

2025 INTERNATIONAL MASTER CLASS



F. FABBRI

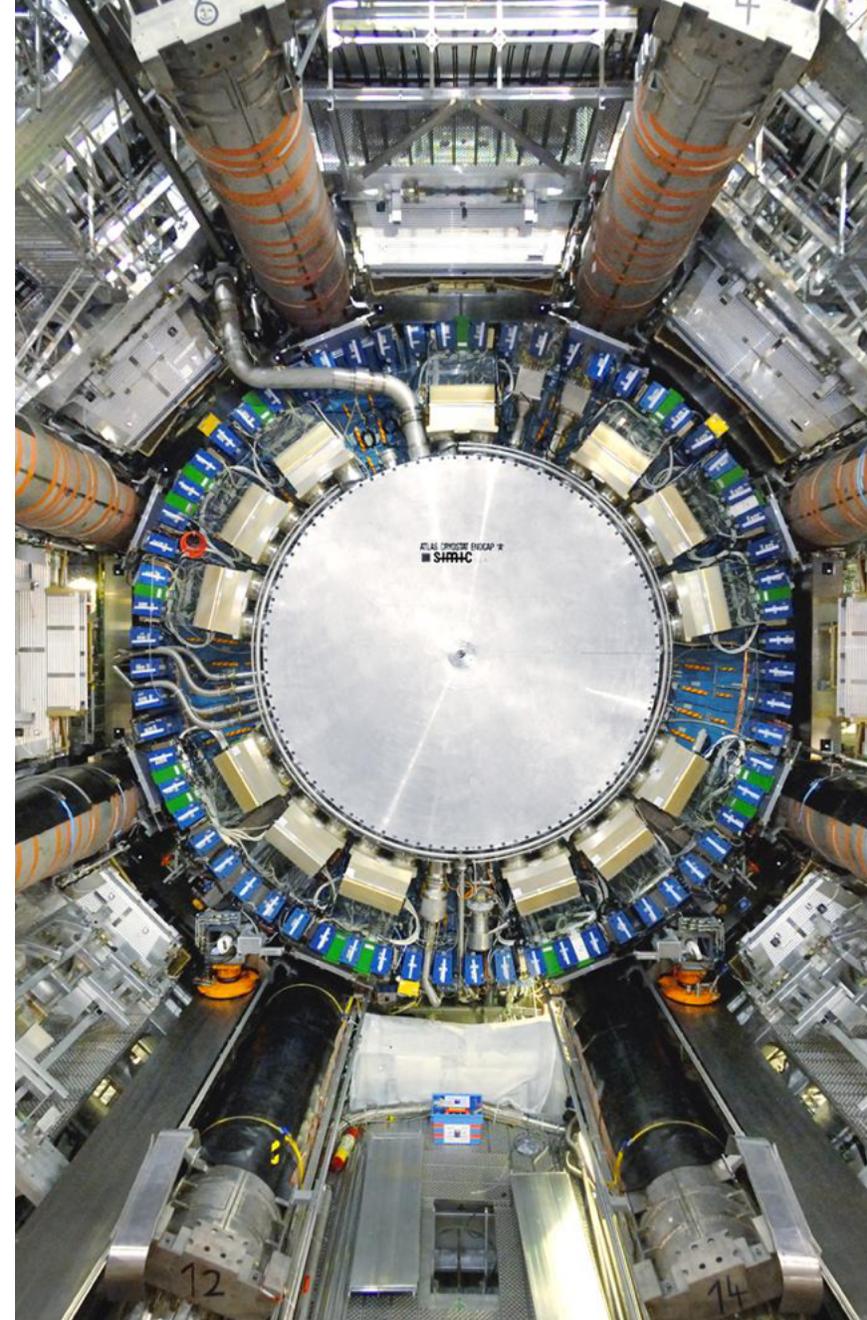


ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA



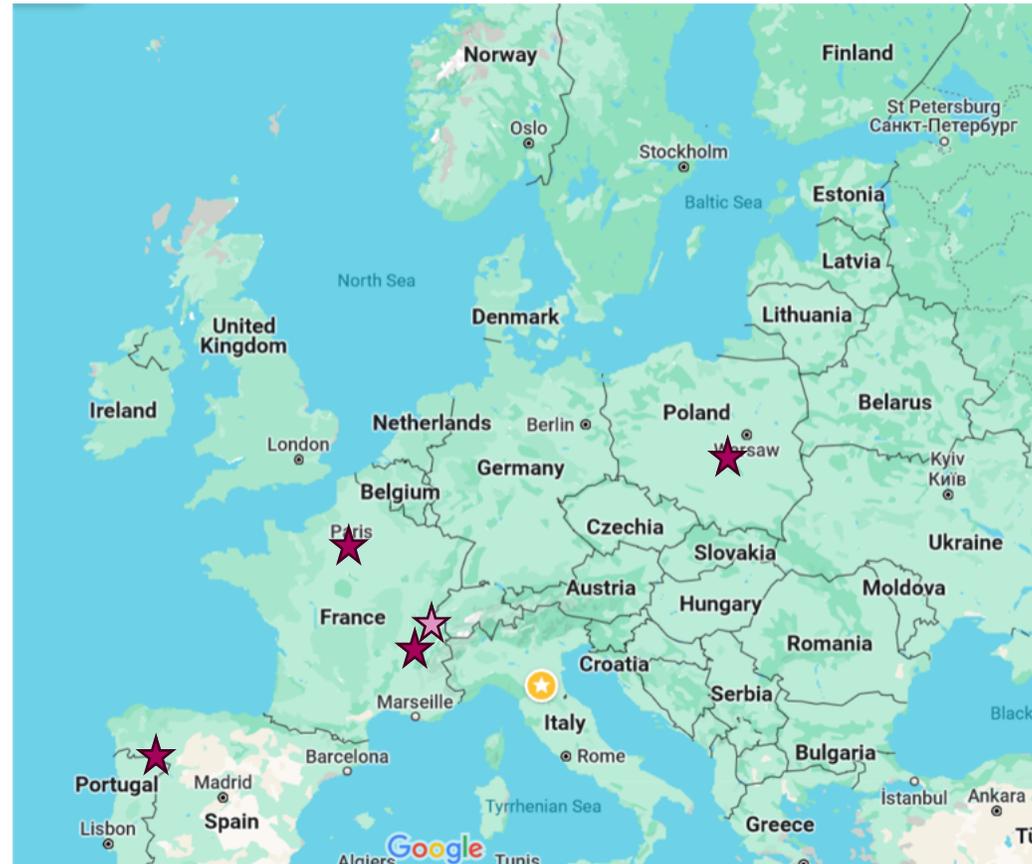
SCHEMA GIORNATA

- **10:00** Introduzione alla fisica del Large Hadron Collider (LHC)
 - **F. Fabbri, INFN & Universita' di Bologna**
- **11:00** Rivelazione degli eventi ed identificazione di particelle a LHC
 - **S. Marcellini, INFN Bologna**
- **12:00** Discussione
- Pausa Pranzo
- **13:30 Esercitazione:** Riconoscimento di particelle in collisioni protone protone a LHC
 - Sara Rabaglia, Post doc @ Universita' di Bologna
 - Federico Corchia, PhD @ Universita' di Bologna
- **16:00 Connessione con il CERN**, presentazione dei risultati cumulativi ottenuti da tutte le sedi coinvolte e discussione

