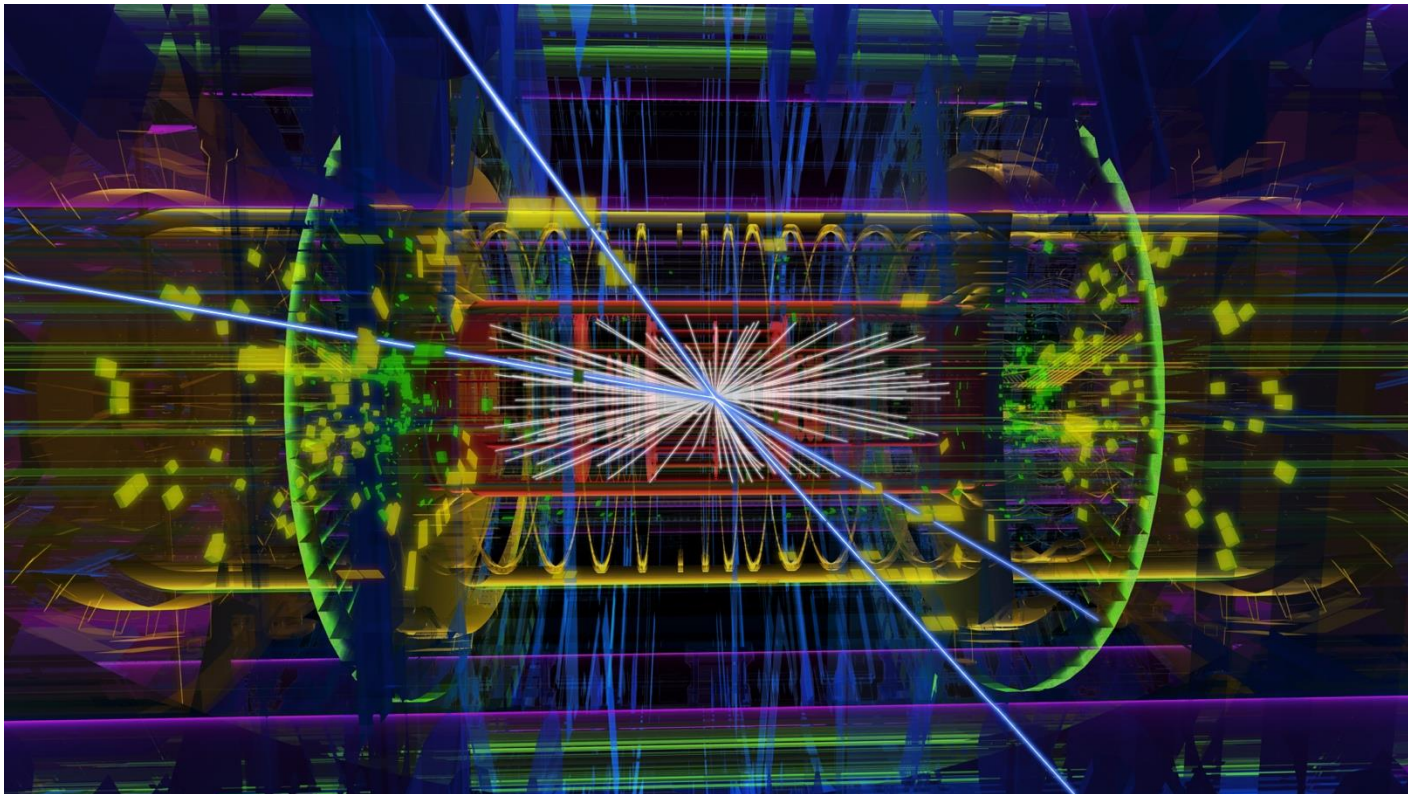


# ATLAS Masterclass

## Ricerca del bosone Z, del bosone di Higgs e di nuove particelle



# Fisica sperimentale agli acceleratori

- Cosa fa il fisico delle particelle sperimentale ?
  - Progetta, costruisce e conduce esperimenti per:
    - verificare o confutare le ipotesi formulate dai fisici teorici
    - fornire nuove osservazioni che possono fornire spunti per nuove e più complete teorie.

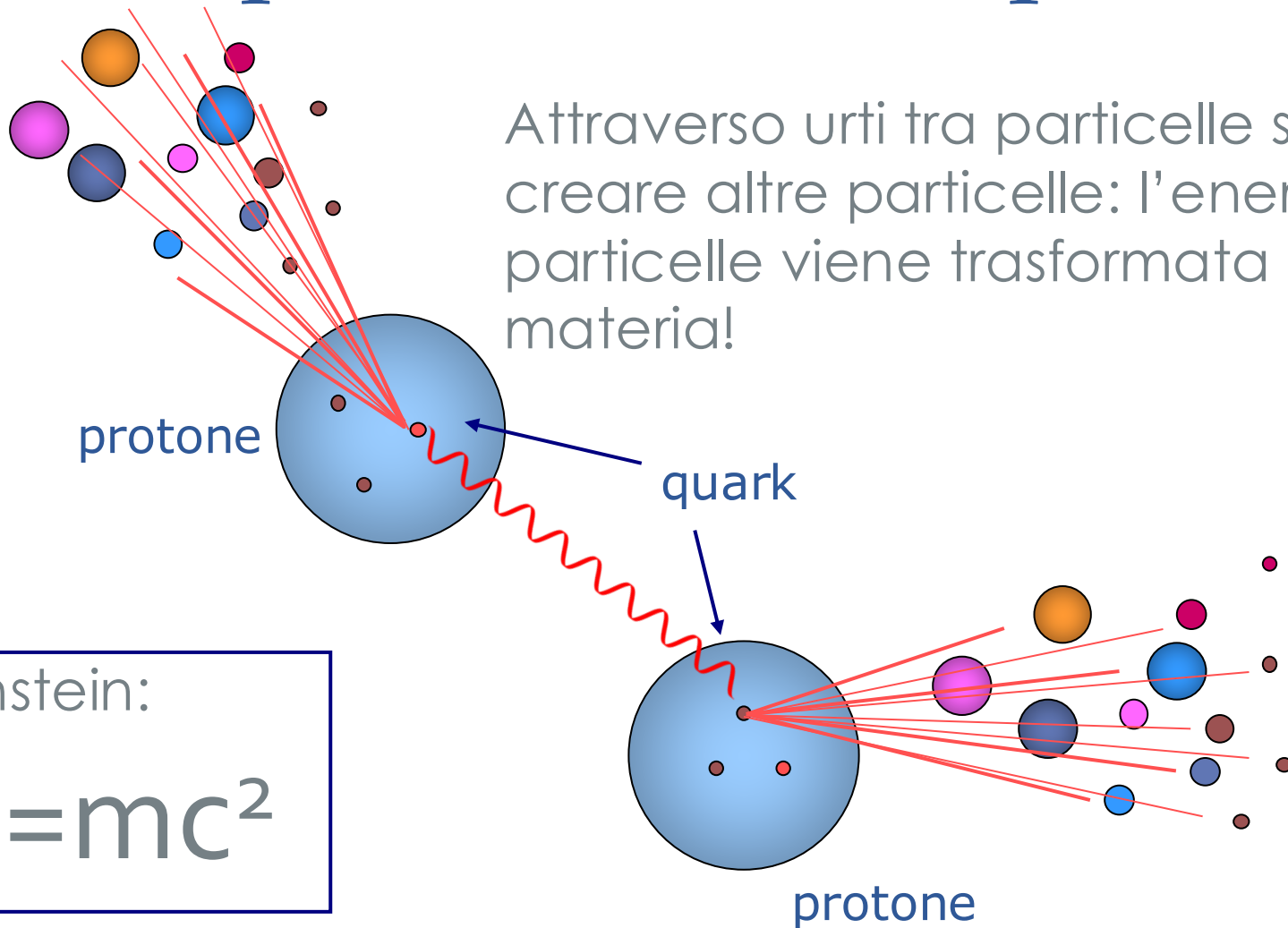
# Fisica sperimentale agli acceleratori

- Cosa fa il fisico delle particelle sperimentale ?
  - Progetta, costruisce e conduce esperimenti per:
    - verificare o confutare le ipotesi formulate dai fisici teorici
    - fornire nuove osservazioni che possono fornire spunti per nuove e più complete teorie.
- Competenze di un fisico sperimentale delle particelle
  - **Rivelatori** (interazione particelle-materia)
  - **Elettronica** (per “leggere” i segnali prodotti nel rivelatore)
  - **Acquisizione e elaborazione dati** (software sviluppato ad hoc, non esistono software “commerciali” adatti allo scopo)
  - **Statistica** (per l’interpretazione e la comprensione dei risultati)
  - **Fisica delle particelle** (bagaglio minimo per poter discutere con un teorico)



