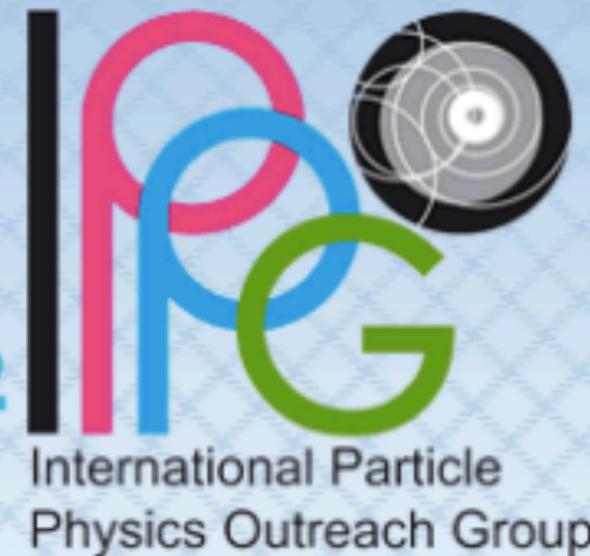




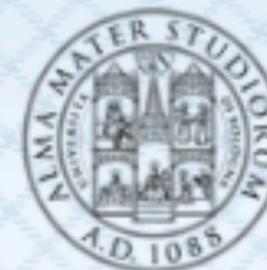
INTERNATIONAL



hands on particle physics



## La scoperta del mondo dei Quark e dei leptoni con dati reali



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Un'iniziativa IPPOG (International Particle-Physics Outreach Group) realizzata a Bologna  
dalla locale sezione INFN con la partecipazione dell'Università di Bologna

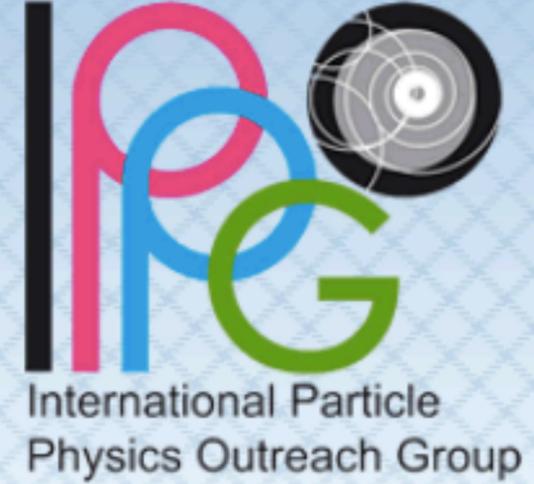
15 marzo 2022, Dipartimento di Fisica ed Astronomia “Augusto Righi”, Bologna



INTERNATIONAL



hands on particle physics



## Programma

Orario	Argomento
ore 10:00	Benvenuto
ore 10:15	Lezione sulla fisica delle particelle - prima parte
ore 11:15	Pausa
ore 11:30	Lezione sulla fisica delle Particelle - seconda parte
ore 12:30	Pranzo
ore 13:30	Preparazione per gli esercizi
ore 14:00	Risoluzione degli esercizi in autonomia
ore 15:30	Discussione sul lavoro svolto
ore 16:00	Collegamento con il CERN
ore 17:30	Fine

# Sedi che parteciperanno a questa giornata



- Grenoble (FR)



- Bologna (IT)



- Prague (CZ)



- Amsterdam (NL)

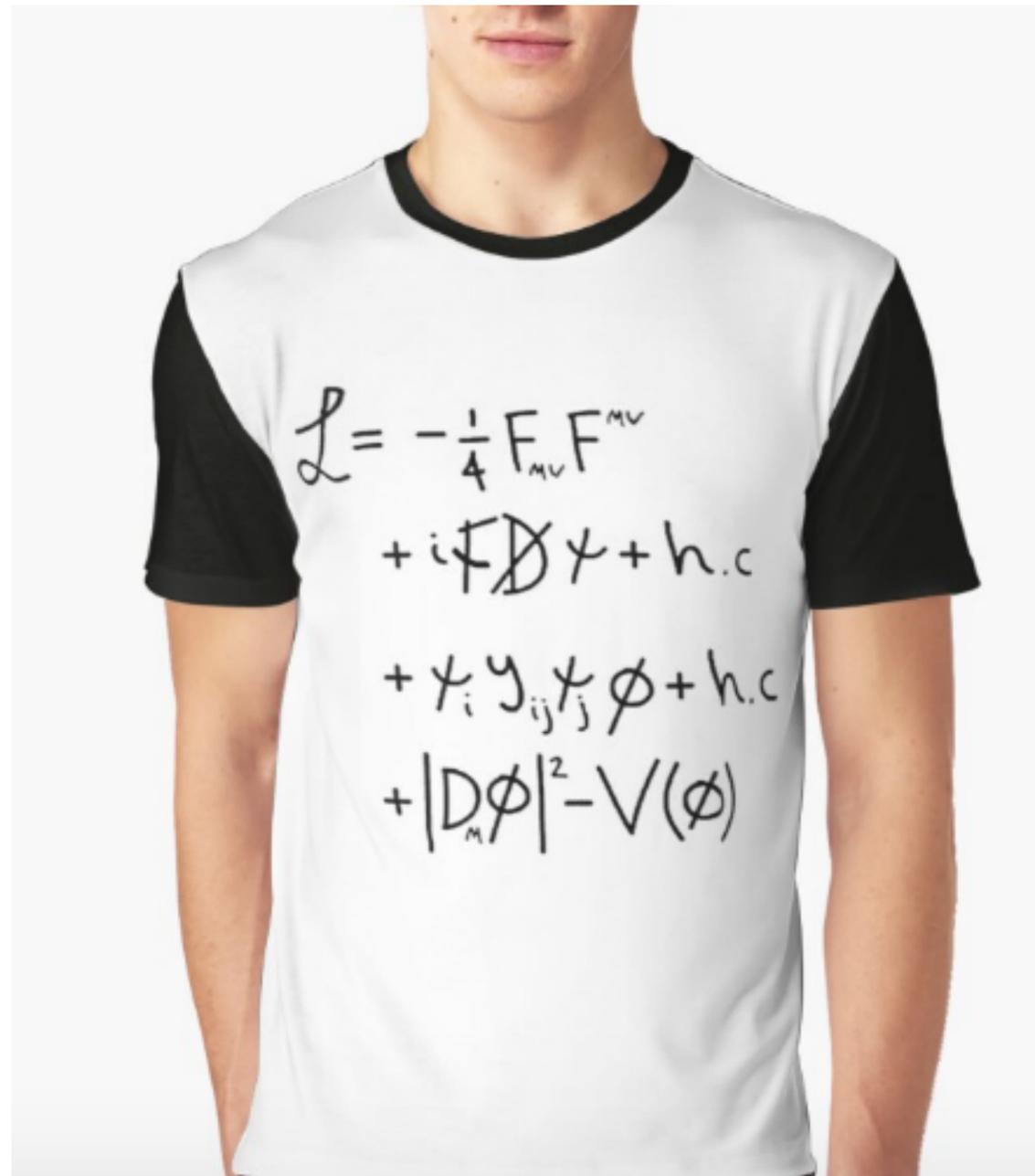


- M'sila (DZ)

**Saranno tutte collegate al CERN alle 16:00**

# Il Modello Standard e la fisica di LHC

Lorenzo Bellagamba, INFN Bologna



# Studio della struttura della materia:

strumenti capaci di risolvere oggetti sempre piu' piccoli

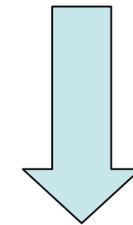
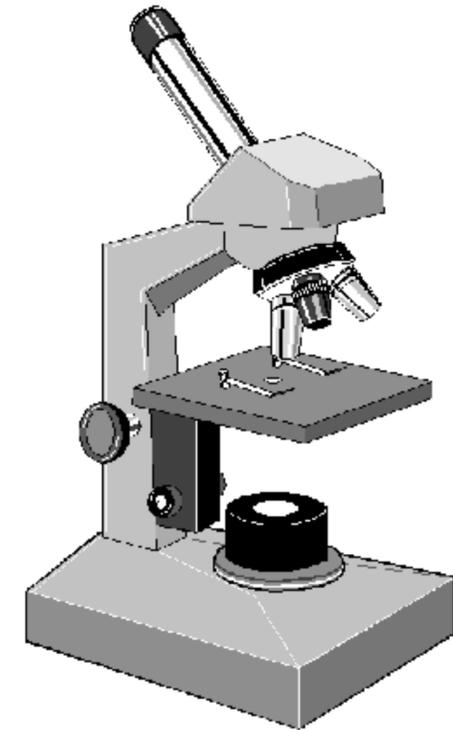
## Microscopio ottico

→ risoluzioni dell'ordine di  $0.2 \mu\text{m}$   
(2 decimillesimi di mm)

Perche' non si puo' fare meglio?

→ utilizza luce visibile

non e' possibile risolvere strutture molto  
piu' piccole della lunghezze d'onda della luce!!



## Come possiamo fare meglio ?

Ci viene in aiuto la **meccanica quantistica**

Nel mondo microscopico non c'è distinzione netta tra comportamenti corpuscolari ed ondulatori. Le particelle si comportano come onde e viceversa.

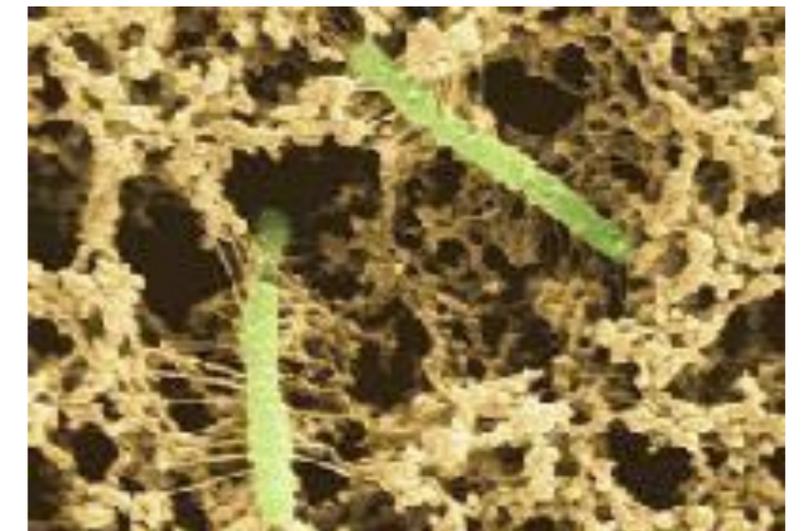


$$\Lambda = \frac{h}{p} \quad p = m \cdot v$$
$$h = 4 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$$

elettroni accelerati  
→ risoluzioni molto migliori  
di un microscopio ottico

Si possono osservare dettagli fino a qualche  
decimilionesimo di mm ( $\sim 0.1 \text{ nm}$ )

**$\sim 1000$  volte meglio del microscopio ottico**

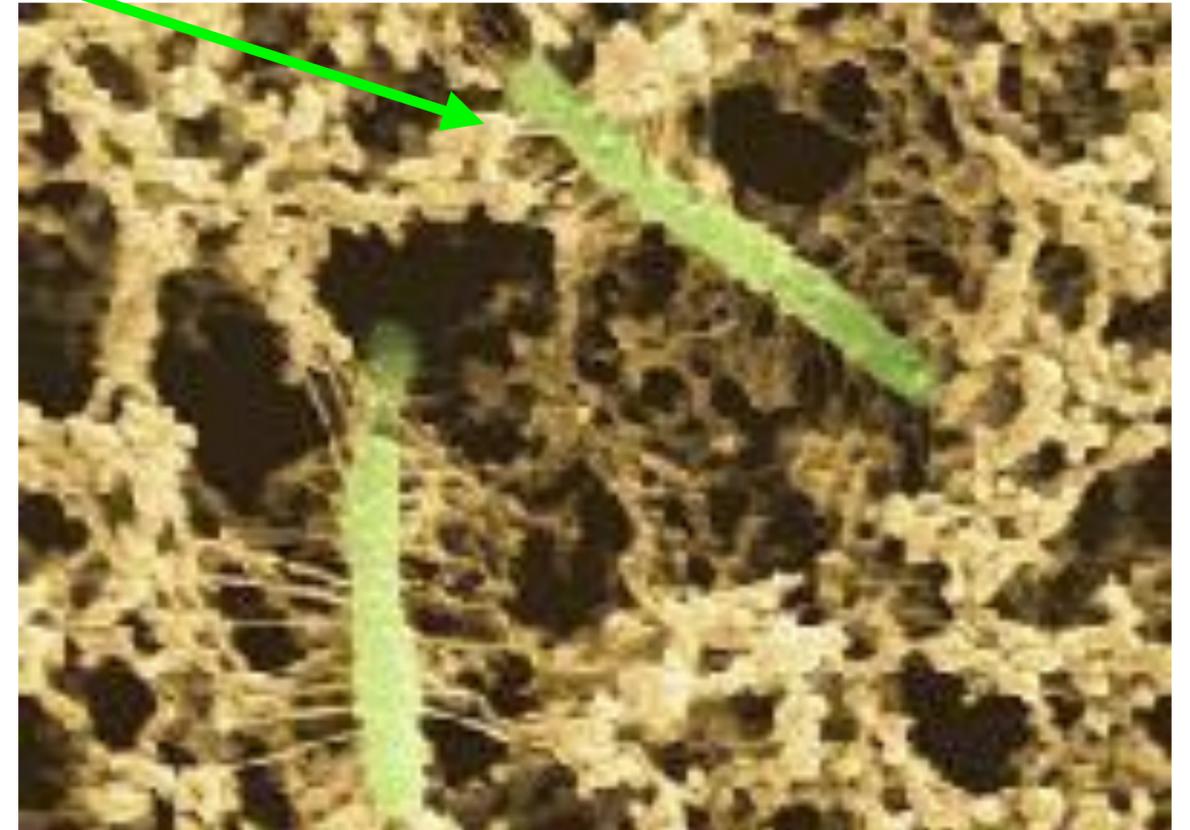


# Enorme differenza di risoluzione

batteri



**Microscopio ottico**  
**Luce visibile**



**Microscopio elettronico**  
**Elettroni accelerati**

## Per studiare oggetti ancora piu' piccoli?

Un nucleo atomico e' un milione di volte piu' piccolo (un millesimo di miliardesimo di mm,  $10^{-15}$  m)

I piu' piccoli costituenti della materia a noi noti sono almeno 100000 volte piu' piccoli dei nuclei

Il microscopio che ci occorre per risolvere tali strutture e' uno strumento in grado di accelerare particelle ad energie elevatissime

