

Investigando l'infinitamente piccolo: La fisica al Large Hadron Collider del CERN

Alessandra Betti

Ricercatrice Universitaria

Dipartimento di Fisica della Sapienza Università di Roma e INFN Roma



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA



Mi presento

- Ricercatrice in fisica sperimentale delle particelle elementari presso il Dipartimento di Fisica di Sapienza Università di Roma
- Associata all'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
- Membro della Collaborazione ATLAS del CERN



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Sezione di Roma



Perché sono qui oggi? Progetto INFN Art&Science

- **Progetto Art&Science:** Progetto dell'INFN per promuovere la cultura scientifica nelle scuole superiori coniugando i linguaggi di scienza e arte
- **Varie fasi del progetto:** seminari, visite a musei e laboratori, campionato di creatività, realizzazione di una composizione artistica, esposizione e valutazione delle opere
 - i vincitori della competizione artistica/scientifica nazionale saranno invitati a partecipare ad un master sul tema arte e scienza al CERN di Ginevra e in altri laboratori nazionali dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
- **Oggi:** Seminario scientifico in cui vi racconterò di cosa mi occupo nella mia attività di ricerca



IL CERN



Il CERN: European Council for Nuclear Research (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)

Laboratorio internazionale Europeo situato a Ginevra e fondato nel 1954 da 12 stati fondatori:
Belgium, Denmark, France, the Federal Republic of Germany, Greece, Italy, the Netherlands, Norway, Sweden, Switzerland,
the United Kingdom and Yugoslavia

Oggi è composto da 24 stati membri:

Austria, Belgium, Bulgaria, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland,
France, Germany, Greece, Hungary, Israel, Italy, Netherlands, Norway,
Poland, Portugal, Romania, Serbia, Slovakia, Spain, Sweden, Switzerland
and United Kingdom



Più di 10 000 scienziati da tutto il mondo,
con circa 110 nazionalità diverse,
lavorano qui insieme!

Le motivazioni

Un grande laboratorio internazionale Europeo dove studiare le **particelle elementari** e il loro comportamento per rispondere a domande che ancora non hanno una risposta:

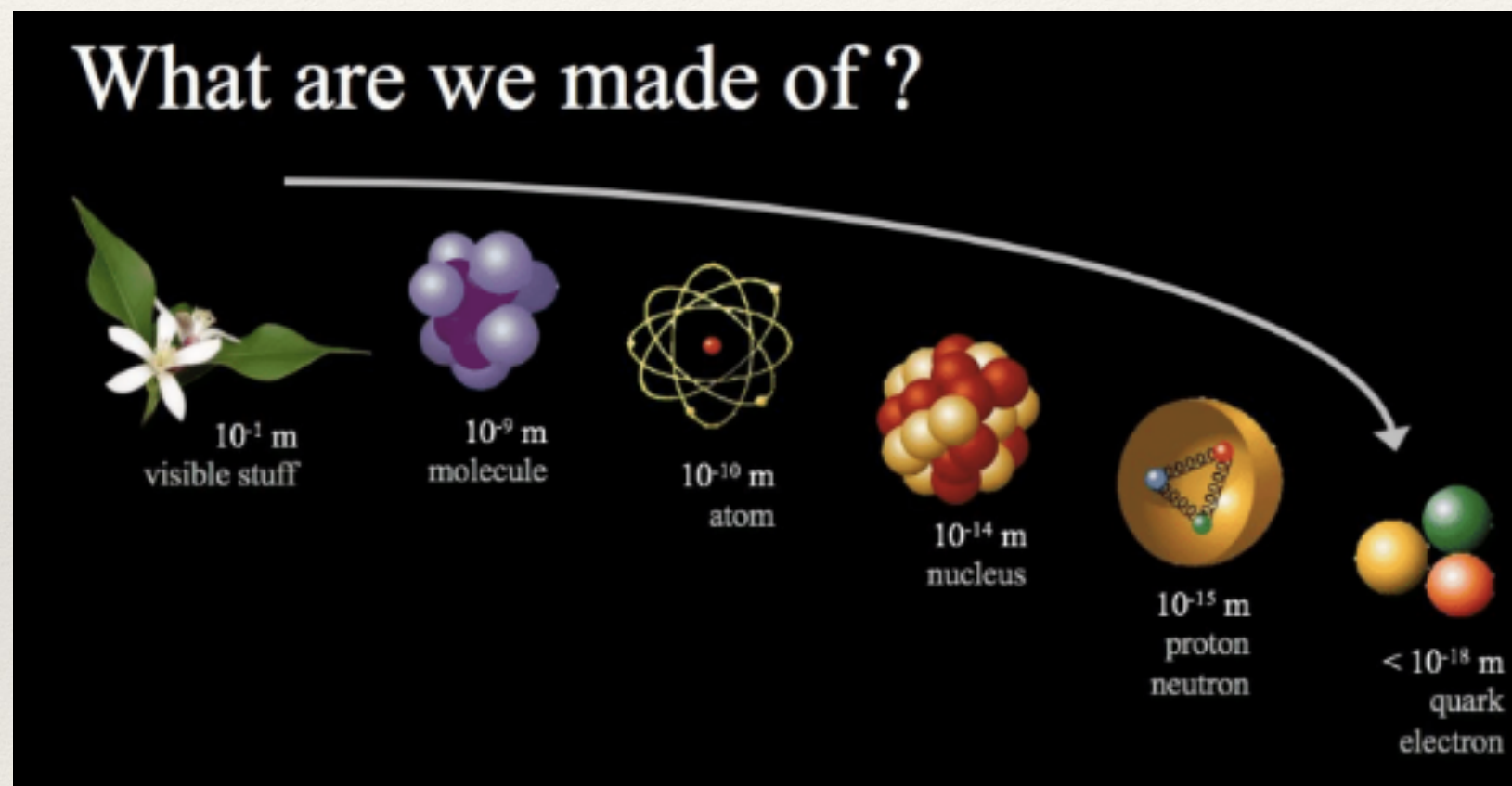
- I quark e i leptoni sono veramente particelle fondamentali? O sono composti da particelle ancora più piccole?
- E' possibile includere la gravità in una teoria unica che include tutte e quattro le interazioni fondamentali? (un altro bosone mediatore della forza di gravità?)
- Qual è l'origine della massa delle particelle? (Il bosone di Higgs?)
- Che cos'è la materia oscura?



Particelle elementari: Cosa sono e come si studiano

Particelle

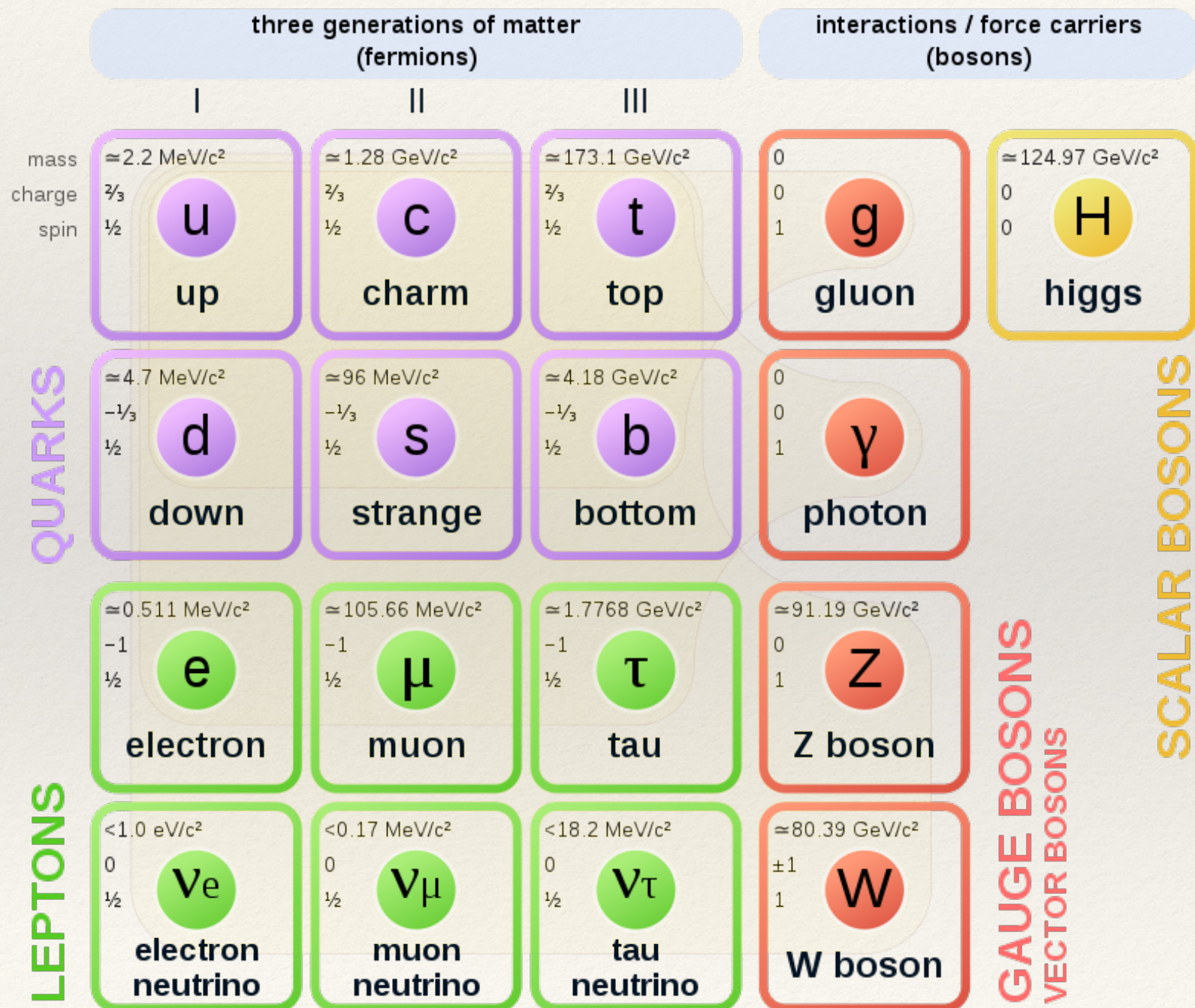
Costituenti fondamentali della materia (particelle sub-atomiche)



- **elementari**: particelle che non possono essere scomposte
- **composte**: sono formate dall'unione di altre particelle che si legano tramite una forza

Particelle elementari nel Modello Standard

Standard Model of Elementary Particles



Fermioni:
costituenti della materia

Bosoni:
mediatori delle forze

I fermioni interagiscono
tramite lo “scambio” di
bosoni che mediano
l’azione delle forze, ogni
fermione ha diverse
“cariche” che definiscono
quali interazioni può fare

Bosone di Higgs:
fornisce massa alle
particelle

Interazioni tra particelle elementari

Elettromagnetica:

forza tra particelle con carica elettrica (quark e leptoni carichi)
mediata dal fotone



Forte:

forza tra particelle con carica di colore (quark)
mediata dal gluone (tiene insieme i nuclei)

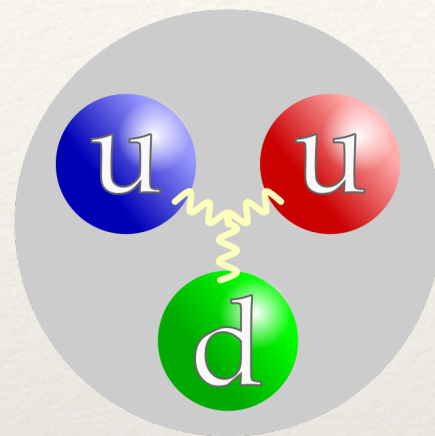
Debole:

forza tra particelle con carica debole (quark e leptoni)
mediata dai bosoni Z e W (responsabile dei decadimenti beta)

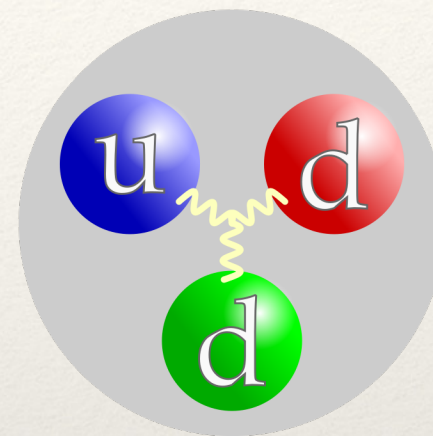


Particelle composte

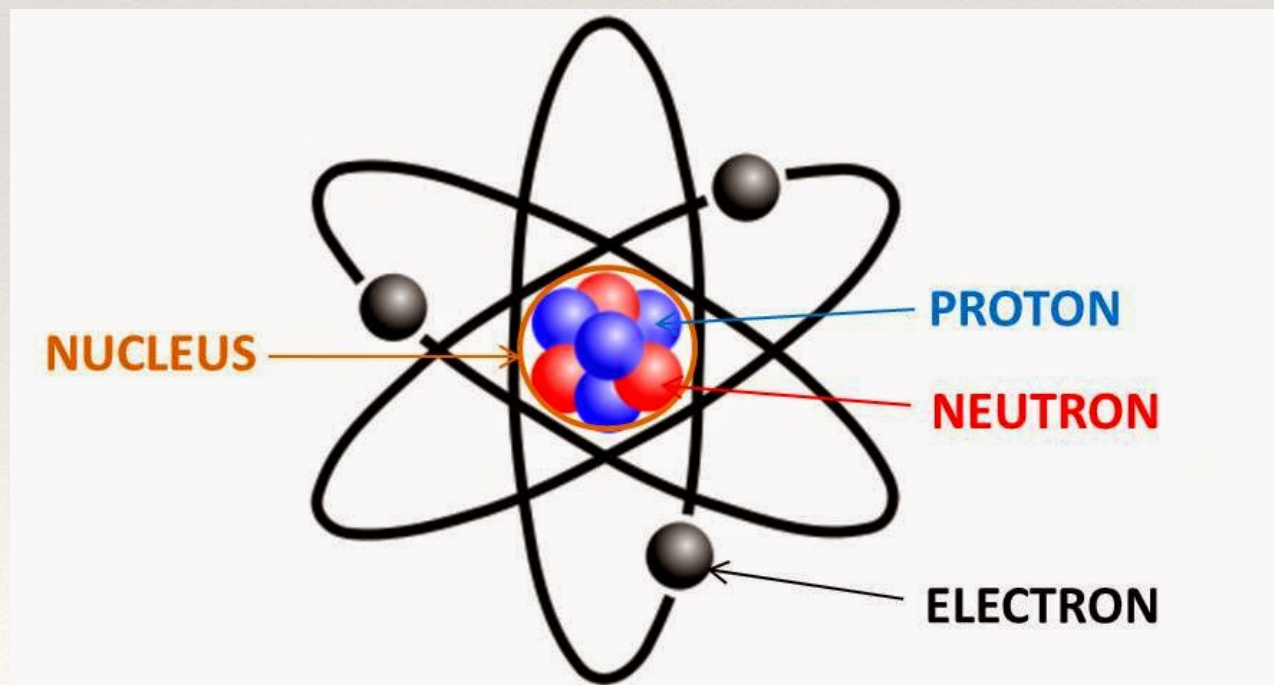
Protone



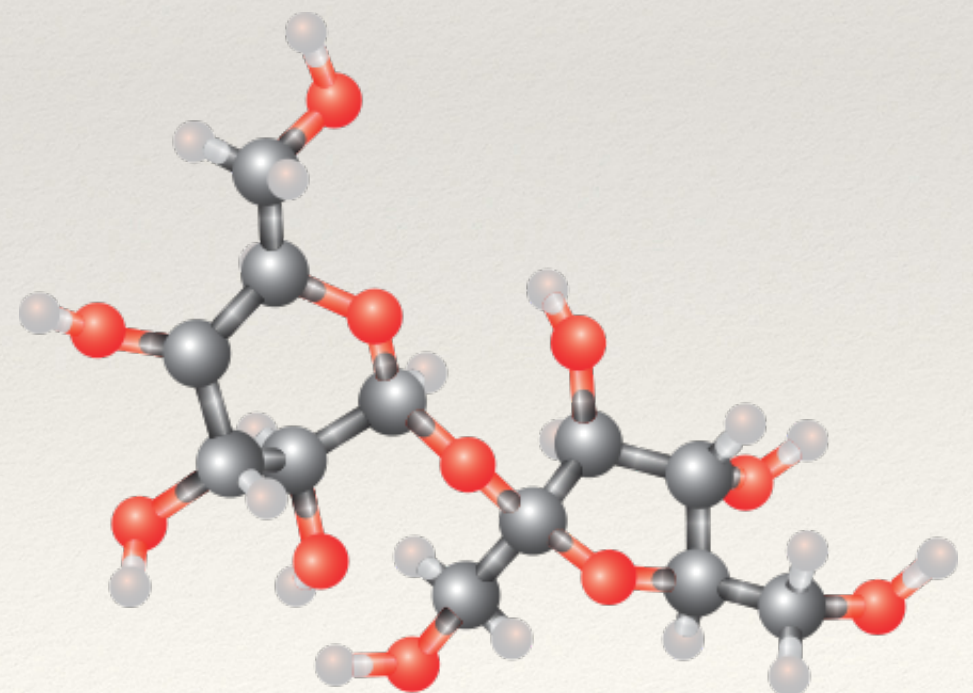
Neutrone



Atomo



Molecola

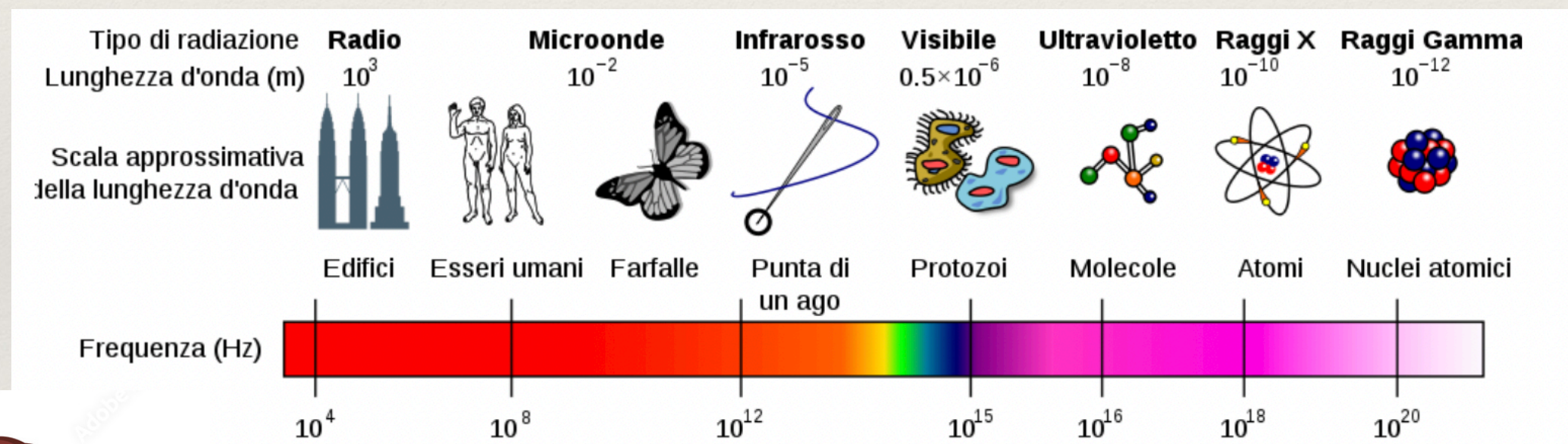


Come si studiano le particelle elementari e le loro interazioni?

Per studiare particelle di dimensioni molto molto piccole servono
“microscopi potentissimi”

La dimensione che riesco a studiare è proporzionale a $1/E$ della sonda utilizzata
(E = energia della sonda)

→ Maggiore è l'energia della sonda minore è la dimensione che riesco a studiare!



$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$$\text{Cellule: } d \simeq 10^{-7} \text{ m} \rightarrow E \simeq 10^{-19} \text{ J} = 1 \text{ eV}$$

$$\text{Quark: } d \simeq 10^{-18} \text{ m} \rightarrow E \simeq 10^{-6} \text{ J} \simeq 10^{12} \text{ eV} = \text{TeV}$$

Come si studiano le particelle elementari e le loro interazioni?

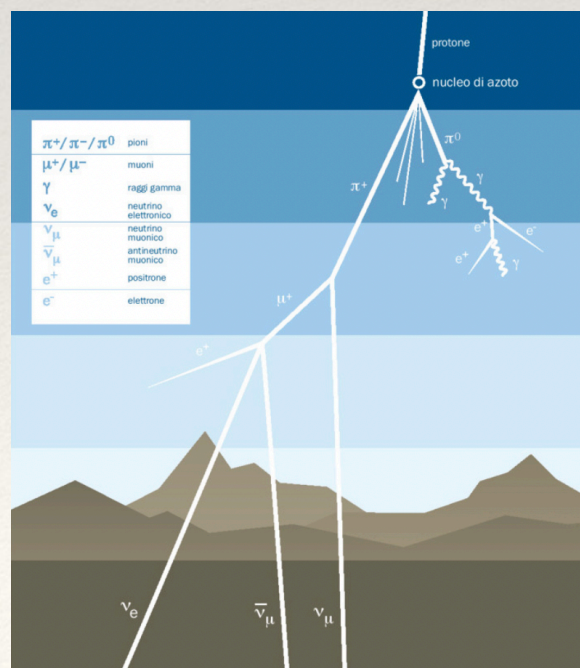
Per studiare particelle subatomiche servono sonde con energie dell'ordine del TeV

→ Una fonte di questo tipo di sonde così energetiche sono i raggi cosmici!

Raggi cosmici: particelle di alta energia che bombardano la terra provenendo dallo spazio galattico ed extra-galattico;

includono i nuclei di tutti gli elementi, protoni, anti-protoni, elettroni e positroni, che interagendo con l'atmosfera terrestre producono una varietà di altre particelle

→ Soprattutto in passato molti esperimenti di fisica delle particelle elementari si basavano sull'uso delle particelle provenienti dai raggi cosmici come sonde di alta energia



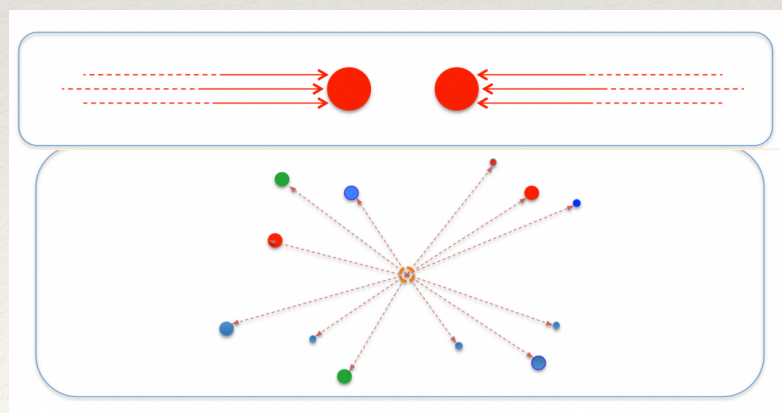
Come si studiano le particelle elementari e le loro interazioni?

Per studiare particelle subatomiche servono sonde con energie dell'ordine del TeV

→ Una fonte di questo tipo di sonde così energetiche sono gli acceleratori di particelle!