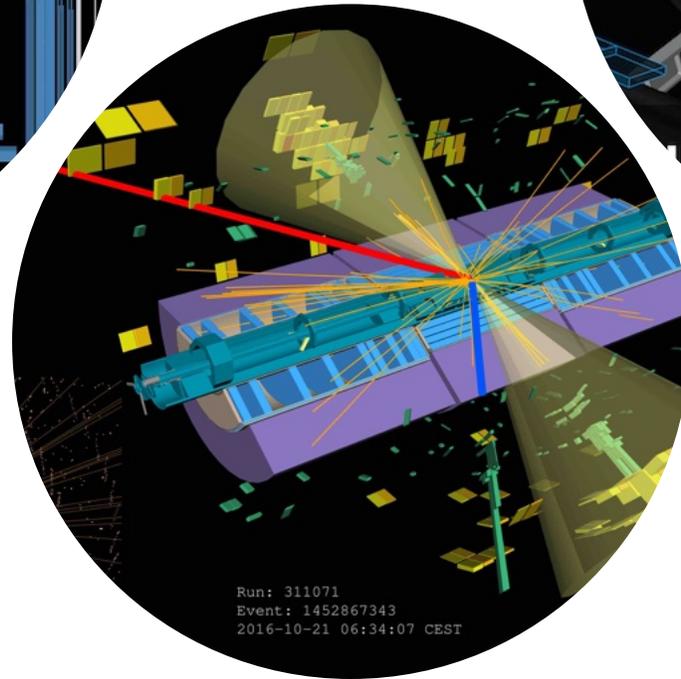
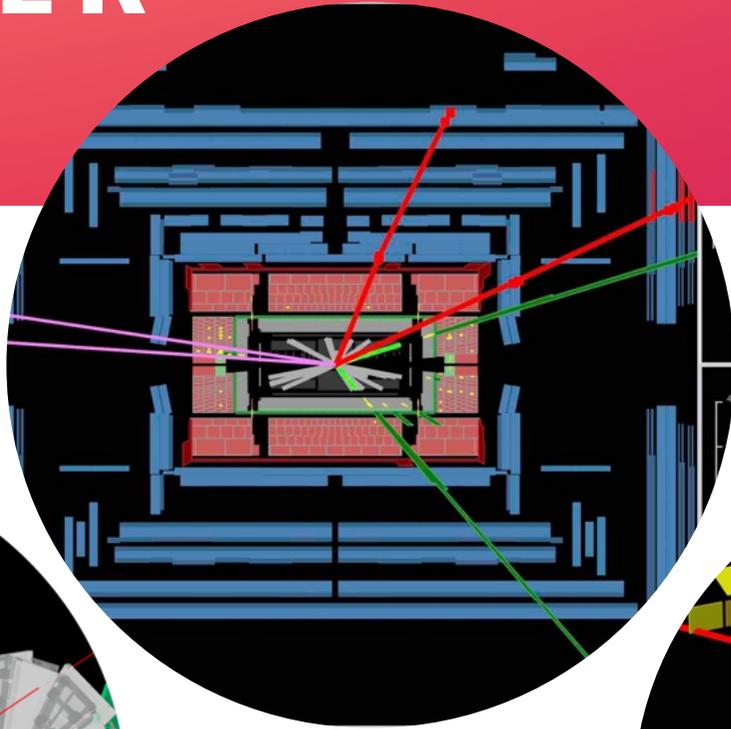
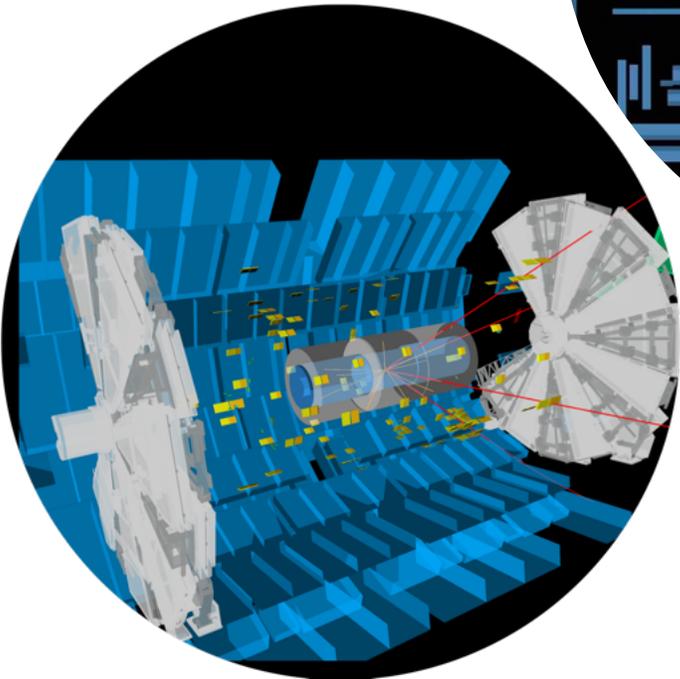


SEDI CHE PARTECIPERANNO

- Grenoble 
- Paris 
- Skierniewice 
- Bologna 
- Bragança 

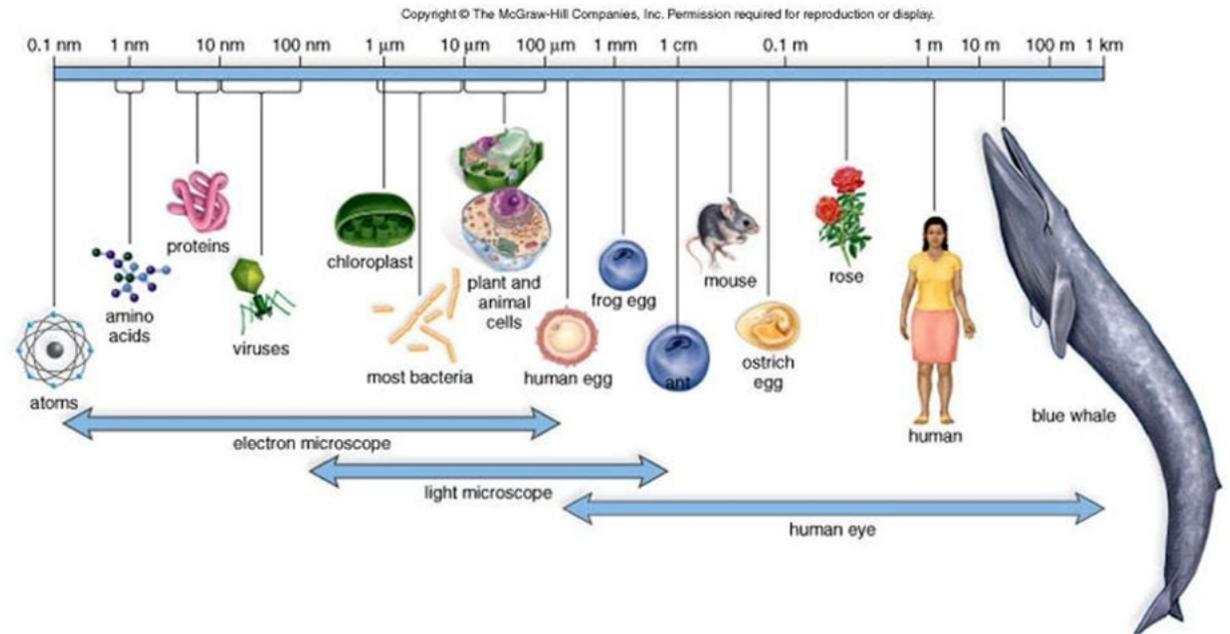
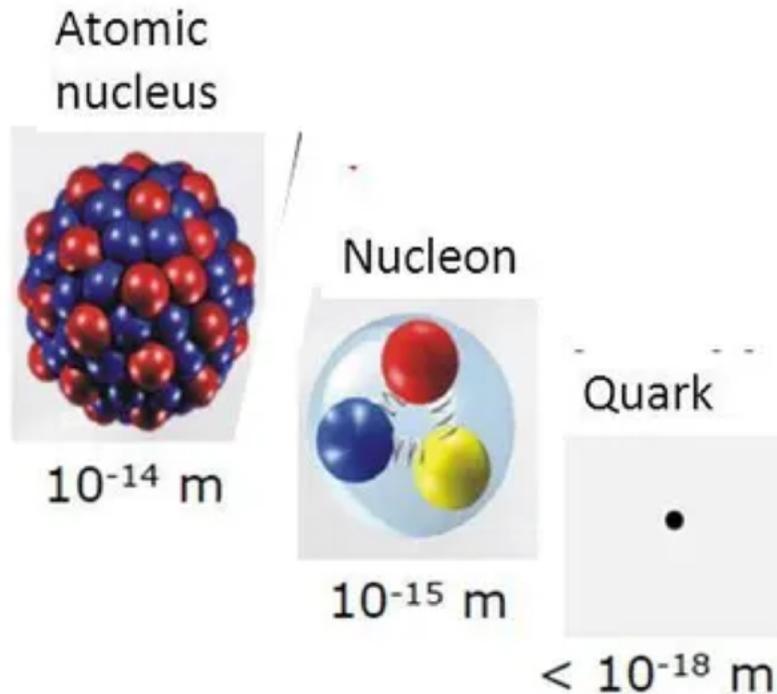