Questo microscopio e' un acceleratore di particelle

# LHC (Large Hadron Collider) e' il piu' potente acceleratore di particelle mai costruito

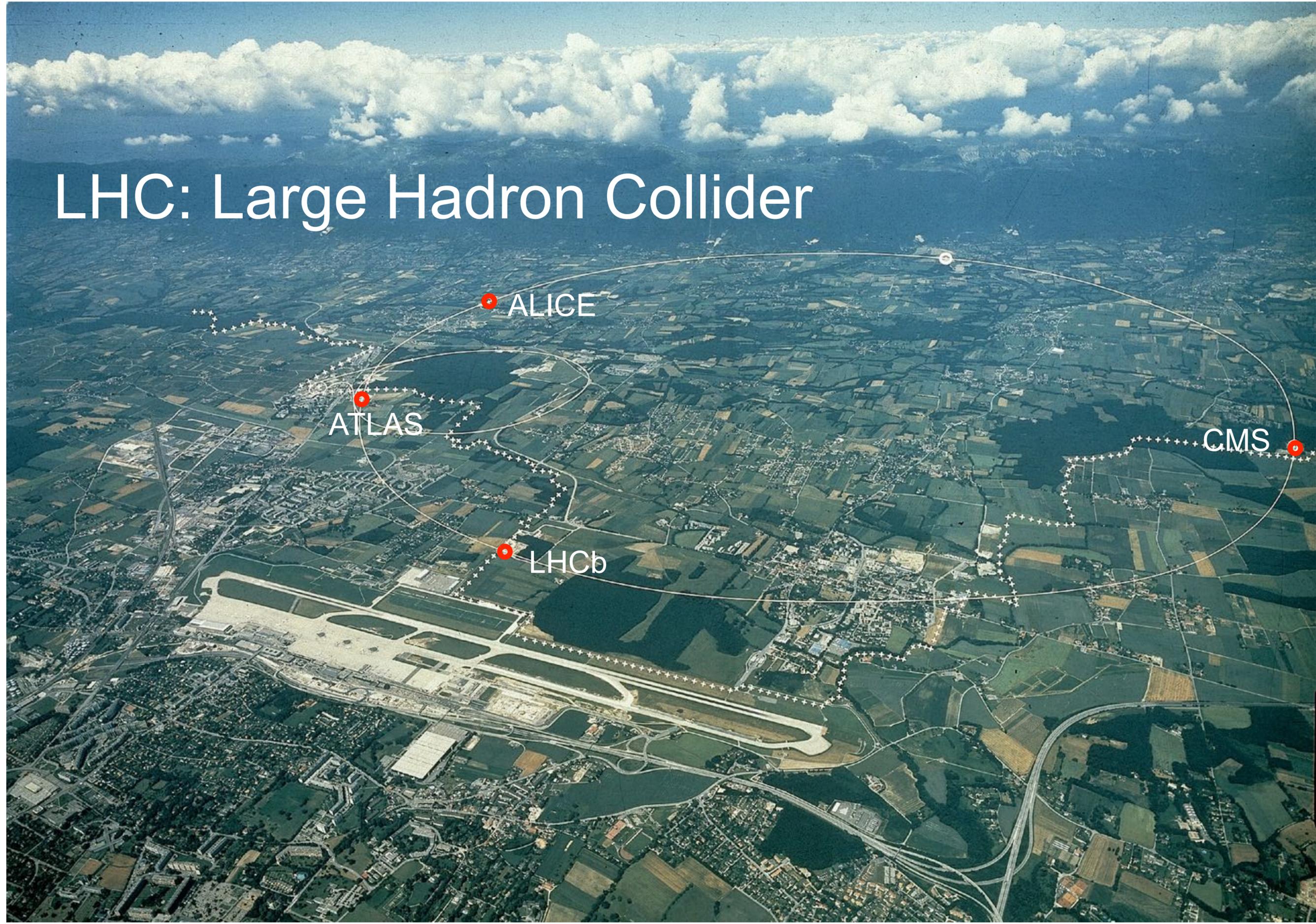
Si trova presso il CERN, nella regione di Ginevra al confine tra Francia e Svizzera

Ha una circonferenza di circa 27 Km

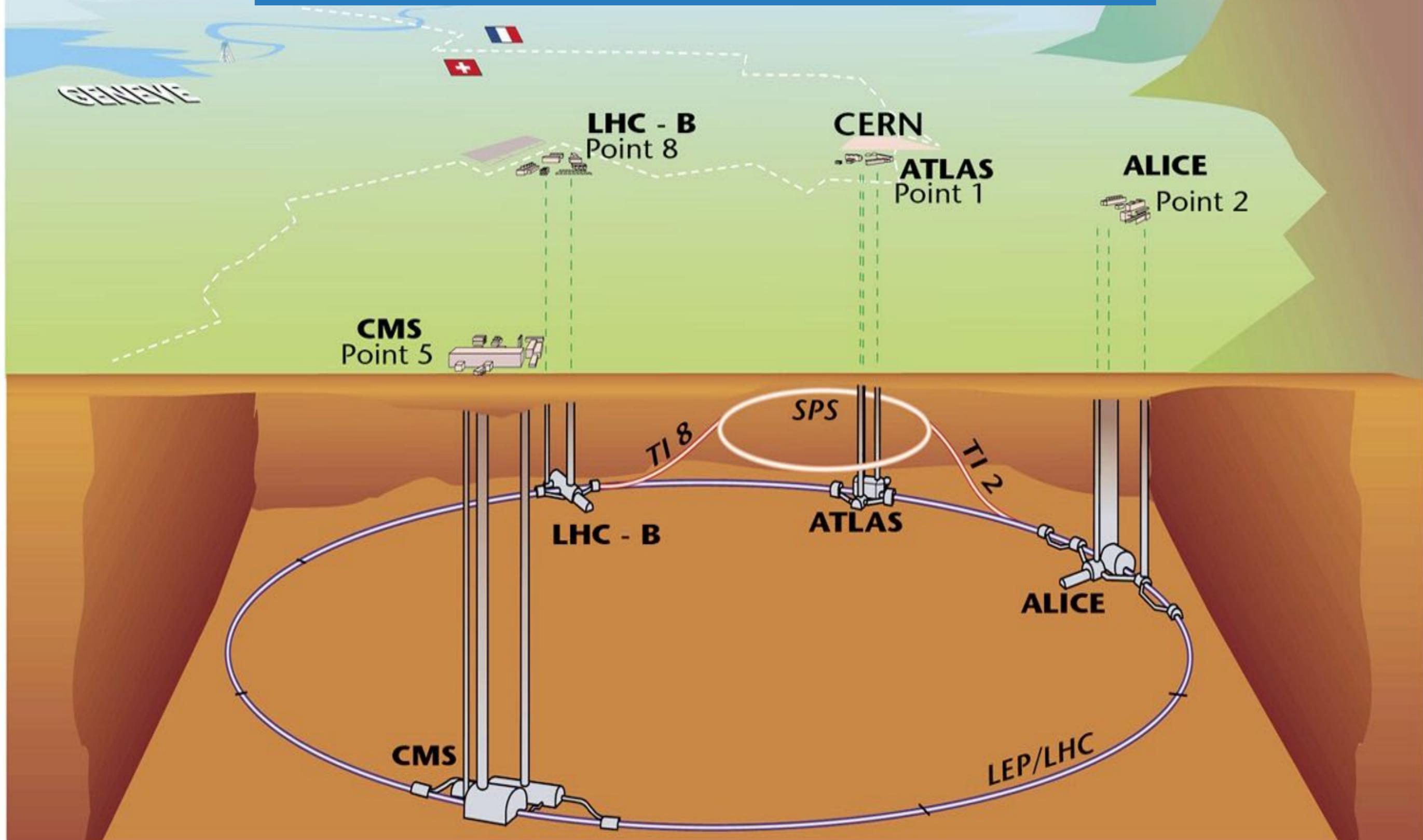
Accelera e fa collidere protoni



# LHC: Large Hadron Collider



# Gli Esperimenti ad LHC



CERN 25/04/2007



# Sezione del tunnel e acceleratore



**Due fasci di protoni vengono accelerati in direzioni opposte**

**ad una energia di**

**6500 miliardi di elettronVolt ( $6.5 \times 10^{12} \text{eV}$ )  $\rightarrow$  6.5 TeV**

**(1 ev è l'energia di un protone accelerato da una ddp di 1 Volt)**

**L'energia di un protone a LHC corrisponde a  
quella di una zanzara in volo**

**puo' sembrare poco ma...**

**questa energia è concentrata**

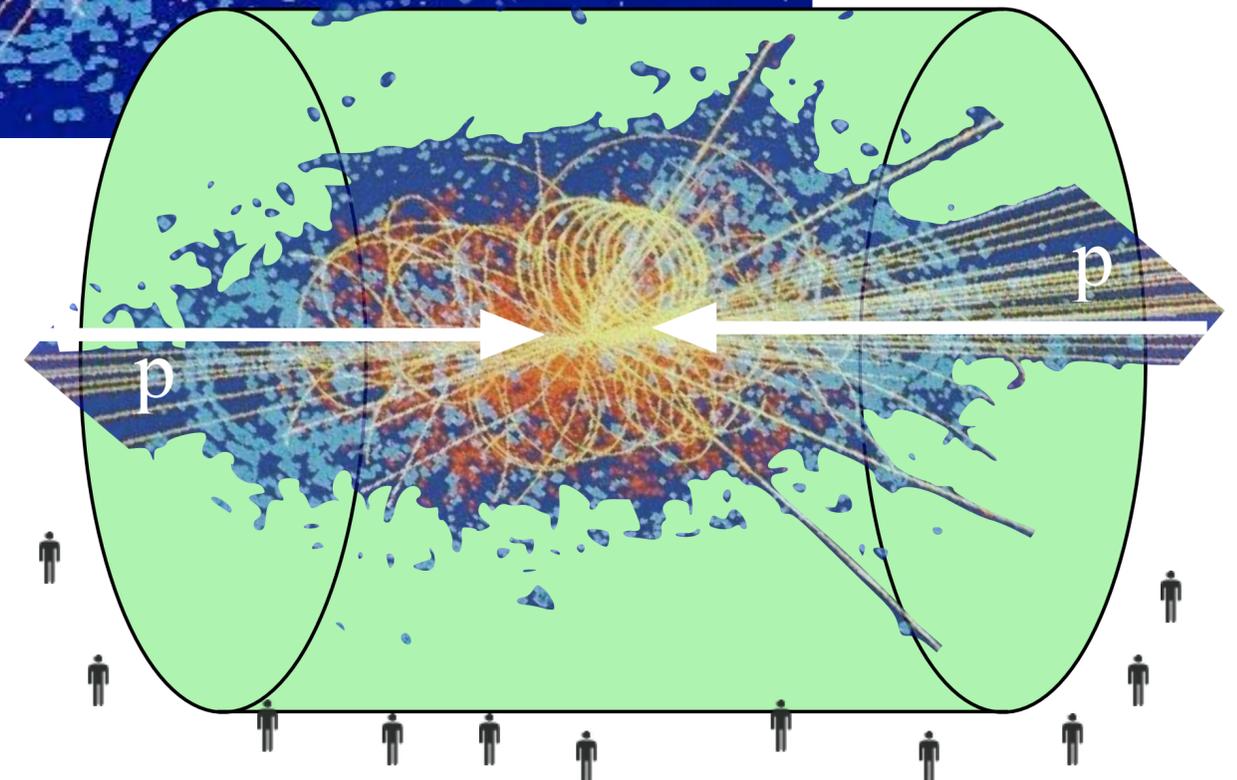
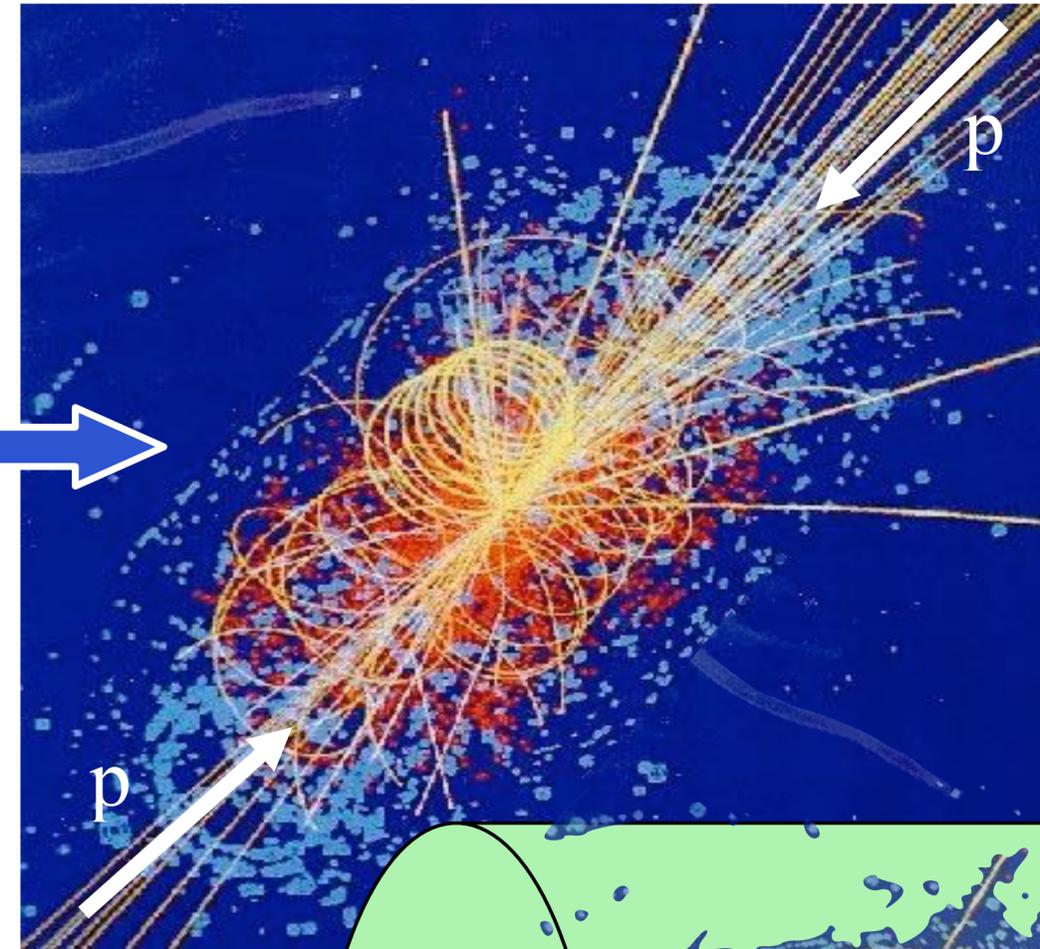
**su un solo protone!**

Quando i due fasci collidono una grande quantità di energia viene concentrata in dimensioni spaziali piccolissime

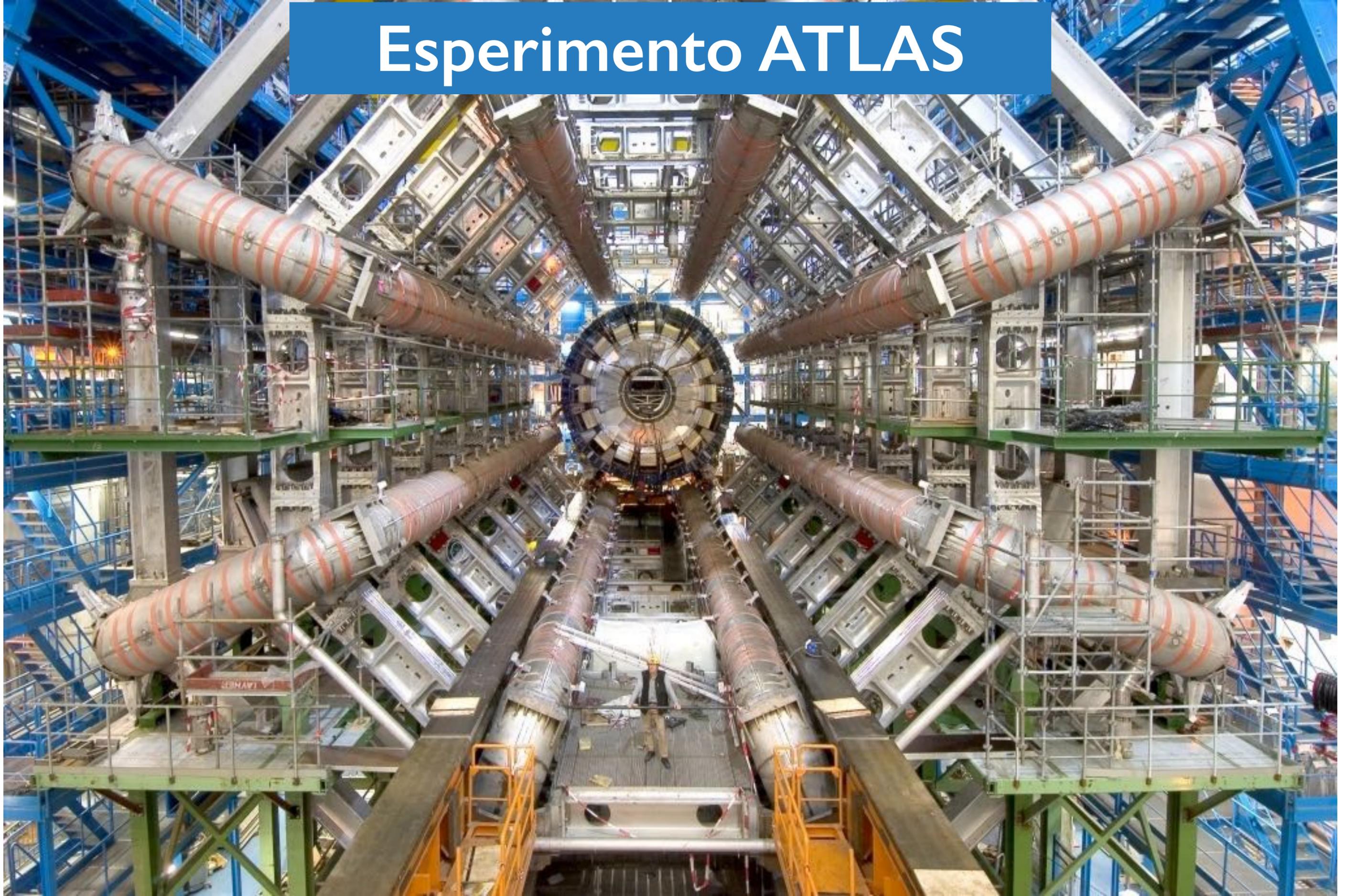
Creazione di materia  
dall'energia

$$E = mc^2$$

Le collisioni avvengono all'interno degli apparati sperimentali: grandi strumenti delle dimensioni di edifici di diversi piani che hanno il compito di analizzare i prodotti dell'urto per ricostruire quello che è successo