Rispetto all'uso di particelle provenienti dai raggi cosmici,
l'uso di acceleratori di particelle ha il vantaggio di
poter “scegliere e controllare” il tipo e l'energia della particella usata come sonda
e di poter ottenere un grandissimo numero di misure in minor tempo

→ Oggi molti esperimenti di fisica delle particelle elementari
sono esperimenti agli acceleratori



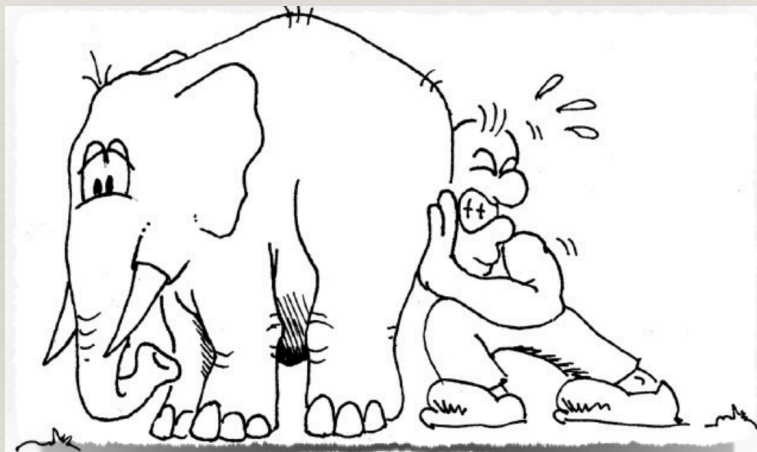
Acceleratori di particelle

Acceleratori di particelle

Macchine che producono fasci di particelle elettricamente cariche,
principalmente: elettroni, protoni o ioni carichi

campi elettrici: forniscono energia alle particelle cariche accelerandole

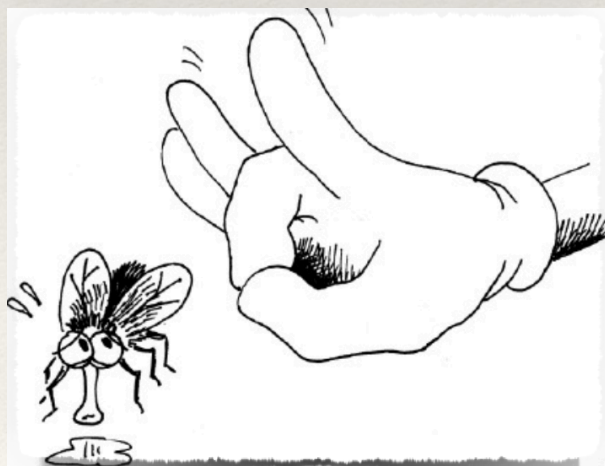
campi magnetici: curvano la traiettoria delle particelle cariche negli acceleratori circolari sfruttando la forza di Lorentz



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

$$\vec{a} = \frac{q}{m} \vec{E}$$

più le particelle sono leggere più è facile accelerarle

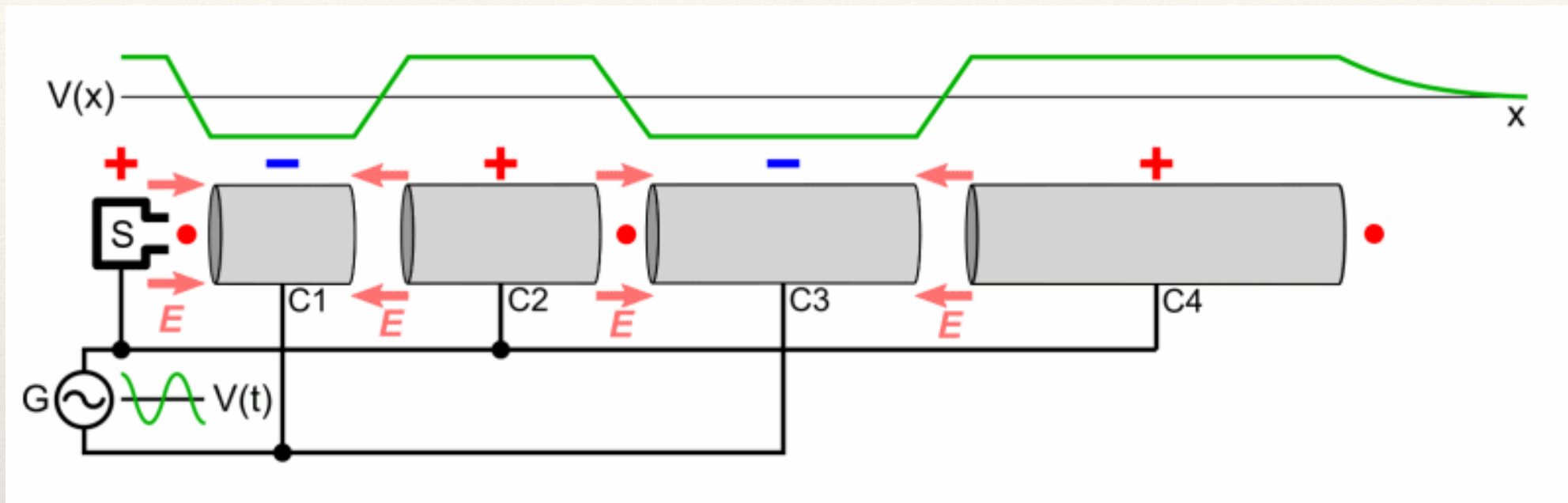


$$\vec{F}_L = q\vec{v} \times \vec{B}$$

$$r = \frac{mv}{qB}$$

più le particelle sono leggere e lente più è facile curvarle

Acceleratori lineari



Serie di **elettrodi cilindrici disposti in linea retta** a cui viene applicata una **differenza di potenziale pulsata** tale che nello spazio tra due cilindri ci sia sempre un **campo elettrico in fase con il passaggio della particella**

→ la particella riceve una “spinta” da parte del campo elettrico
ogni volta che attraversa lo spazio tra due cilindri

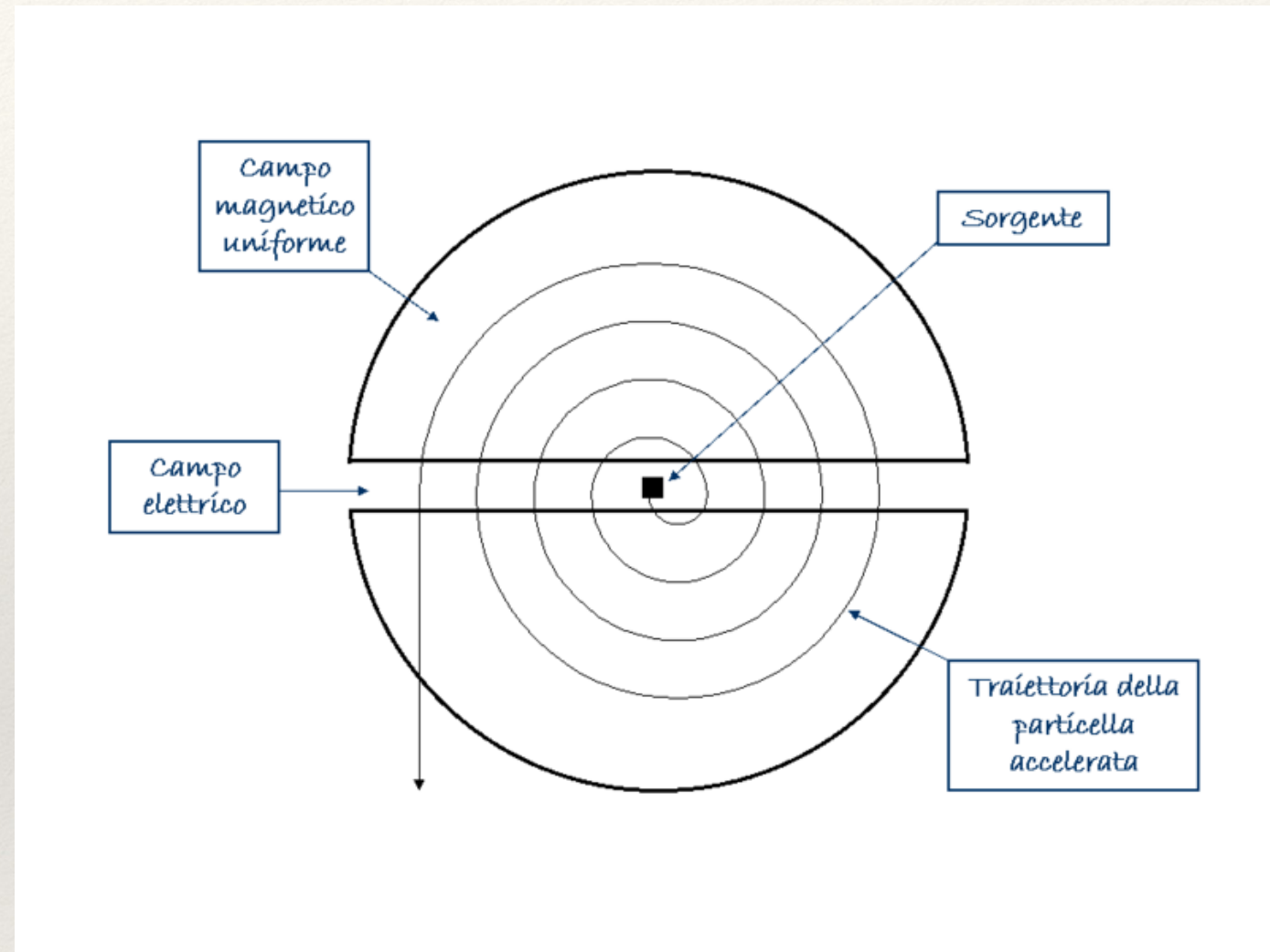
- Limitazioni: le particelle passano una sola volta attraverso ogni cavità accelerante quindi necessitano di grandi lunghezze per raggiungere alte energie

Ciclotroni

Due elettrodi semicircolari tra cui c'è una differenza di potenziale alternata e sono immersi in un campo magnetico uniforme perpendicolare al piano degli elettrodi

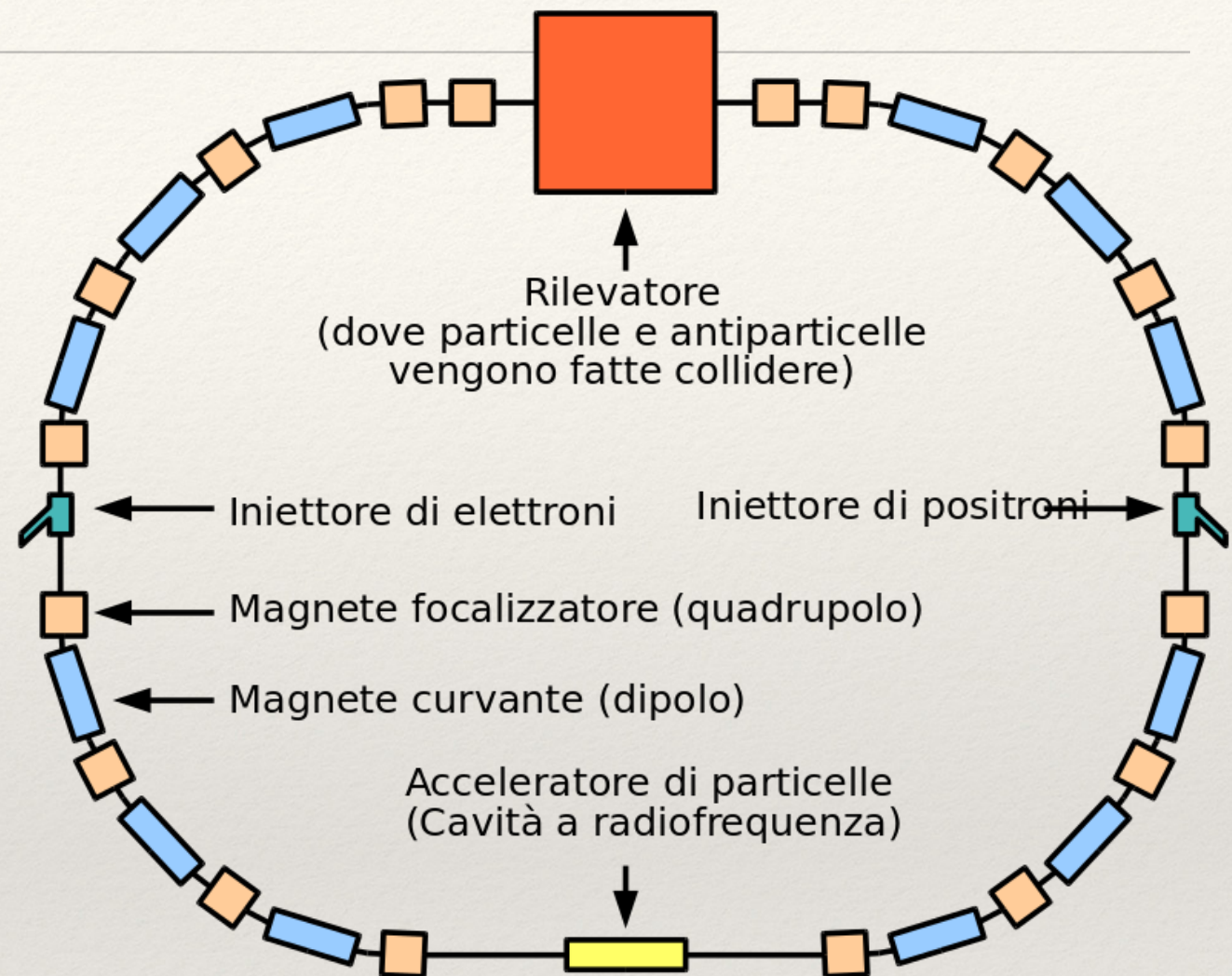
→ la particella subisce un'accelerazione ogni volta che passa nello spazio tra gli elettrodi e viene curvata dal campo magnetico, il diametro dell'orbita aumenta all'aumentare della velocità e le particelle percorrono un'orbita a spirale fino a quando il fascio non fuoriesce dal bordo del dispositivo

- Limitazioni: l'energia che si può raggiungere è limitata dalla frequenza costante del campo elettrico in quanto particelle a velocità relativistiche non si trovano più in fase con il campo elettrico



Sincrotroni

Derivano dai ciclotroni, ma **il campo elettrico ha una frequenza variabile e il campo magnetico ha un'intensità variabile** in funzione dell'aumentare dell'energia dalle particelle **in modo da mantenere l'orbita del fascio di particelle a raggio costante**



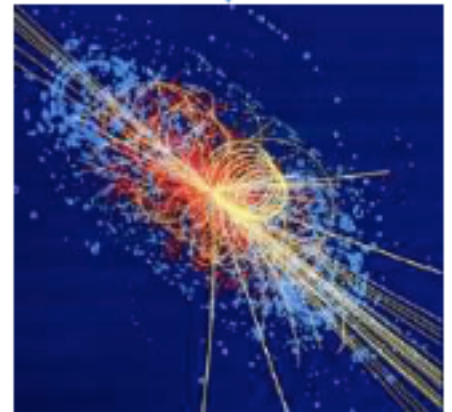
- Limitazioni: Particelle cariche in moto circolare a velocità relativistiche perdono energia per emissione di fotoni. Quando l'energia persa equivale a quella fornita ad ogni ciclo, il fascio non può essere ulteriormente accelerato.
- Questo limite viene superato costruendo acceleratori di raggio sempre maggiore per raggiungere energie sempre maggiori.

A cosa servono gli acceleratori di particelle?

Nati nell'ambito della ricerca fondamentale in fisica delle particelle per studiare come si comportano le particelle nelle loro interazioni

oggi usati anche (in realtà principalmente) per molti altri scopi:

- scopi medici (radioterapia, adroterapia e produzione di isotopi radioattivi)
- studio della struttura dei materiali
- scopi industriali (impiantazione di ioni, sterilizzazione)



Fisica delle alte energie



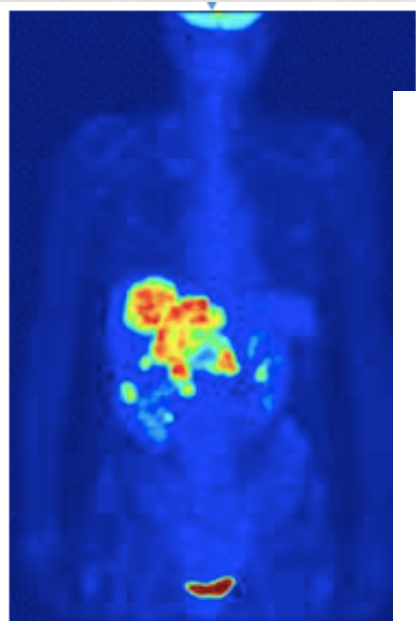
Produzione di raggi X e γ per fisica della materia