FISICA AL LARGE HADRON COLLIDER



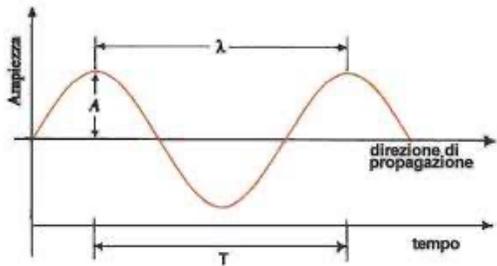
STUDIO DELLA STRUTTURA DELLA MATERIA

- Da sempre l'umanità cerca di osservare quantità sempre più piccole: batteri, cellule, molecole, atomi, nuclei/elettroni, protoni, interno dei protoni

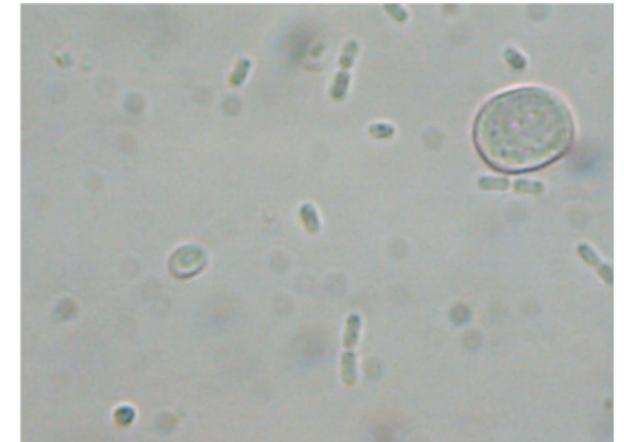
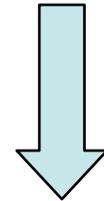
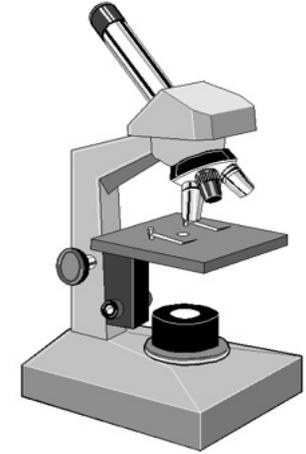


STRUMENTI

- Per dimensioni sempre piu' piccole ci servono diversi strumenti
- **Microscopio ottico** risoluzioni dell'ordine di $0.2 \mu\text{m}$ (2 decimillesimi di mm)
 - **Perche' non si puo' fare meglio? utilizza luce visibile**



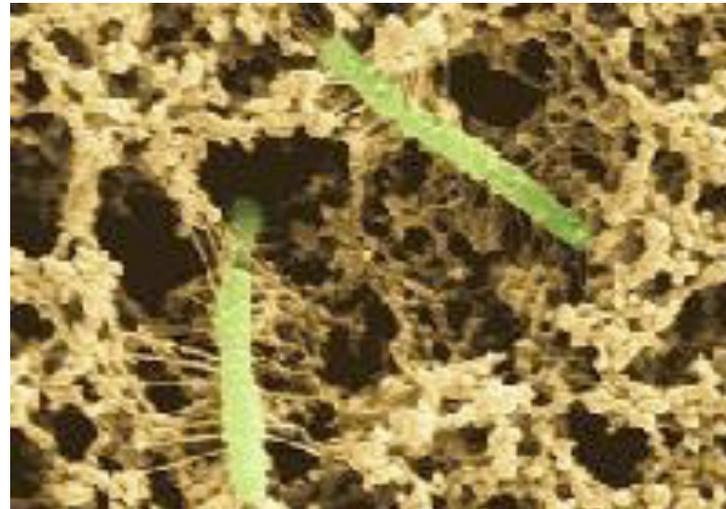
- **non e' possibile risolvere strutture molto piu' piccole della lunghezza d'onda della luce**
- **Ci servono onde con una lunghezza d'onda piu' piccola!**



STRUMENT I

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

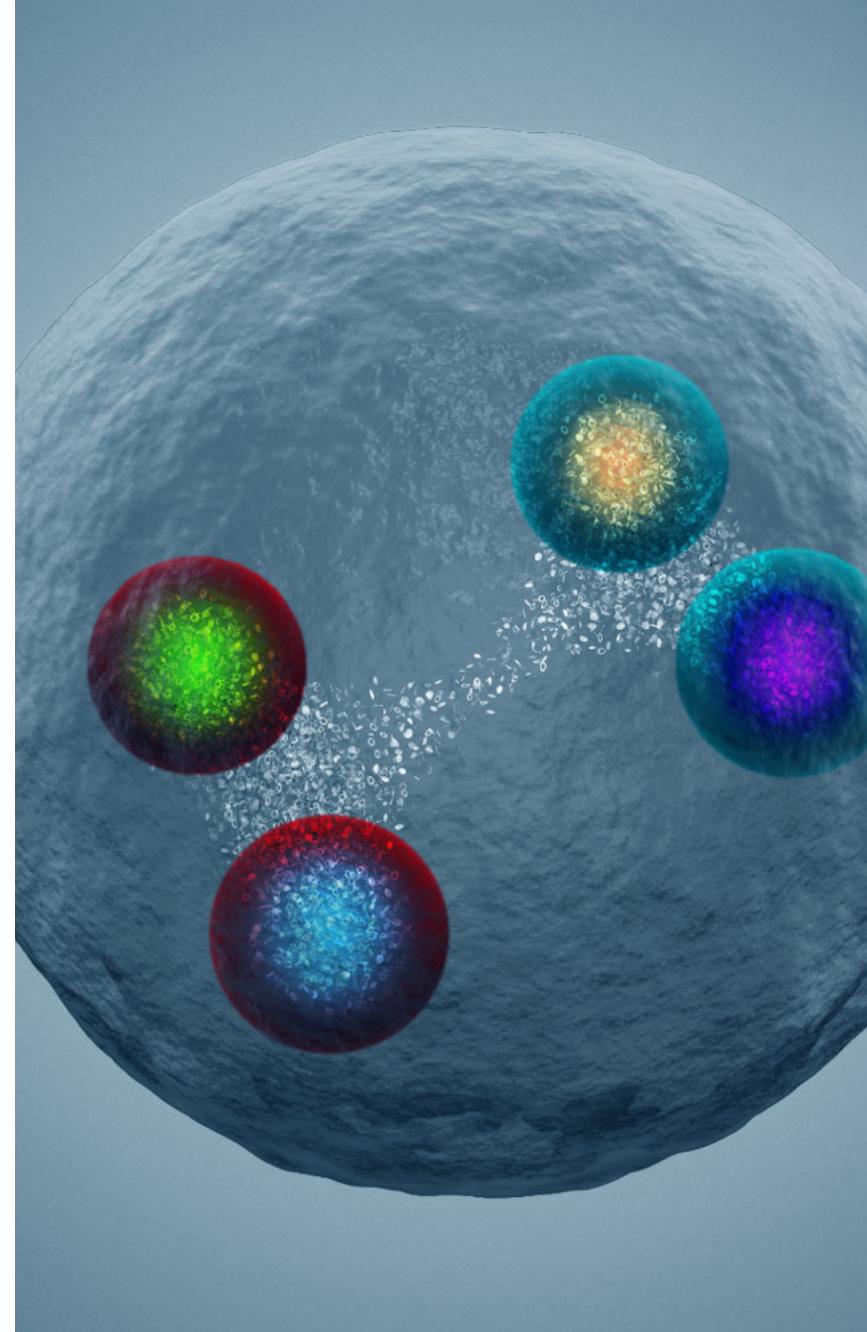
- Secondo la *meccanica quantistica* non c'è distinzione netta tra comportamenti corpuscolari ed ondulatori. Le particelle si comportano come onde e viceversa.
- Elettroni accelerati raggiungono risoluzioni molto migliori rispetto ad un microscopio ottico
- Si possono osservare dettagli fino a qualche decimillesimo di mm (~ 0.1 nm)
 - ~ 1000 volte meglio del microscopio ottico



ANCORA PIU' IN PICCOLO?