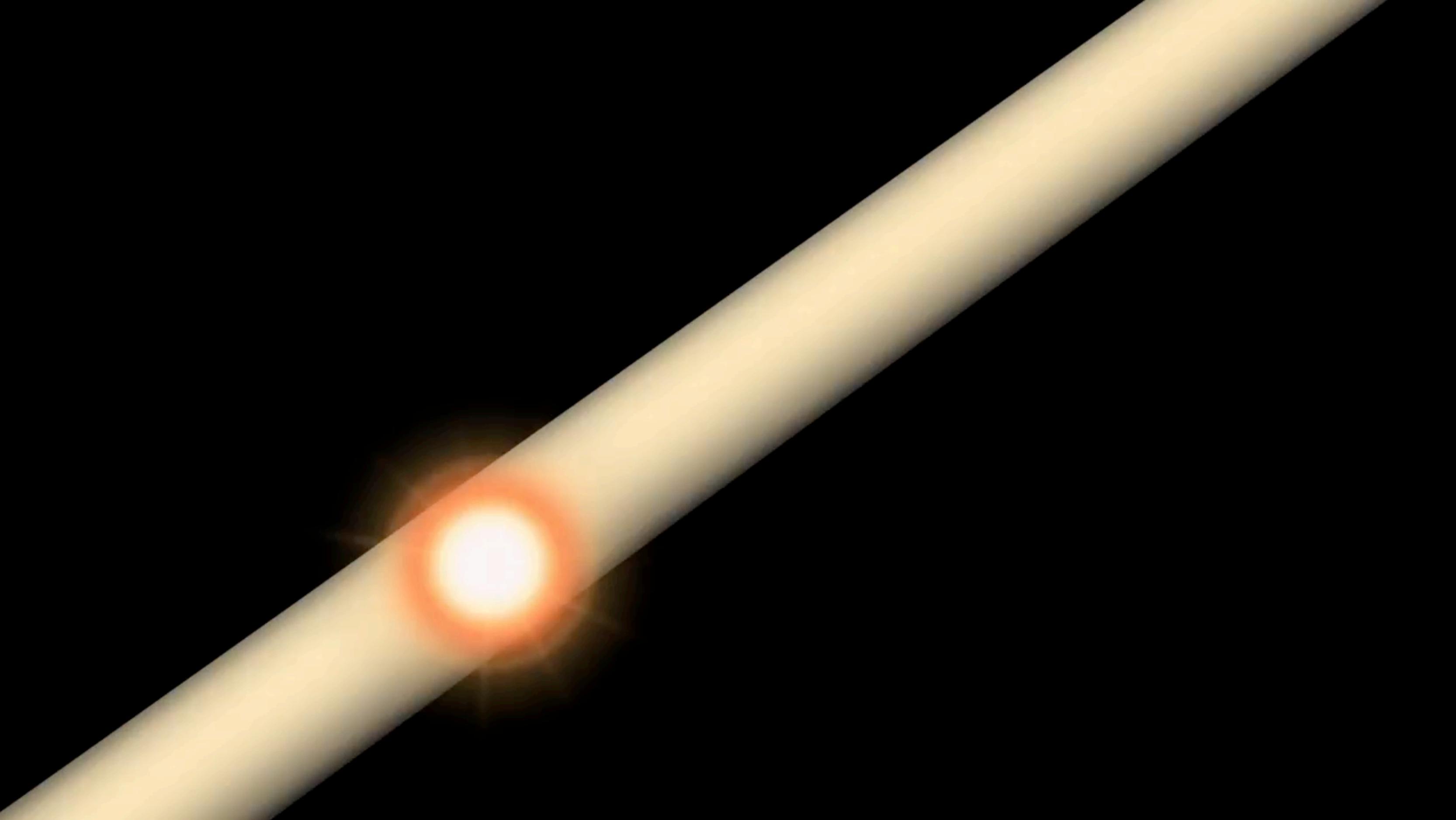


# Esperimento ATLAS

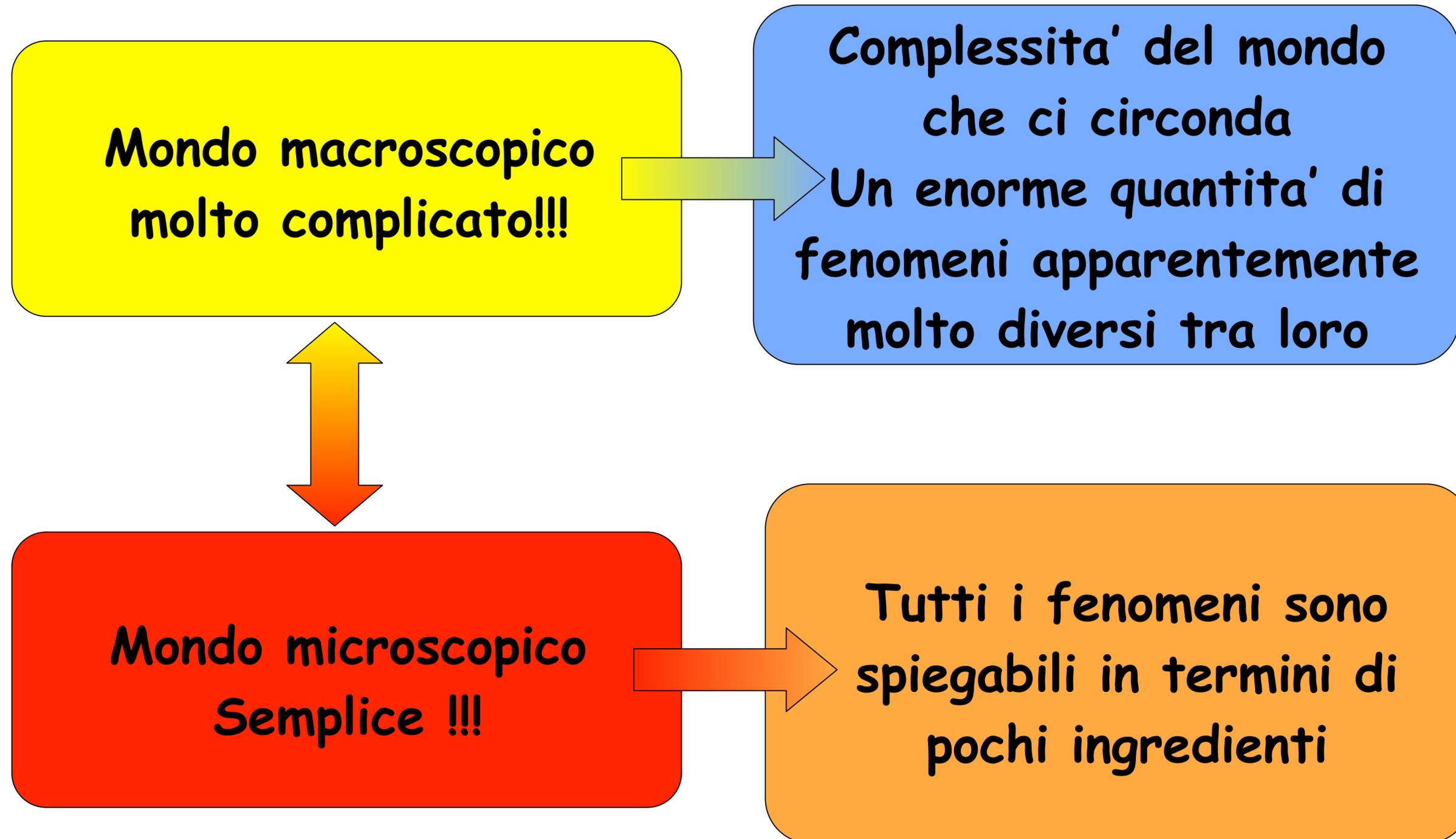


# Esperimento CMS

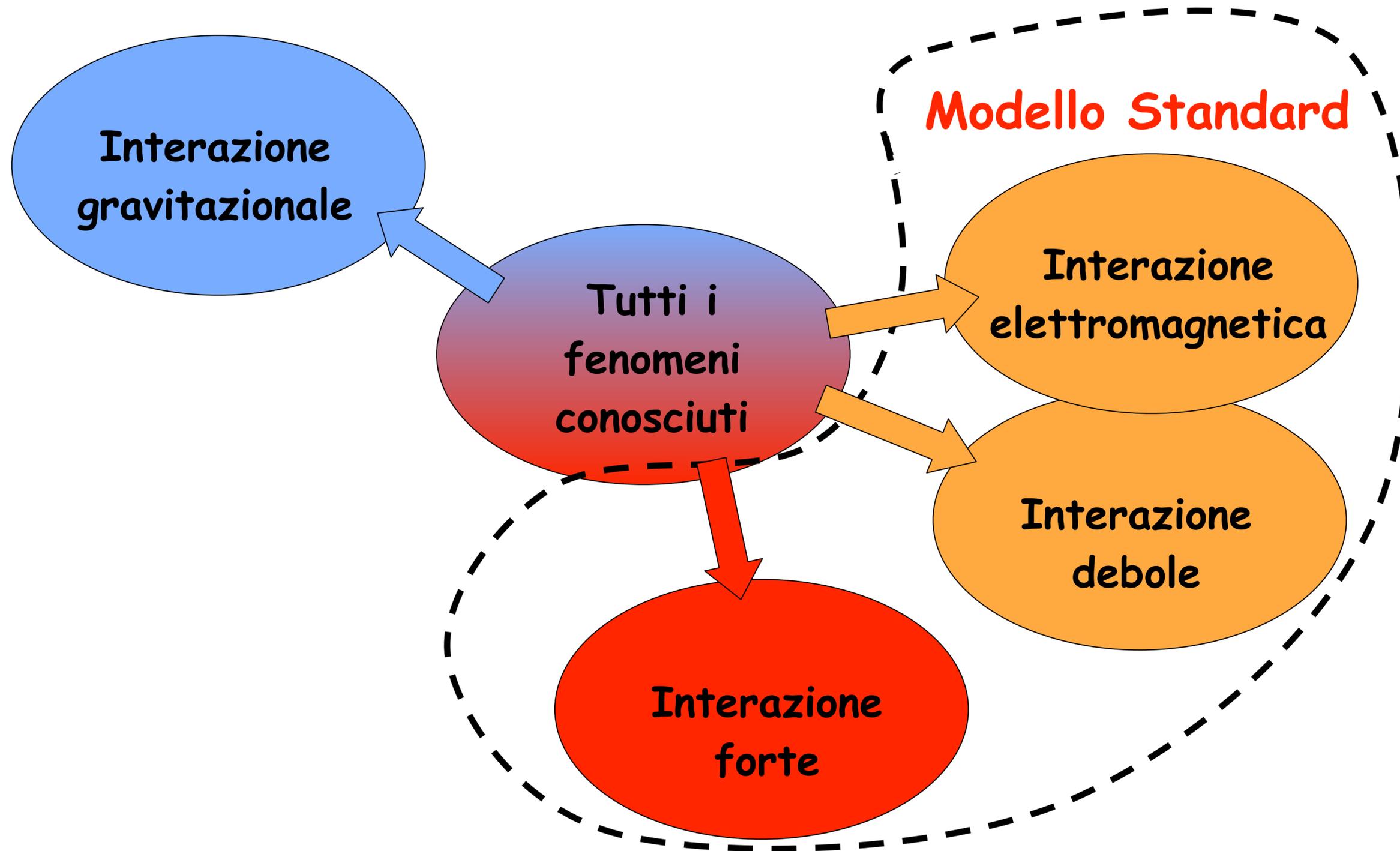




# Cosa impariamo dallo studio delle particelle elementari ?



# Le quattro interazioni fondamentali

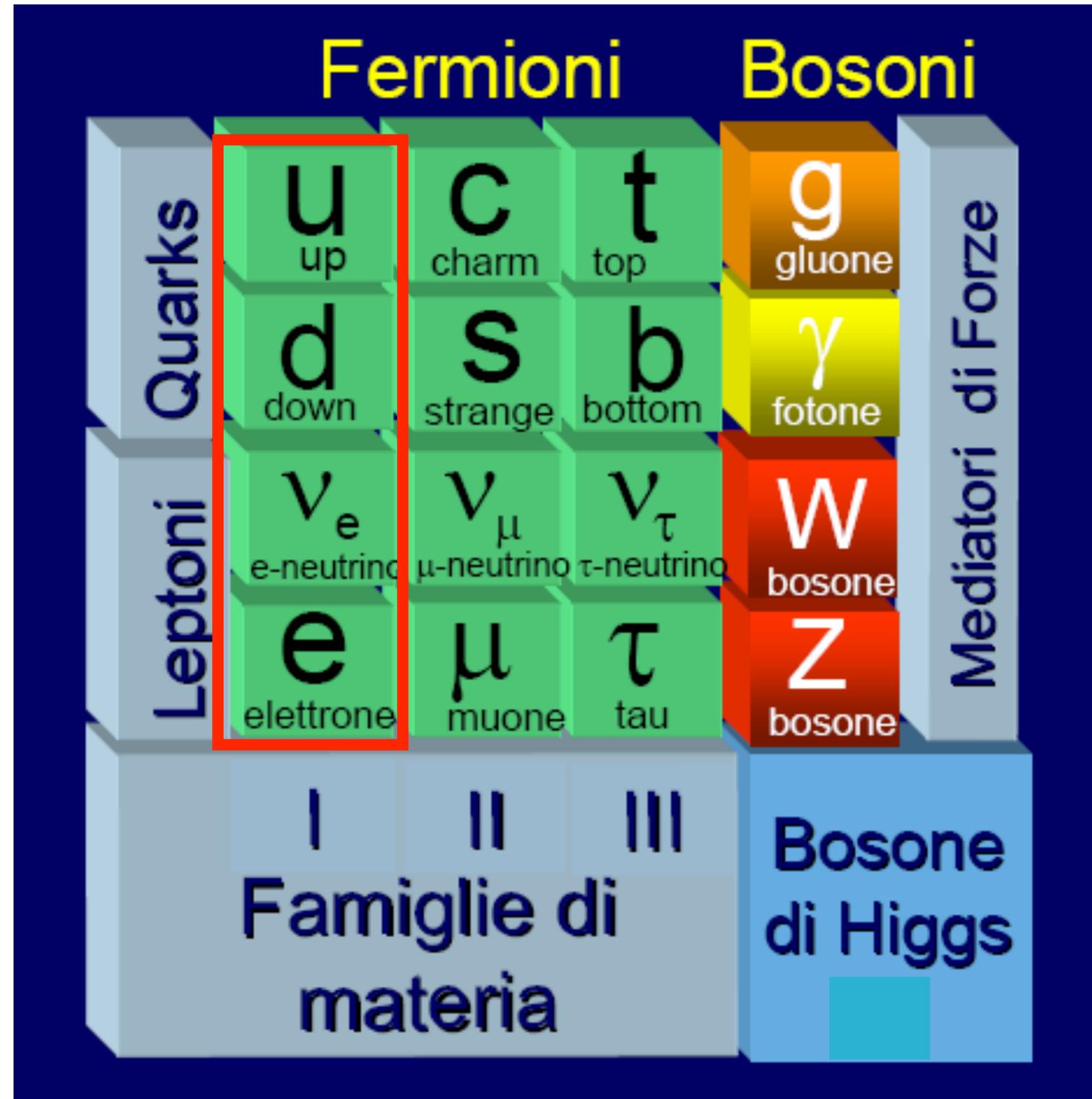


# Modello Standard

tutte le nostre conoscenze in pochi ingredienti base

Tutto ciò che ci è noto è composto da quark e leptoni che interagiscono tramite i mediatori delle forze elettromagnetica, debole, forte e **gravitazionale**