# Come produciamo le particelle?

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

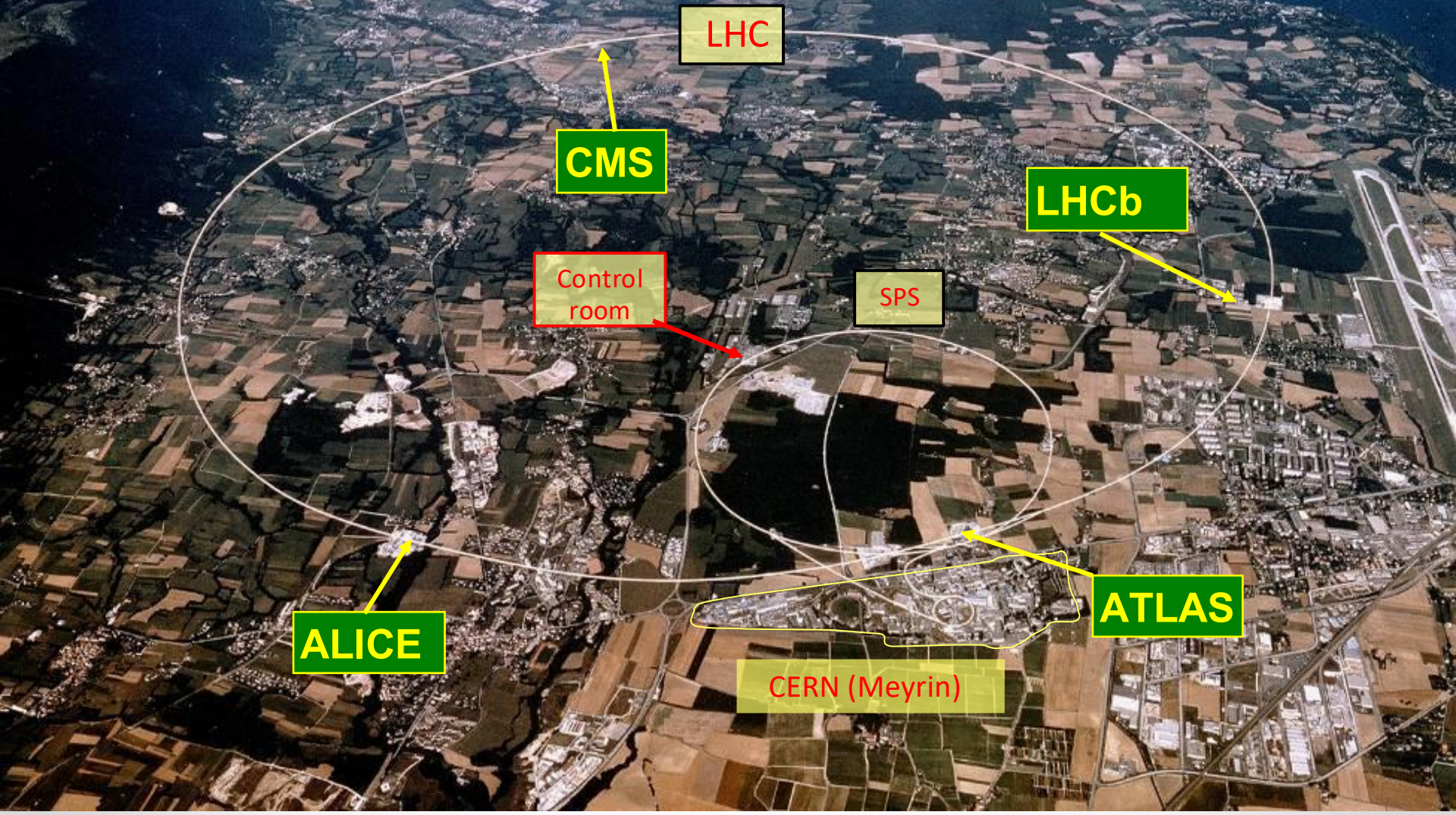


Einstein:

$$E=mc^2$$

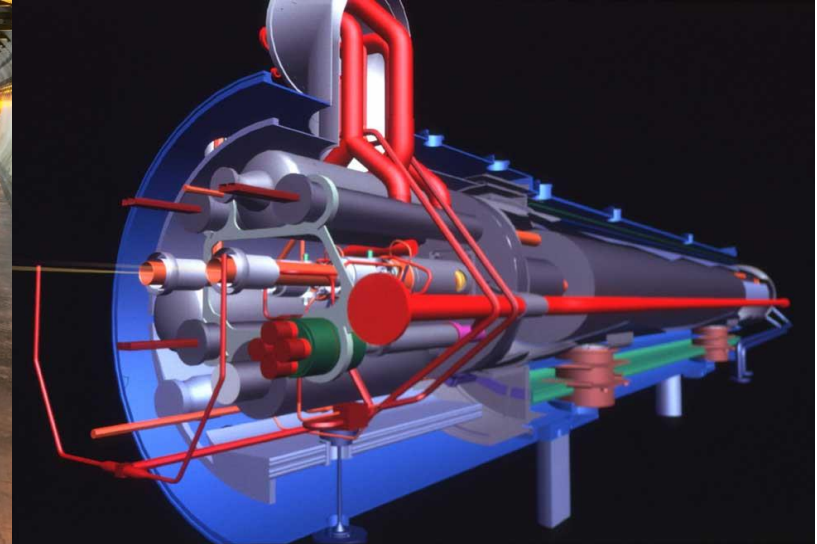
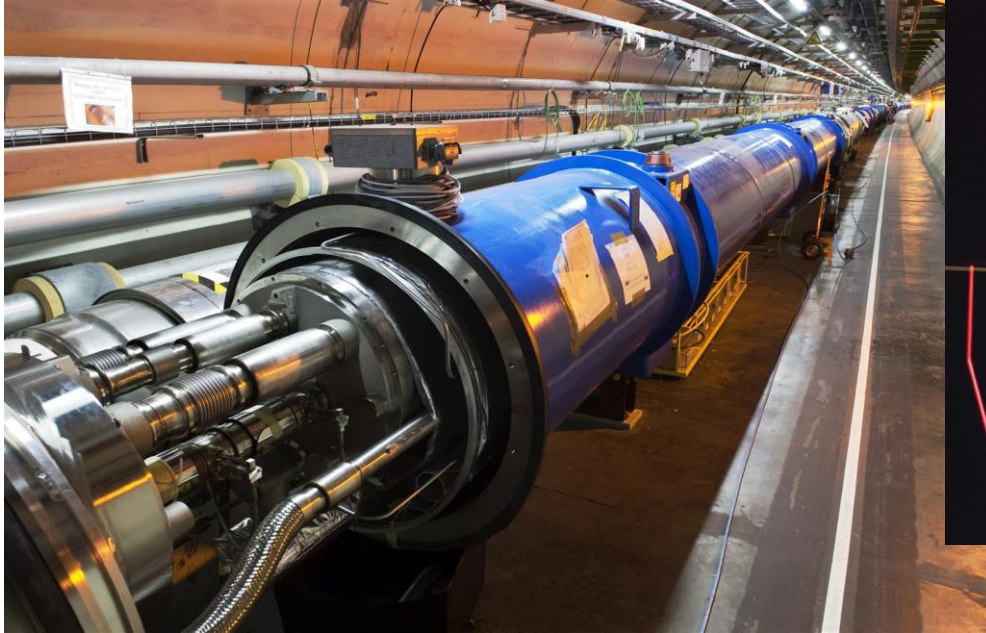
# L'acceleratore LHC al CERN di Ginevra

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 6.8 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.



- Posto **più freddo** dell'universo: LHC usa magneti superconduttori che operano a una temperatura inferiore alla minima temperatura rilevabile nell'Universo
- Posto **più caldo** dell'universo: LHC fa collidere anche ioni di Pb, a una "temperatura"  $10^{12}$  volte maggiore di quella al centro del Sole.