Impiantazione ionica



Radioterapia e Adroterapia

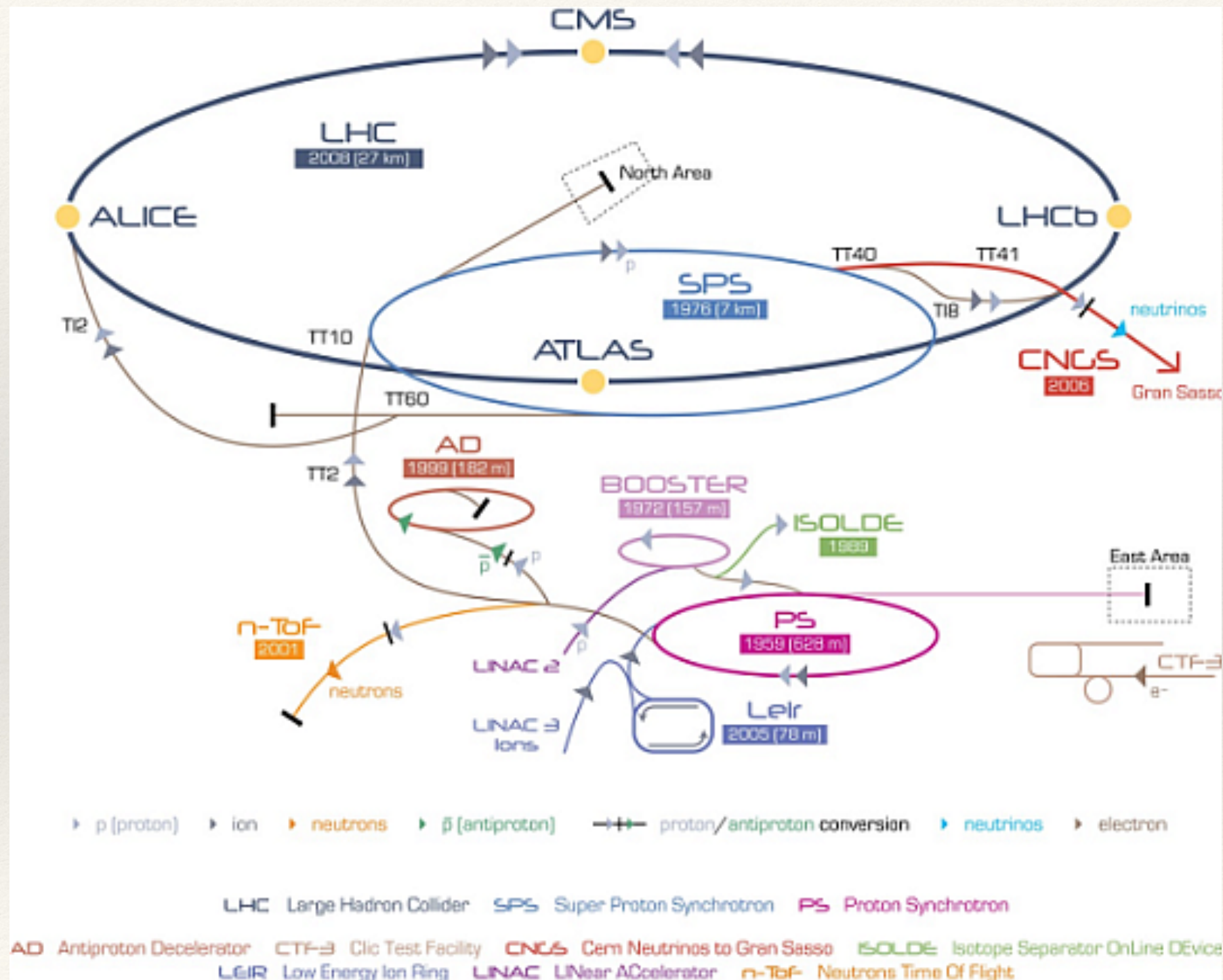


Produzione di radioisotopi

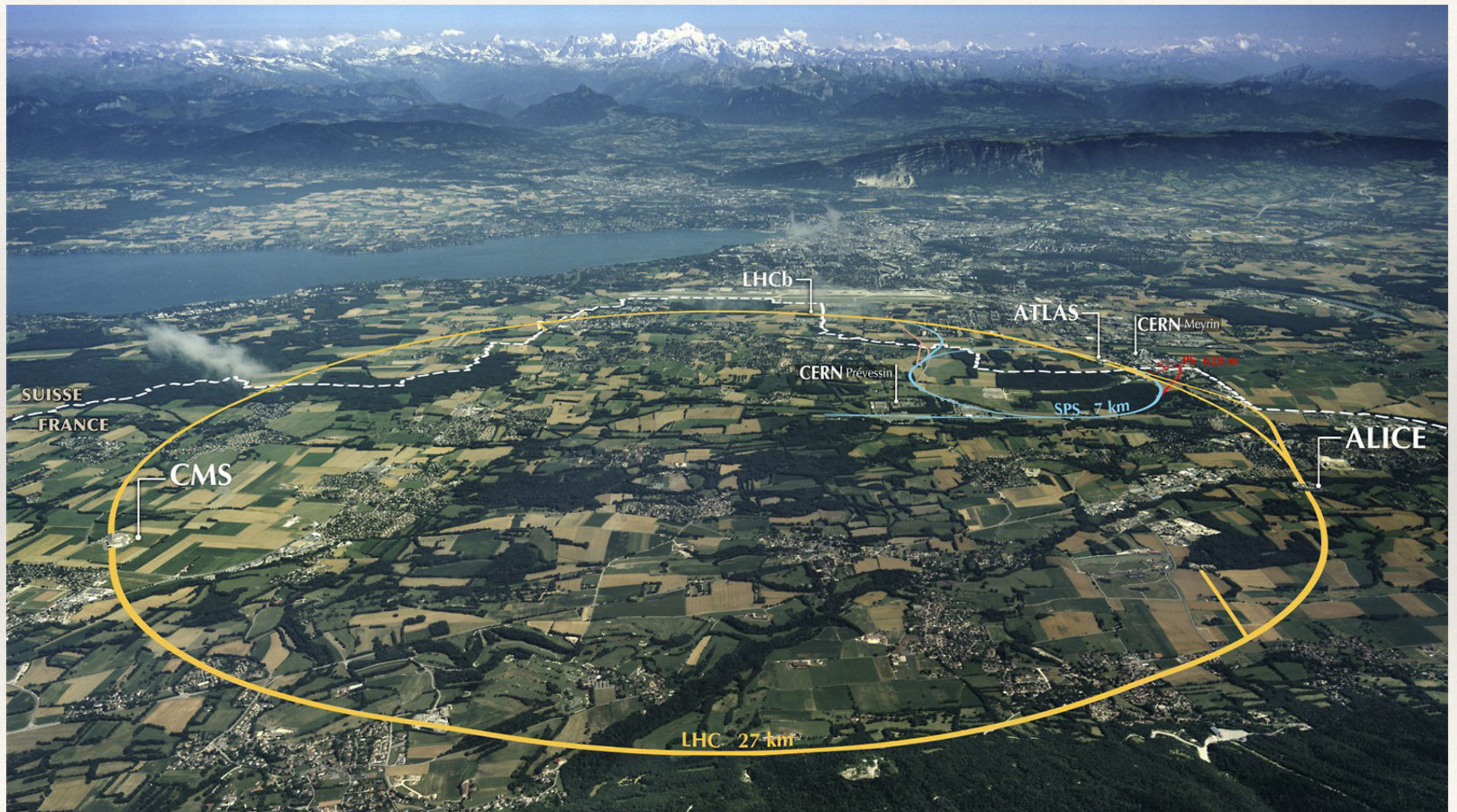


Esperimenti al Large Hadron Collider del CERN

Il complesso di acceleratori del CERN



LHC: Large Hadron Collider



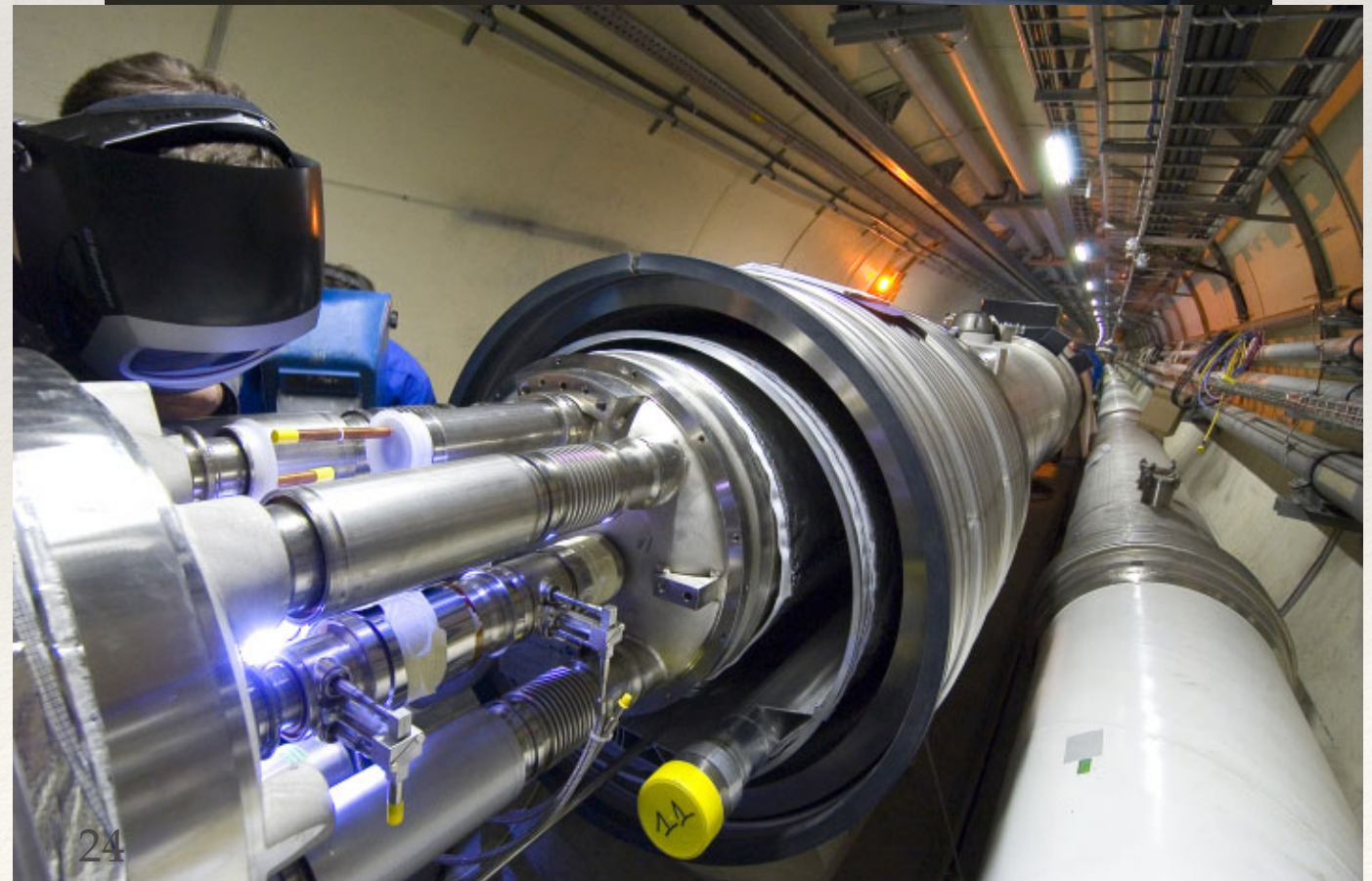
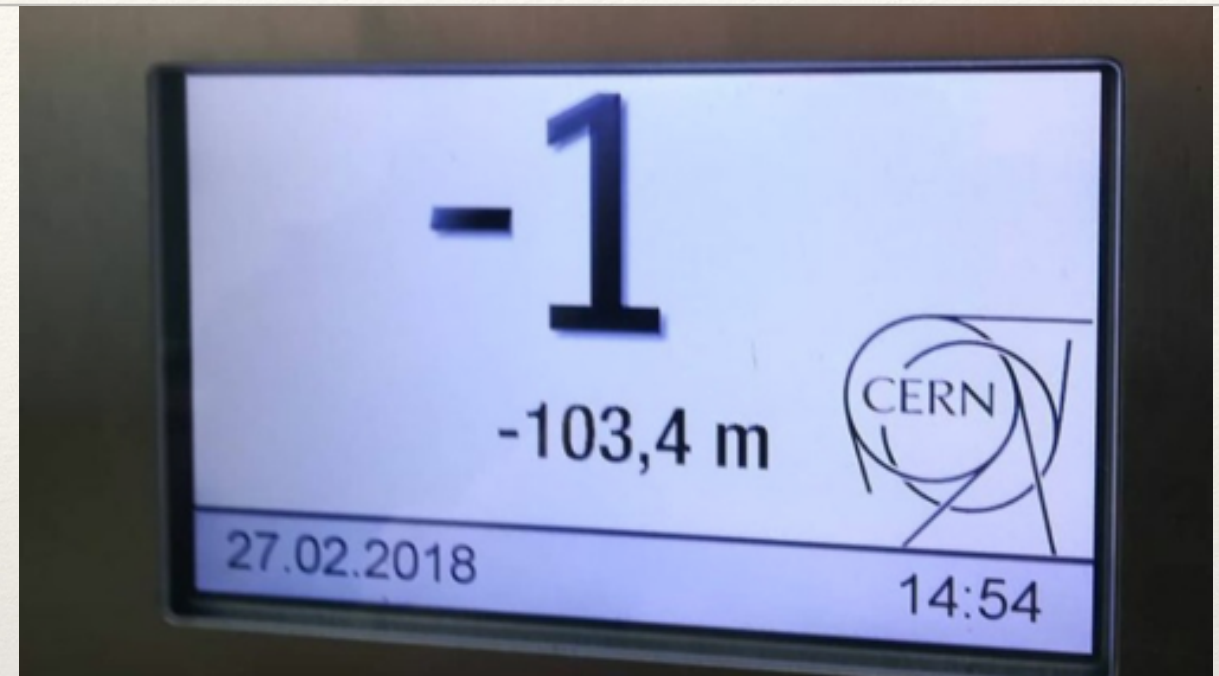
LHC: Large Hadron Collider

- Si trova 100 m sotto terra
- E' un acceleratore circolare con una circonferenza di 27 km
- Accelera protoni fino a 7 TeV e fa collidere due fasci di protoni ad un'energia di 14 TeV
- I protoni raggiungono una velocità $v = 99.9999991\% c$

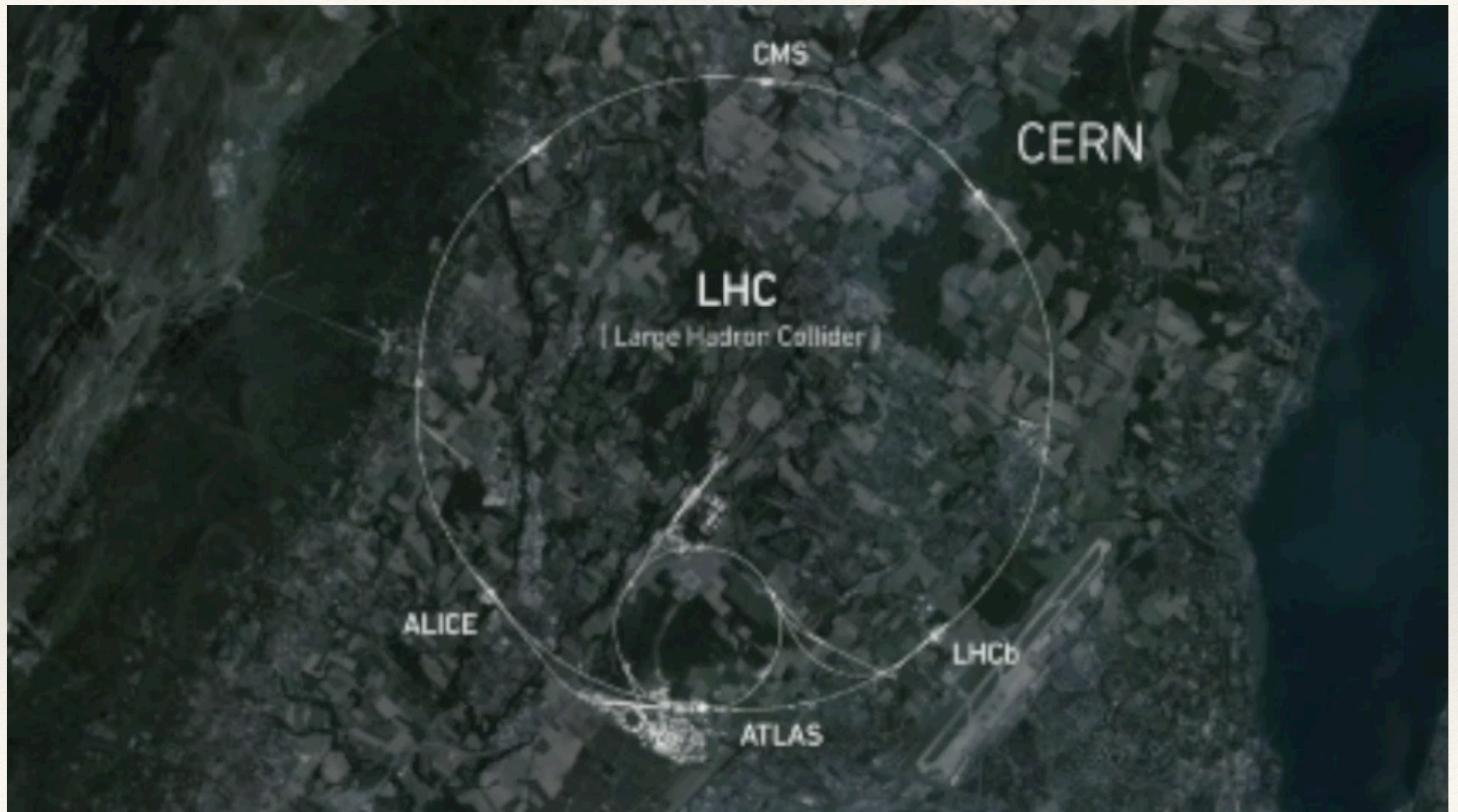
Curiosità:

- In ogni run di LHC i protoni circolano per circa 10 ore, percorrendo una distanza pari alla distanza andata e ritorno dal CERN a Nettuno (2×4500 milioni di km)
- Per funzionare consuma la stessa energia consumata da tutte le case degli abitanti del cantone di Ginevra (500000 abitanti)
- I magneti di LHC lavorano ad una temperatura di -270°C

E' Il più grande e più potente acceleratore di particelle mai costruito

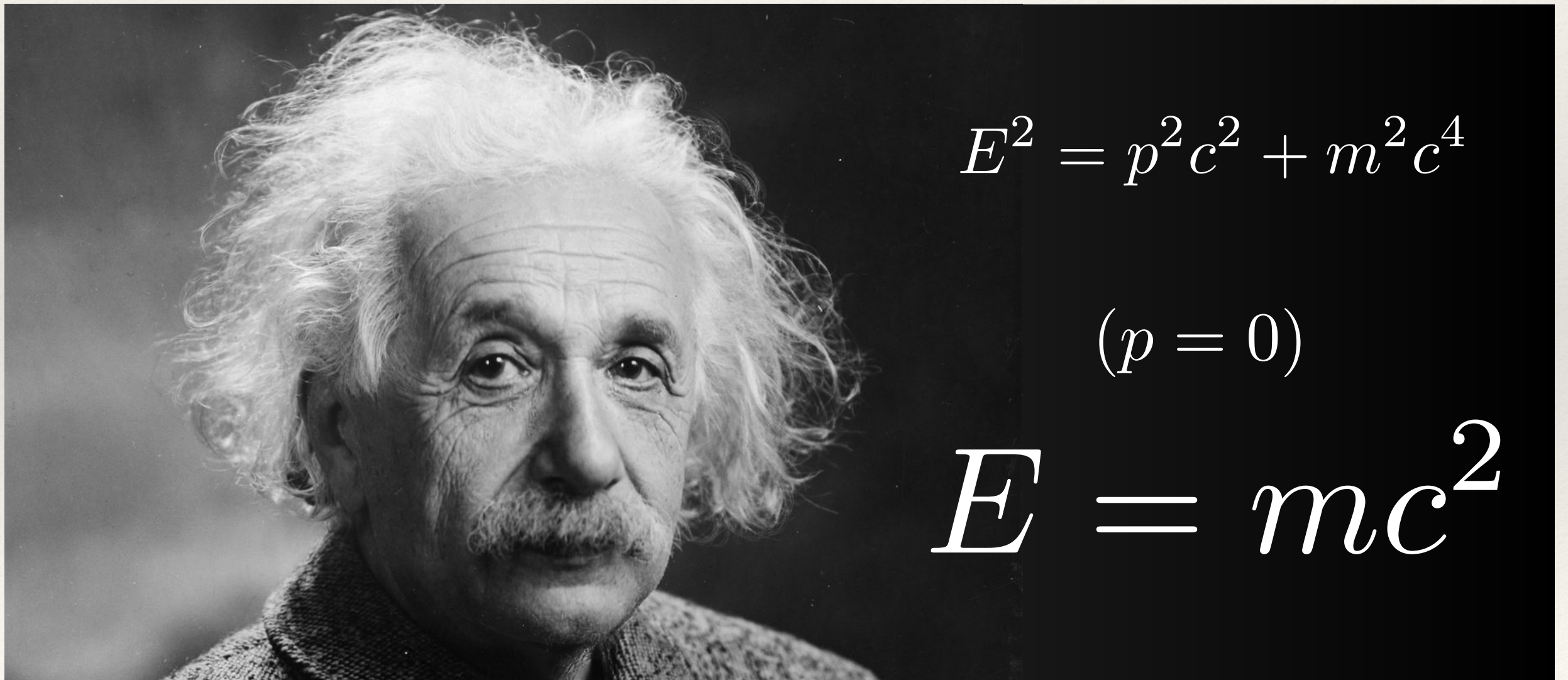


LHC: Large Hadron Collider

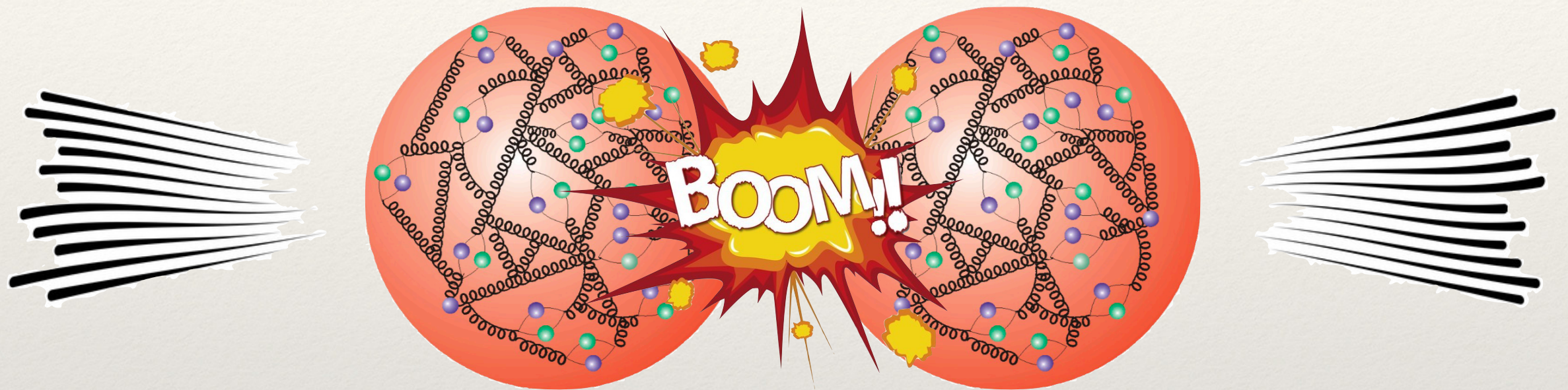


Produzione di particelle

Energia e massa sono equivalenti

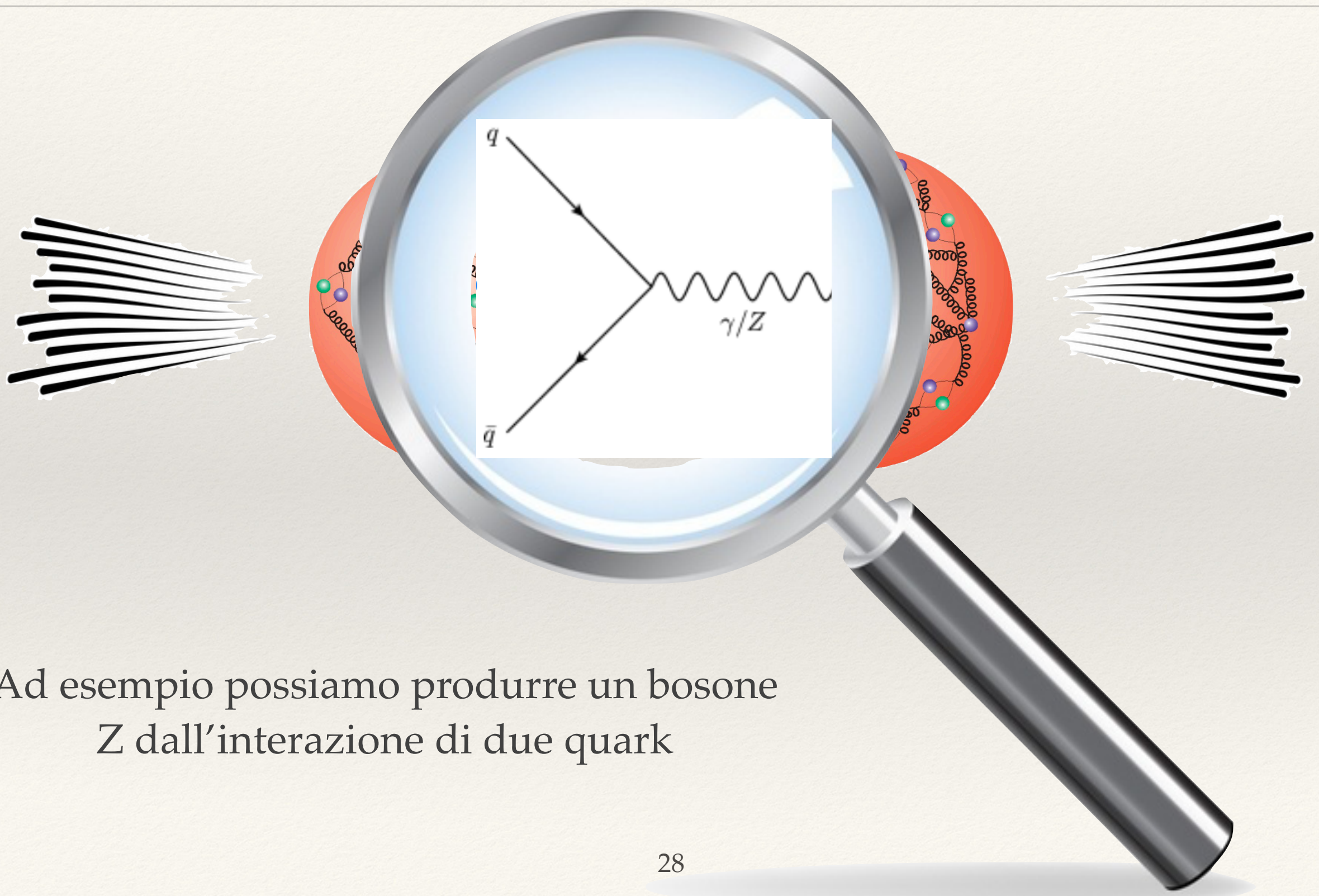


Produzione di particelle



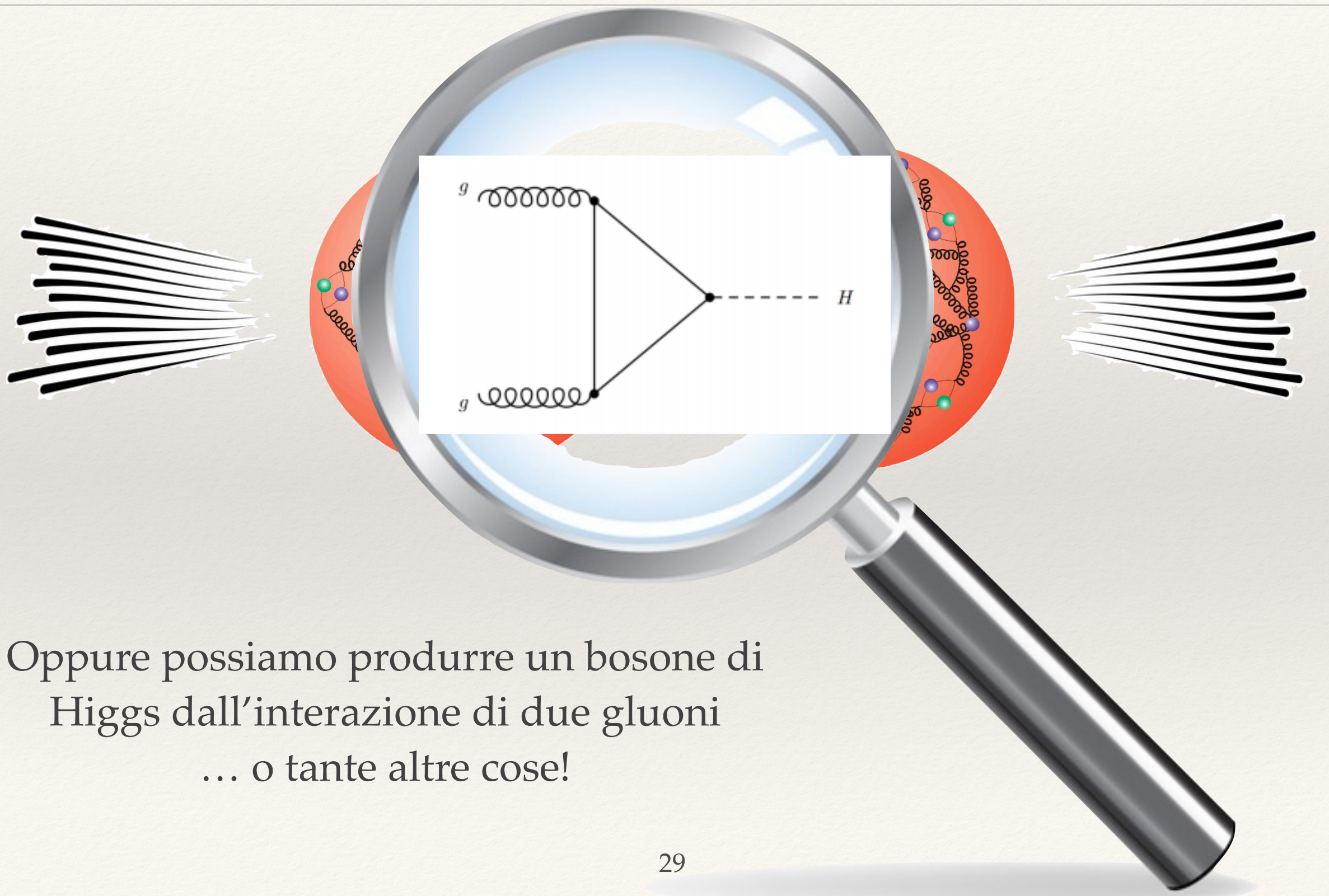
Quando i protoni collidono i quark (o gluoni) contenuti al loro interno interagiscono e la loro energia si trasforma in massa e energia di altre particelle che vengono prodotte nella collisione