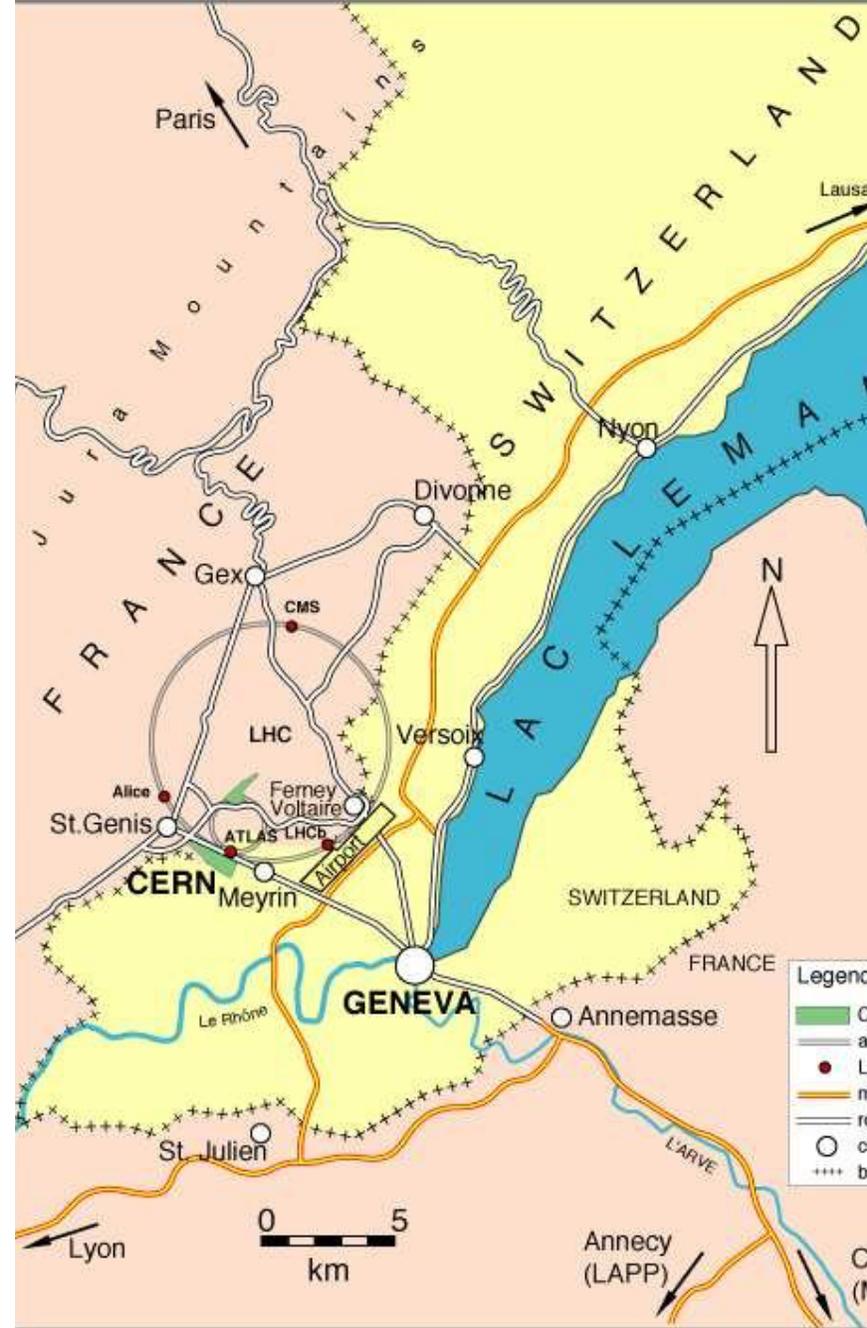
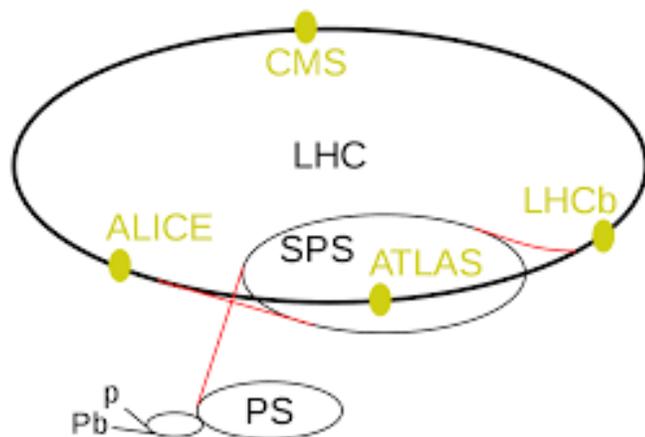
- Un nucleo atomico e' un milione di volte piu' piccolo (un millesimo di miliardesimo di mm, 10^{-15} m)
- I piu' piccoli costituenti della materia a noi noti sono almeno 10000 volte piu' piccoli dei nuclei
 - Il microscopio che ci occorre per risolvere tali strutture e' uno strumento in grado di accelerare particelle ad energie elevatissime

[Questo microscopio e' un acceleratore di particelle](#)



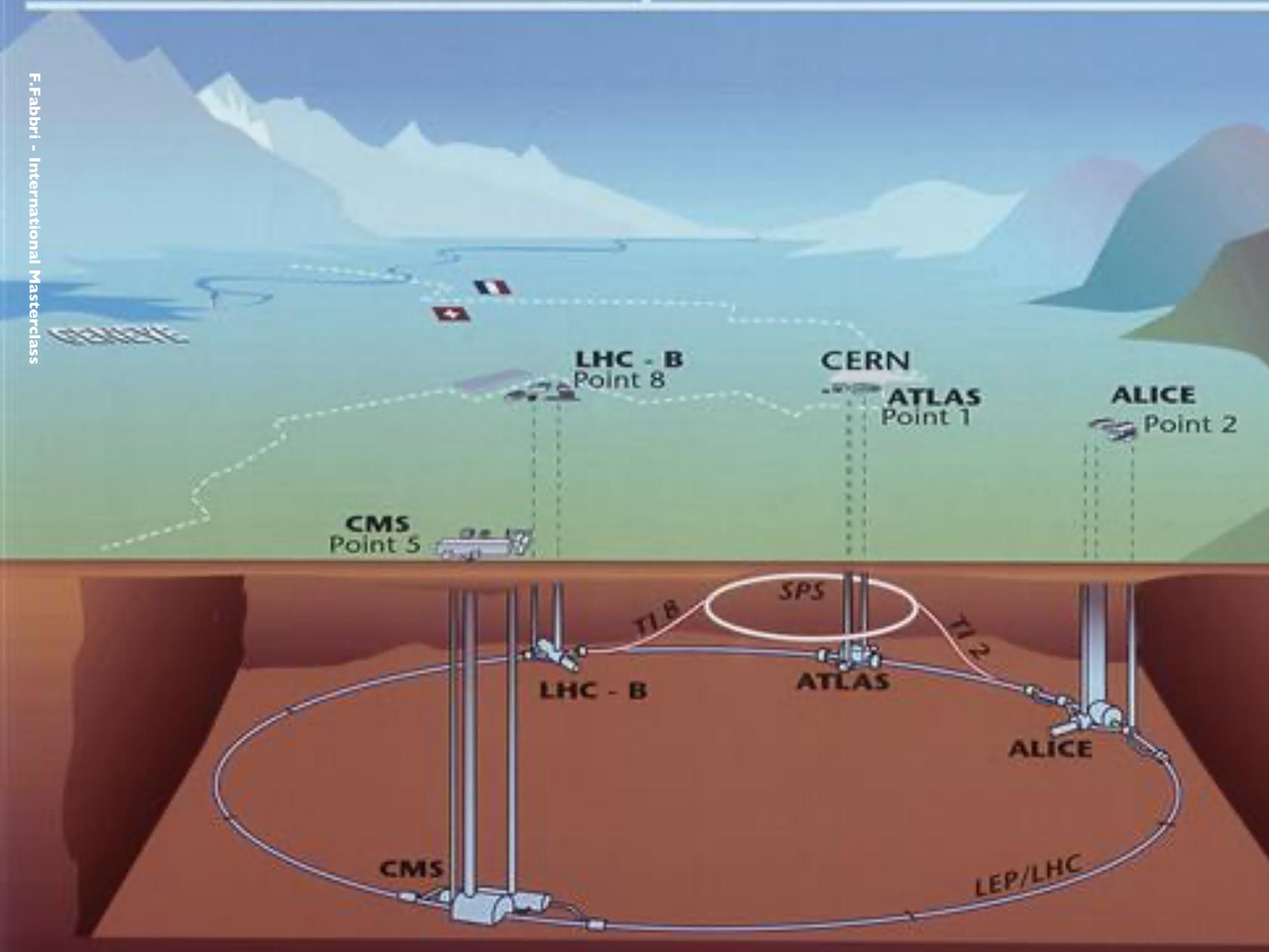
LHC

- (Large Hadron Collider) e' il piu' grande 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



Overall view of the LHC experiments.