# Dove tutto ha inizio...

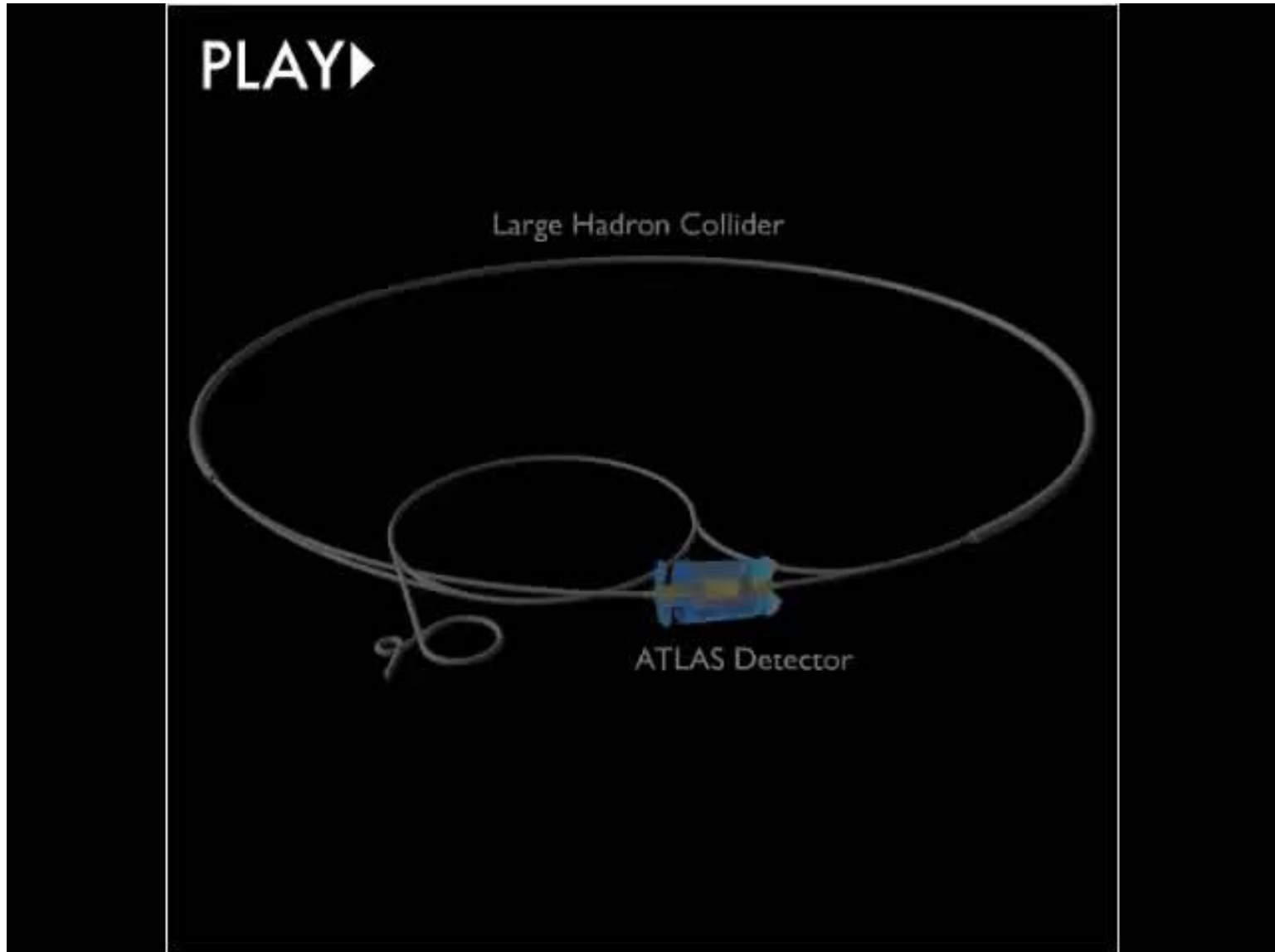
- Da dove escono le particelle che vengono accelerate in LHC ?
- Da una bombola di idrogeno!
- L'atomo di idrogeno è formato da un protone e da un elettrone, tramite forze elettriche si strappa l'elettrone ottenendo un insieme di protoni.



# Funzionamento di una cavità

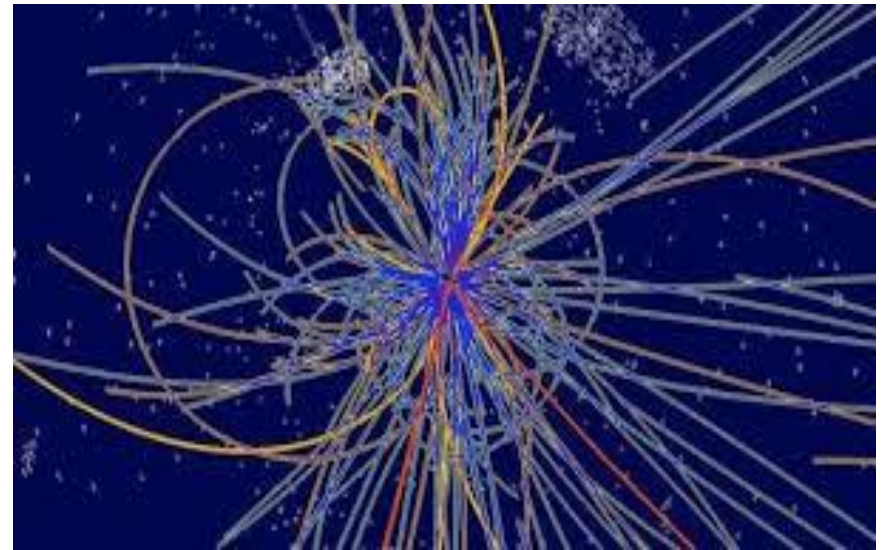


# Funzionamento di un collider



# Dove vanno le particelle prodotte ?

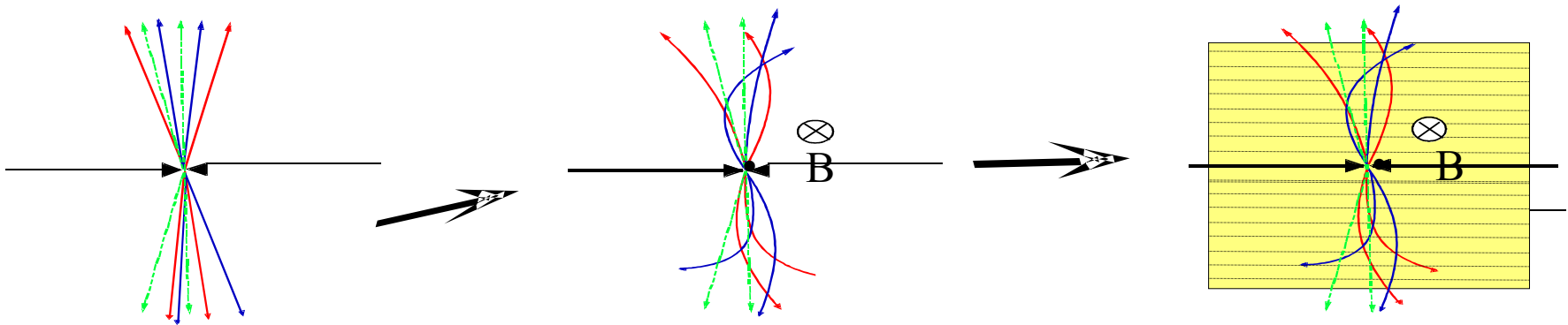
- Le particelle prodotte dalla collisione protone-protone hanno un'esistenza brevissima (da  $10^{-22}$  a  $10^{-12}$  sec) e poi decadono (si trasformano) in particelle "figlie" stabili.
- Le particelle "figlie" lasciano "orme" nel rivelatore.