Produzione di particelle



Ad esempio possiamo produrre un bosone
Z dall'interazione di due quark

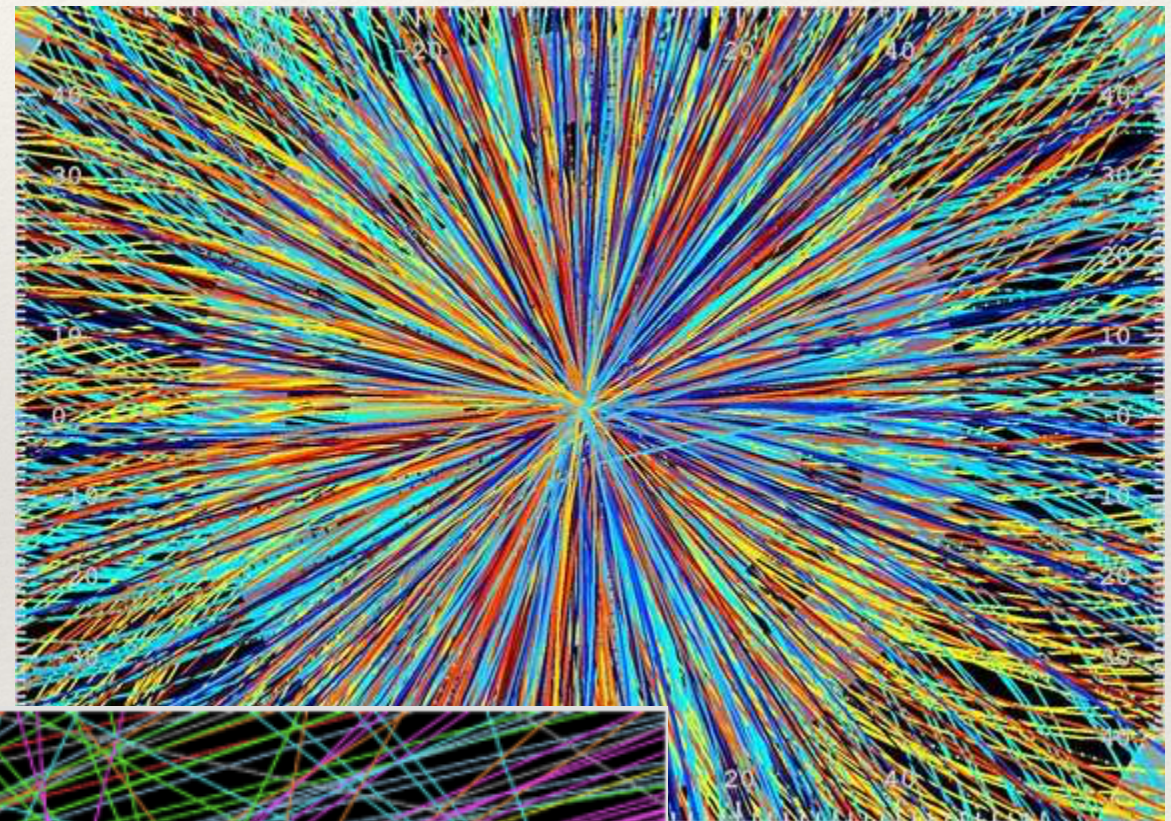
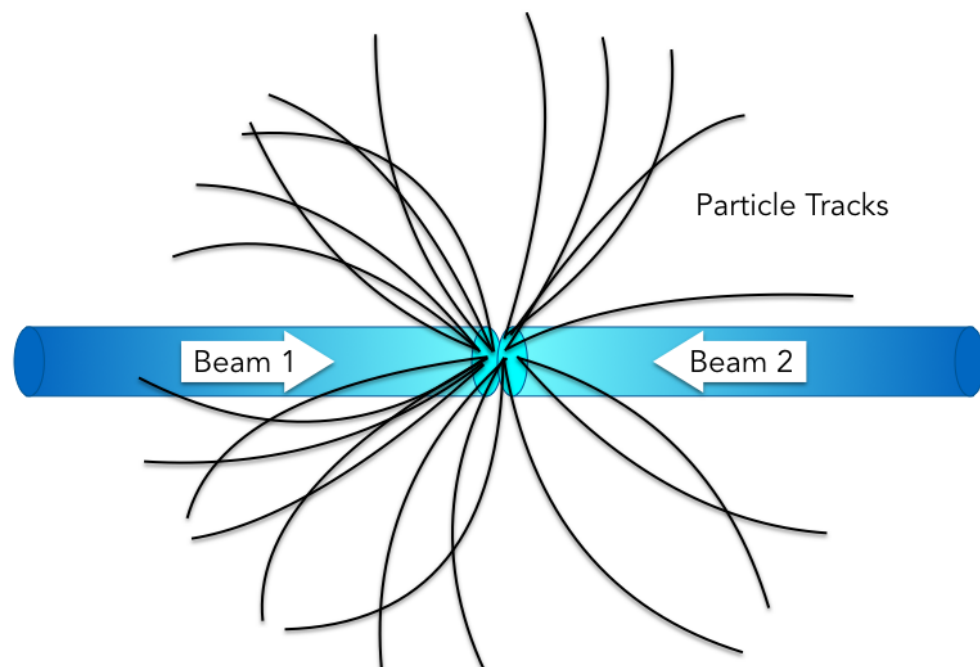
Produzione di particelle



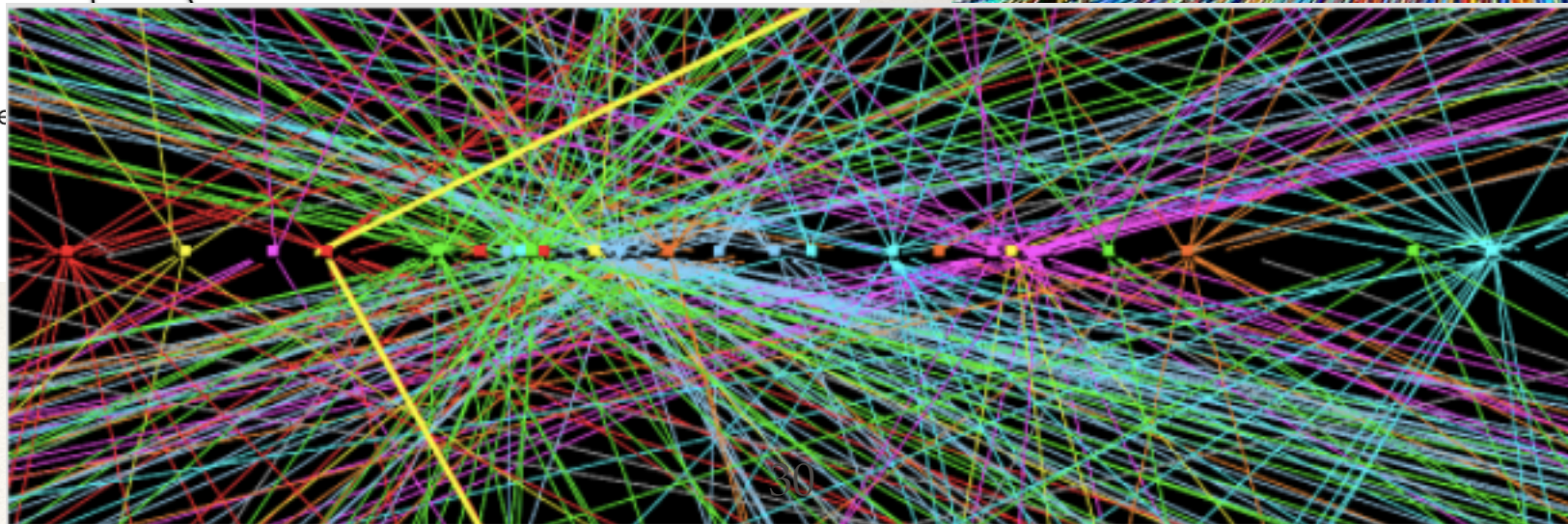
Oppure possiamo produrre un bosone di Higgs dall'interazione di due gluoni
... o tante altre cose!

Produzione di particelle

In ogni collisione dei fasci di protoni avvengono tantissime interazioni
(circa 60 per collisione)
e tantissime particelle vengono prodotte



b). When the two beams overlap



Rivelatori di particelle

Le particelle prodotte nella collisione dei protoni attraversano i rivelatori posti attorno al punto di collisione

Ogni tipo di particella interagisce in modo particolare con il materiale del rivelatore, lasciando una segnatura che la distingue e questo ci permette di riconoscerle

Guardando i segnali lasciati dalle particelle nel rivelatore è come se guardassimo una foto dell'evento e di tutte le particelle che sono state prodotte nella collisione

I rivelatori sono come delle gigantesche fotocamere

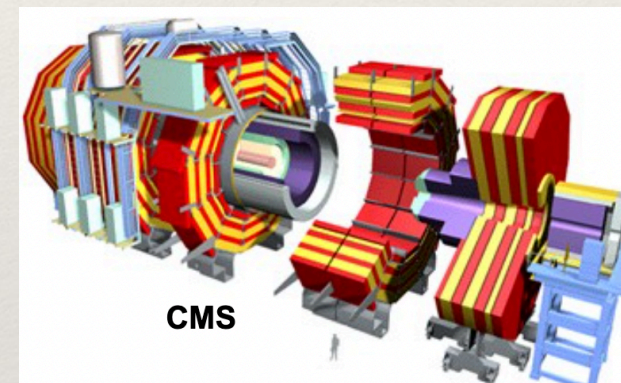
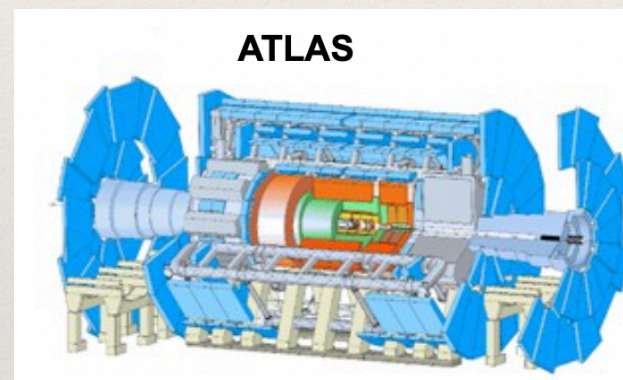


I rivelatori ATLAS e CMS

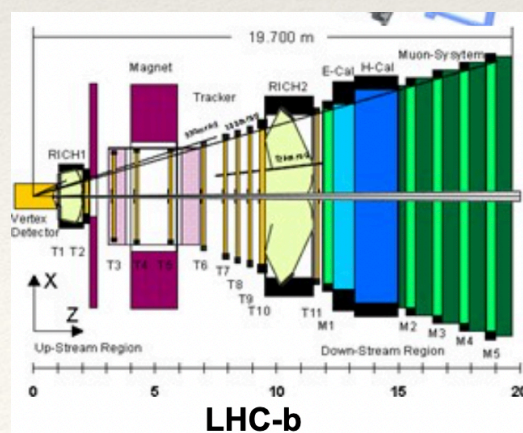
Ad LHC ci sono 4 principali esperimenti collocati in 4 punti di interazione dei fasci di protoni:

ATLAS e CMS: studiano le proprietà del bosone di Higgs e cercano nuove particelle

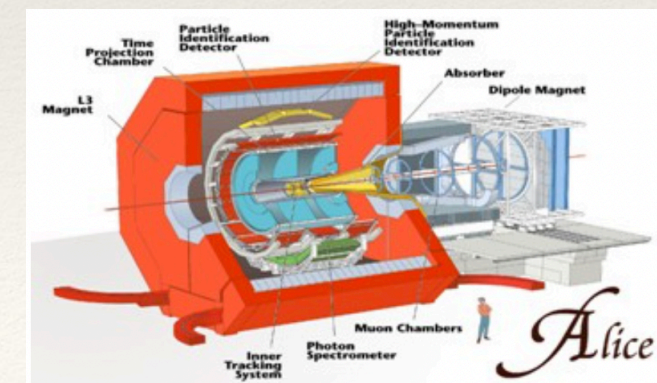
Rivelatori molto simili basati sugli stessi principi di funzionamento,
Lavorano in parallelo per poter confermare le osservazioni fatte da ciascun esperimento e per poter combinare i risultati delle loro ricerche ed ottenere risultati con maggiore precisione



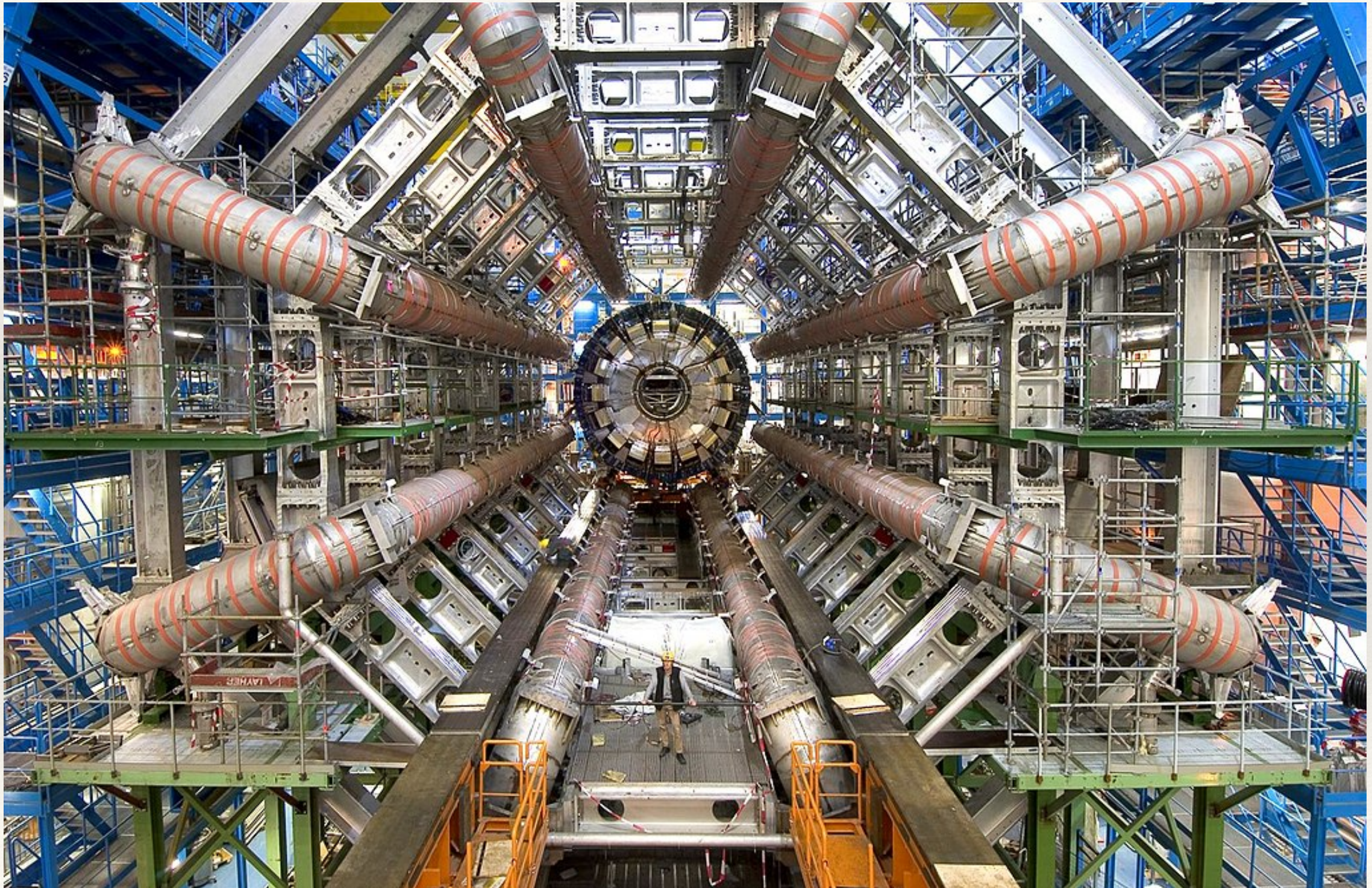
LHCb: analizza le proprietà dei mesoni B (composti da quark b) per studiare le interazioni deboli



ALICE: analizza i prodotti di collisioni di ioni di Piombo per studiare le interazioni forti



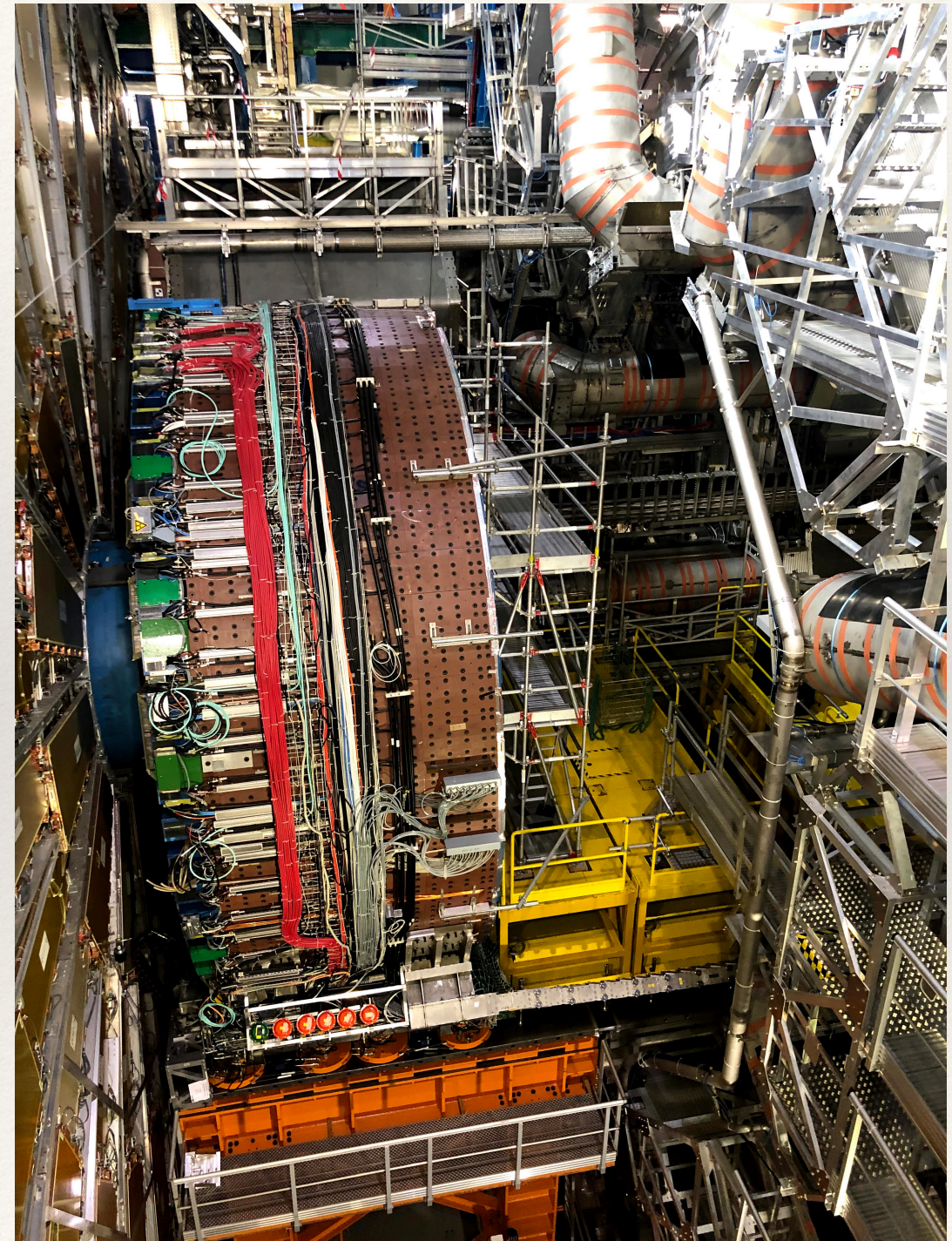
Il rivelatore ATLAS a LHC



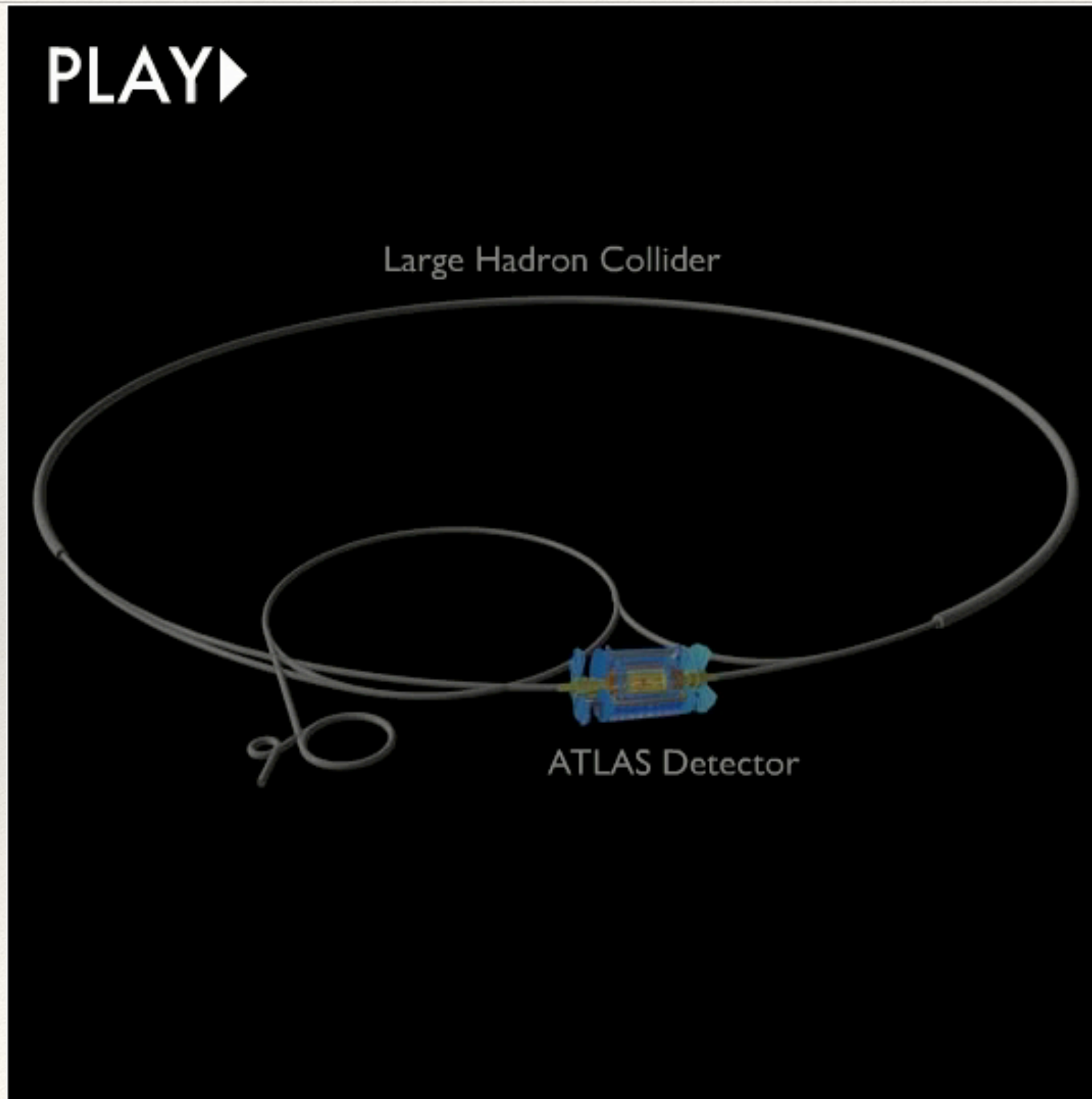
Rivelatore ATLAS a LHC

Il più grande rivelatore di particelle mai costruito

- Ha le dimensioni di un cilindro, con 46 m di lunghezza e 25 m di diametro
- Si trova in una caverna a 100 m sotto terra in corrispondenza di uno dei punti di collisione dei protoni di LHC
- Pesa 7000 tonnellate, circa il peso della Torre Eiffel