F.Fabbri - International Masterclass



LHC EXPERIMENT S

- I protoni sono accelerati lungo il tunnel lungo 27 km
 - Sembra lungo? Il progetto per il prossimo acceleratore FCC (future circular collider é 91 km)
- Ci sono 4 punti di collisione in cui sono posti degli esperimenti che misurano i prodotti della collisione
- 100 m sotto terra: evita che gli esperimenti interagiscano con particelle provenienti dal cosmo



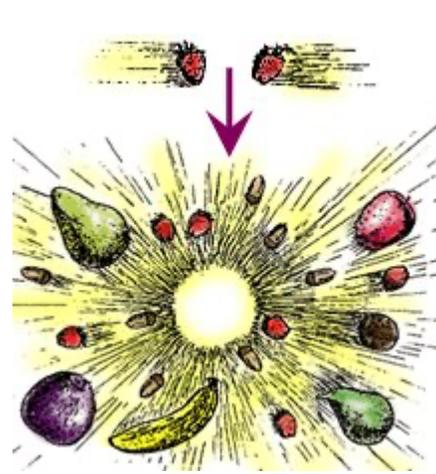
LHC TUNNEL AND ACCELERATOR

- I protoni devono essere accelerati ad una grande energia, fatto grazie a potentissimi magneti
 - Intensità pari a 8 Tesla (200000 volte il campo magnetico terrestre)
 - I magneti devono essere tenuti a temperature bassissime ~ temperature dell'universo per lavorare
 - I magneti devono fare scorrere i protoni in direzioni diverse a brevissima distanza tra loro

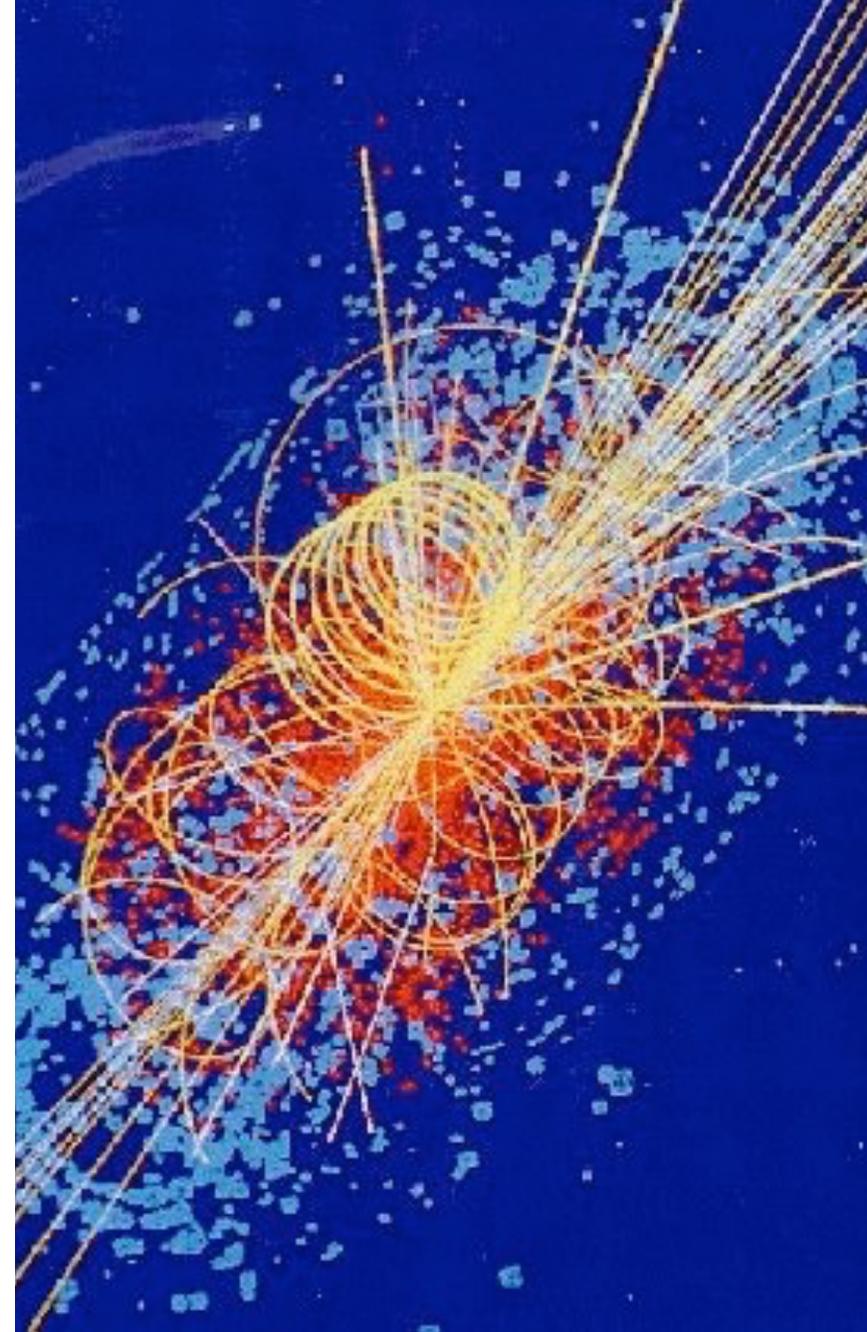
ENERGIA A LHC

- Due fasci di protoni vengono accelerati in direzioni opposte ad una energia di 6800 miliardi di elettronVolt ($6.8 \times 10^{12} \text{eV}$) \rightarrow 6.8 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 é concentrata su un solo protone!
- Per rendere piú probabile avere una collisione interessante i fasci vengono collimati da speciali magneti
- Il raggio dei fasci é circa $16 \mu\text{m}$ al momento della collisione

CREARE PARTICELLE



- Quando i due fasci collidono una grande quantità di energia viene concentrata in dimensioni estremamente ridotte
 - $E=mc^2 \rightarrow$ Energia = massa \rightarrow Energia = particelle create dall'interazione dei protoni
 - $pp \rightarrow XX$
- Queste particelle ci circondano continuamente, ma non c'è altro modo di crearle in un sistema «controllato» per poterle misurare
- Le collisioni avvengono all'interno degli apparati sperimentali: che hanno il compito di analizzare i prodotti dell'urto per ricostruire quello che è successo



COME VEDIAMO OGGETTI INVISIBILI?

- Andare alla ricerca di nuove particelle è come seguire le orme sulla sabbia.
- Anziché cercare direttamente le particelle, noi guardiamo le tracce che lasciano nel rivelatore.
- Si studiano gli effetti che il passaggio delle particelle hanno nella materia.
- Ogni particella lascia una traccia caratteristica.