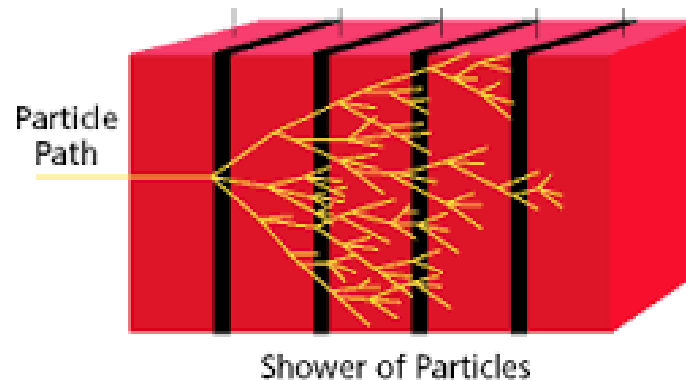
- Il primo passo consiste quindi nel capire in quali particelle "figlie" si possono trasformare le particelle che vogliamo cercare.

# Come rivelare le particelle prodotte ?

- Impulso particelle cariche tramite curvatura della traiettoria in campo magnetico (Forza di Lorentz:  $F = qv \times B$ )



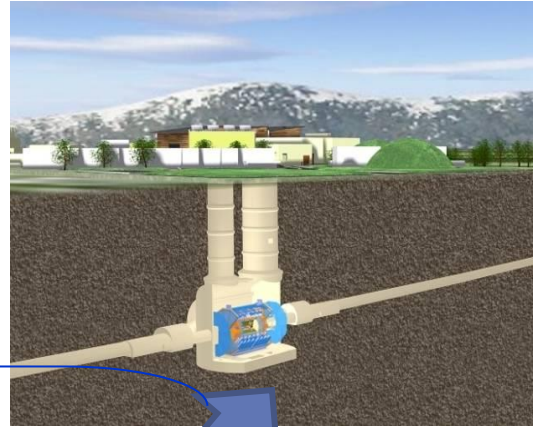
- Energia: "fermando" la particella in un materiale denso e misurando l'energia depositata. Per leptoni carichi la perdita di energia è proporzionale a  $1/m^2$ .