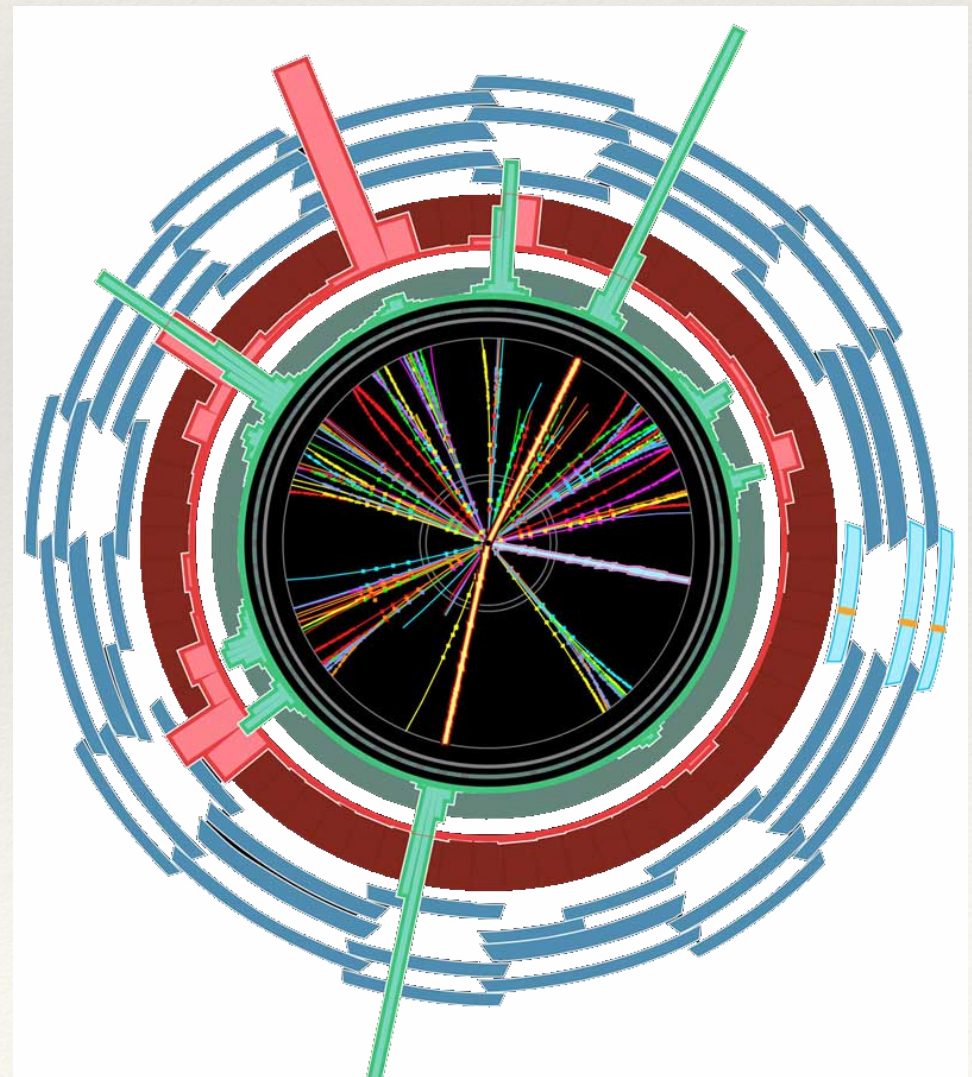
I rivelatori



I rivelatori

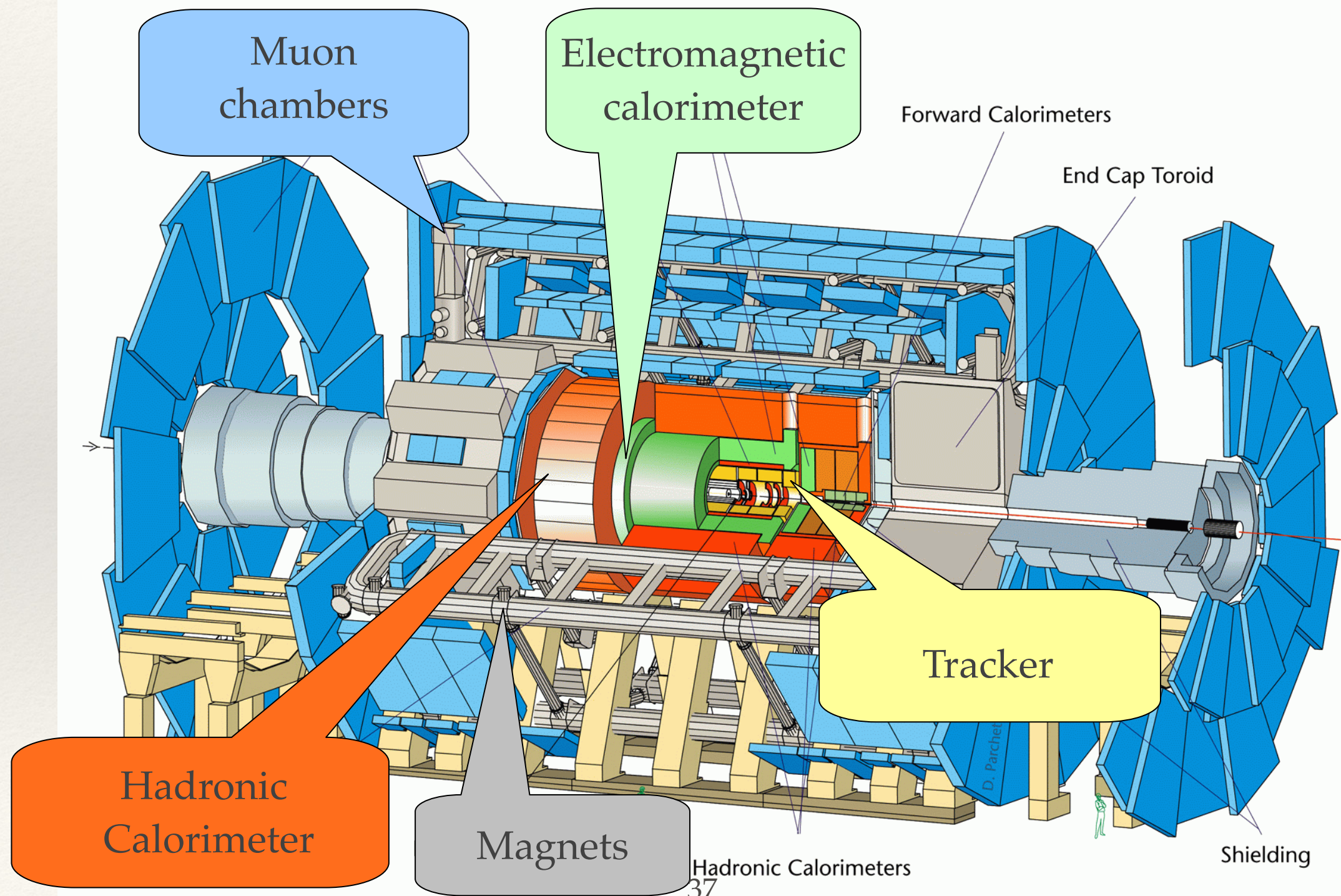
I rivelatori sono posti attorno al punto di collisione e hanno una struttura che chiamiamo “a cipolla” in quanto sono fatti a strati

Le particelle prodotte dalla collisione dei protoni al centro del rivelatore si muovono verso l'esterno attraversando i vari strati in cui vengono misurate diverse proprietà

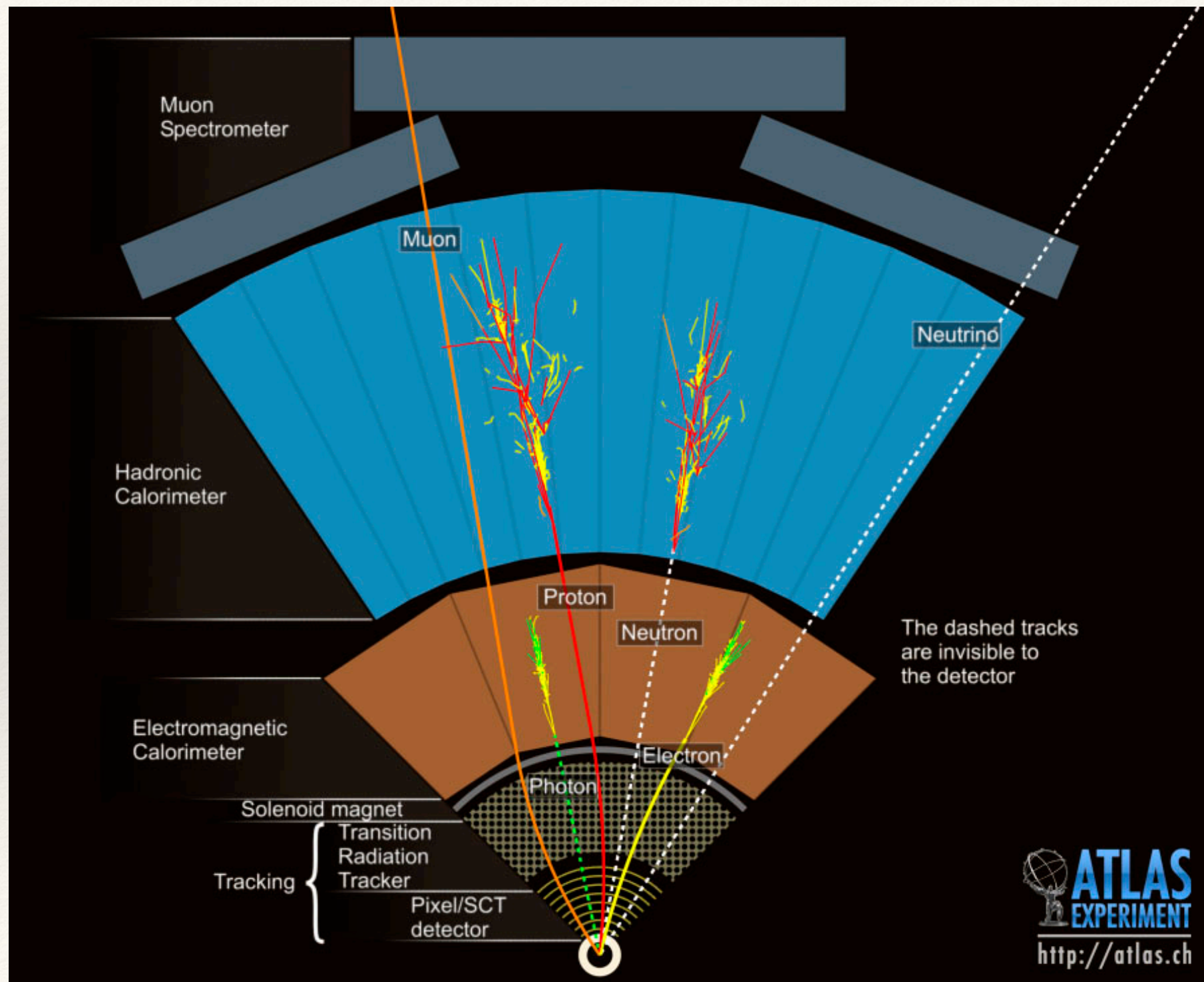


Il rivelatore ATLAS a LHC

D712/mb-26/06/97



Caratterizzazione delle particelle



Caratterizzazione delle particelle: la massa

Molte delle particelle prodotte a LHC e che vogliamo studiare decadono quasi istantaneamente e possono essere ricostruite e identificate solo tramite i loro prodotti di decadimento

Una caratteristica che usiamo per identificare le particelle a partire dai loro prodotti di decadimento è la **massa invariante**:

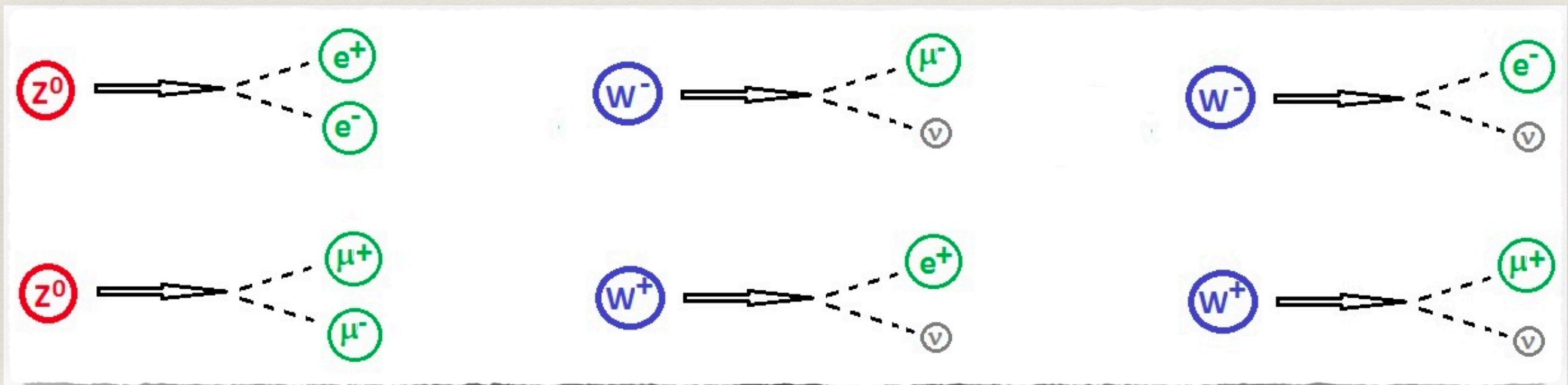
$$m_X = \sqrt{E_1 E_2 (1 - \cos \theta)}$$

Misurando l'energia e la direzione dei prodotti di decadimento possiamo calcolare la massa della particella che li ha prodotti

I bosoni Z e W

I bosoni W e Z, mediatori delle interazioni deboli,
sono stati scoperti al CERN negli anni '80

Particelle che decadono quasi istantaneamente e possono essere ricostruite e identificate solo tramite i loro prodotti di decadimento

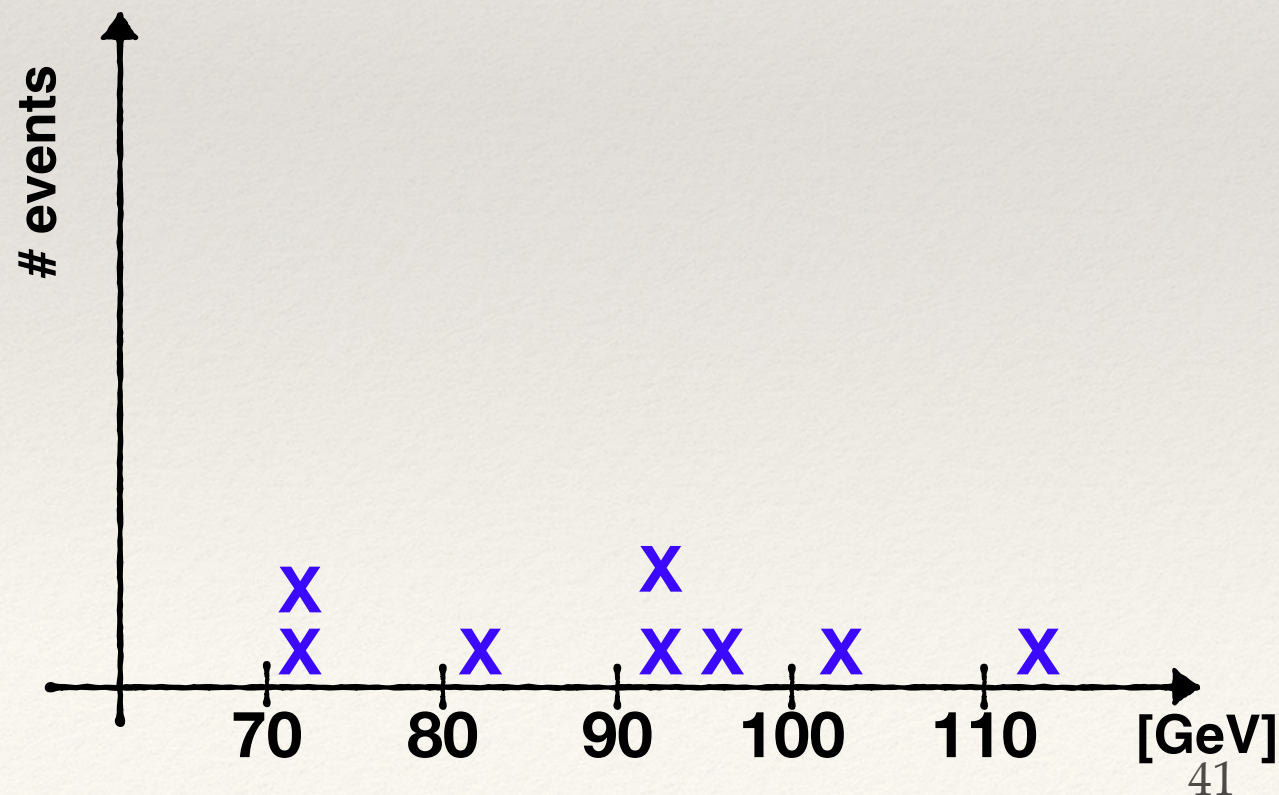


Quindi quando in una collisione p-p vengono prodotti un bosone Z o un bosone W
quello che vediamo nei rivelatori sono solo elettroni o muoni,
E studiamo queste particelle nei nostri rivelatori per identificare i bosoni Z e W

Scoperta del bosone Z

In ogni evento in cui viene prodotto il bosone Z abbiamo due elettroni o due muoni nello stato finale

Calcoliamo la massa invariante degli elettroni o muoni e riempiamo un istogramma con i valori ottenuti per ogni evento

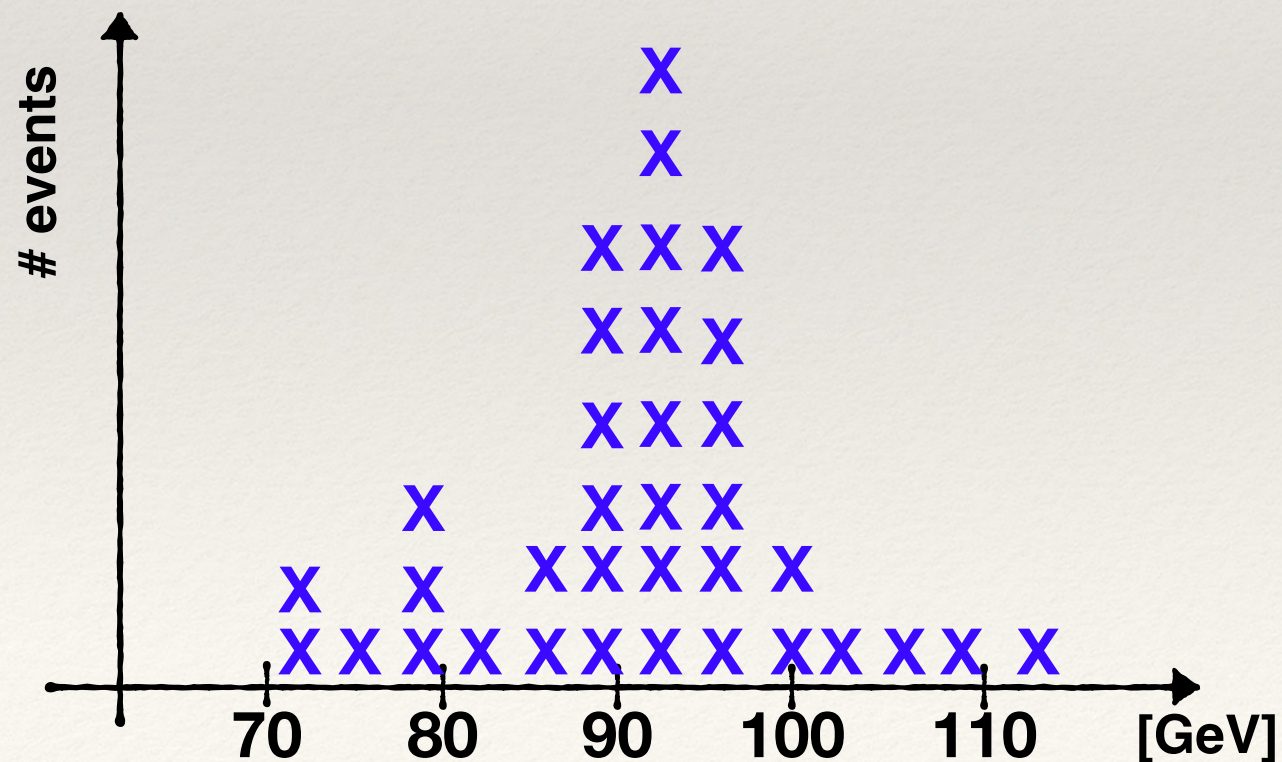


$$m_X = \sqrt{E_1 E_2 (1 - \cos \theta)}$$

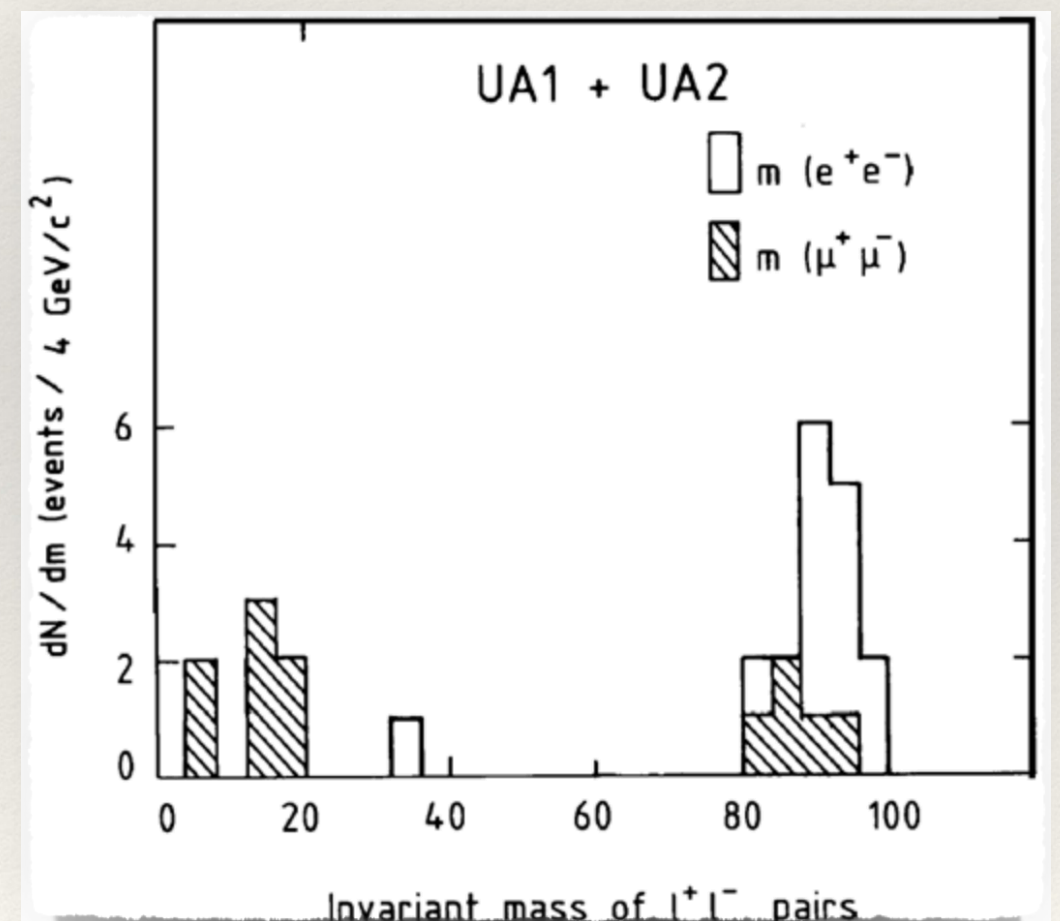
Scoperta del bosone Z

Riempiendo l'istogramma con tanti eventi,
Comparirà un picco in corrispondenza del valore della
massa del bosone Z (se il bosone Z esiste ...)