In particolare tutta la materia che ci circonda è composta da quark e leptoni della I famiglia



**materia:** fermioni, spin 1/2

**Interazioni:** bosoni, spin 1,2

leptoni

$\nu_e$

$\nu_\mu$

$\nu_\tau$

e

$\mu$

$\tau$

u

c

t

d

s

b

1°

2°

3°

Debole, Gravitazionale

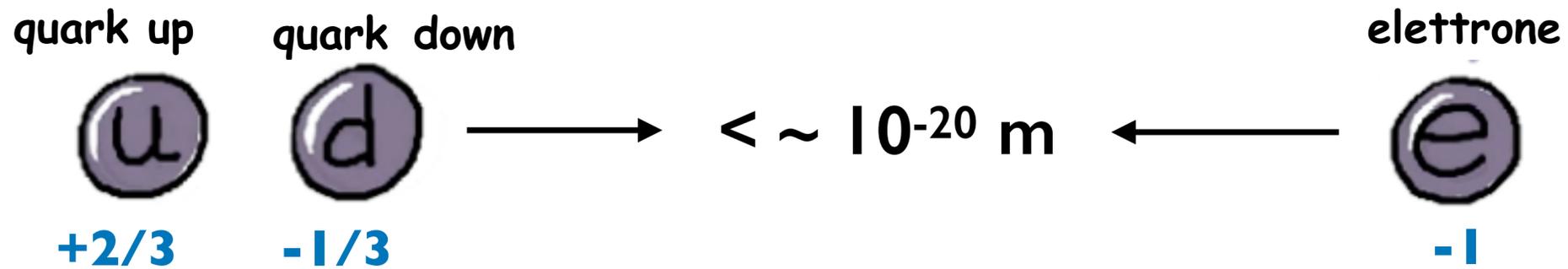
Debole, Gravitazionale,  
Elettromagnetica

Debole, Gravitazionale,  
Elettromagnetica, Forte

quark

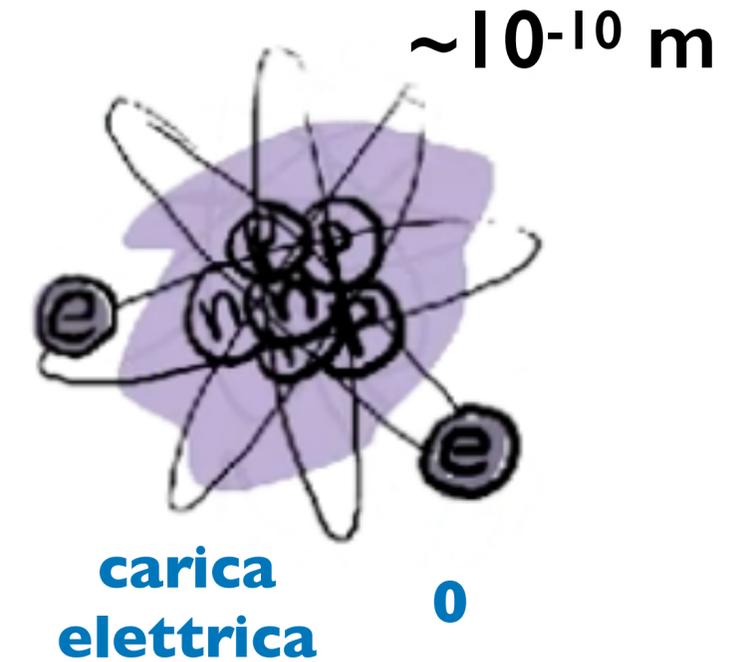
**Bosone di Higgs:** responsabile della massa delle particelle, spin 0

# Tutta la materia che ci circonda e' composta da particella della I famiglia

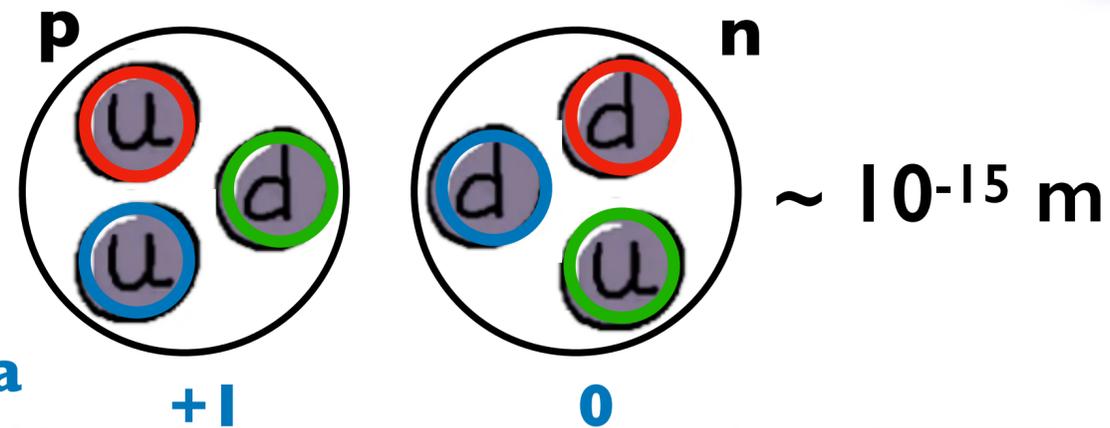


quark u e d costituiscono tramite l'**interazione forte** protoni e neutroni

protoni e neutroni si legano per costituire i nuclei atomici che sono tenuti insieme da un **residuo dell'interazione forte tra quark**

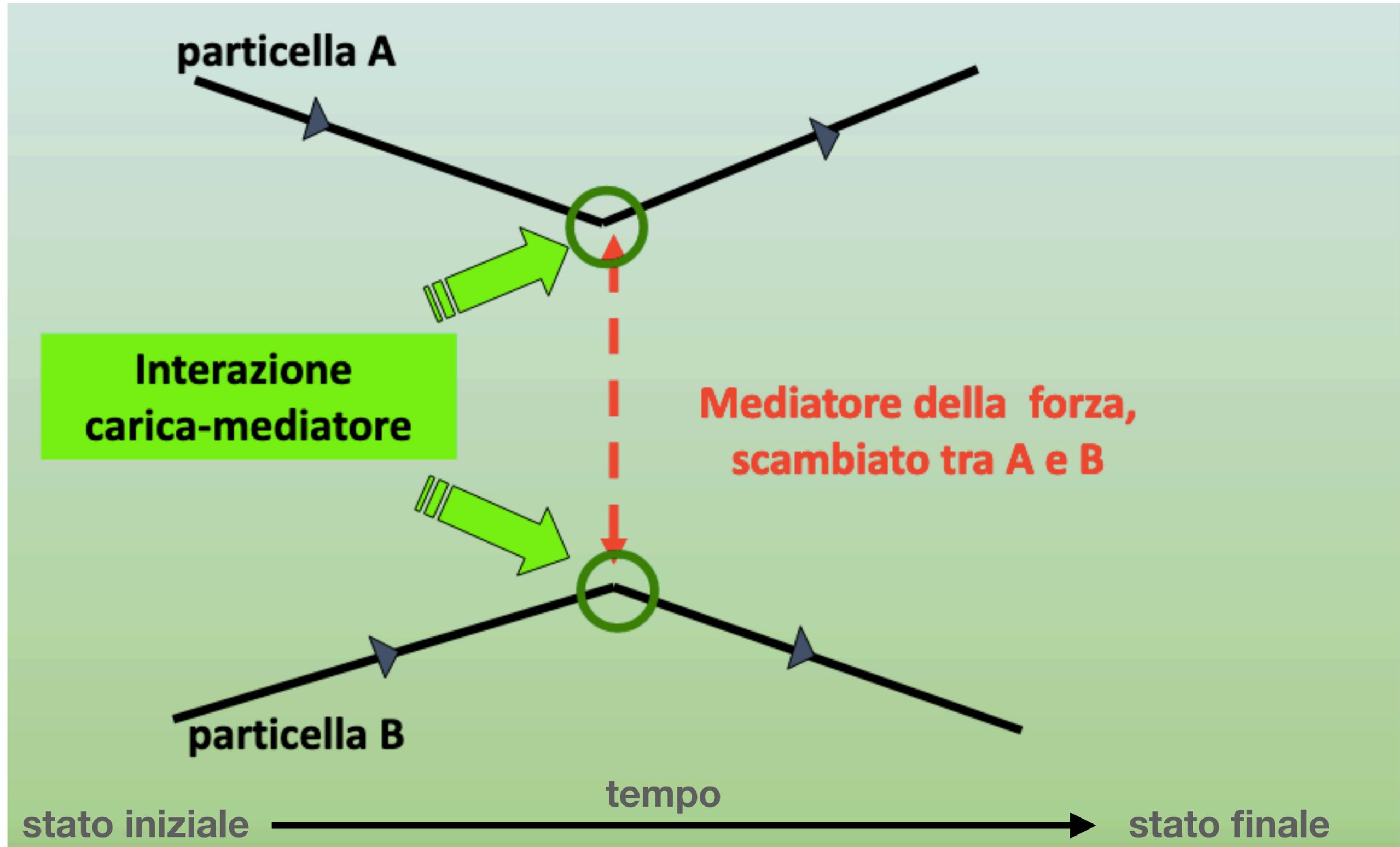


l'atomo e' completato dagli elettroni legati al nucleo dall'**interazione elettromagnetica**



Tutta la materia ordinaria che ci circonda e formata da differenti tipi di atomi

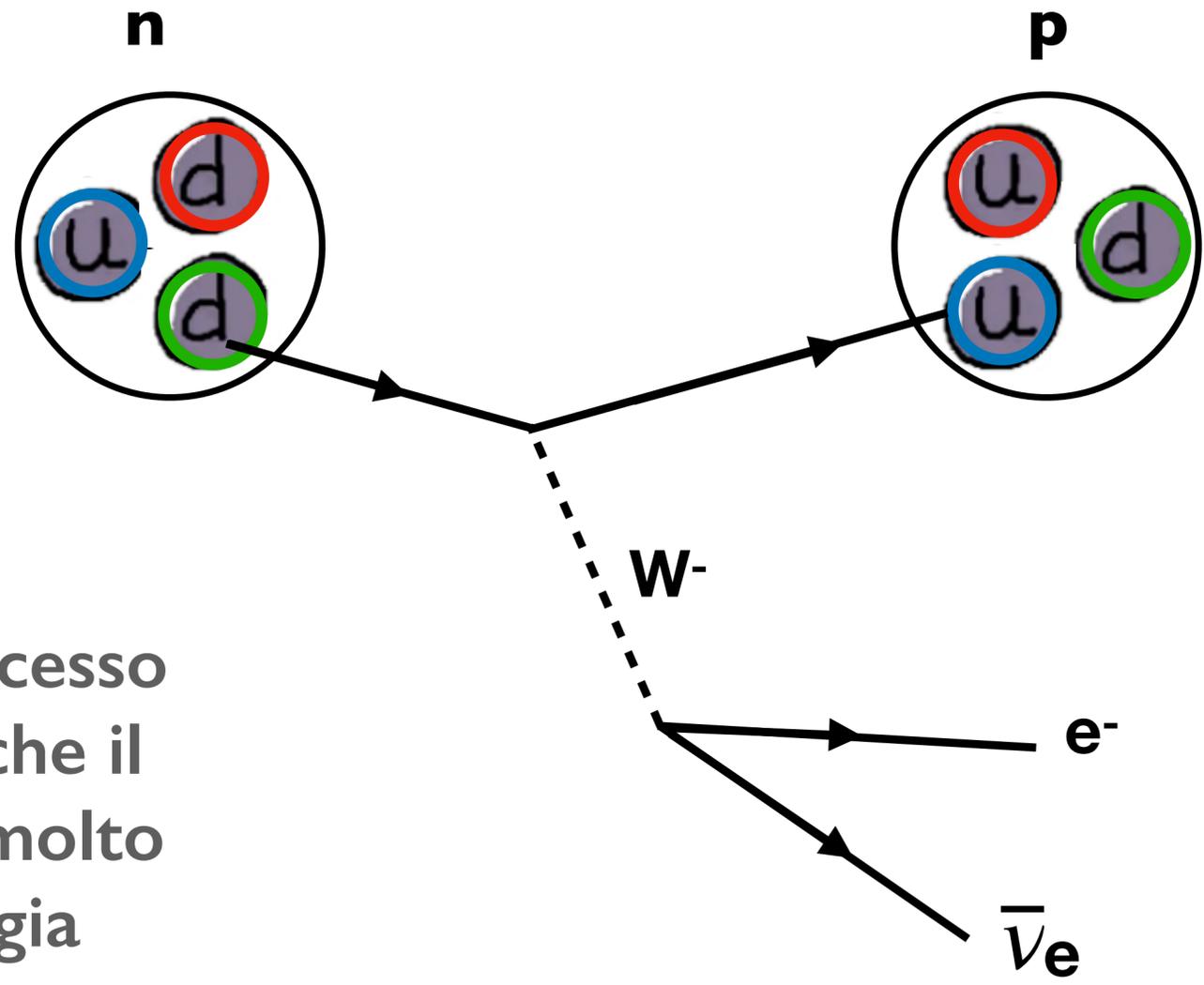
Interazione tra due particelle → scambio del bosone mediatore



# esempio: decadimento $\beta$

$$n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$$

$$M_n - M_p \simeq 1 \text{ MeV}$$



**Vita media lunga:** processo ostacolato dal fatto che il mediatore ha massa molto maggiore dell'energia disponibile nel decadimento

**Corto raggio di azione:** il mediatore sopravvive per un tempo compatibile con il principio di indeterminazione

$$\Delta t \cdot \Delta M > \hbar$$

# Il campo di Higgs e l'origine della massa

Pausa di un congresso di fisica



campo di Higgs

Un giovane studente al suo primo congresso non ha difficoltà a muoversi nella stanza



particella leggera

Un fisico affermato viene circondato da colleghi ed ha grosse difficoltà a spostarsi



Mr Einstein!!

Mr Einstein!!