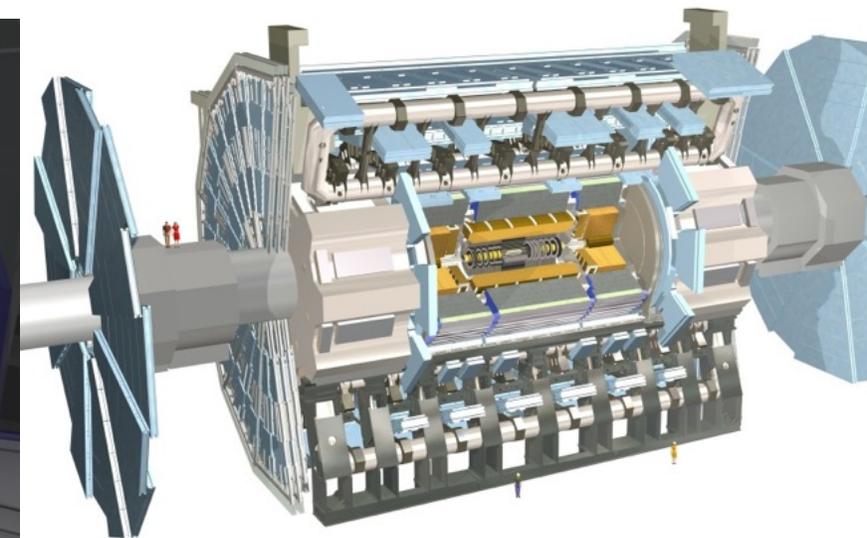
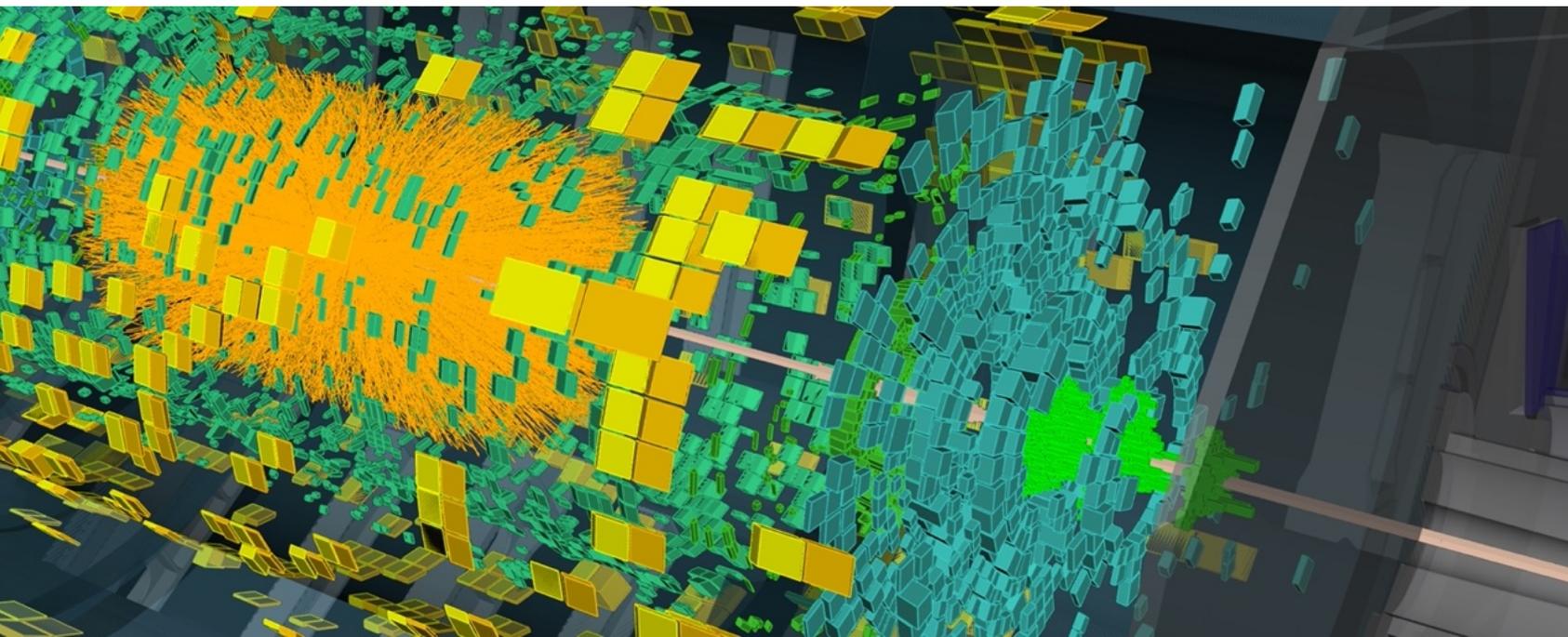
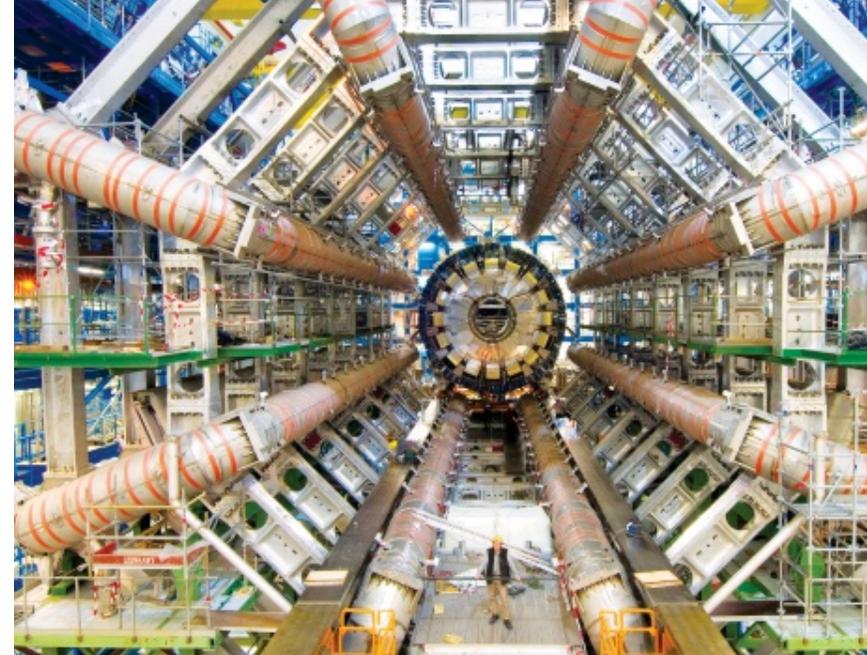
ESPERIMENTI

ATLAS:

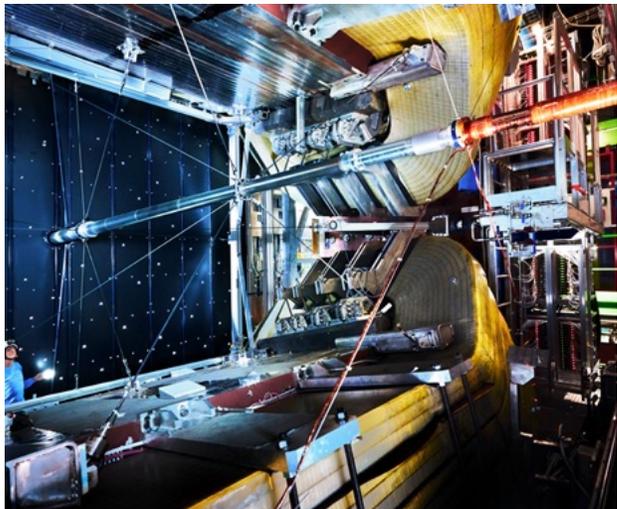
- Lungo 46m
- Diametro 25m
- Peso 7000 tonnellate (come la torre Eiffel)

Il detector e' composto da diversi strati, ognuno con una specifica funzione per identificare e misurare le particelle create nell'evento

Le particelle lasciano una parte della loro energia nel detector (o tutta la loro energia → detector molto grandi)

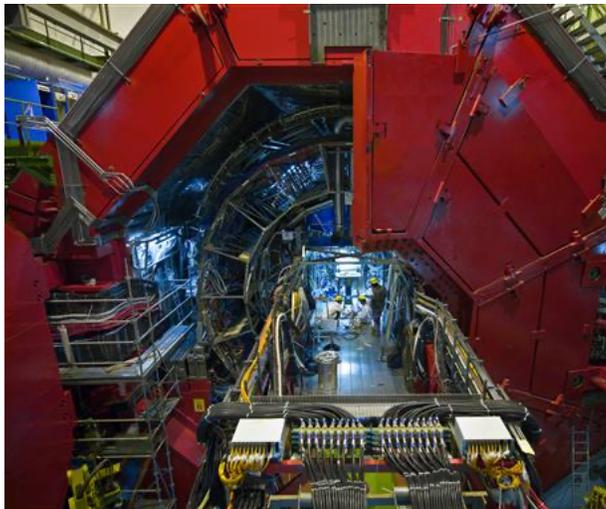


ESPERIMENTI



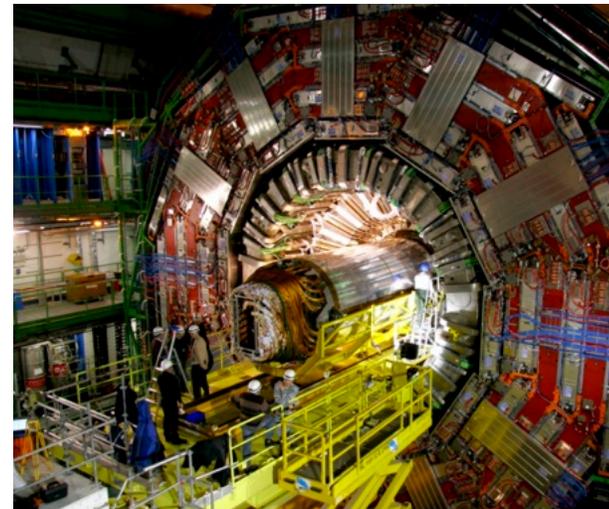
LHCb:

- 5600 tonnellate
- Lunghezza 21m
- Altezza 10m



ALICE:

- 10 000 tonnellate
- Lunghezza 26 m
- Altezza 16 m

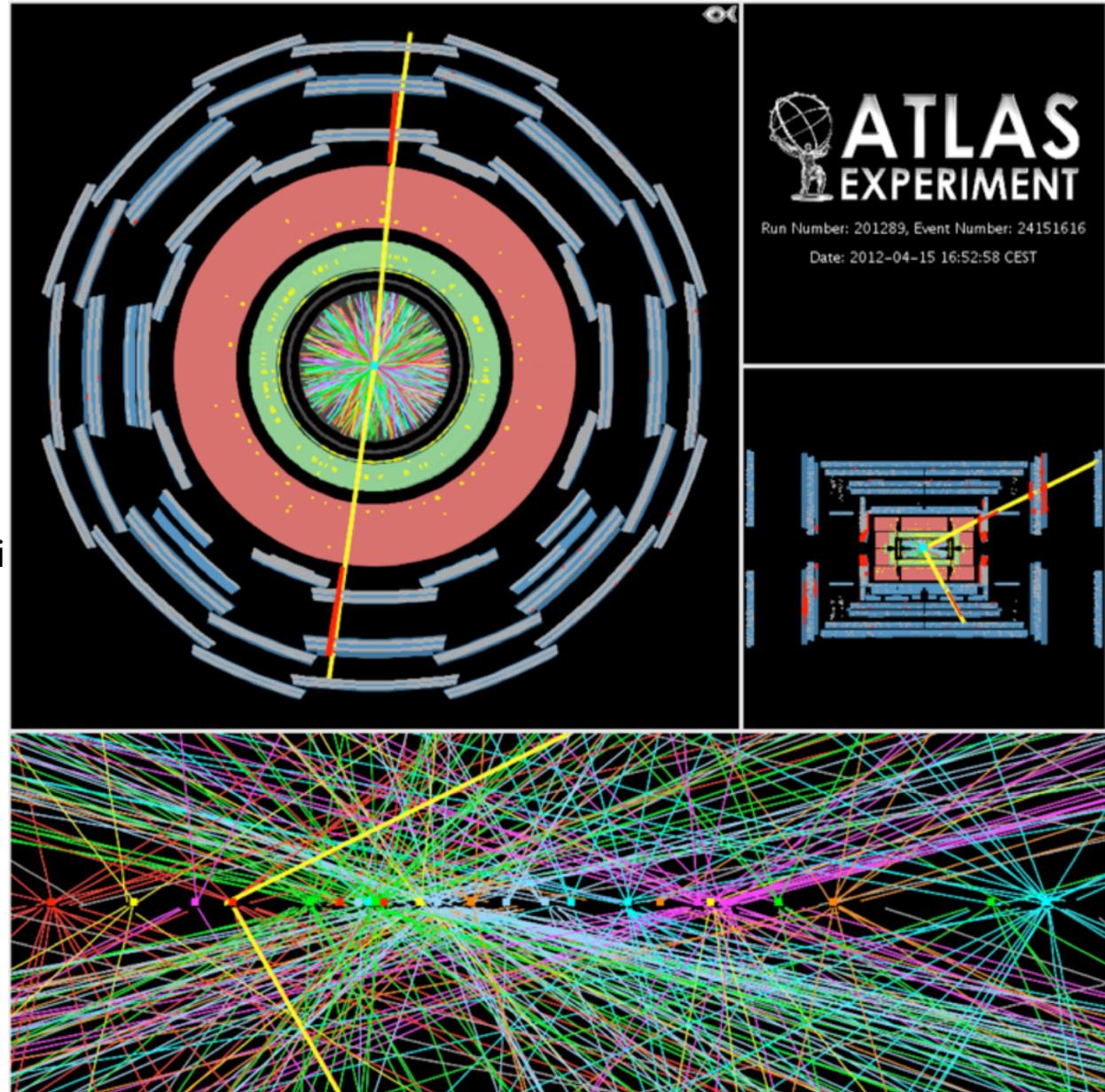


CMS:

- 14000 tonnellate
- Lunghezza 21m
- Altezza 15m

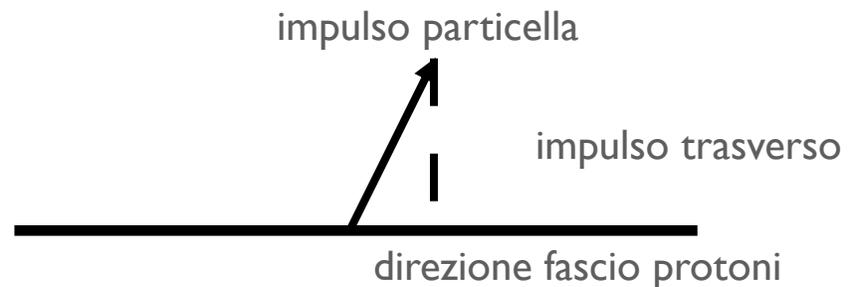
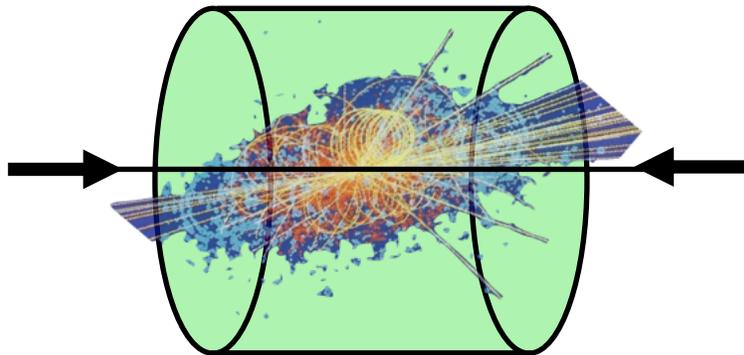
QUALCHE DETTAGLIO IN PIU'

- 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)



COME SELEZIONIAMO EVENTI INTERESSANTI?

- Come abbiamo visto da ciascuna collisione si generano centinaia di particelle
 - Non possiamo ricostruirle con precisione tutte
 - Non possiamo salvare tutti gli eventi