Se il picco è abbastanza grande,
possiamo annunciare di aver
scoperto il bosone Z!



Plot di scoperta del bosone Z nel 1983



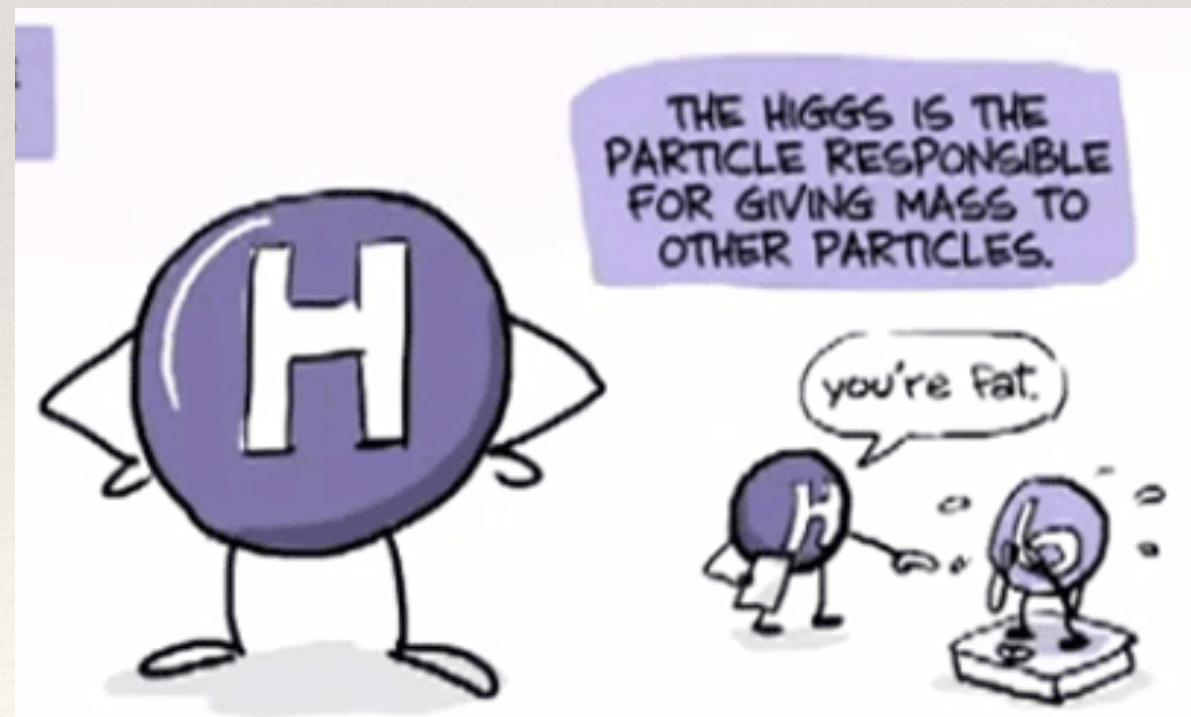
Scoperta del bosone di Higgs

Bosone di Higgs

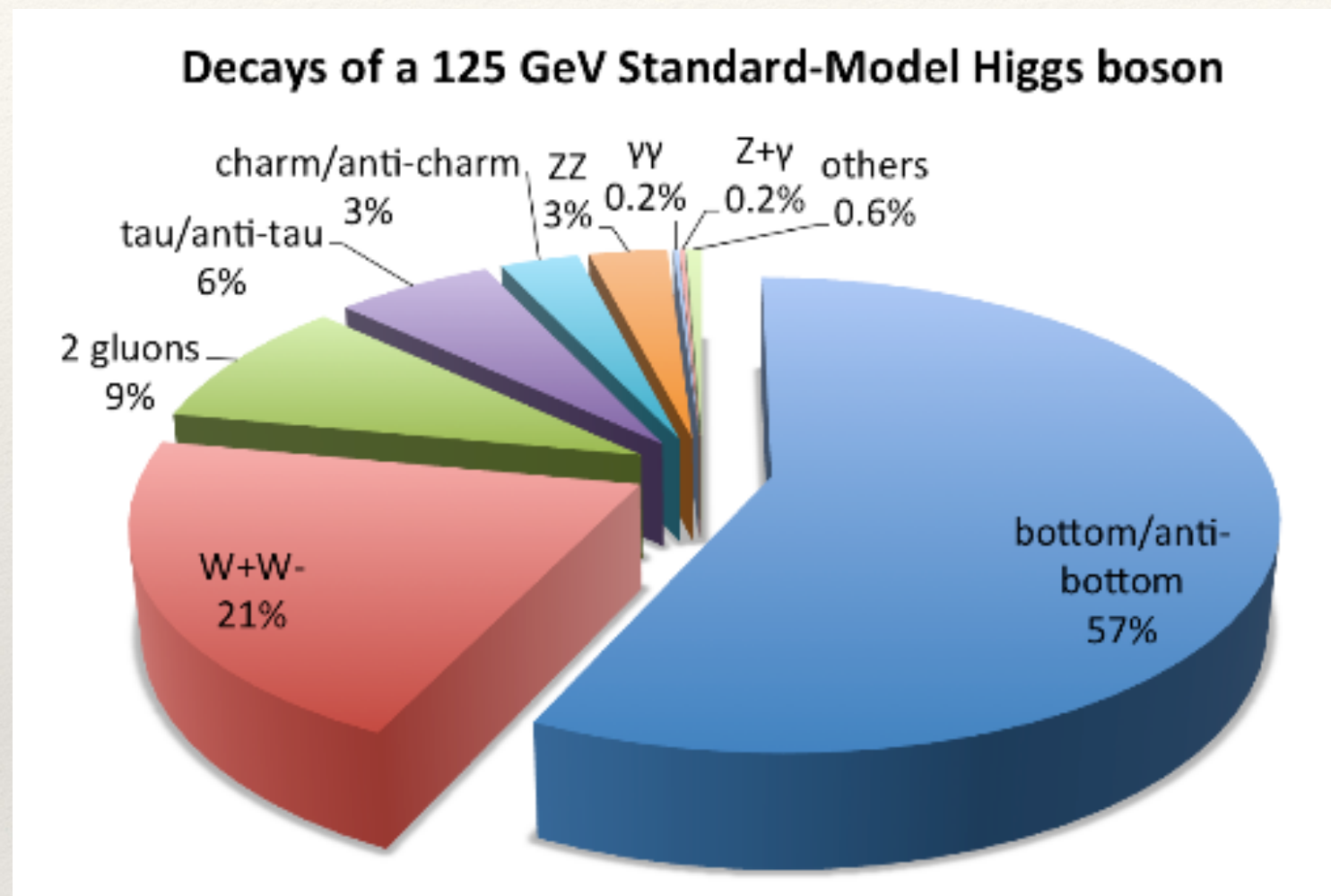
Particella prevista dal Modello Standard come la particella che fornisce la massa alle altre particelle, fino alla sua scoperta avvenuta nel 2012, era l'unica particella “mancante” del modello

Ma il bosone di Higgs che osserviamo ha veramente tutte le caratteristiche previste dal modello?

→ Lo stiamo studiando per capirlo!



Ricerca del bosone di Higgs

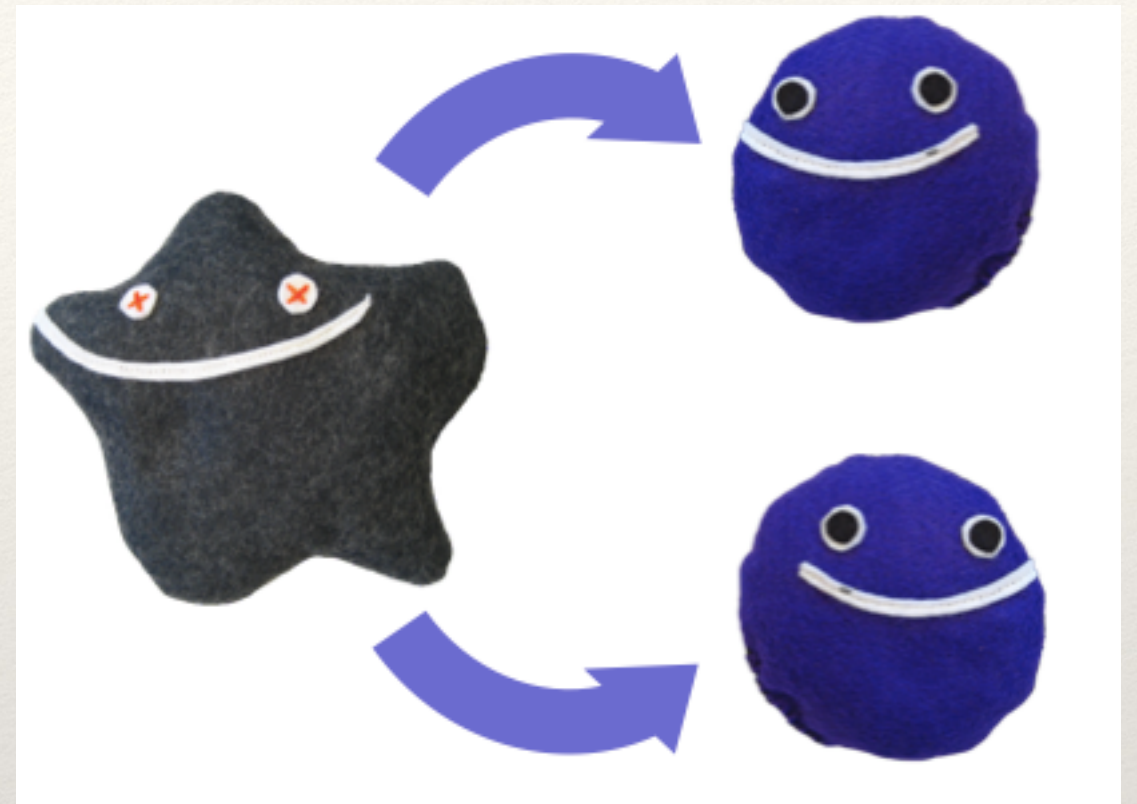
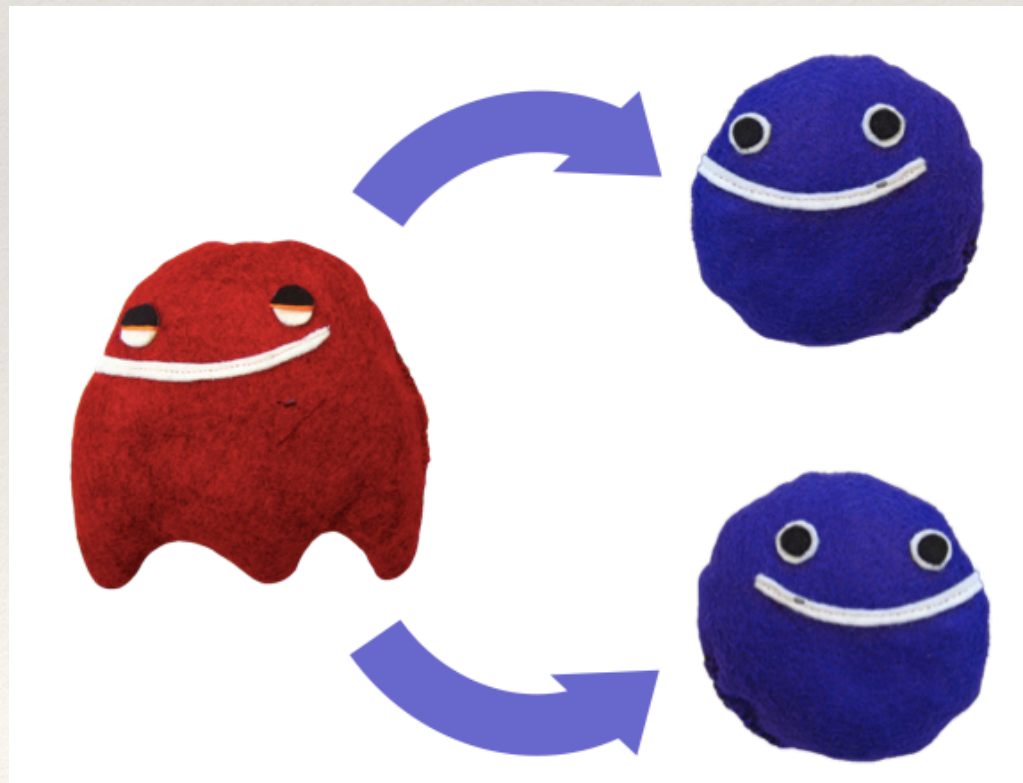


Il bosone di Higgs decade immediatamente dopo essere stato prodotto, può decadere in diversi modi, producendo stati finali con diversi tipi di particelle che possono essere osservate nel nostro rivelatore

→ possiamo osservare il bosone di Higgs indirettamente tramite i suoi prodotti di decadimento

Ricerca del bosone di Higgs nel canale di decadimento in due muoni

Il bosone di Higgs può
decadere in una
coppia di muoni
→ questo è il nostro “segnale”



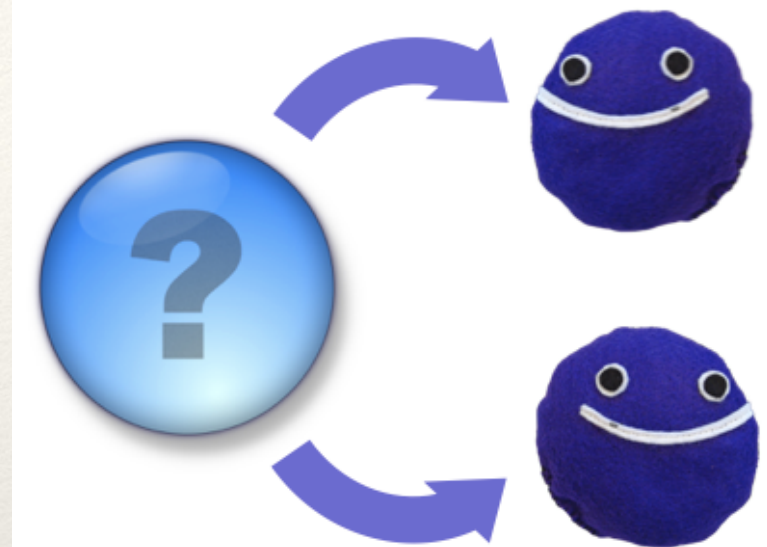
Anche il bosone Z può
decadere in una
coppia di muoni
→ questo è il nostro “fondo”

Ricerca del bosone di Higgs nel canale di decadimento in due muoni

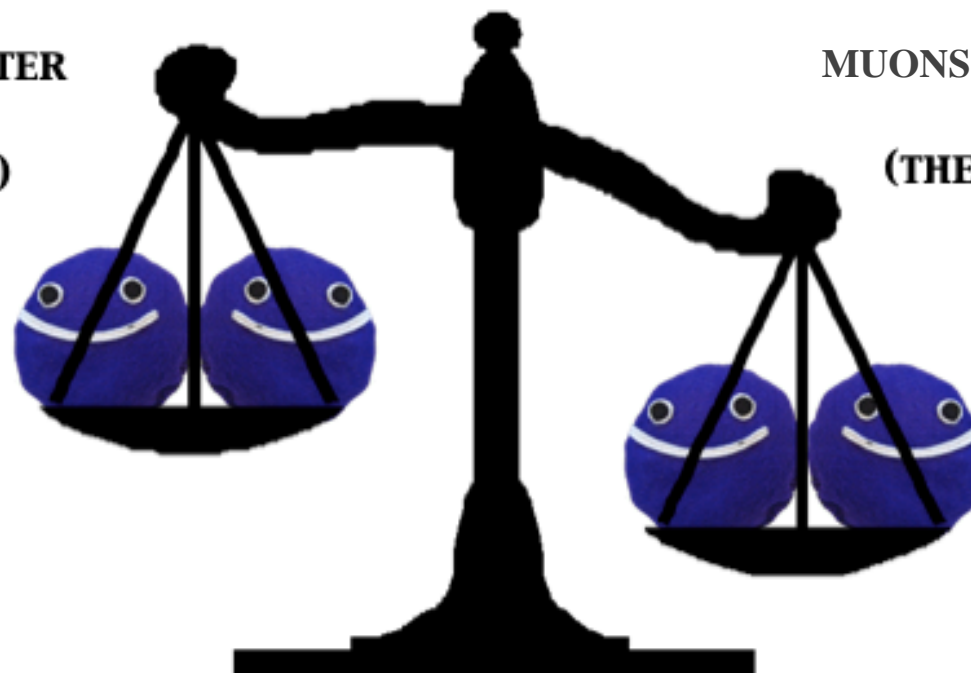
Selezioniamo gli eventi che contengono due muoni
e calcoliamo la massa invariante
dei due muoni per ogni evento per capire da quale
particella vengono

La massa dei muoni che vengono dal bosone Z è più piccola di
quella dei muoni che vengono dal bosone di Higgs:

$$m_Z = 91 \text{ GeV} < m_H = 125 \text{ GeV}$$



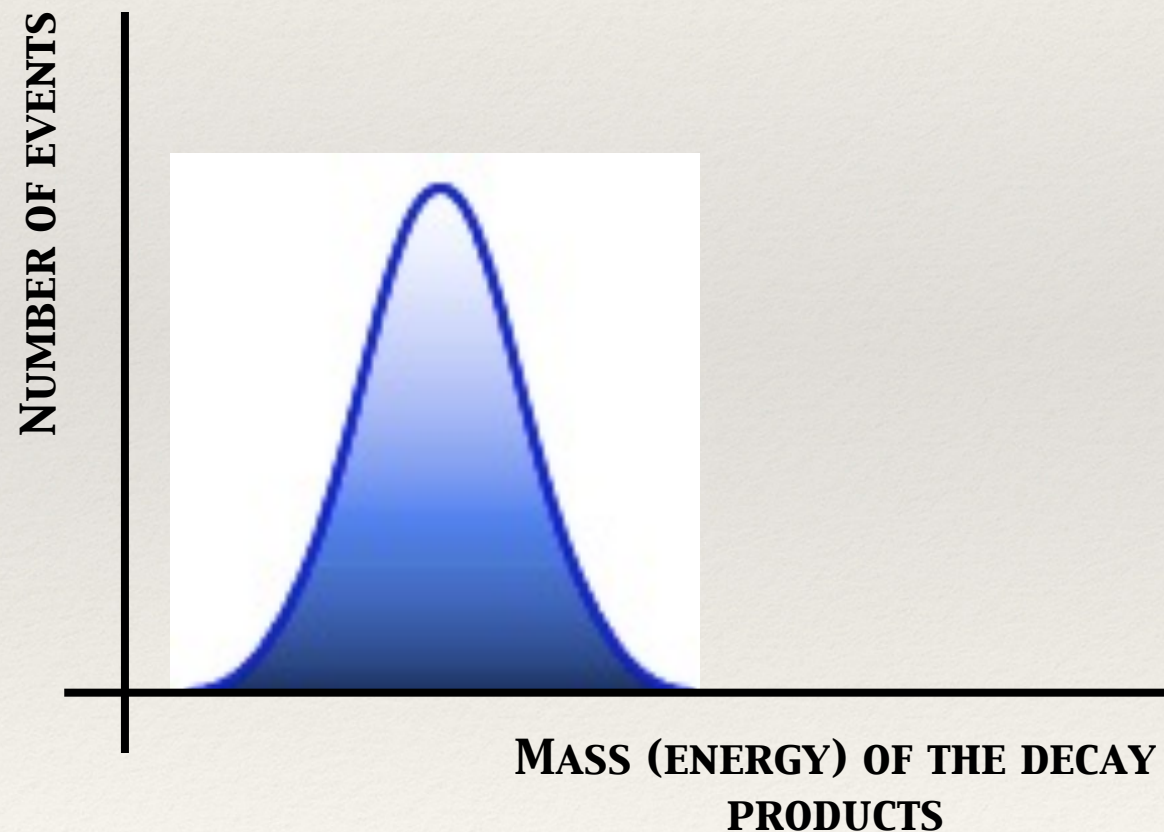
**MUONS FROM LIGHTER
PARTICLE
(THE Z-BOSON)**



**MUONS FROM HEAVIER
PARTICLE
(THE HIGGS-BOSON)**

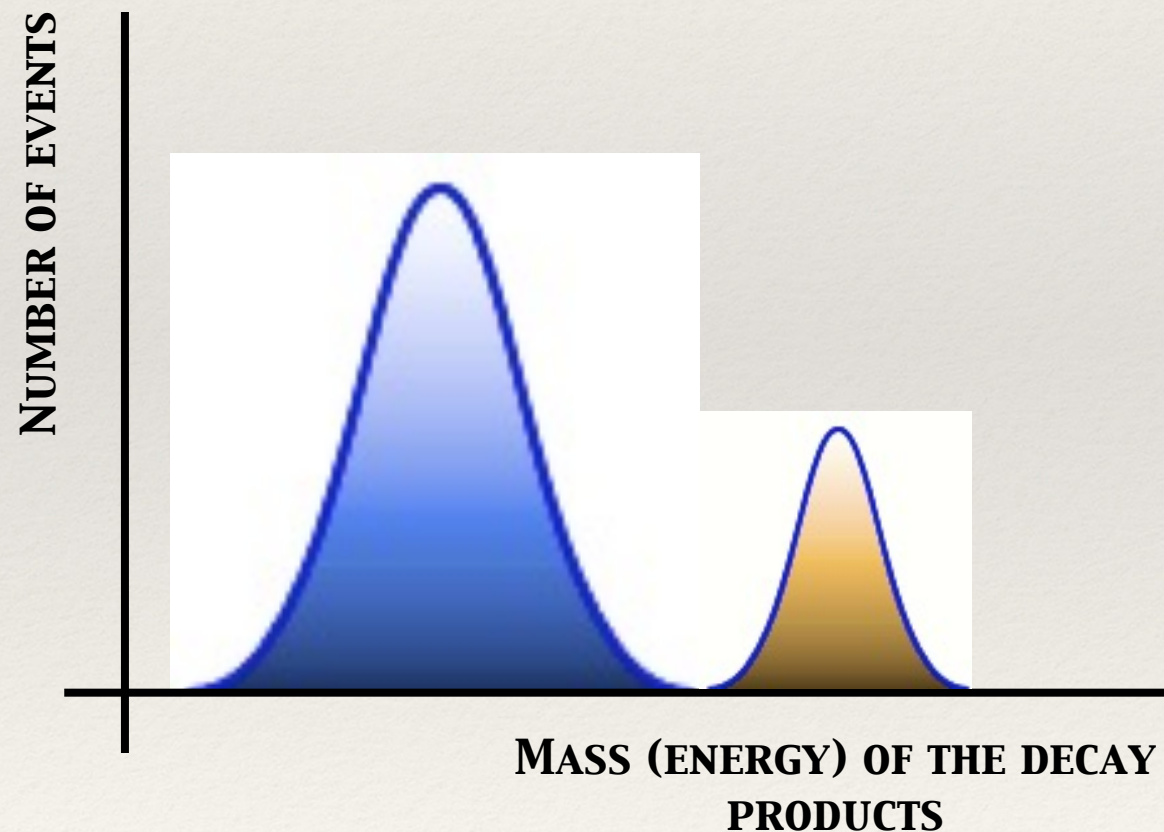
Analisi dei dati

Sappiamo cosa aspettarci per la distribuzione della massa invariante dei muoni che vengono dal bosone Z che è per noi il “fondo” nella nostra ricerca