Mr Einstein!!

particella massiva

Una notizia si diffonde provocando grande eccitazione

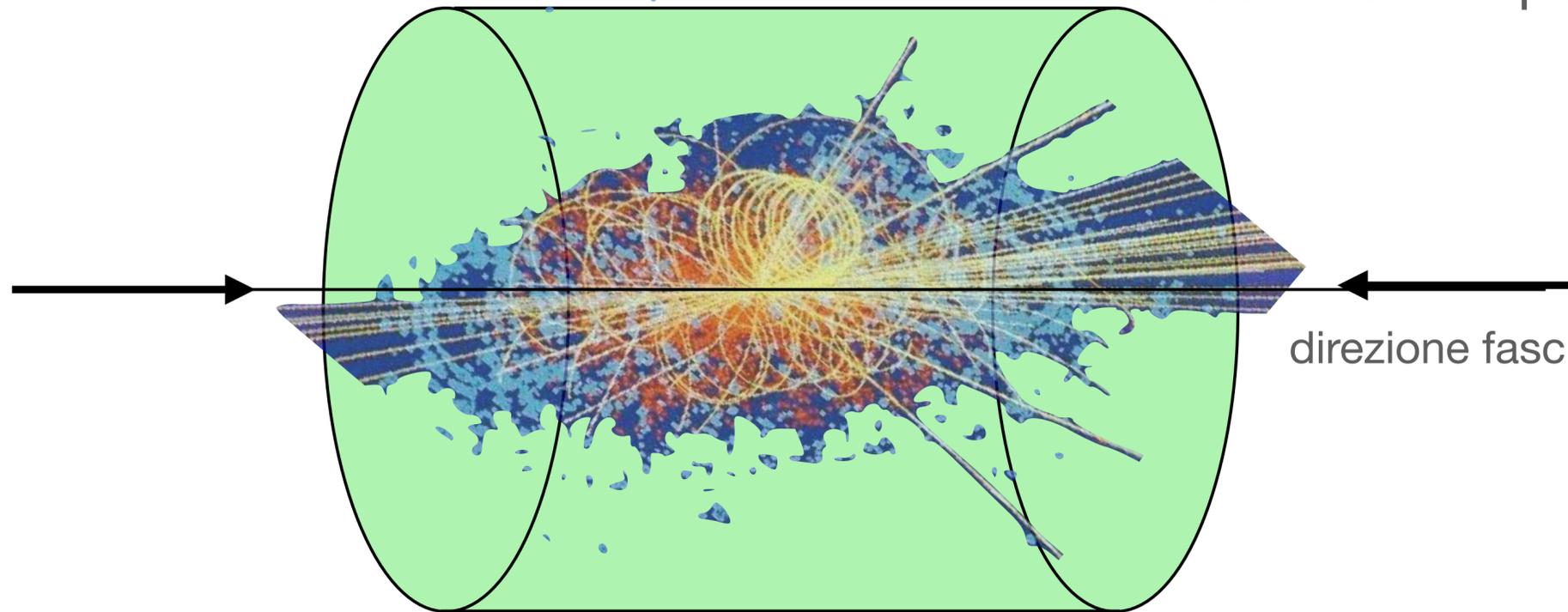


Al CERN hanno scoperto il bosone di Higgs !!!!

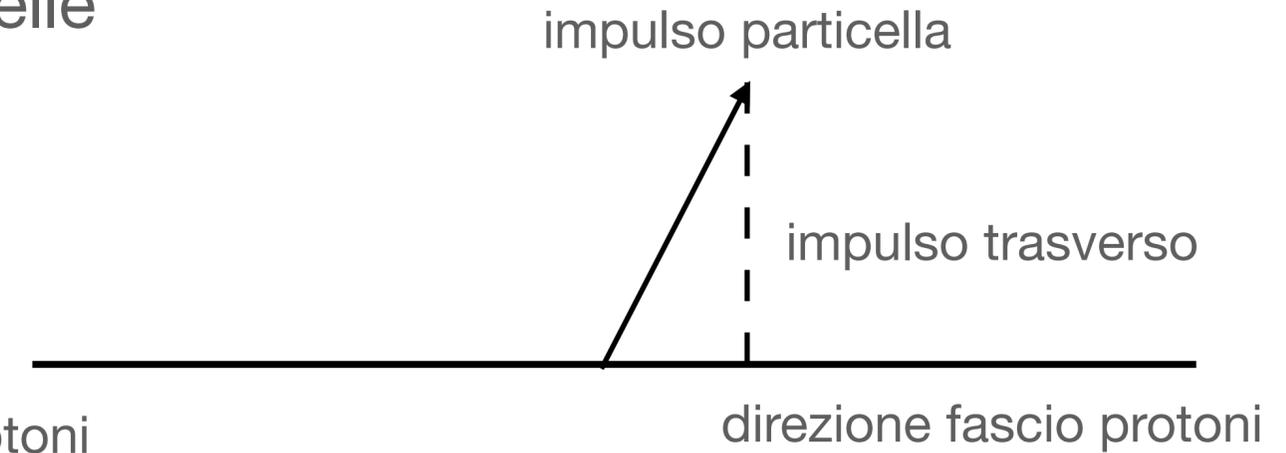
bosone di Higgs

# Selezione eventi interessanti: impulso trasverso

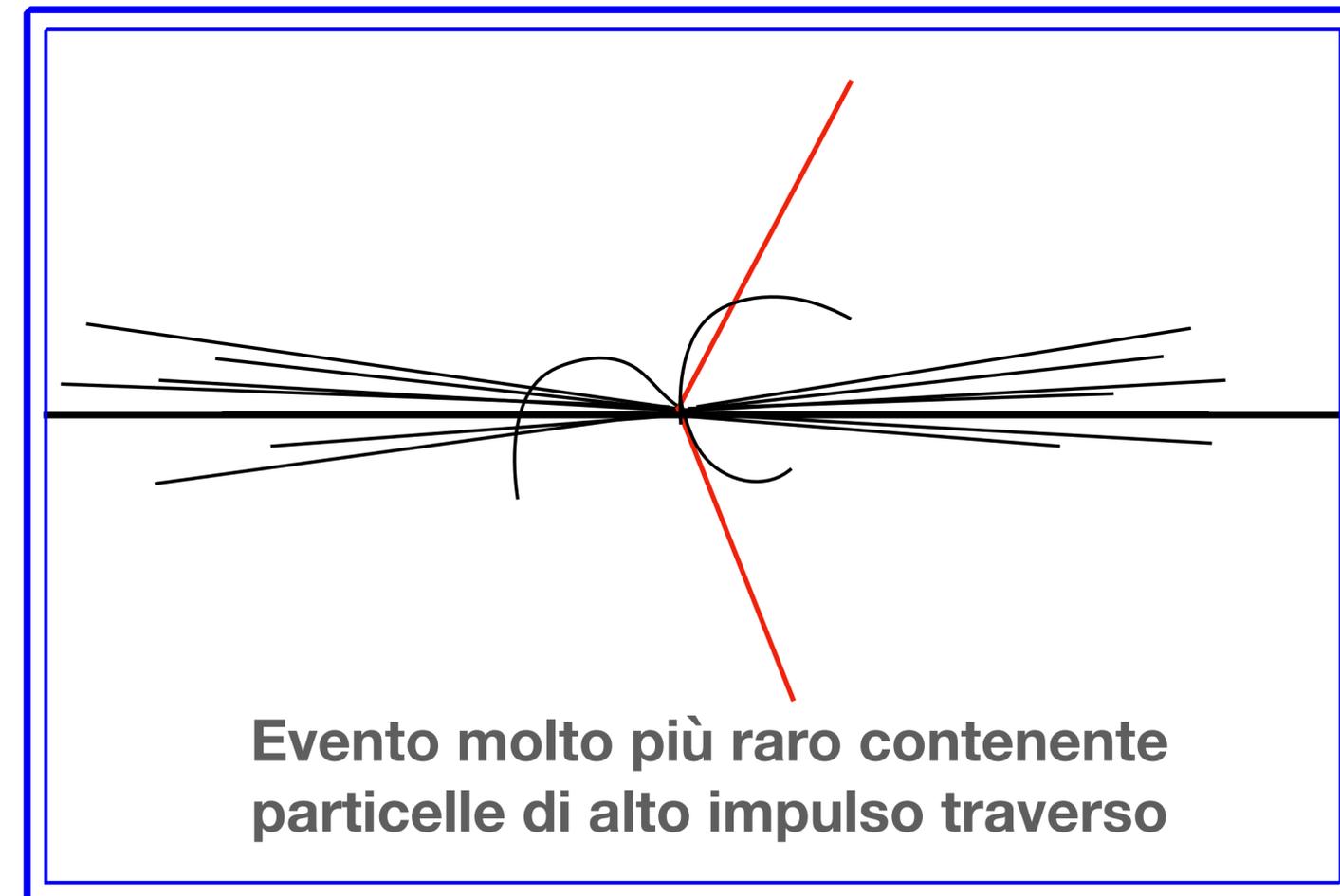
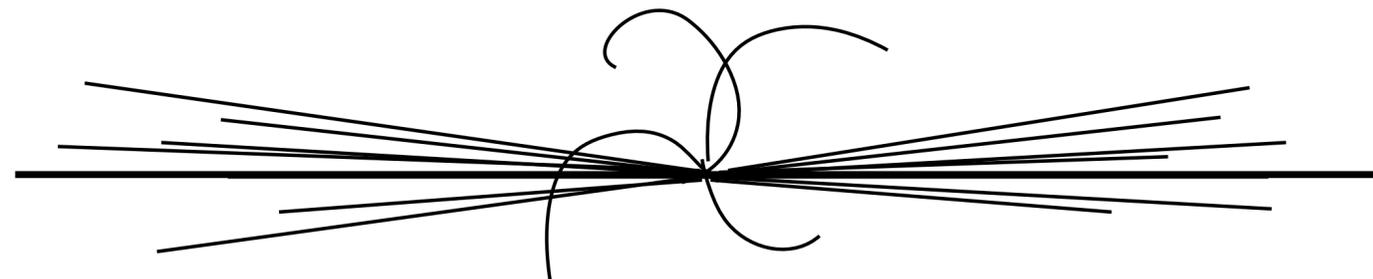
Come abbiamo visto da ciascuna collisione si generano centinaia di particelle



direzione fascio protoni



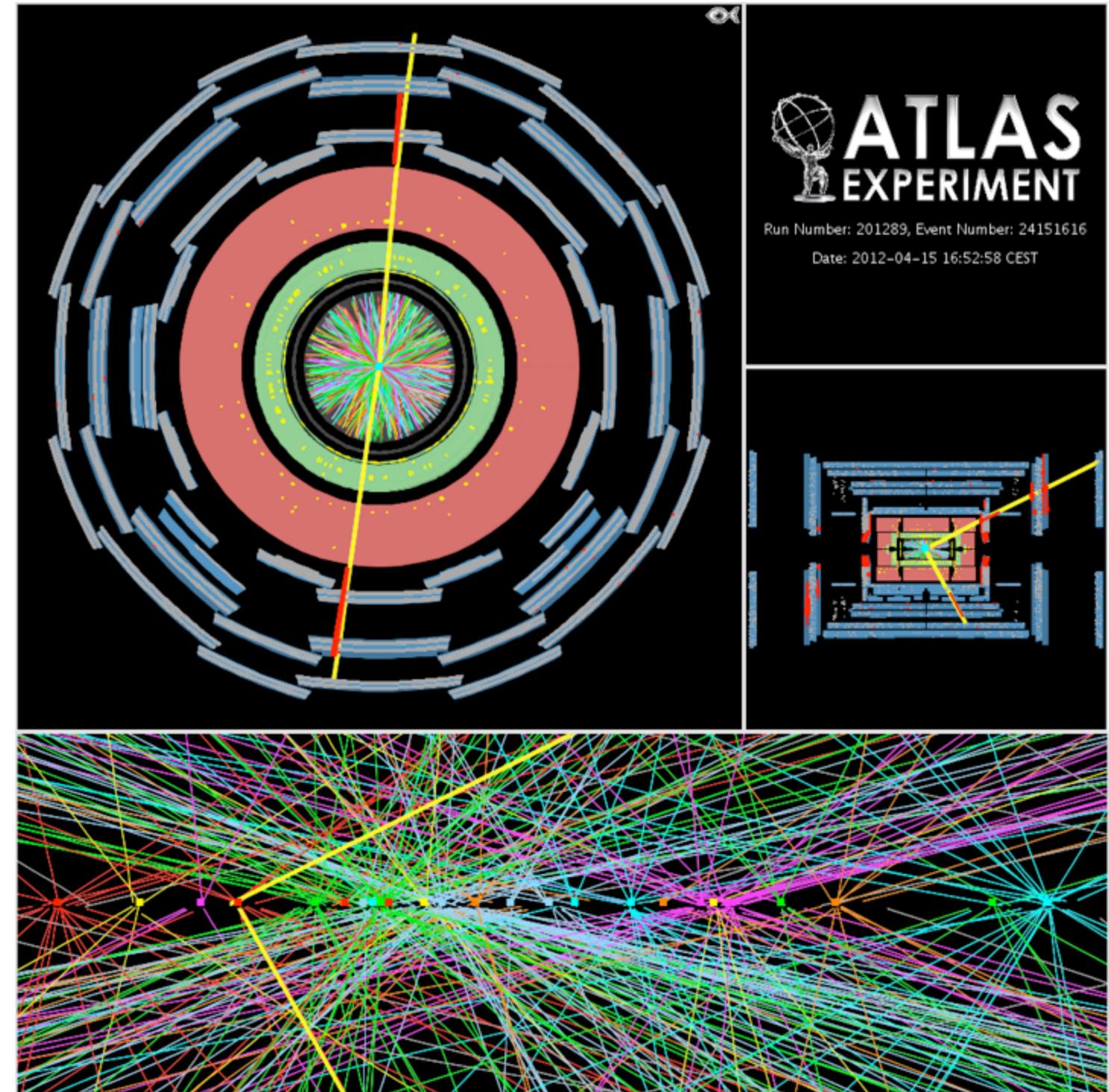
**Evento molto frequente ad LHC:  
molte tracce di basso impulso trasverso**