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

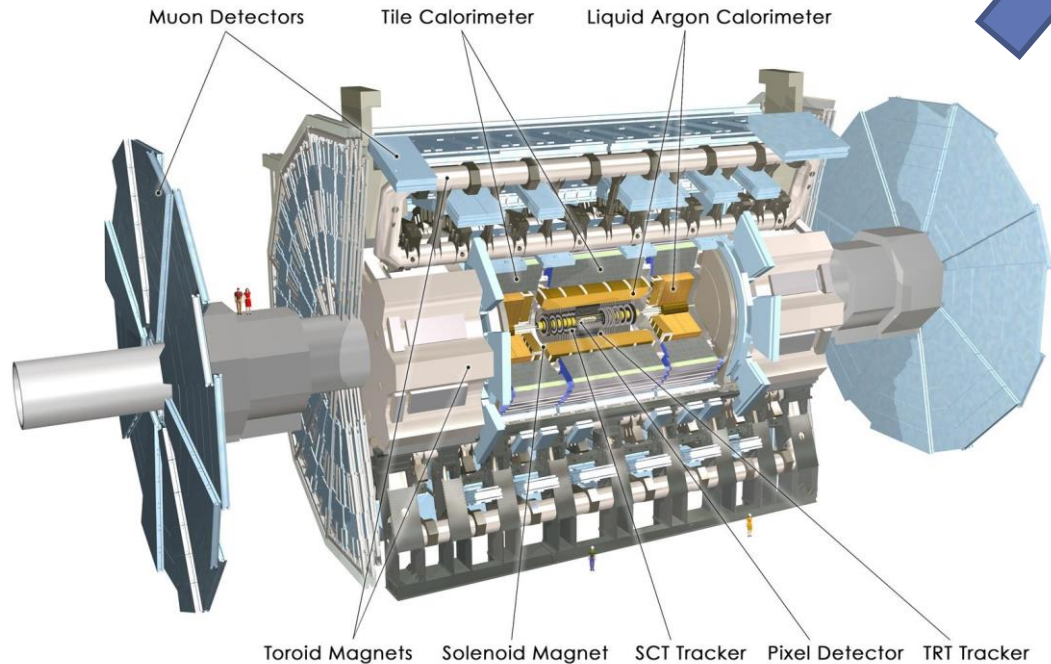


ATLAS vicino ad un edificio di 5 piani: 15 anni per progettarlo e costruirlo



**45 m**

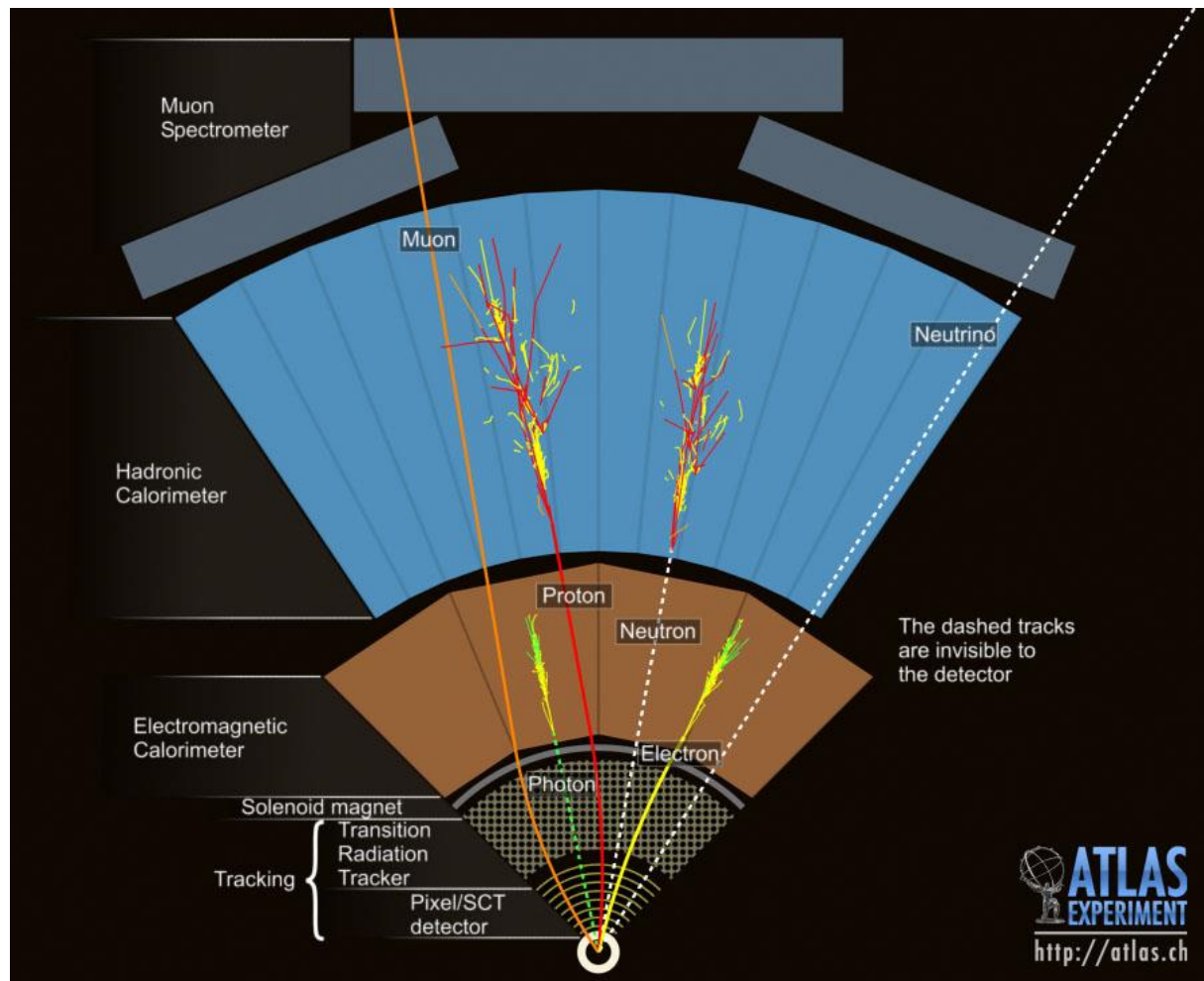
**7000 Tonnellate**



**24 m**

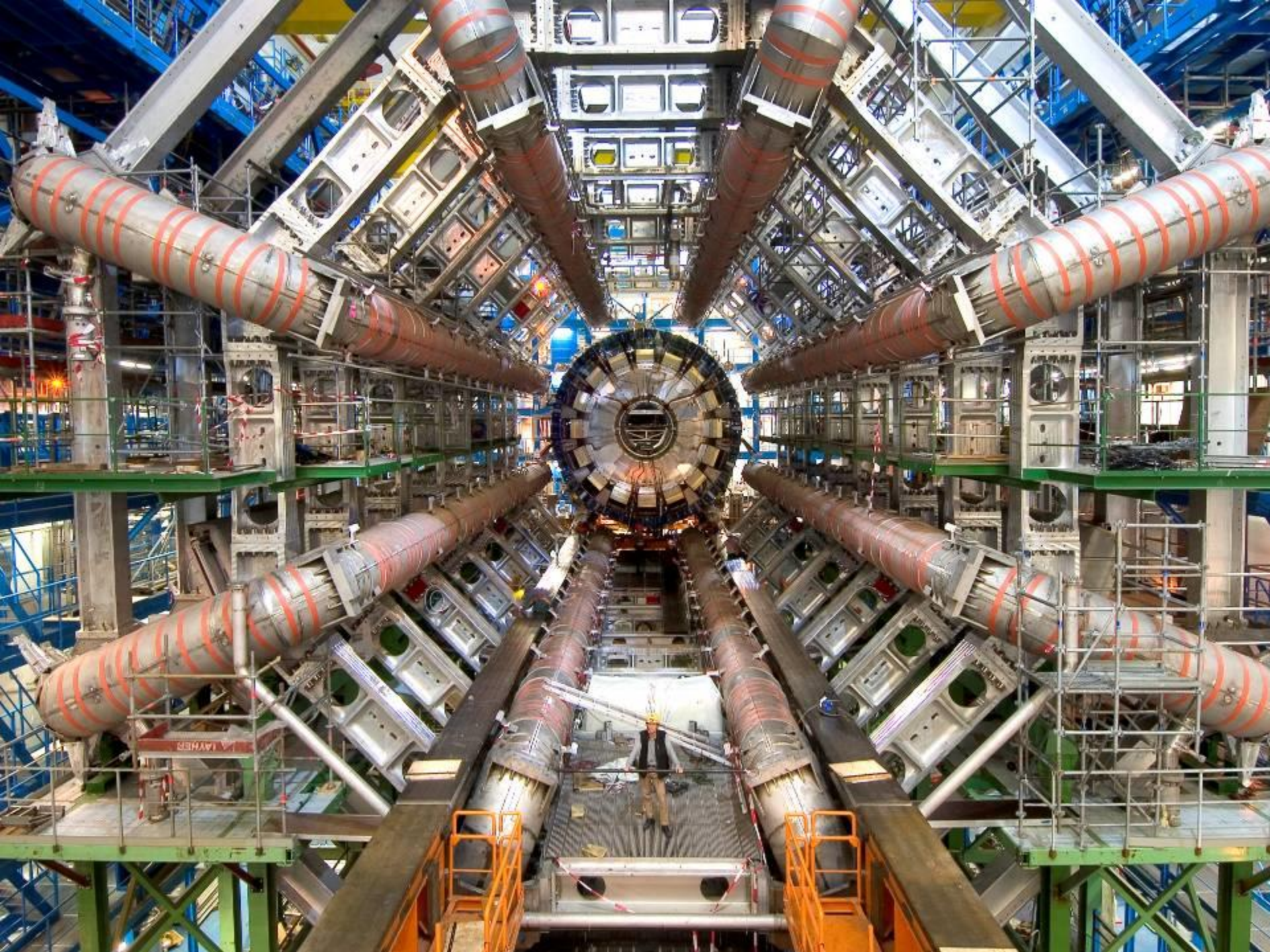
# Le orme delle particelle

- Le particelle che effettivamente vengono ricostruite dai rivelatori sono
  - **Elettroni**
  - **Muoni** (cugini pesanti degli elettroni)
  - **Fotoni**
  - Fiotti di particelle (**Jet**) prodotti da quark.
- Ognuna di esse lascia un segnale distintivo



## Installazione del rivelatore ATLAS: 2003-2008

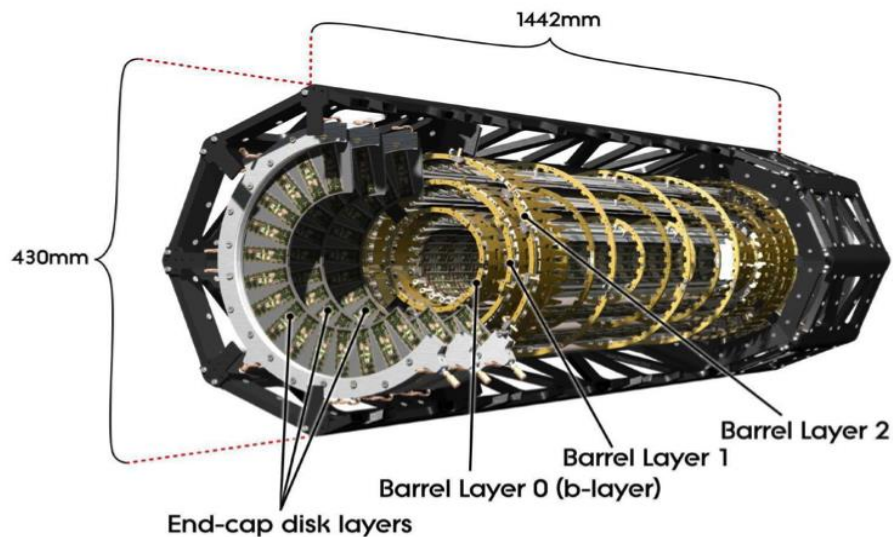




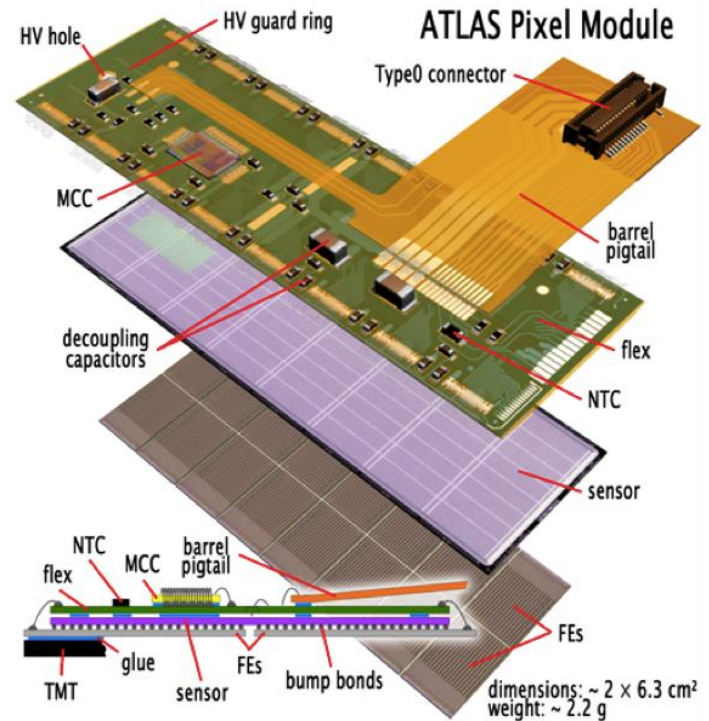
# Rivelatore a Pixel

Rivelatore più vicino al punto di collisione. In larga parte costruito 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)



(a)



(b)