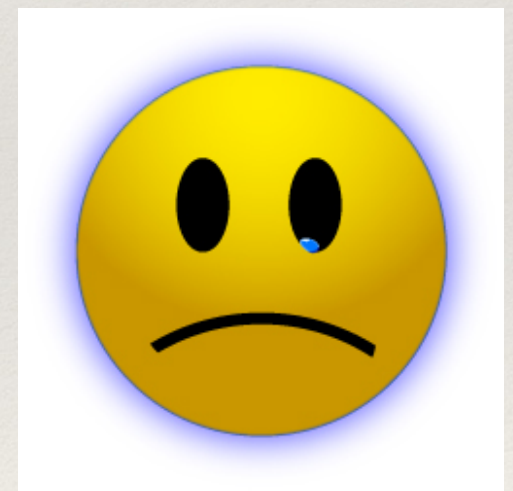
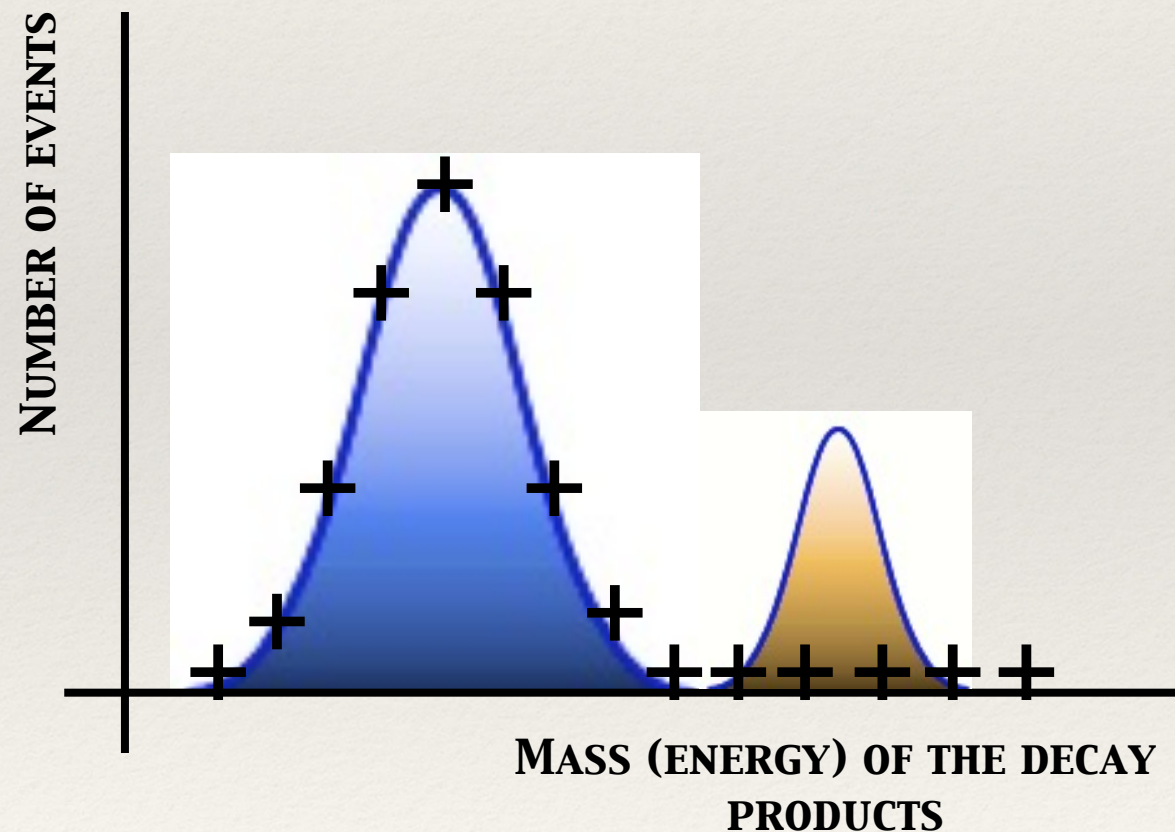
Analisi dei dati

E sappiamo cosa aspettarci per la distribuzione della massa invariante dei muoni che vengono dal bosone di Higgs che è per noi il “segnale” nella nostra ricerca



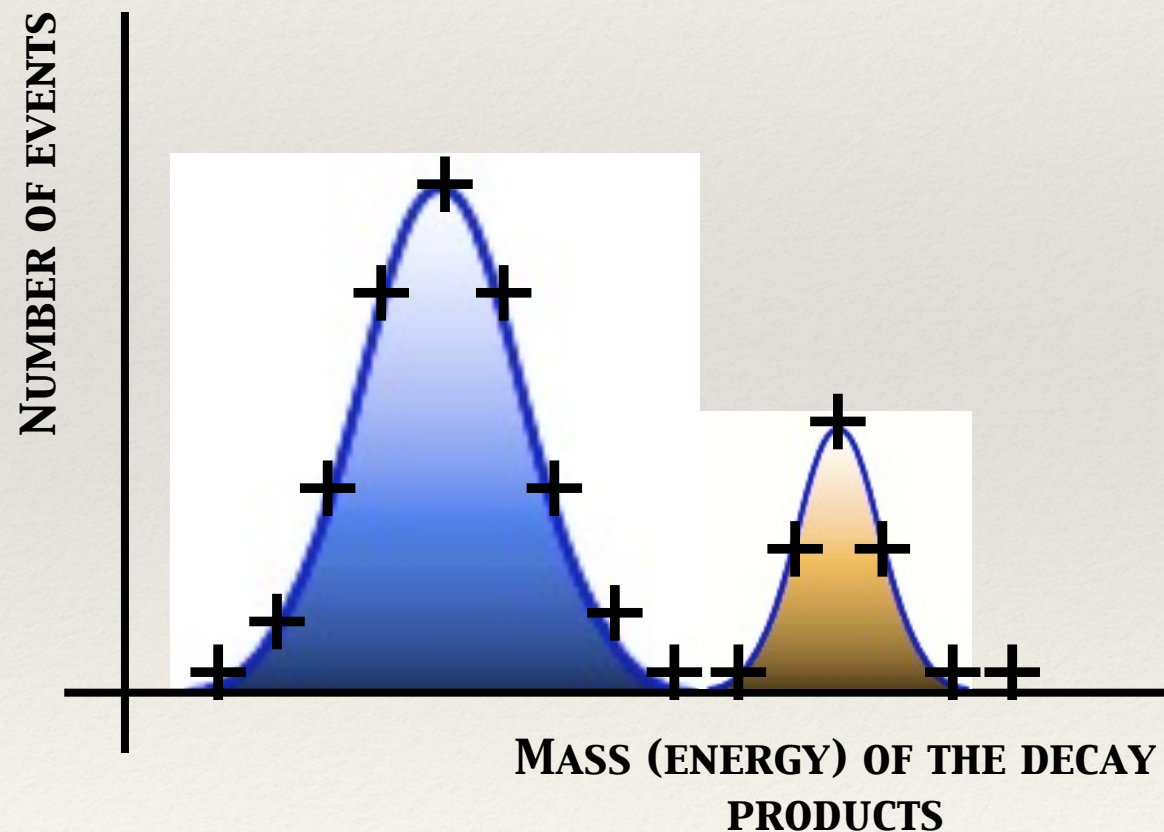
Analisi dei dati

Se i dati sono in accordo con la distribuzione attesa dal fondo,
non abbiamo osservato il nostro segnale



Analisi dei dati

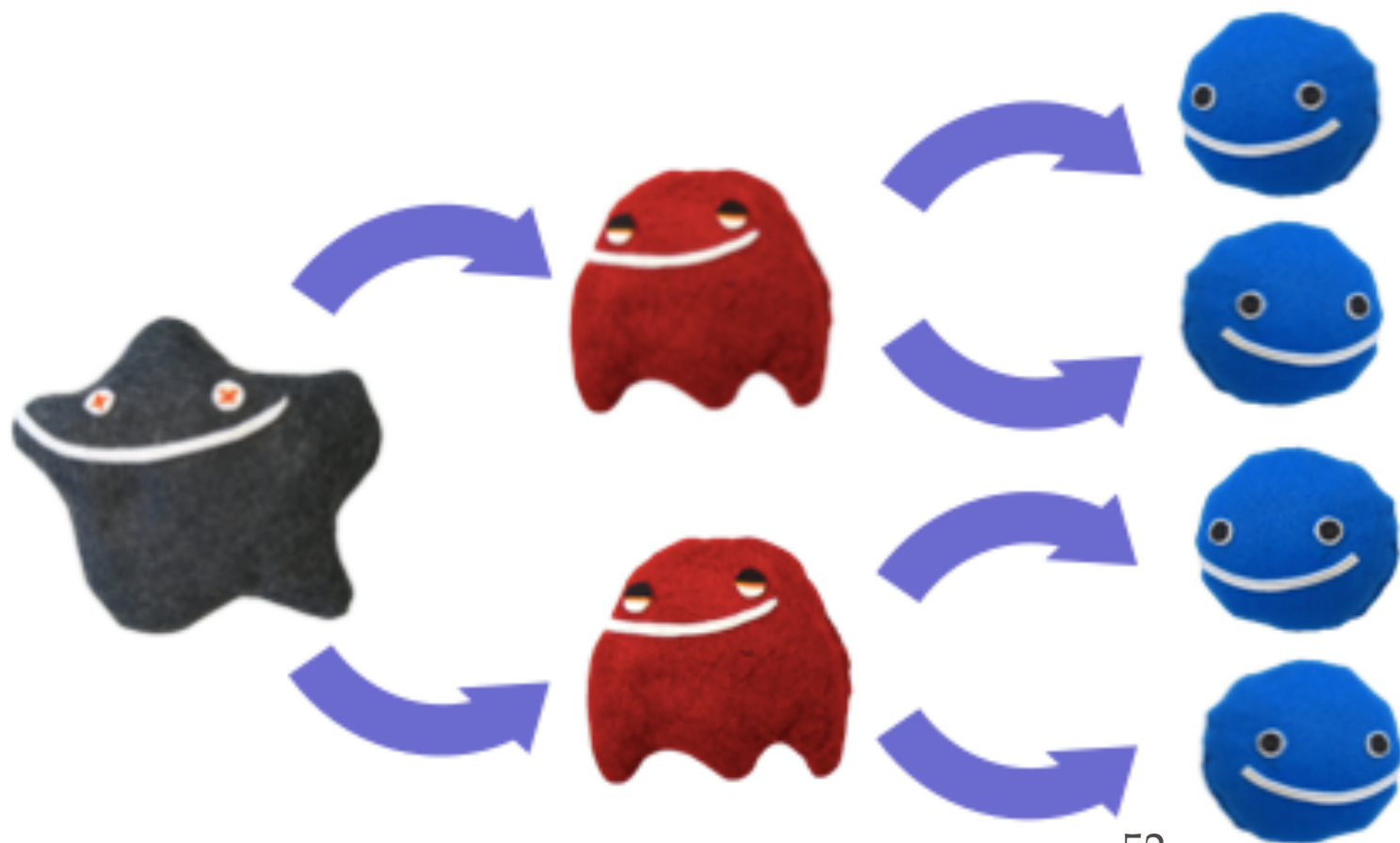
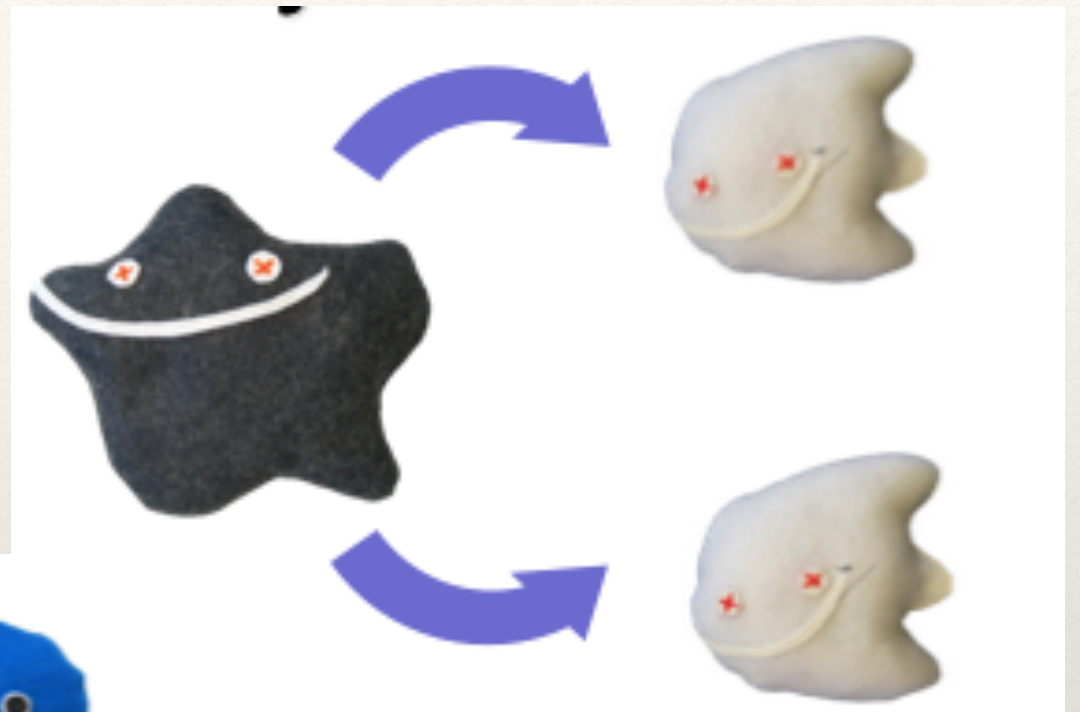
Se i dati sono in accordo con la distribuzione attesa
dall'unione di fondo e segnale,
abbiamo osservato il nostro segnale



Scoperta del bosone di Higgs

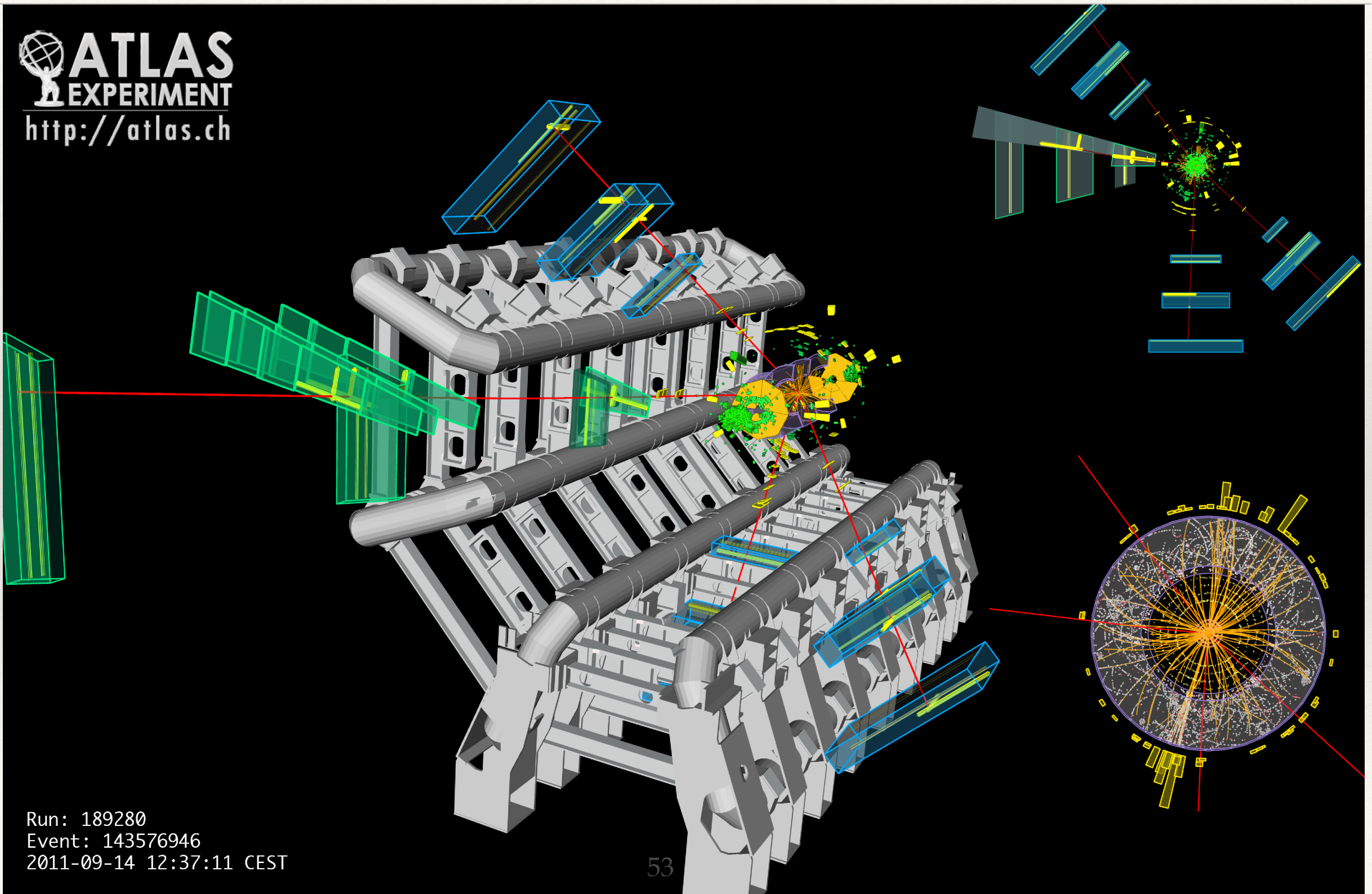
I canali di decadimento dell'Higgs che sono stati importanti per la sua scoperta sono:

Il decadimento in due fotoni

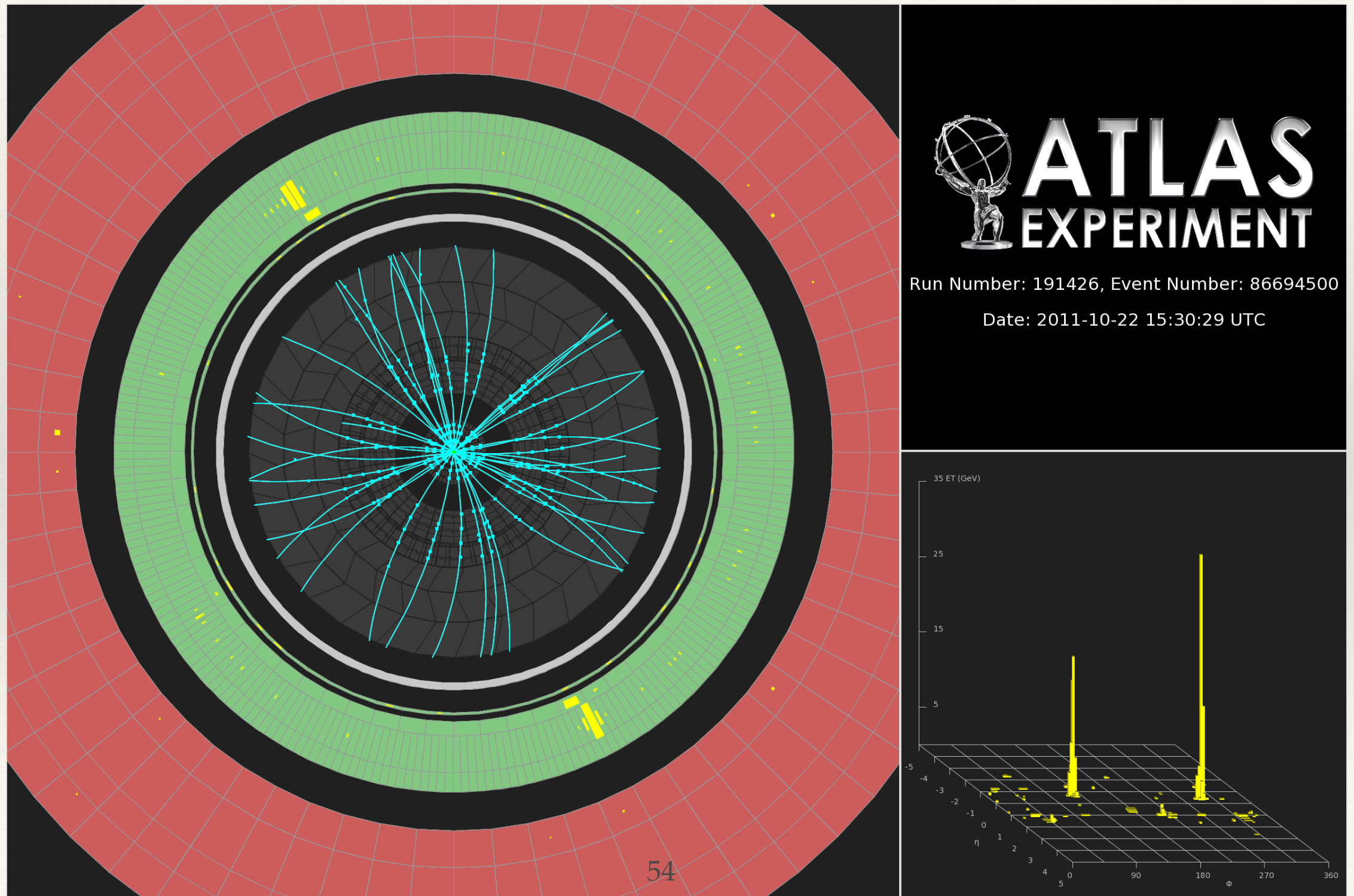


Il decadimento in due bosoni Z che a loro volta decadono in quattro leptoni (muoni o elettroni)