**Evento molto più raro contenente  
particelle di alto impulso trasverso**

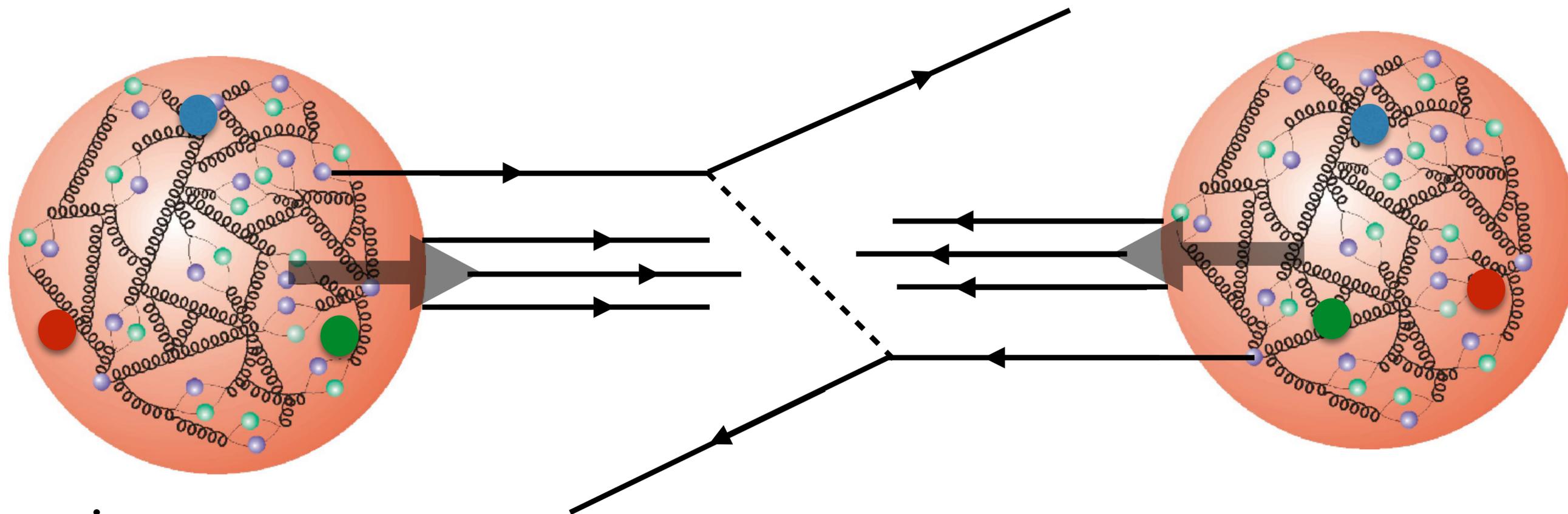
# Qualche dettaglio in piu' su LHC

- ▶ protoni immagazzinati in pacchetti  
~ 100 miliardi di protoni x pacchetto  
~ 2800 pacchetti che circolano
- ▶ i pacchetti si incrociano all'interno dei rivelatori ogni 25 ns (40 milioni di volte al secondo)
- ▶ per ogni incrocio ci sono piu' collisioni protone-protone
- ▶ Gli eventi interessanti sono estremamente rari, dobbiamo produrre molte collisioni per poterne avere qualcuna di interesse
- ▶ Soltanto una piccolissima frazione di tutte le collisioni viene conservata per l'analisi successiva (qualche centinaio di eventi al secondo)  Sistema veloce (online) per la selezione degli eventi interessanti: **trigger**

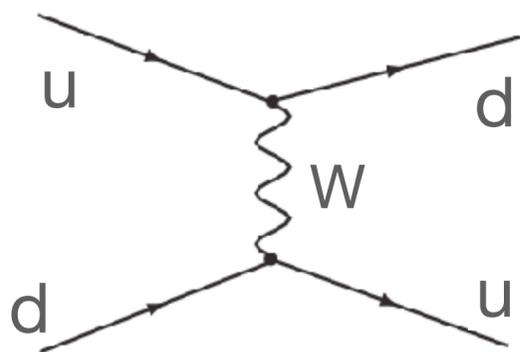


# Il protone alle energie di LHC ha una struttura complessa

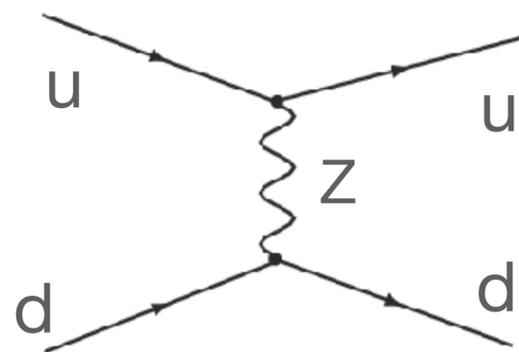
collisioni tra le componenti del protone quark e gluoni



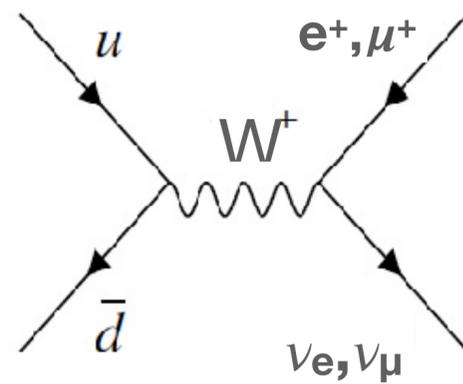
alcuni esempi:



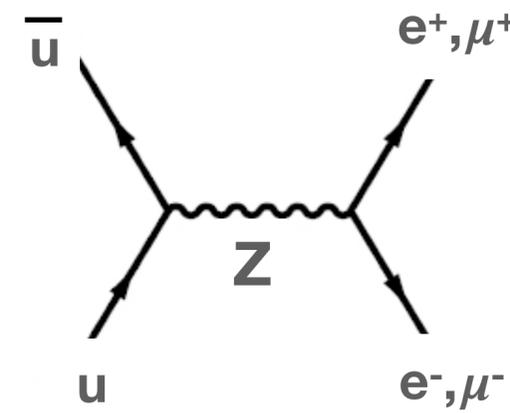
scambio  $W$



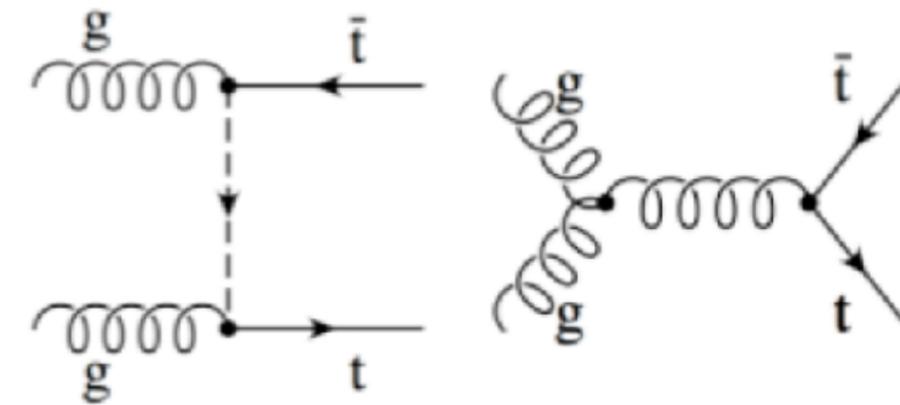
scambio  $Z$



produzione  $W$

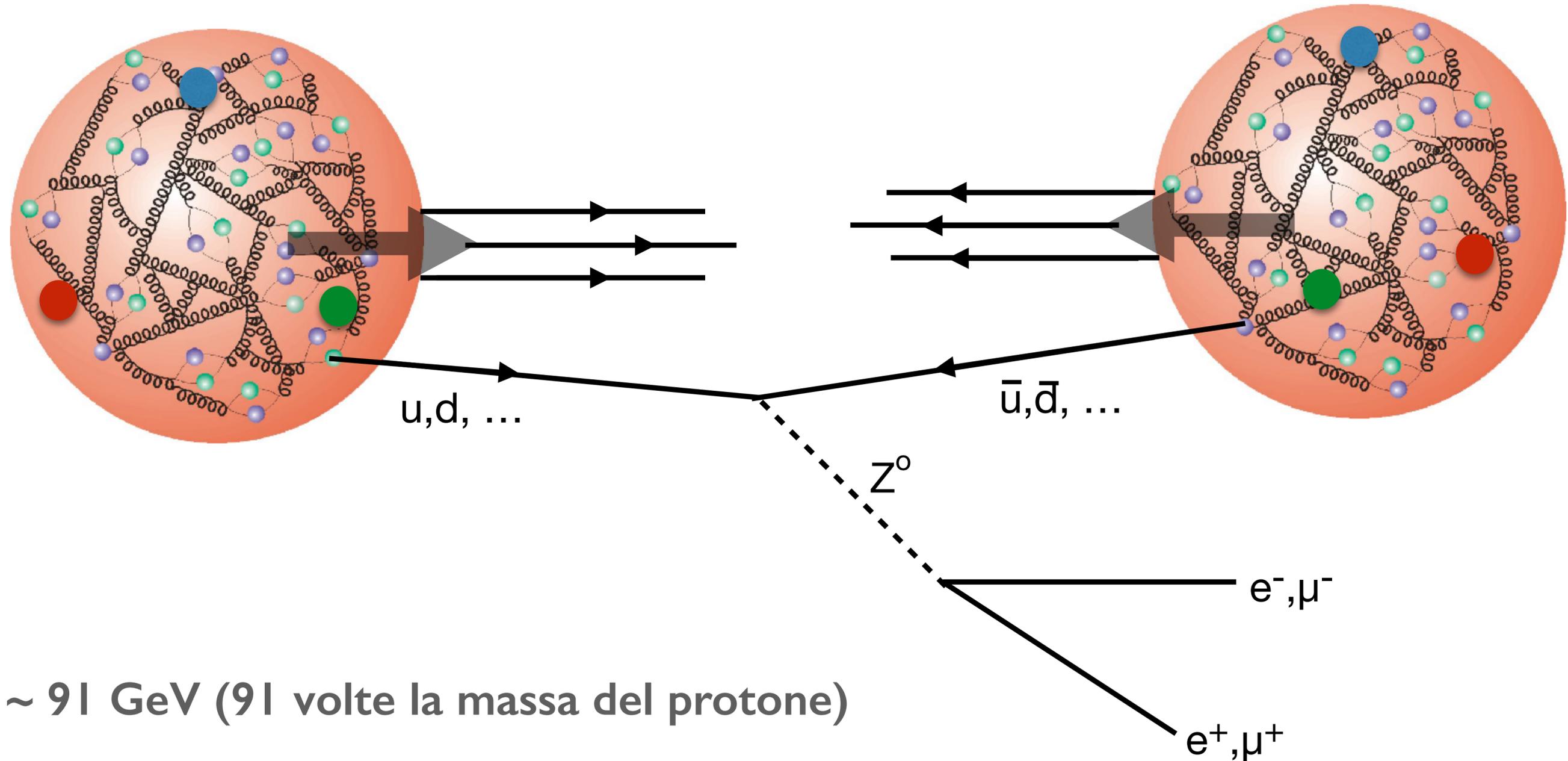


produzione  $Z$



collisioni gluone-gluone

# Mediatore interazione debole neutra: $Z^0$



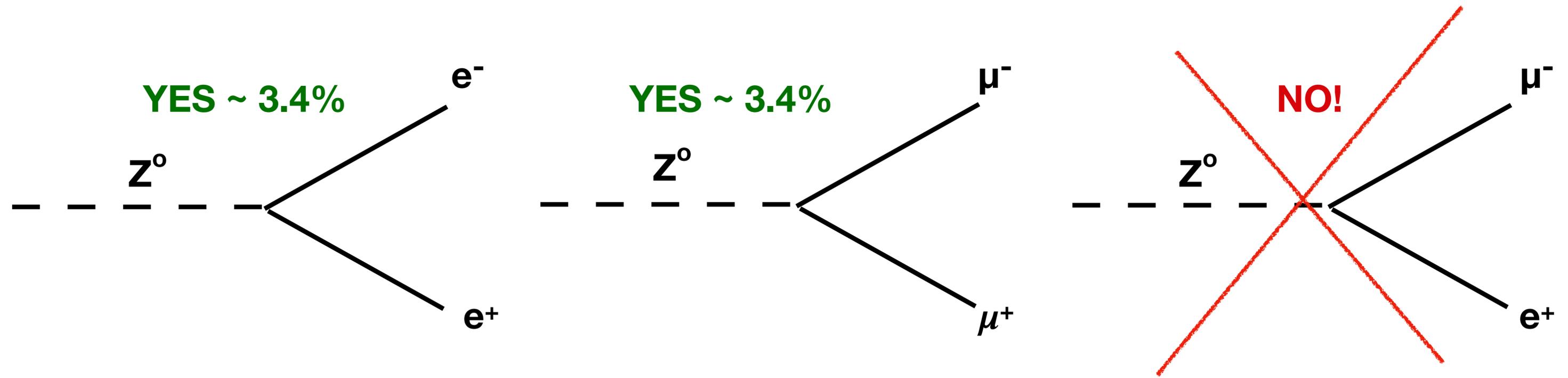
► Massa  $\sim 91$  GeV (91 volte la massa del protone)

► Non la osserviamo direttamente (vive per un tempo brevissimo  $\sim 10^{-25}$  s)

► La sua presenza è indicata dallo studio dei prodotti di decadimento

# Decadimento della $Z^0$

La  $Z^0$  vive pochissimo e poi decade trasformandosi in coppie di particella-antiparticella (es: elettrone-antielettrone oppure muone-antimuone ~ 3% dei casi ciascuno)



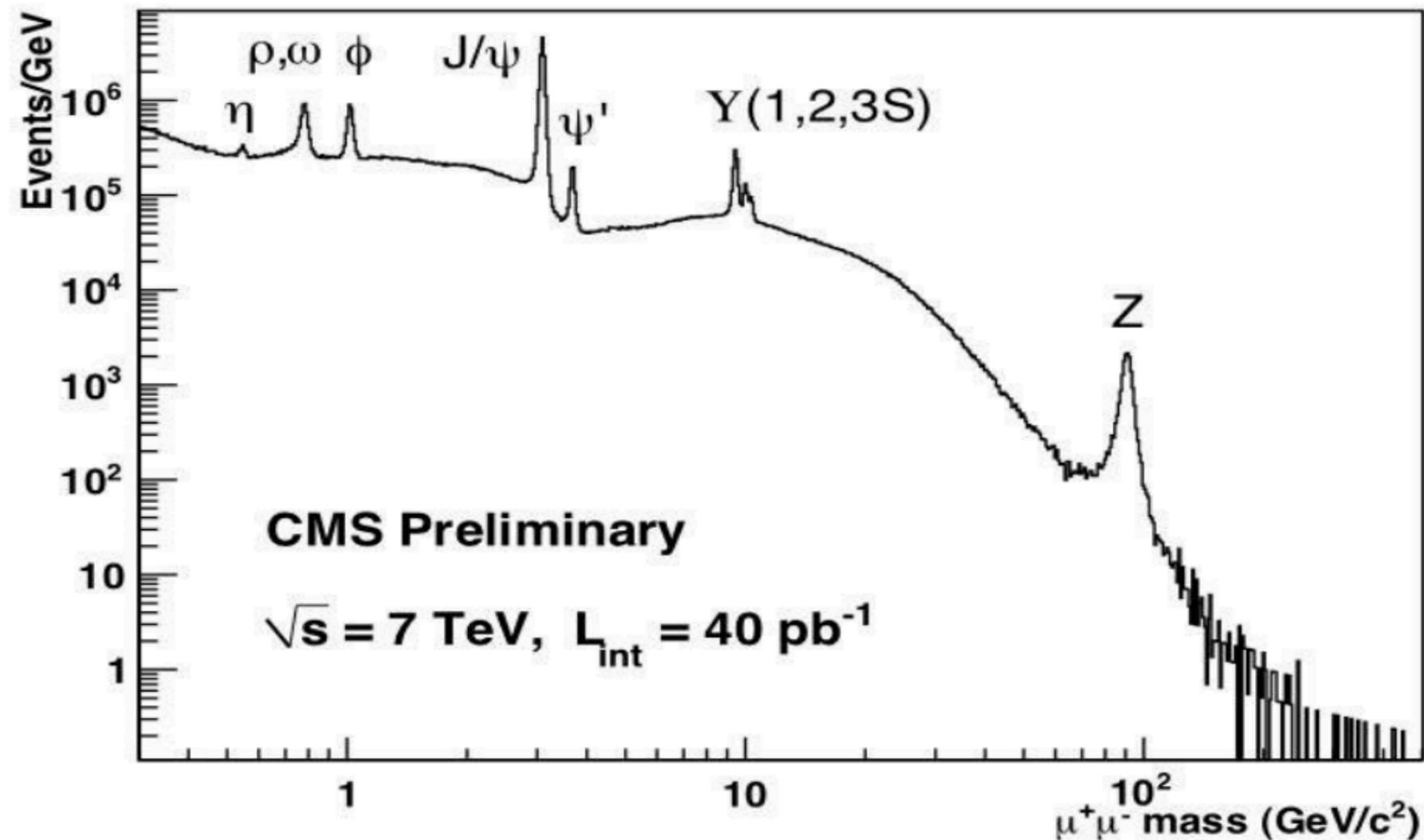
Massa invariante:

$$m^2 = (E_1/c^2 + E_2/c^2)^2 - (\vec{p}_1/c + \vec{p}_2/c)^2$$

Consente di risalire alla massa a riposo della particella madre dalla misura di energia ed impulso dei prodotti di decadimento