# Selezione dei dati di LHC

Elaborazione dati  
veloce  
sul rivelatore



Selezione finale su  
Farm  
di computers



Trasferimento al  
centro  
di calcolo

0.000 000 000s



# Elaborazione dei dati di LHC

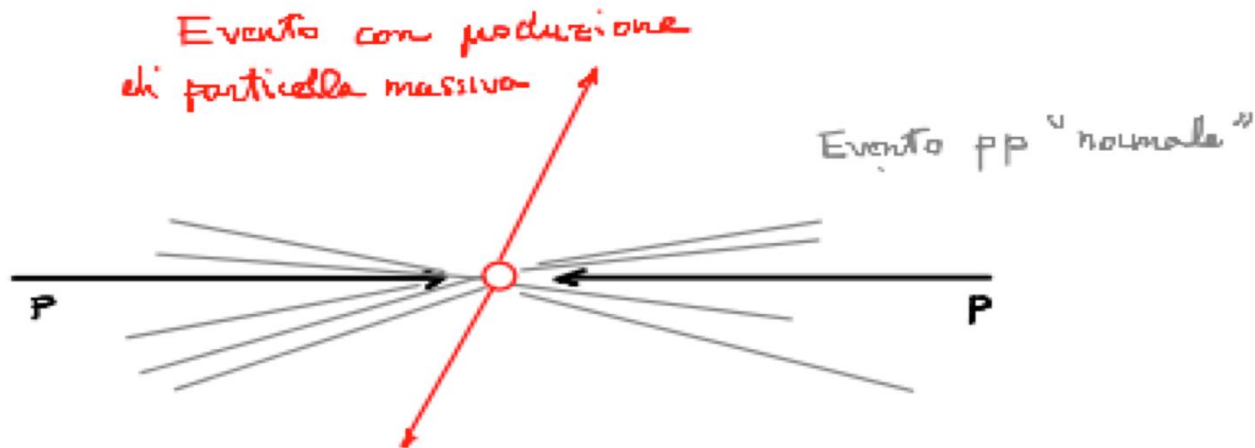


Computing Grid

# Selezione degli eventi

## Criteri generali

- Ricerca di leptoni ( $e$ ,  $\mu$ ), fotoni e **energia mancante** (nel piano trasverso), raramente prodotti in collisioni pp.
- Oggetti con grande componente della quantità di moto nel piano trasverso ( $p_T$ )

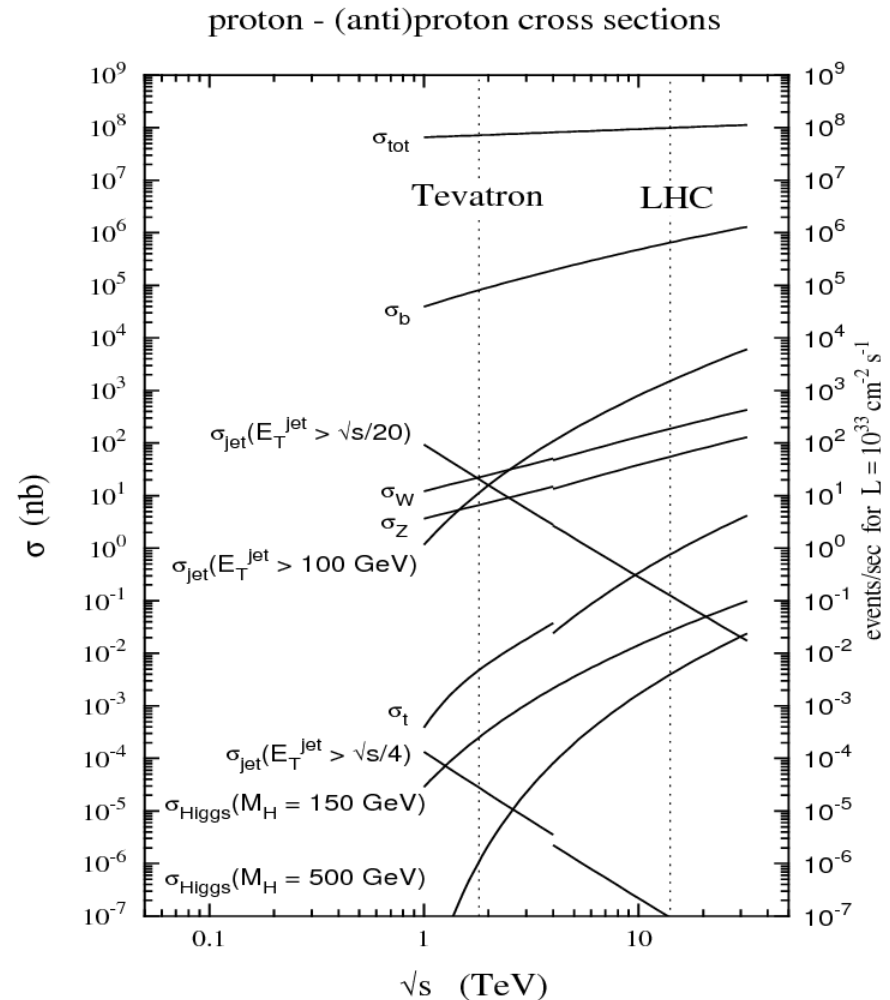


# Che probabilità ha di crearsi un bosone di Higgs?

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

Con l'attuale modalità di funzionamento di LHC, si produce quasi un bosone di Higgs al secondo (secondo teoria e osservazioni attuali), ma non è affatto semplice registrarli tutti

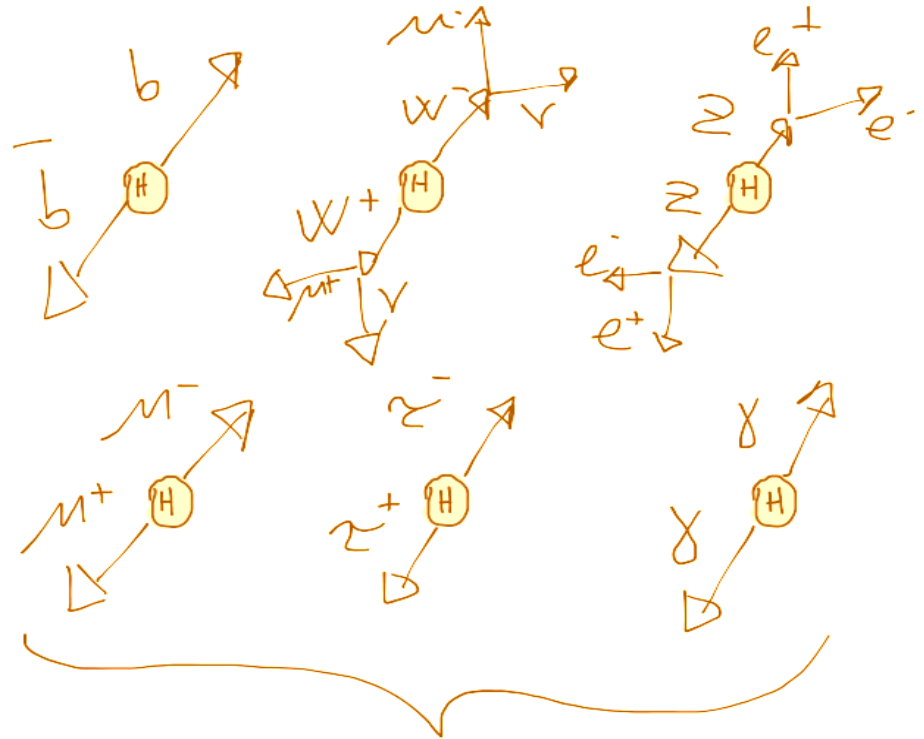
→ in alcuni "decadimenti" ne vediamo circa uno all'ora!



# 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  $b\bar{b}$ , oppure  $WW$ ,  $ZZ$ , ...,  $gg$ , e vedere se è la stessa.



Tutte le combinazioni hanno la stessa massa!

