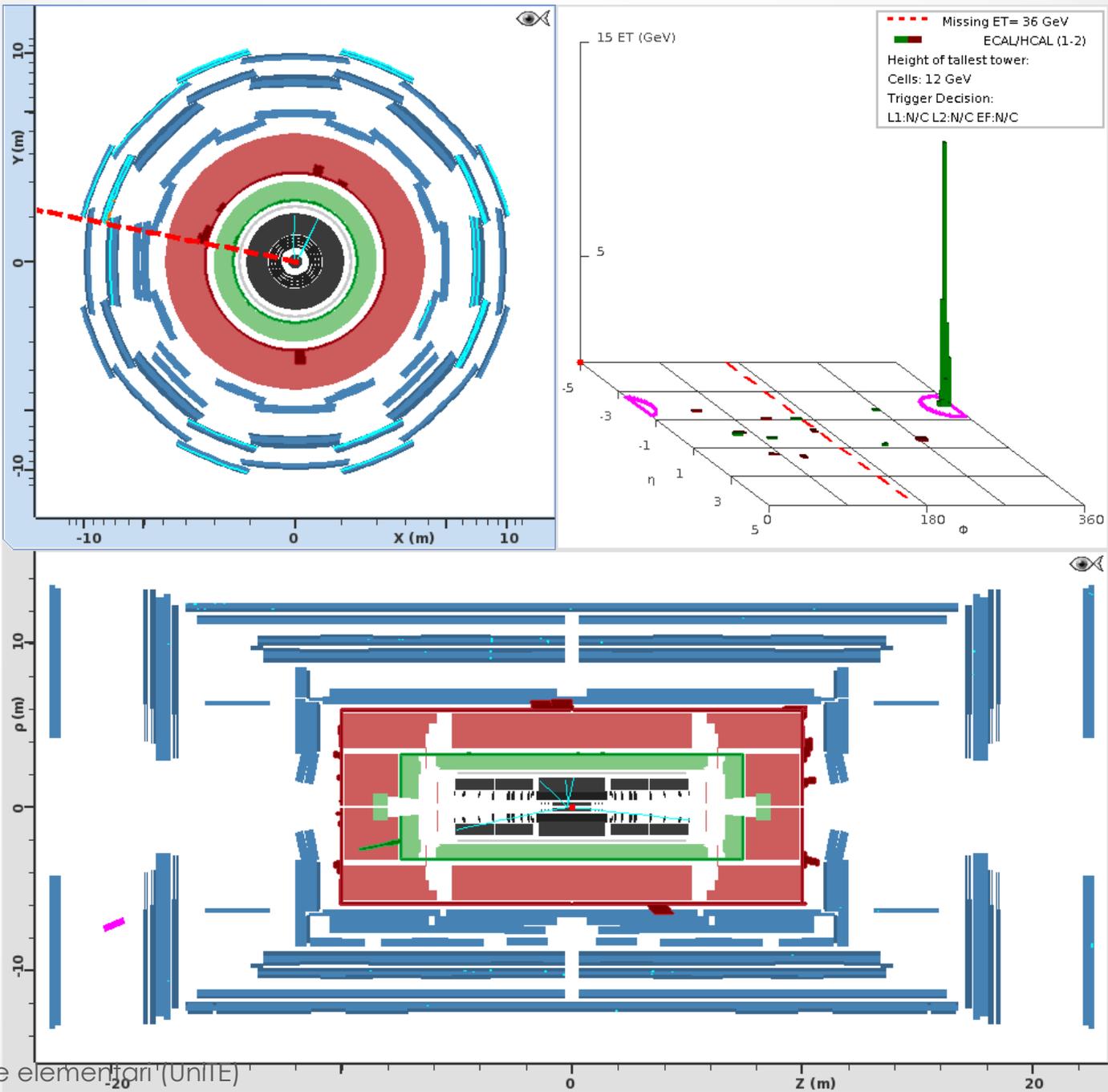
# 13