# Nell'esercizio troverete coppie di elettroni e muoni

La misura della massa invariante di queste coppie contiene il “ricordo” del fatto che esse sono state prodotte dal decadimento della Z o di altre particelle

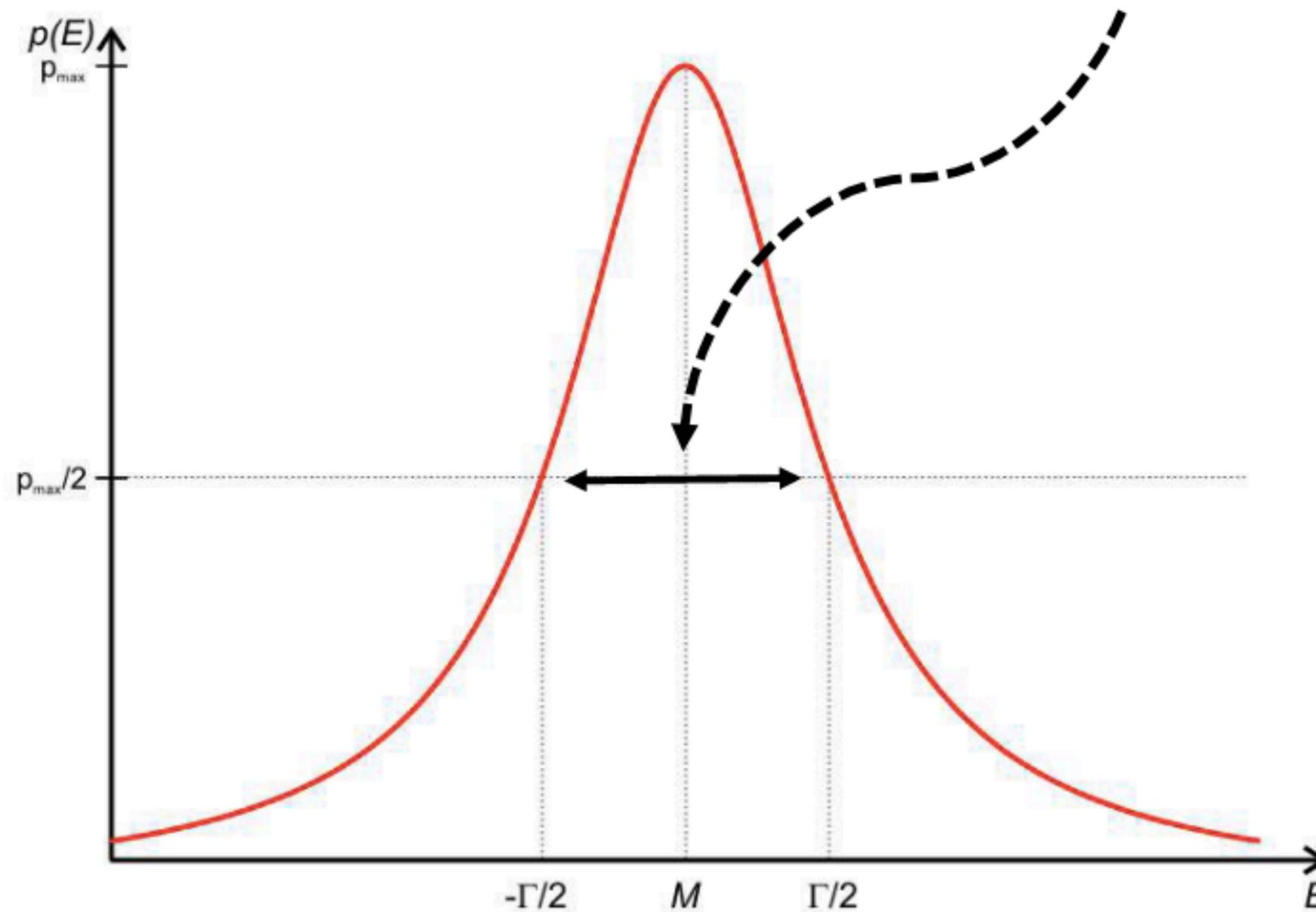


Le coppie possono anche essere prodotte da processi diversi dal decadimento di una particella ed in questo caso non si concentrano attorno ad una massa precisa

# Perche' non si osserva una massa ben precisa ?

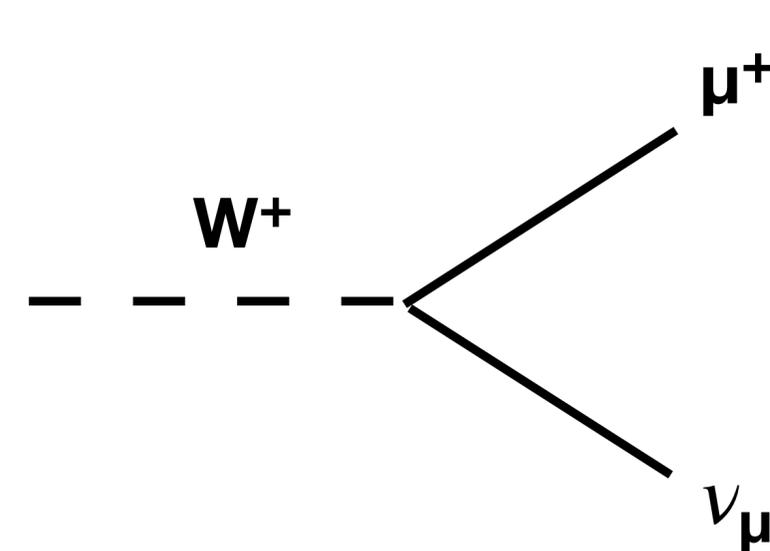
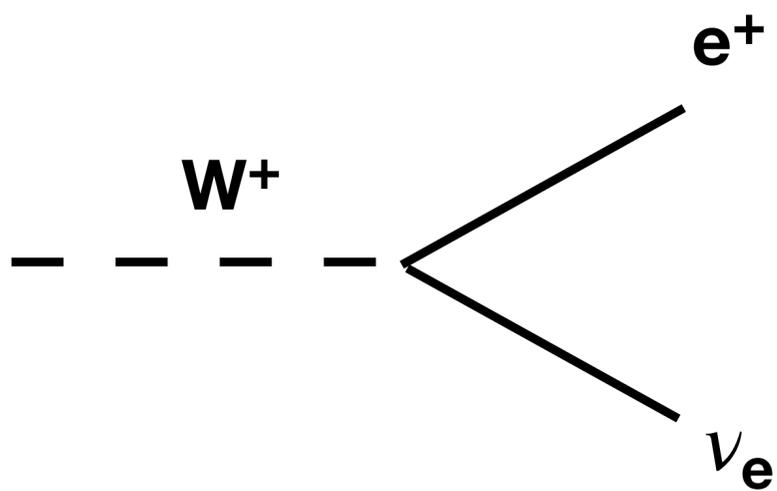
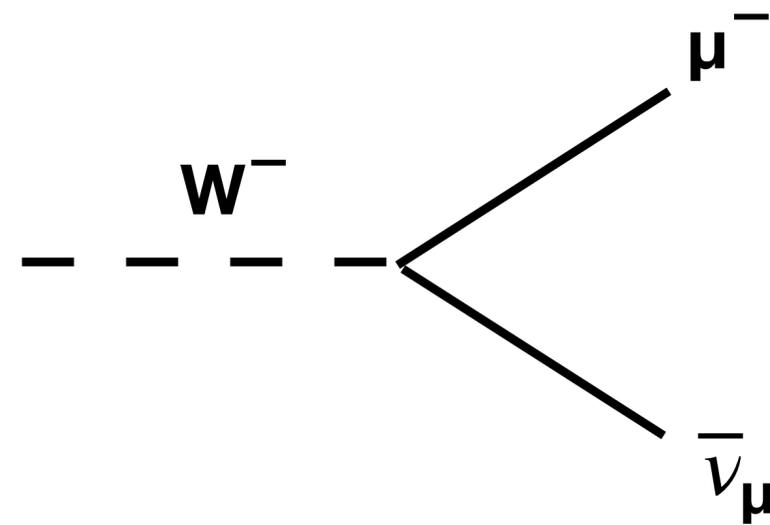
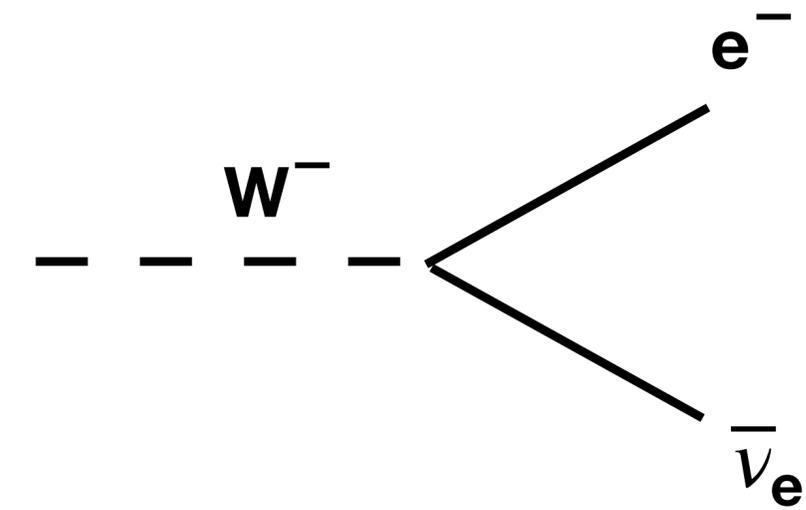
Particella che “nasce e muore” in un tempo brevissimo:  
la sua massa (energia) è quindi indeterminata

Principio di indeterminazione di Heisenberg:  $\Delta t \cdot \Delta M > \hbar$



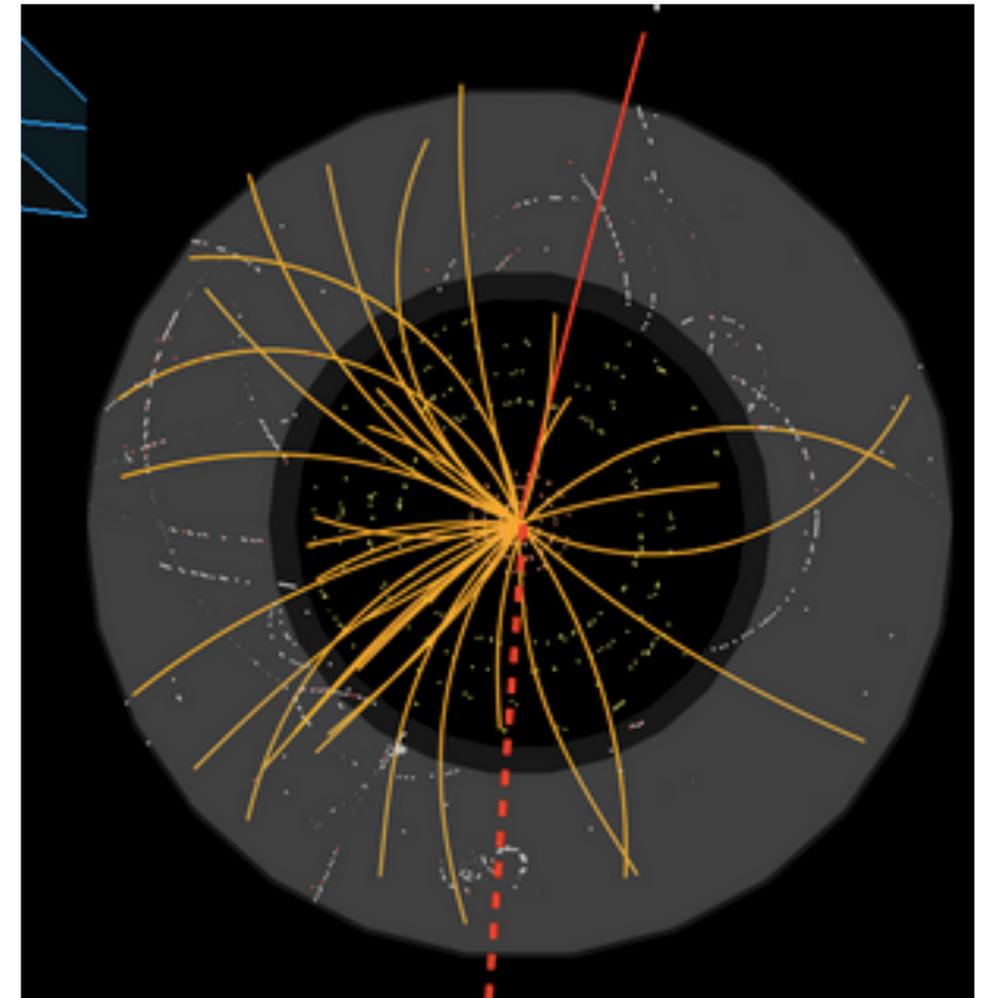
# Altri processi che possono produrre uno o più leptoni ( $e/\mu$ )

## Decadimento W



La carica del leptone indica la carica del W

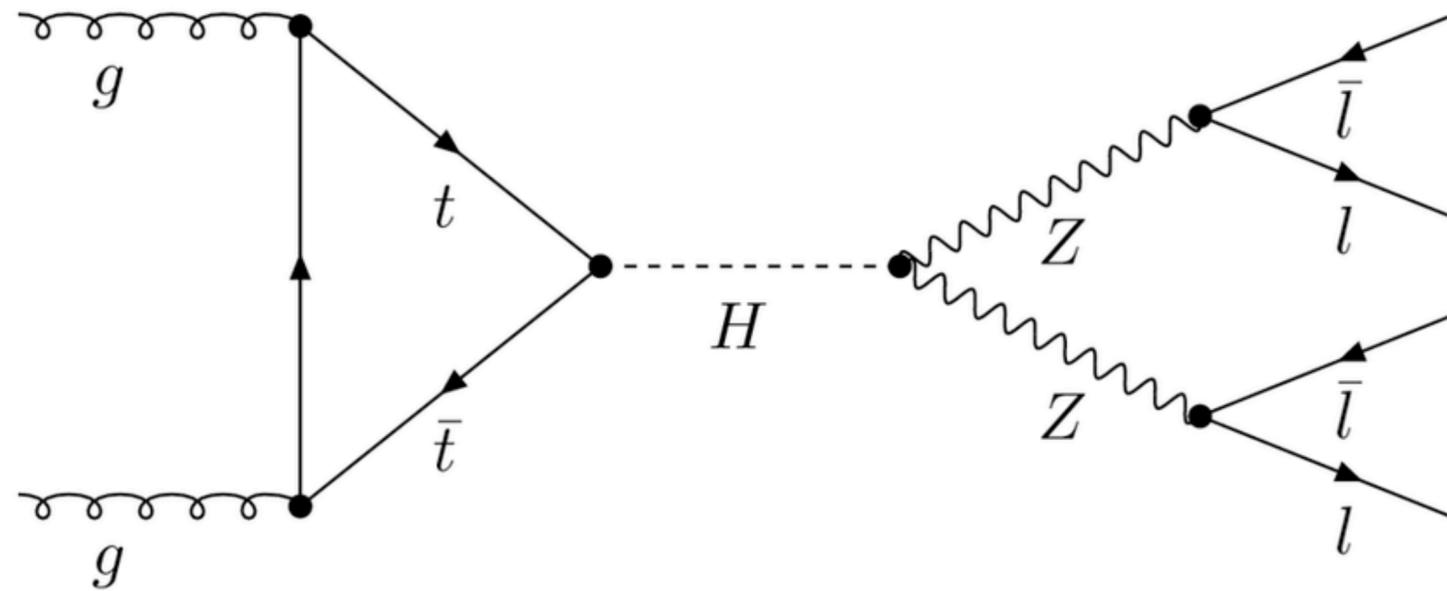
Il neutrino attraversa il rivelatore senza rilasciare alcun segnale:  
la sua presenza e' segnalata dall'energia mancante