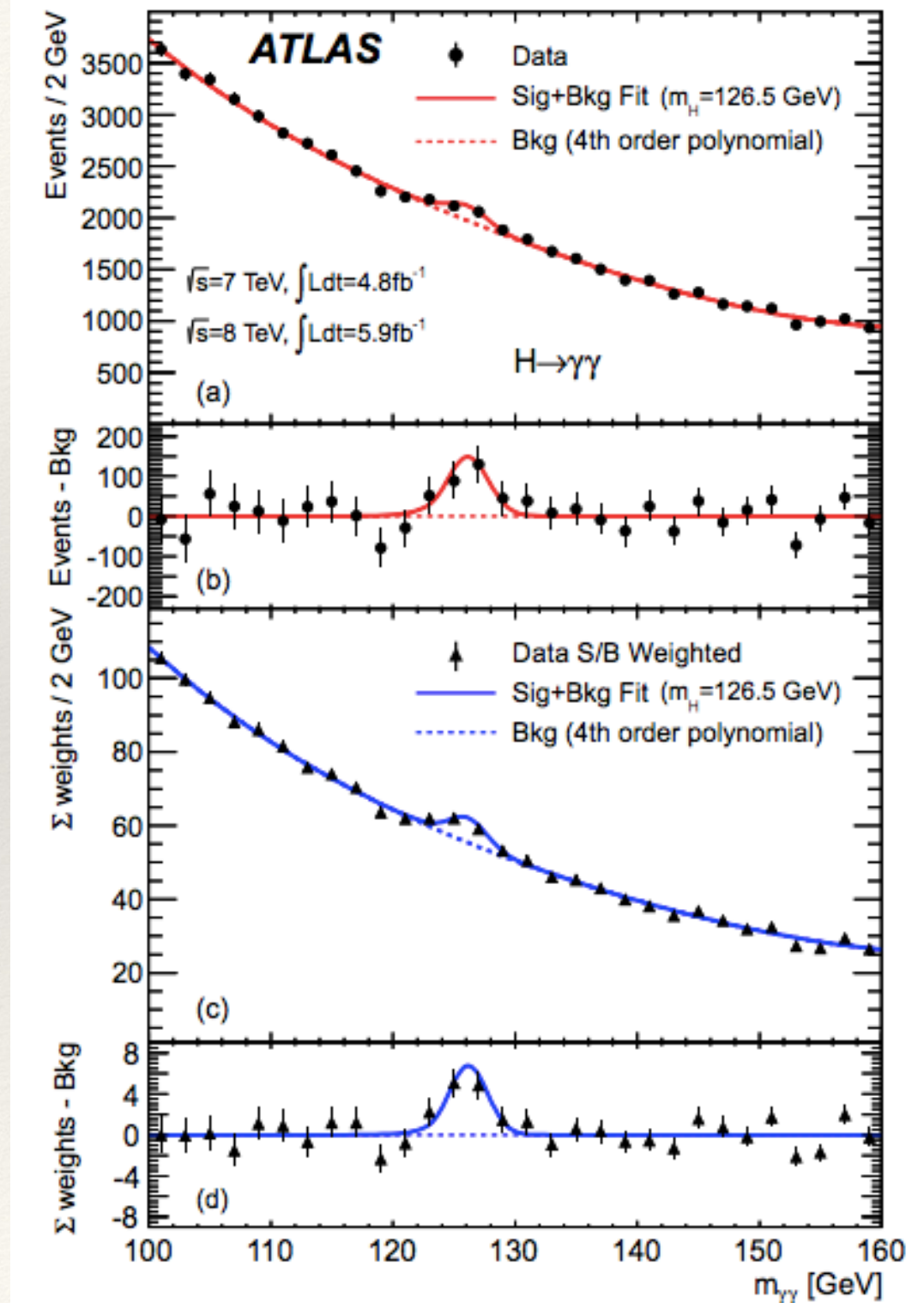
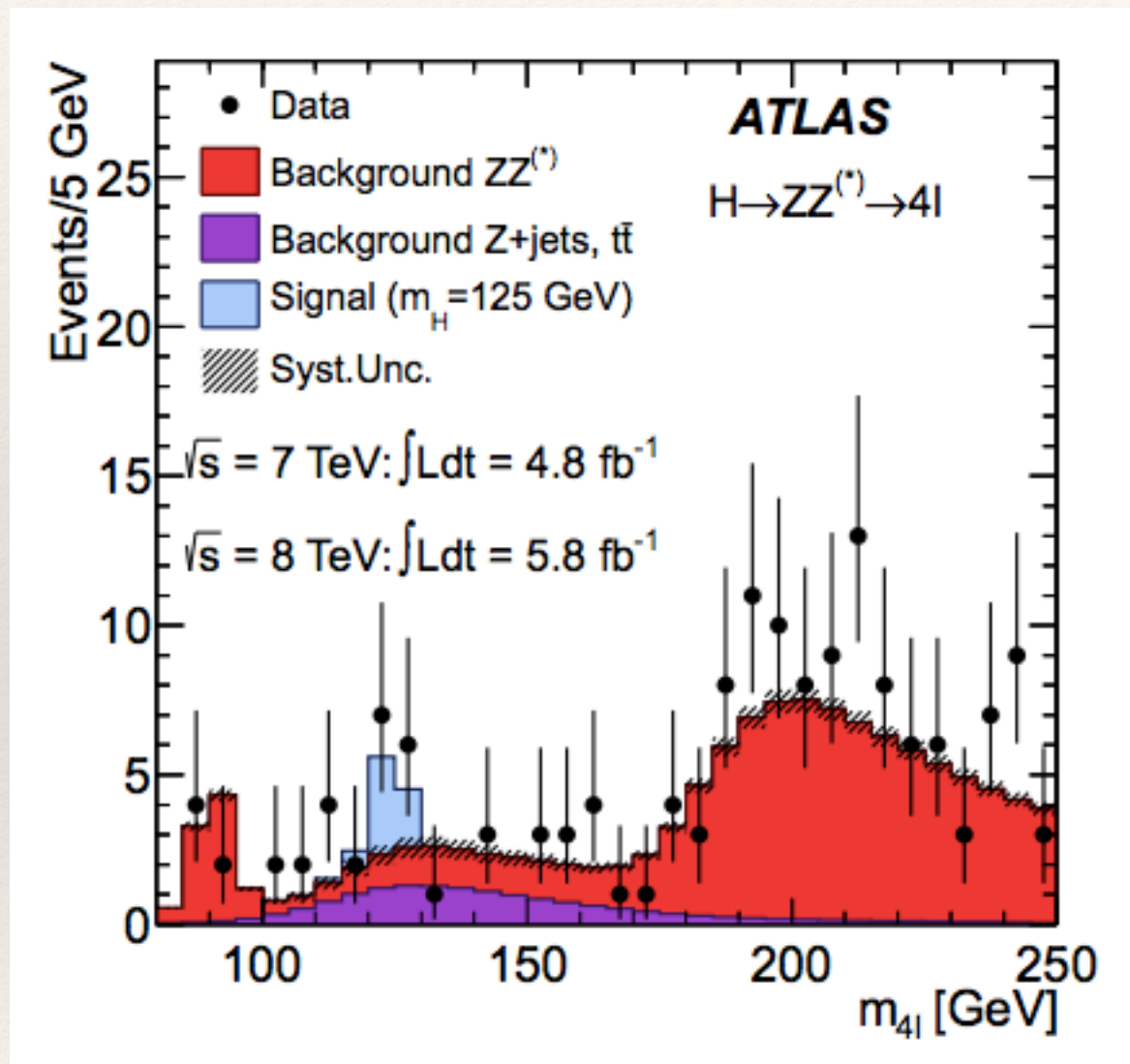
Evento candidato $H \rightarrow 4\mu$



Evento candidato $H \rightarrow \gamma\gamma$



Scoperta del bosone di Higgs



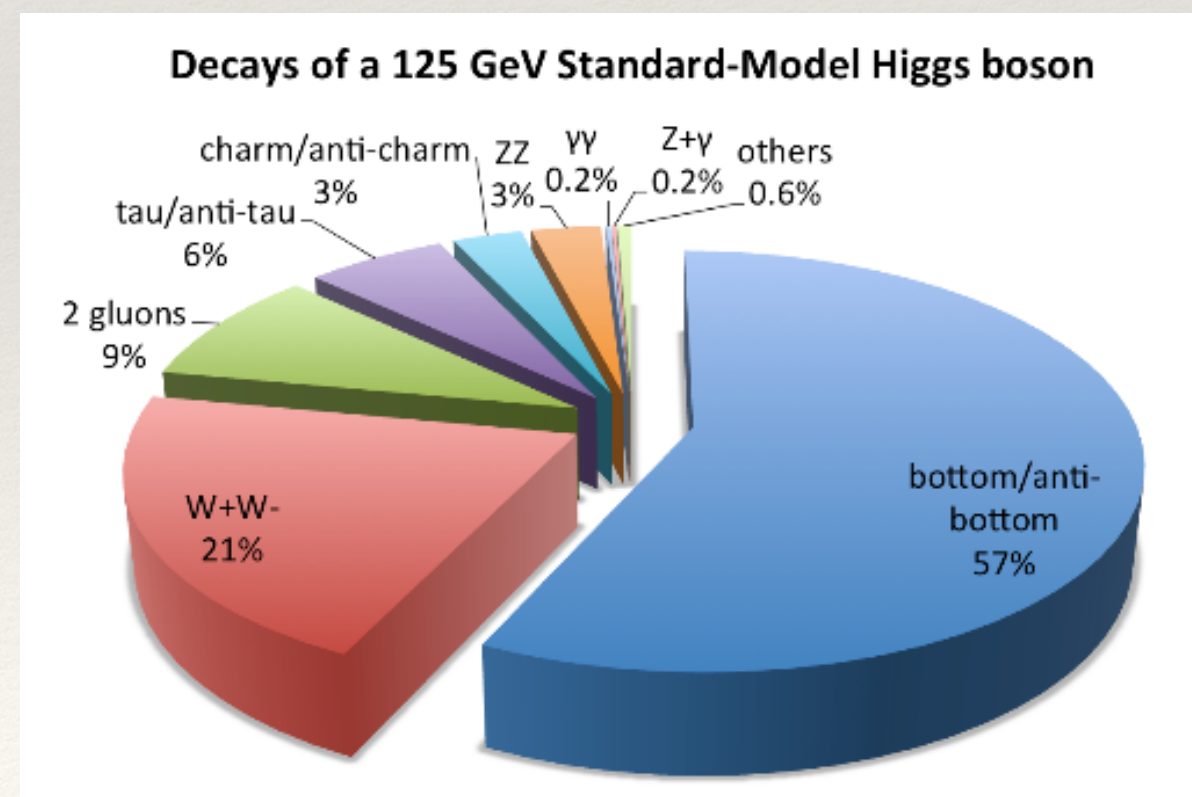
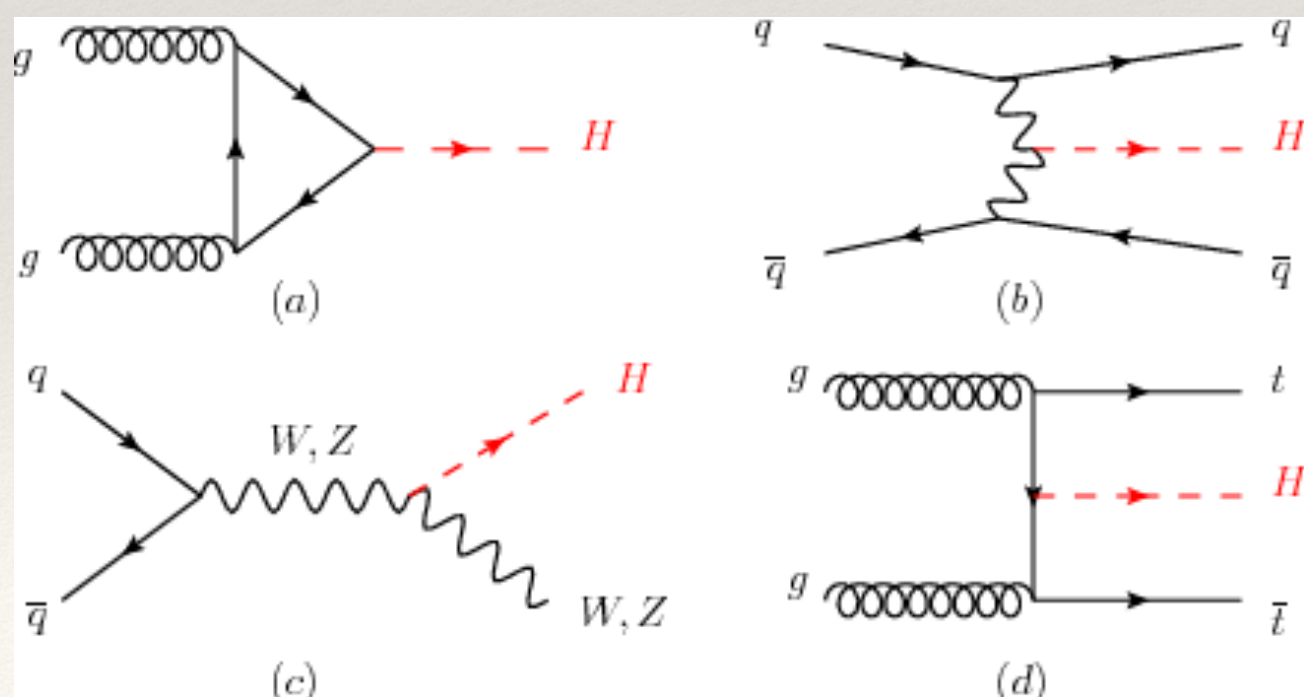
Scoperta del bosone di Higgs



Studio delle proprietà del bosone di Higgs

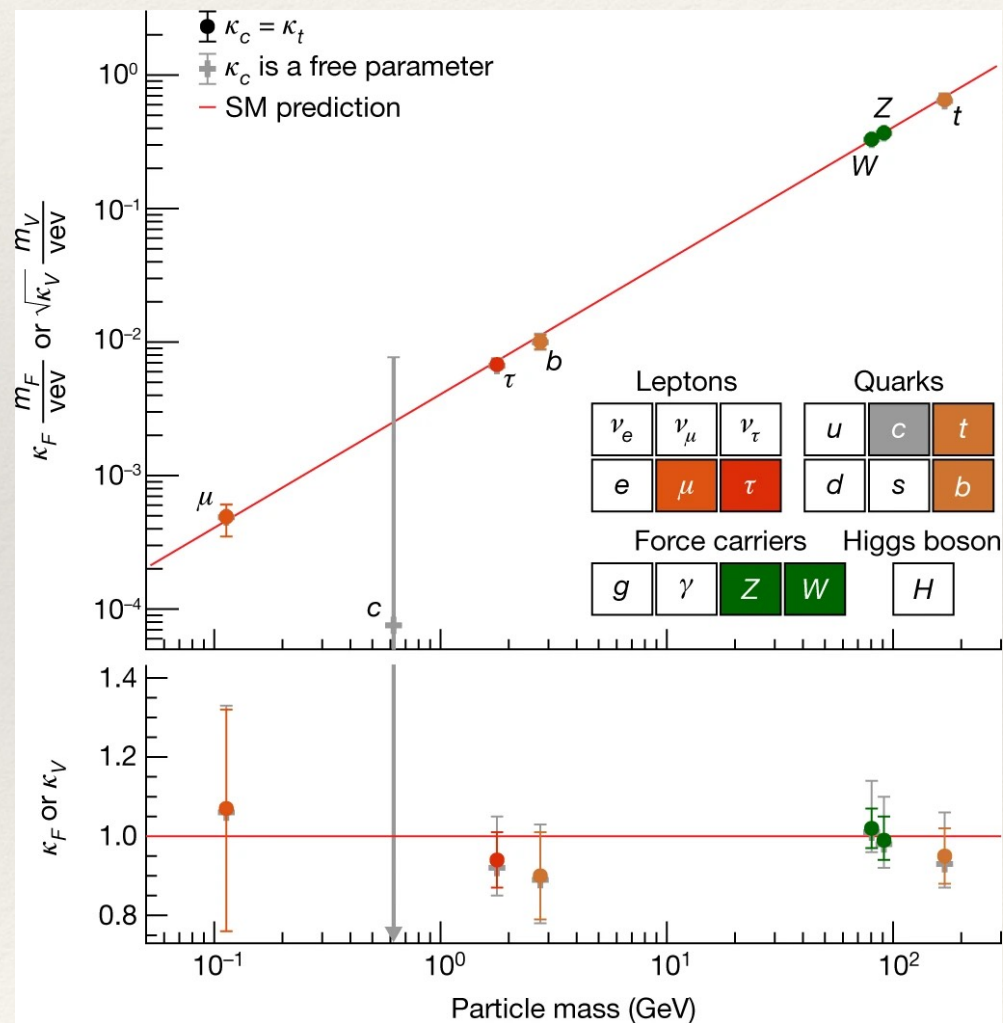
Dopo la scoperta del bosone di Higgs,
gli esperimenti ATLAS e CMS hanno avviato un vasto programma di
studio delle sue caratteristiche per verificare se tutte le osservazioni sperimentali
riguardo al suo comportamento sono compatibili
con quanto previsto dal Modello Standard

→ Si studiano gli accoppiamenti del bosone di Higgs con altre particelle tramite la misura delle sezioni d'urto (probabilità) di produzione e delle frazioni di decadimento in vari canali



Studio delle proprietà del bosone di Higgs

Fino ad ora tutte le misure degli accoppiamenti del bosone di Higgs sono in accordo con le predizioni del Modello Standard



Alcune di queste misure hanno ancora incertezze grandi che devono essere ridotte per testare la compatibilità con il Modello Standard con maggiore precisione

Gli accoppiamenti con alcune particelle non sono ancora stati misurati a causa della rarità dei processi e delle difficoltà sperimentali

C'è ancora molto da fare!

Ricerca di nuove particelle

Ricerca di nuove particelle

Il Modello Standard,
è il modello che al momento descrive al meglio della nostra conoscenza
la fisica delle particelle elementari
(tutte le misure sperimentali sono in accordo con le previsioni del modello)

Sappiamo però che il Modello Standard non è un modello completo!

- L'interazione gravitazionale e il suo mediatore non sono inclusi nel modello
- La materia oscura e le sue interazioni non sono incluse nel modello

→ Gli esperimenti a LHC ricercano nuove particelle che possano essere possibili mediatori dell'interazione gravitazionale o possibili particelle di materia oscura per verificarne la possibile esistenza e studiarne le caratteristiche



Materia Oscura

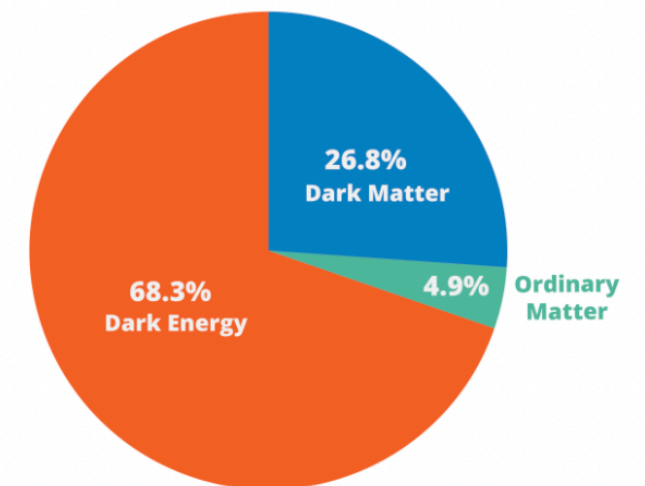


Osservazioni sperimentali in ambito astrofisico indicano che ci deve essere una grossa quantità di materia in più rispetto a quella che osserviamo (ad esempio per giustificare la velocità di rotazione delle galassie)

Si ipotizza la presenza di Materia Oscura, ovvero **materia che non interagisce elettromagneticamente** e quindi non si vede

Dalle osservazioni sperimentali si stima che la Materia Oscura (e l'energia oscura) sia circa il 95% di tutta la materia dell'universo!

Estimated matter-energy content of the Universe

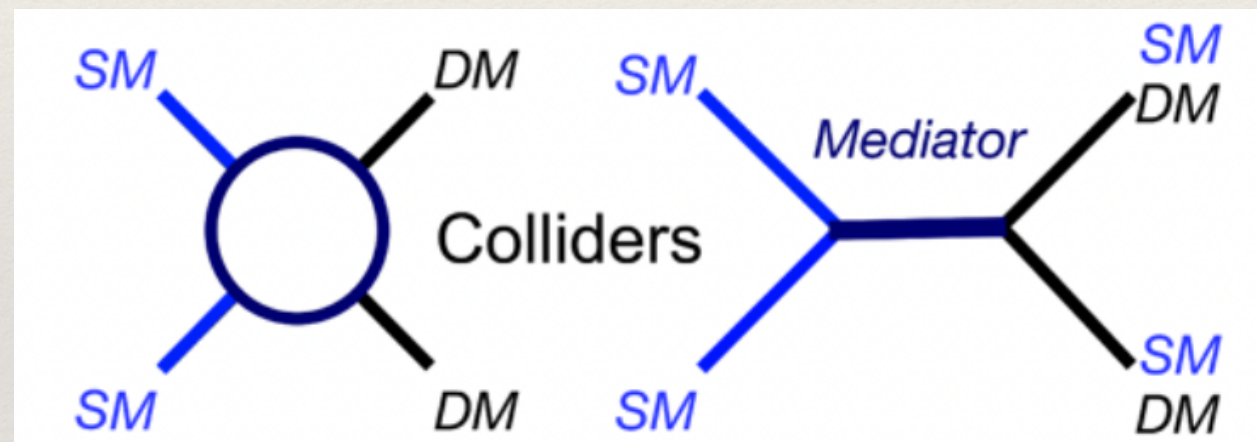


La natura della materia oscura è ancora sconosciuta!

Ricerca di materia oscura

Ad LHC cerchiamo la materia oscura assumendo che possa essere prodotta nelle collisioni p-p

Diversi modelli prevedono diversi comportamenti della materia oscura e diversi tipi di interazione con la materia ordinaria, quindi diversi possibili modi di produzione all'LHC



Partendo da particelle del Modello Standard, possiamo produrre particelle di Materia Oscura tramite annichilazione o tramite l'interazione con un nuovo mediatore

Ricerca di materia oscura

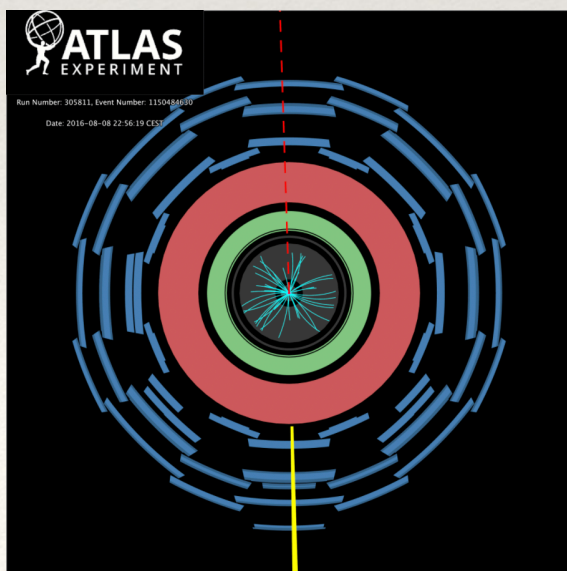
Se viene prodotta, come la osserviamo nei nostri rivelatori?

La materia oscura interagisce molto poco con la materia ordinaria,
quindi con la materia dei nostri rivelatori

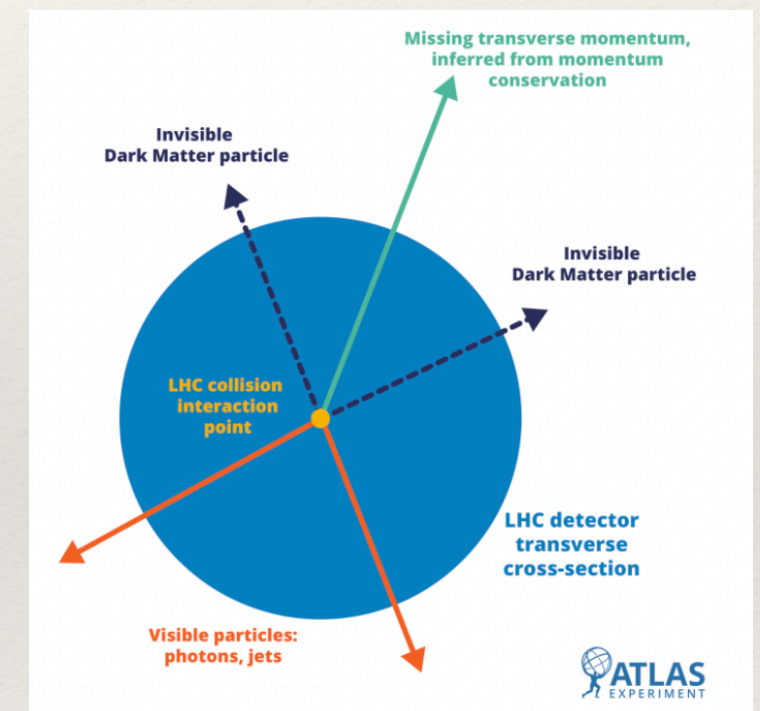
→ la osserviamo indirettamente tramite la misura di
“energia (trasversa) mancante”

Applichiamo il principio di conservazione dell'energia:
nelle collisioni p-p l'energia iniziale nel piano trasverso,
quindi deve essere zero anche dopo la collisione

→ se l'energia trasversa misurata nel rivelatore non è zero,
significa che la parte mancante è stata acquisita da una particella
che non è stata osservata nel rivelatore



Evento con un
fotone e energia
trasversa mancante
per bilanciare
l'energia trasversa
del fotone



→ cerchiamo un eccesso di questo tipo di eventi
con energia trasversa mancante rispetto agli
eventi attesi dai processi del Modello Standard

Sviluppo tecnologico

Al CERN fisici, ingegneri e tecnici, sviluppano continuamente nuova tecnologia necessaria per portare avanti il programma di ricerca di fisica fondamentale del CERN

Per poter migliorare le nostre misure abbiamo bisogno di strumenti potenti che non sono disponibili sul mercato quindi li sviluppiamo all'interno del CERN

Molti di questi strumenti si rivelano poi molto utili anche per la società, ad esempio al CERN sono stati inventati e sviluppati:

Touch screen negli anni '70



PET scanner negli anni '80



World Wide Web nel 1990



Grazie per l'attenzione!

Domande?