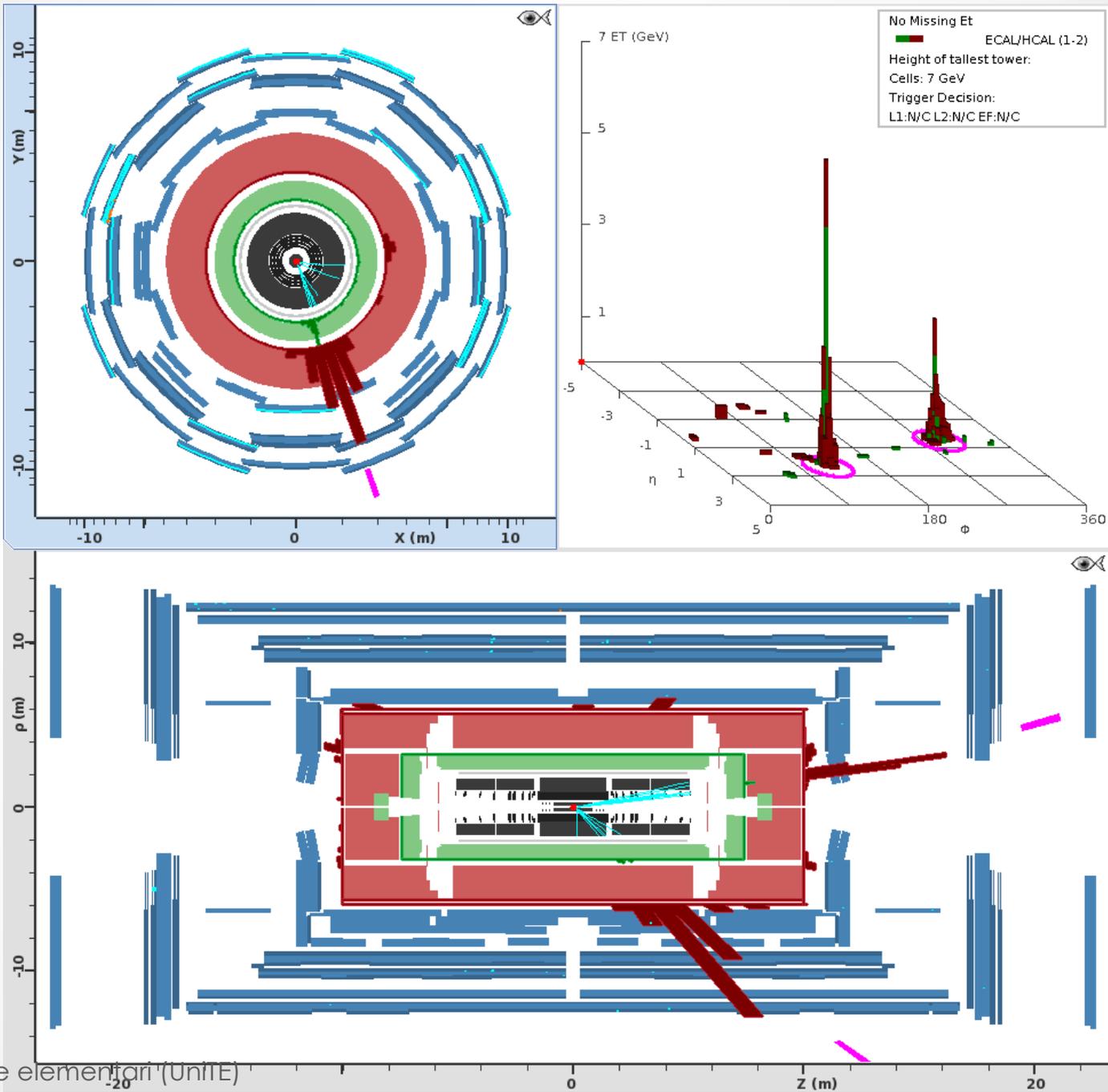
# $W \rightarrow e\nu$