# Altri processi che possono produrre uno o più leptoni ( $e/\mu$ )

## Bosone di Higgs (spin 0)

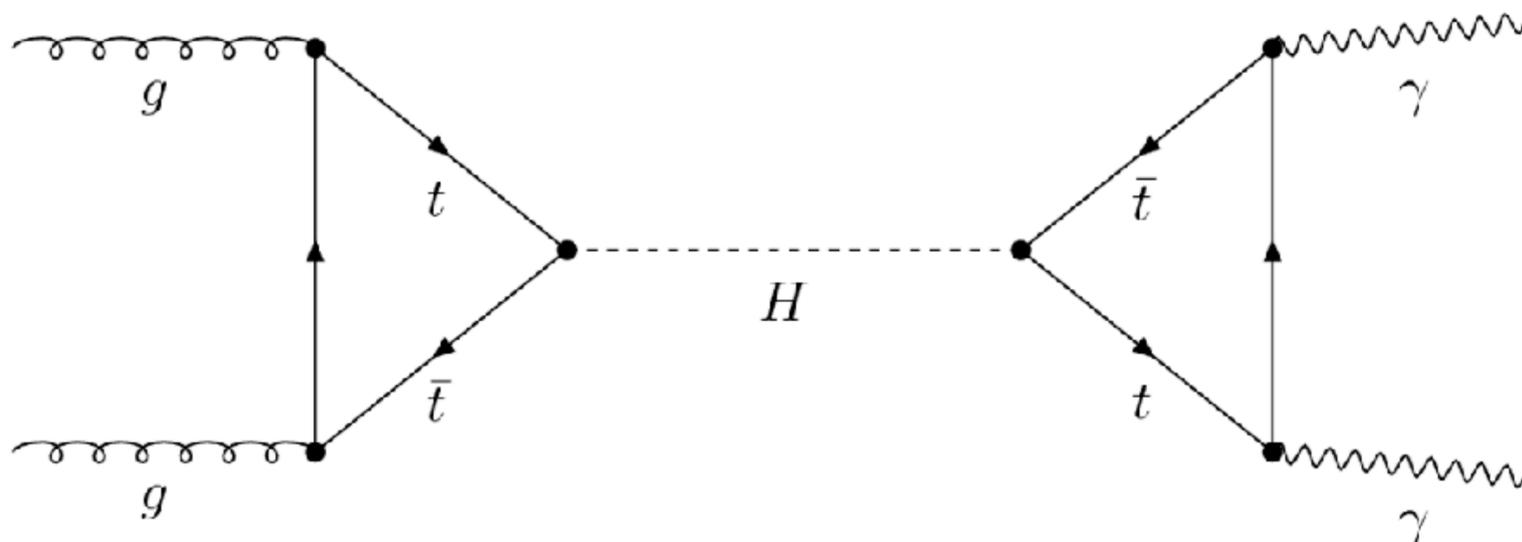
decade in coppie di Z (~2.5% dei casi)



Le particelle fondamentali acquistano massa grazie alla loro interazione con il campo di Higgs

Stati finali con 4 elettroni, 4 muoni, o 2 elettroni e 2 muoni

può anche decadere in coppie di fotoni (~0.2% dei casi)

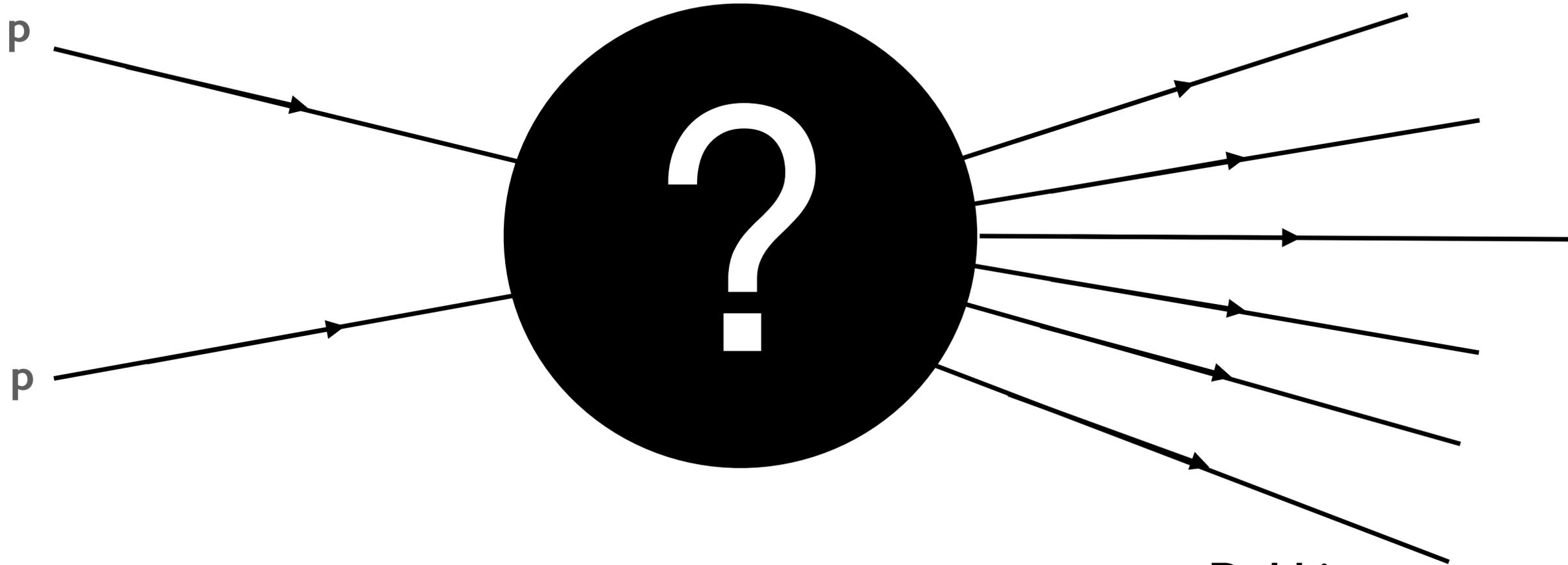


Stati finali con 2 fotoni

# Eventi di fondo

Stato iniziale

Stato finale



Conosciamo lo stato iniziale:  
protoni di energia nota

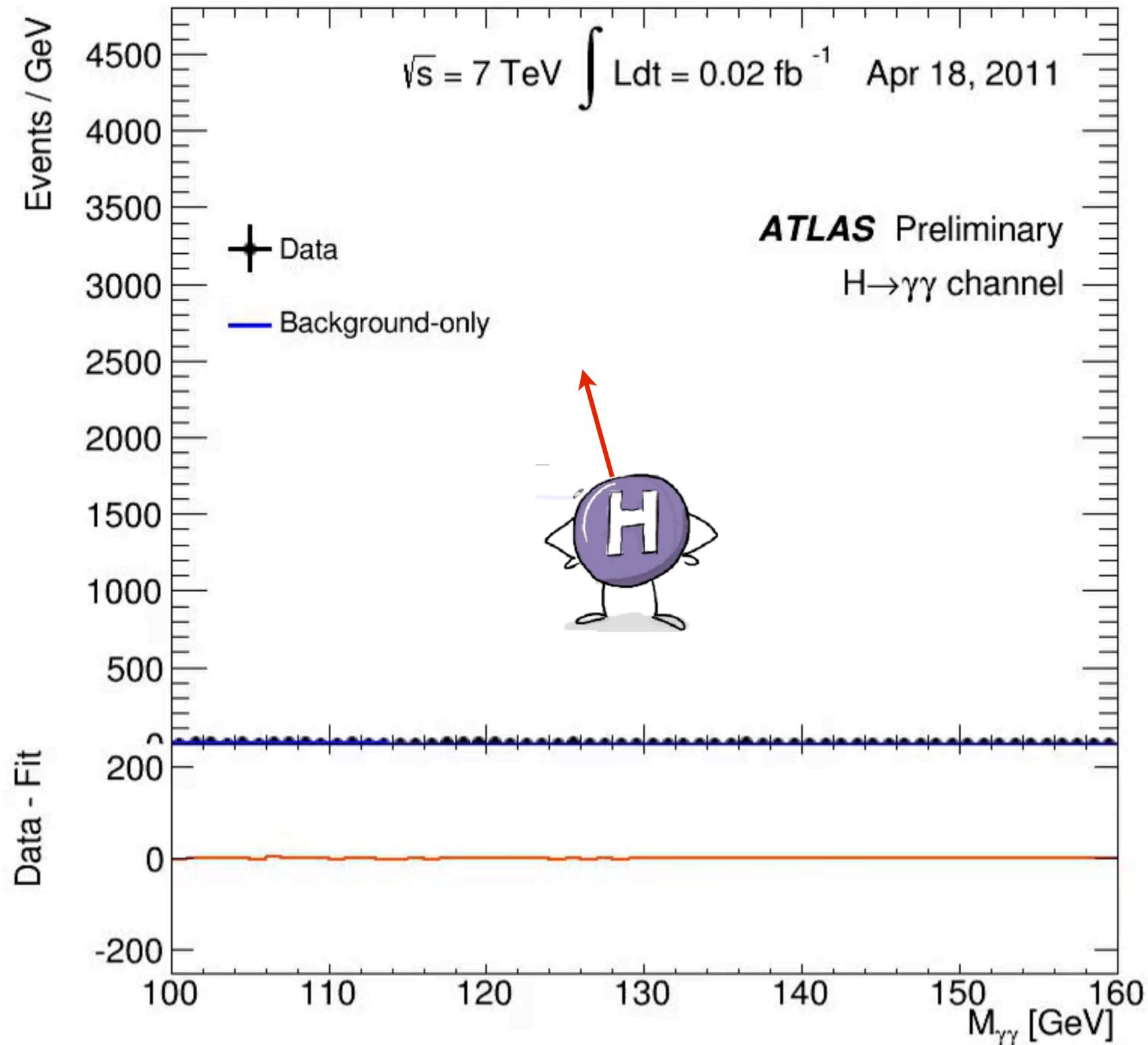
Non abbiamo accesso a quanto  
accade nella collisione

Dobbiamo cercare di capirlo  
dalla misura delle particelle  
nello stato finale

**Molti processi differenti possono produrre stati finali simili**

**➔ eventi di fondo che complicano la misura del segnale che vogliamo identificare**

# Identificazione del segnale dell'Higgs in stati finali con due fotoni

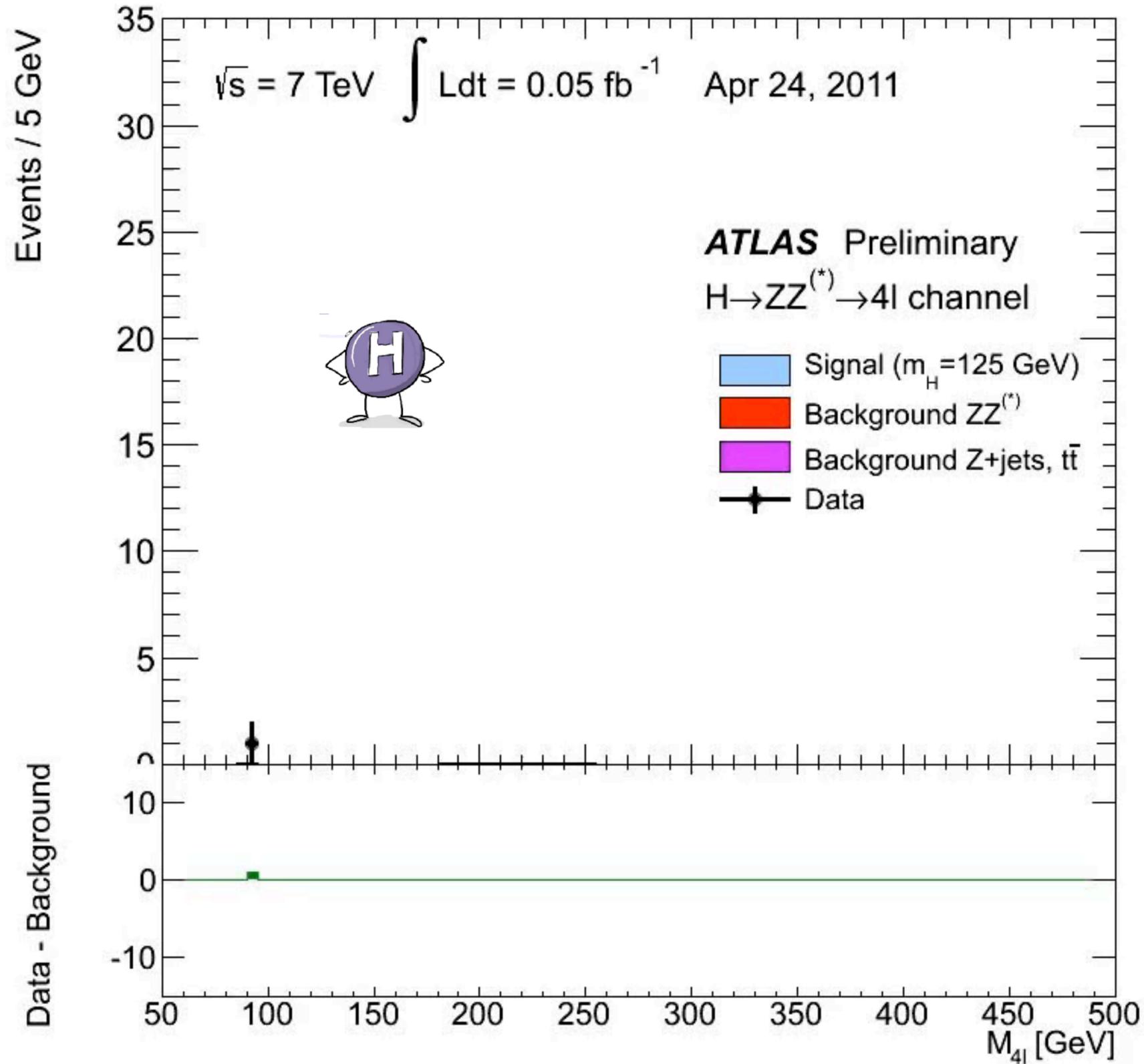


Non e' detto che i decadimenti piu' frequenti siano i migliori.

$$H \rightarrow \gamma\gamma \quad 0.2\% \text{ dei casi}$$

Occorre anche considerare i disturbi da processi con stati finali simili

# Higgs in 4 leptoni (e/ $\mu$ )



$$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l(e/\mu)$$

0.012% dei casi

# CERN, 4 luglio 2012: annuncio della scoperta



Francois Englert



Peter Higgs



**Nobel prize in physics 2013**

# Abbiamo veramente capito tutto ?

- ▶ Con la scoperta del bosone di Higgs il puzzle del Modello Standard è stato completato
- ▶ Nei 10 anni trascorsi dalla sua scoperta il bosone di Higgs è stato studiato ad LHC con sempre maggior precisione
- ▶ Tutti gli studi hanno fino ad ora confermato come il Modello Standard funzioni estremamente bene riuscendo a dar conto di tutte le osservazioni

## Tante questioni ancora senza risposta

- Molti parametri liberi, valore delle masse delle particelle completamente arbitrari
- Perché 3 famiglie una replica dell'altra ?
- Che fine ha fatto l'antimateria ?
- Che cos'è la materia oscura ?
- La gravità come si inserisce in questo quadro ?

**Molte sfide da raccogliere per le nuove generazioni di fisici !**