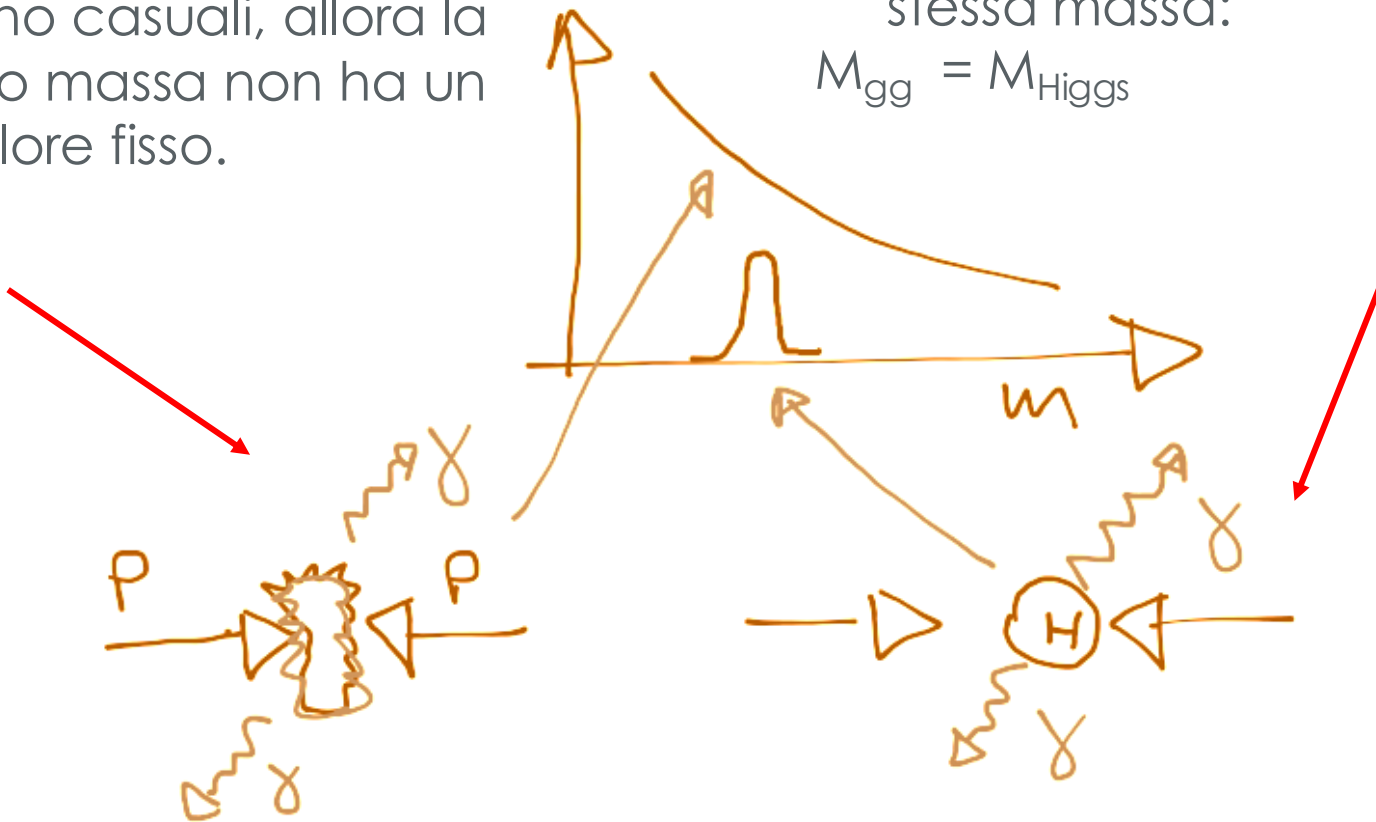
# Coppie di fotoni

Se le coppie di fotoni:

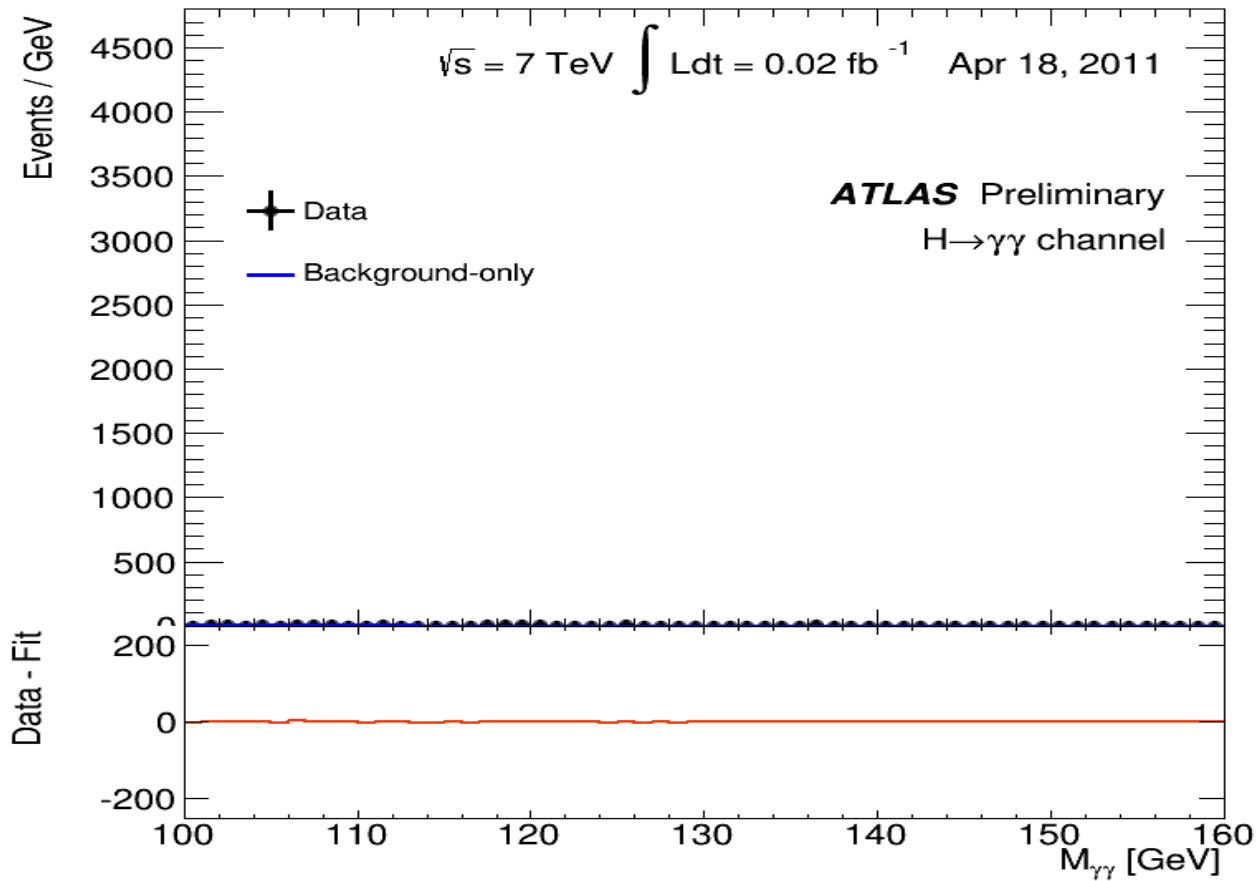
- sono casuali, allora la loro massa non ha un valore fisso.