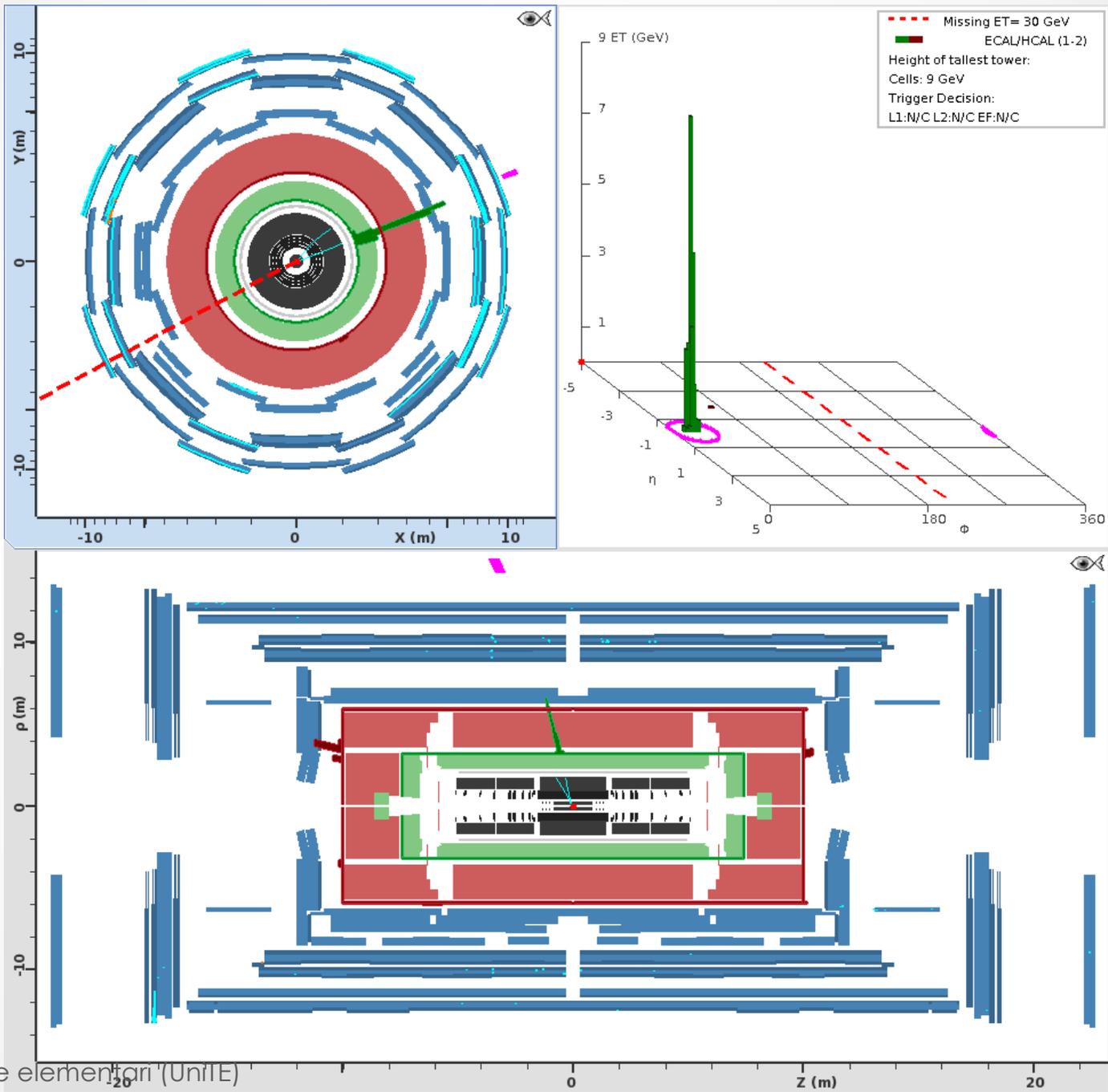


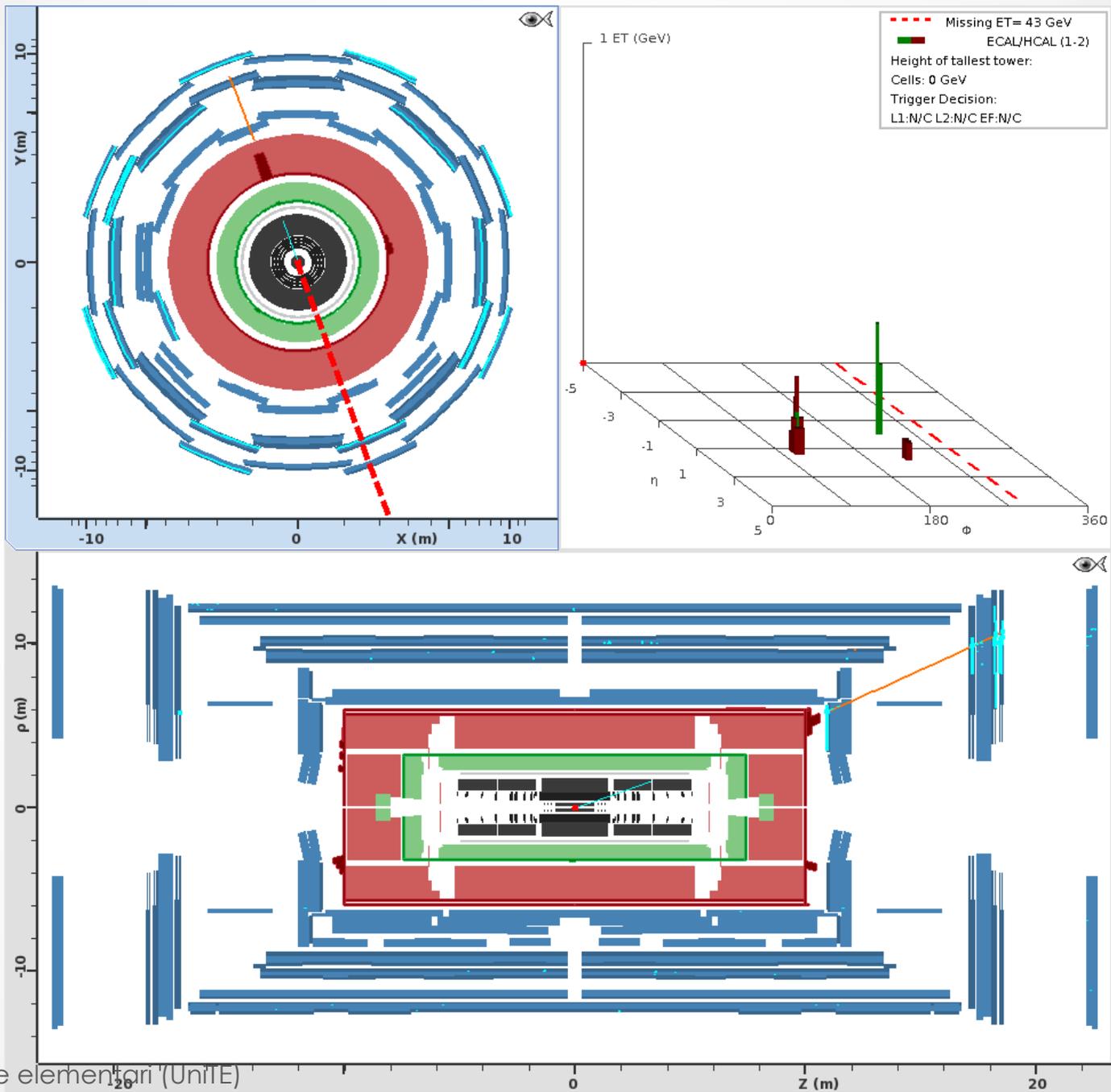
14

$W \rightarrow e\nu$









# 18

# $W \rightarrow e\nu$