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

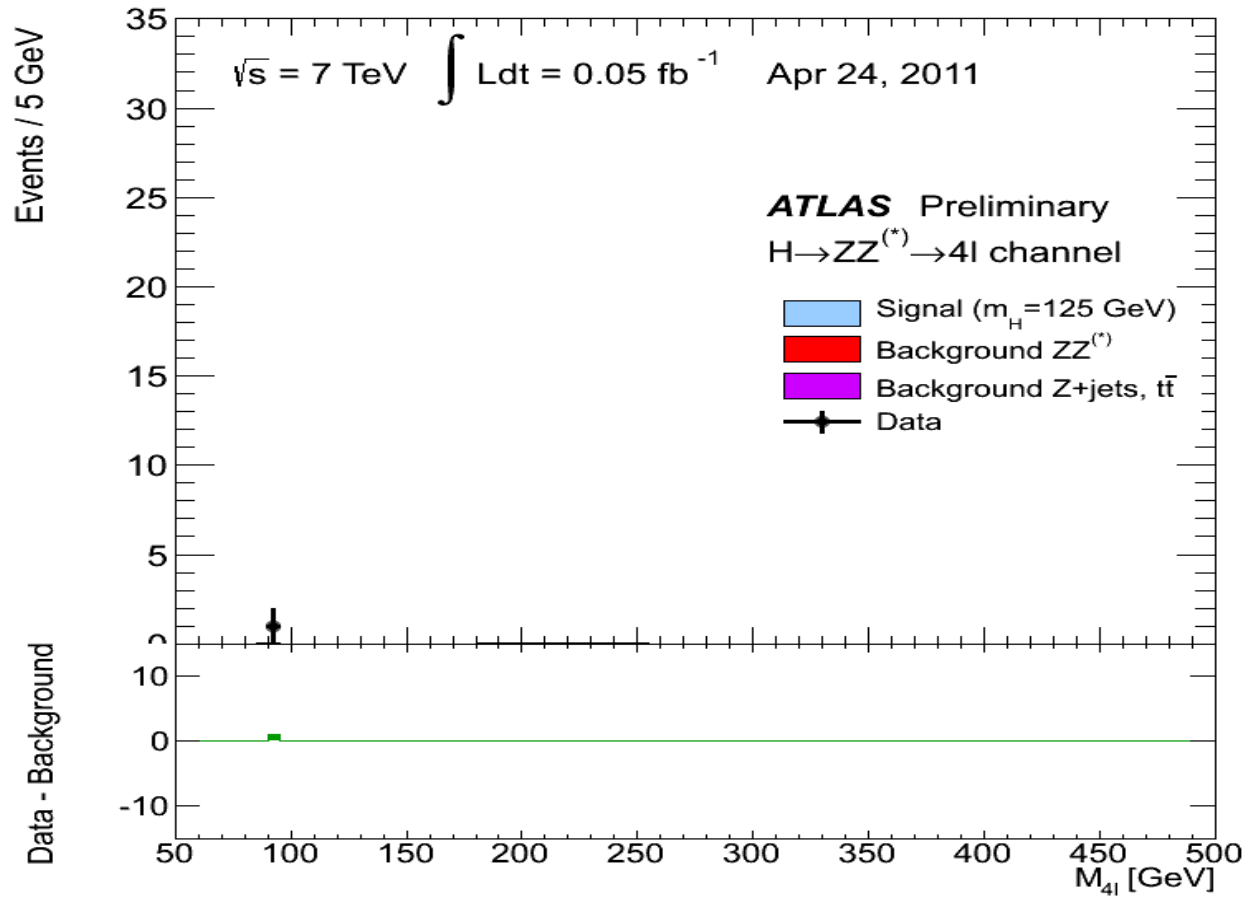
$$M_{\gamma\gamma} = M_{\text{Higgs}}$$



# Higgs in coppie di fotoni

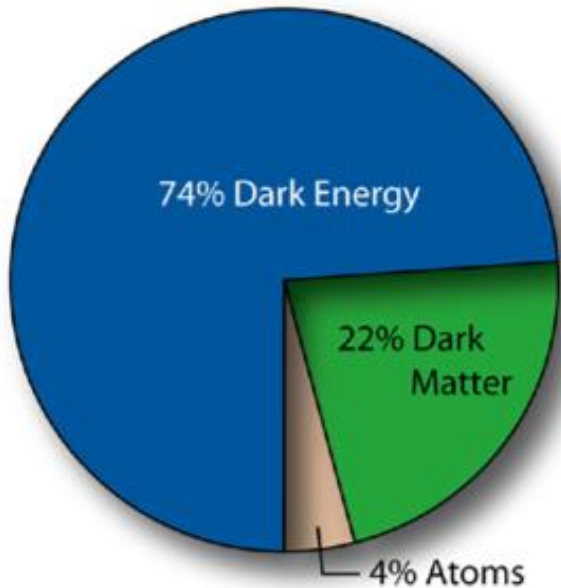


# Higgs in coppie di Z (ATLAS)



# 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%?**

# Non solo ricerca di base...

- 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
- Se Faraday, Roentgen e Hertz (per citarne solo alcuni) si fossero concentrati sui “problemi reali” dei loro tempi non avremmo mai avuto i generatori di corrente, i raggi X, la radio...



## INFN STEAM Summer Camp 2026 - 12-16 luglio 2026

Inoltre:  
registratevi in agenda  
per rimanere in contatto  
con INFN



### Studiare l'Universo sotto 1.400 metri di roccia

Un campo estivo promosso dall'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, rivolto alle studentesse, agli studenti e ai docenti delle scuole secondarie di secondo grado italiane.

L'edizione 2026 si svolgerà presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'INFN (LNGS)

Ogni anno, il Summer Camp propone temi legati alle discipline **STEAM** (Science, Technology, Engineering, Arts, and Mathematics) attraverso seminari e laboratori interattivi, offrendo ai partecipanti un'esperienza formativa dinamica e stimolante.

---

Il **Summer Camp 2026** mette a disposizione **120 posti complessivi**, così ripartiti:

#### Studentesse e studenti (100 posti)

- **80 posti** per studentesse e studenti selezionati tramite **bando INFN Summer Camp - 28486**, con scadenza **16 marzo 2026, ore 14:00** (domande su: <https://reclutamento.dsi.infn.it/#bandi/BORSE>)
- **20 posti** riservati a studentesse e studenti selezionati nell'ambito dei progetti di diffusione della cultura scientifica dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN)

#### Docenti (20 posti)

- **20 docenti** di Matematica, Fisica e Scienze delle scuole secondarie di II grado italiane (candidature dal **5 febbraio** al **16 marzo 2026** - <https://agenda.infn.it/event/48958/registrations/5453>)
-

# Cosa cerchiamo oggi ?

- Oggi cercheremo, in campione dei dati accumulati da ATLAS, eventi con:
  1.  $\gamma\gamma$  (decadimento del bosone di Higgs)
  2.  $\mu^+\mu^-$  o  $e^+e^-$  (decadimento del bosone **Z** ma anche della **J/ψ** e della **Υ**)
  3.  $\mu^+\mu^-\mu^+\mu^-$ ,  $\mu^+\mu^-e^+e^-$ ,  $e^+e^-e^+e^-$  (decadimento del bosone di Higgs in due bosoni Z)
- Per darvi l'“ebbrezza” di scoprire qualcosa di nuovo ai dati reali sono mischiati anche alcuni decadimenti “simulati” di particelle non ancora osservate (ma possibili in alcuni scenari)
  - **Z'** (“partner” del bosone Z associato ad una nuova forza debole).
  - **Gravitone** (mediatore della gravità)

# Lavoriamo insieme...

Aprire su un browser l'agenda e scegliere la vostra giornata



<https://agenda.infn.it/event/50460/>

# Identificazione di particelle

Identifichiamo particelle o gruppi di particelle tra le seguenti:

- elettrone ( $e^-$ )/positrone ( $e^+$ )
- muone ( $\mu^-$ )/anti-muone ( $\mu^+$ )
- fotone ( $\gamma$ )
- neutrino/antineutrino ( $\nu$ )
- **jet** (fiotto di particelle raggruppate in “cono”)

Esempi e esercizi → in agenda scegliete “ESERCIZIO Z”

# Identificazione di eventi

Eventi di segnale:

1.  $\gamma\gamma$   
(decadimento del bosone di Higgs)
2.  $\mu^+ \mu^- / e^+ e^-$   
(decadimento del bosone **Z** ma anche della **J/ψ**, della **Υ** e di altre eventuali particelle)
3.  $\mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^- / \mu^+ \mu^- e^+ e^- / e^+ e^- e^+ e^-$   
(decadimento del bosone di Higgs in due bosoni Z)

Eventi di fondo (rumore):

- **Jets**
- $e \nu, \mu \nu$  (stati finale per il decadimento del bosone W)

# Indenficazioni di eventi con Hypatia

- Aprite il programma Hypatia (sul Desktop)
- Aprite il file di dati di test con
  - **File → Read Event Locally**
  - Cercate il file

`/home/ATLAS/exercise2_Z.zip`

- Procedete all'identificazione riempiendo la tabella in **“VISUALIZZAZIONE EVENTI”** sottosezione **“ESERCITAZIONE PRATICA”**

Ora passate ad analizzare i  
dati in autonomia!

# Analisi dei dati

- Aprite il programma **Hypatia** (sul Desktop)
- Aprite il vostro file di dati
  - **File** → **Read Event Locally**
  - Caricate il file che vi è stato assegnato  
**/home/ATLAS/dir01/groupX.zip**  
(X=A,B,...)
- Ogni volta che trovate una coppia di fotoni, elettroni, muoni o 4 leptoni (muoni o elettroni) caricate i dati sulla finestra della massa invariante (**Invariant Mass Window**). Se l'evento è un evento di fondo non caricate nulla. Trovate informazioni dettagliate nella sezione "**AL LAVORO!**", sottosezione "**VAI!**"

# Analisi dei dati

- Quando avrete analizzato gli eventi eseguite i seguenti passi
  - Dalla finestra “**Invariant mass window**” salvate i dati selezionando dal menu

**File → Export Invariant Masses**

- Andate al link **OPlot** in agenda  
<https://cernmasterclass.uio.no/OPlot/index.php>
- Entrate come **student** (user: ippog / pwd: imc)
- Selezionate la **data, l'istituto, il gruppo** di dati (**il nostro è 1**) e poi la lettera del vostro campione.
- Caricate il file che avete salvato in precedenza.