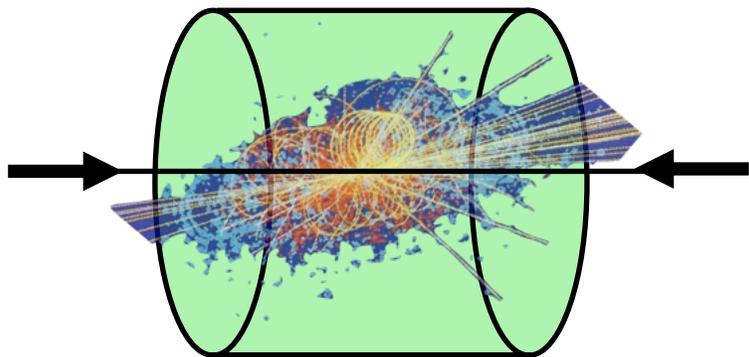


Evento molto frequente ad LHC: molte tracce di basso impulso trasverso

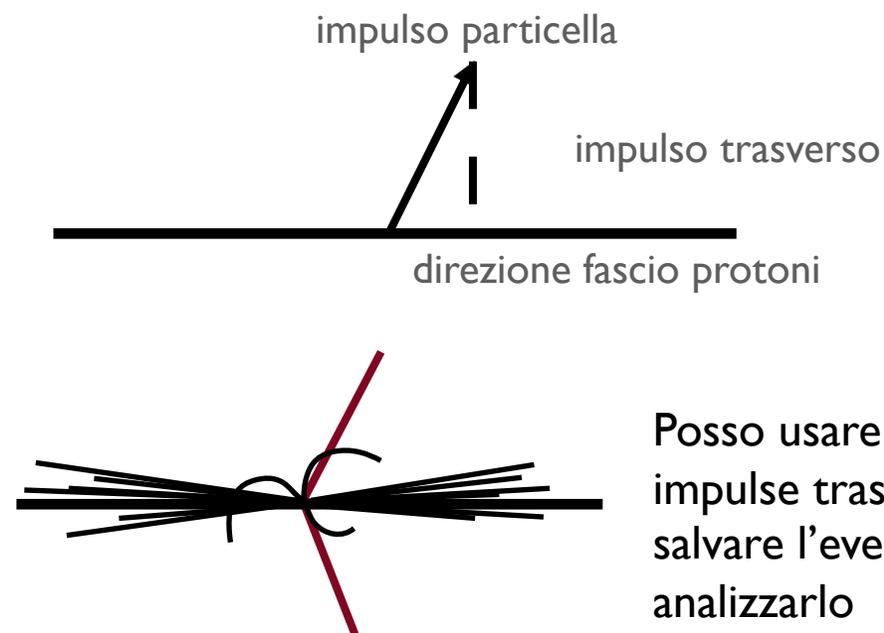


COME SELEZIONIAMO EVENTI INTERESSANTI?

- Come abbiamo visto da ciascuna collisione si generano centinaia di particelle
 - Non possiamo ricostruirle con precisione tutte
 - Non possiamo salvare tutti gli eventi

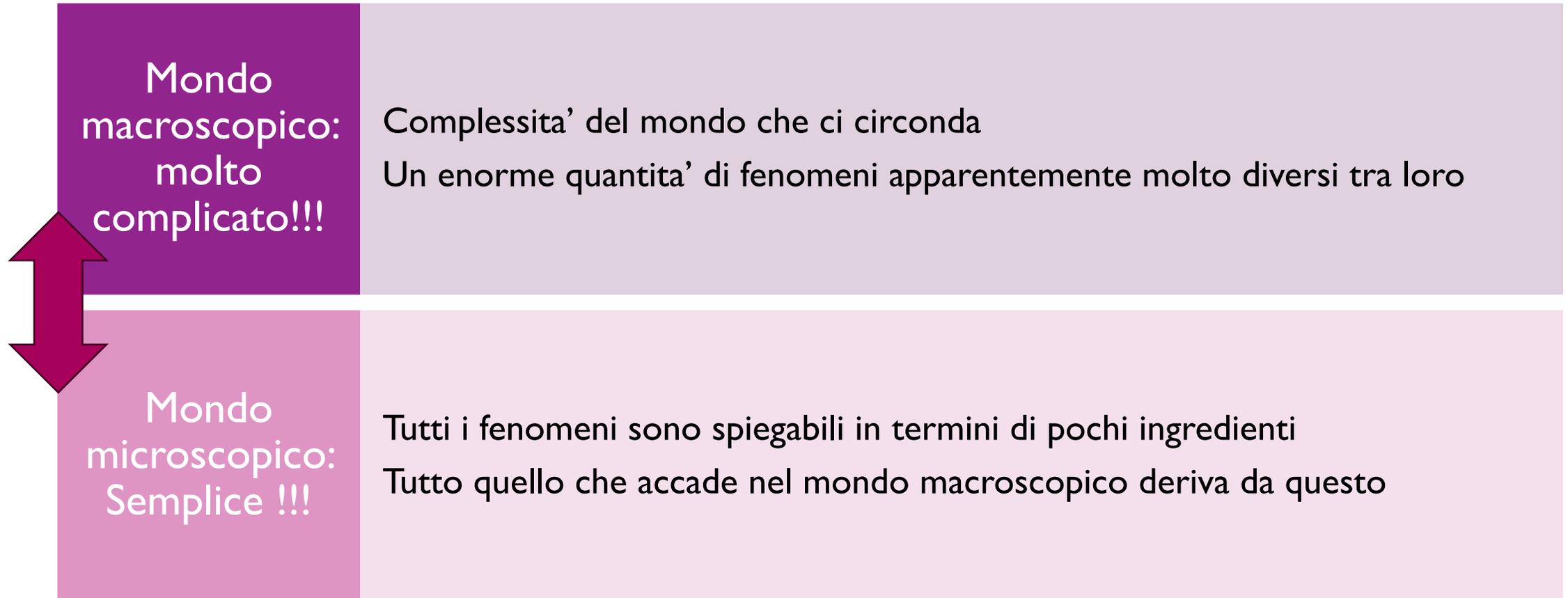


Evento poco frequente ad LHC: creazione di una particella molto pesante → crea tracce molto energetiche

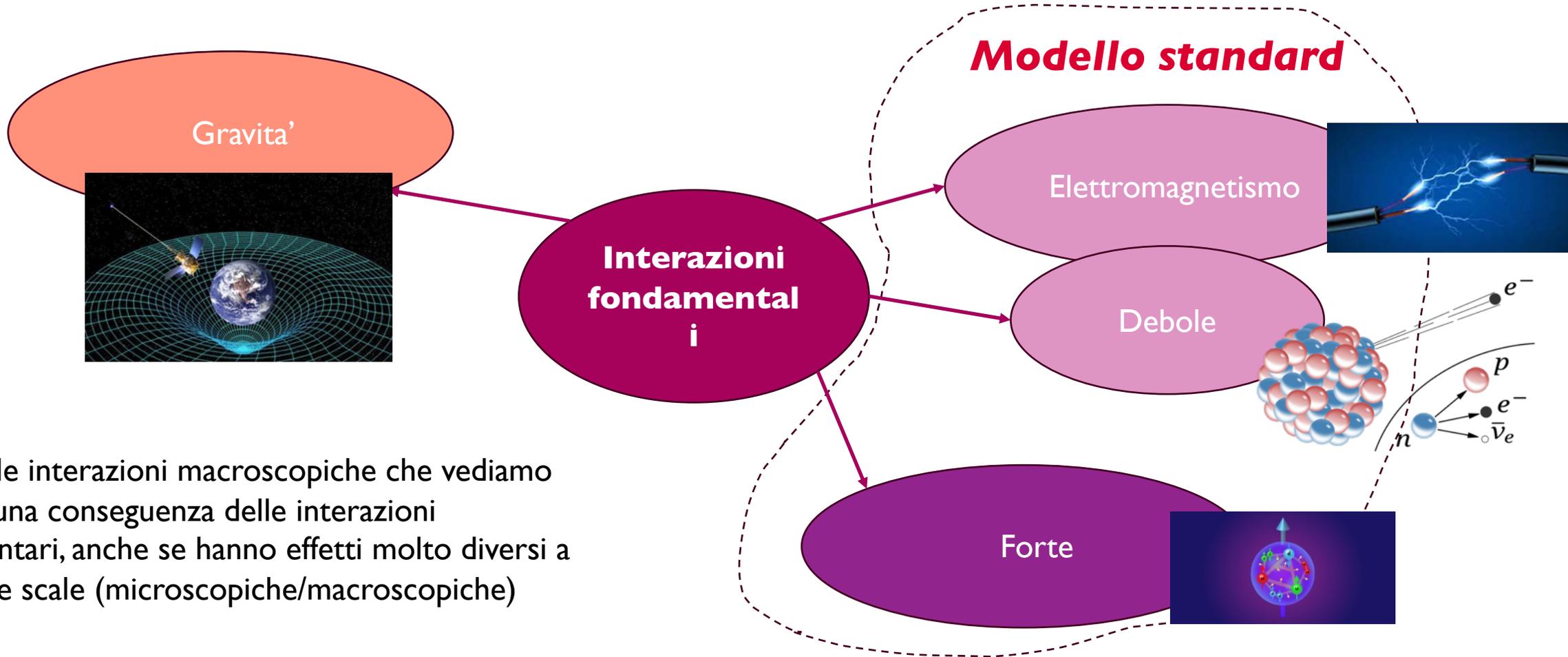


Posso usare le tracce ad alto impulso trasverso per decidere di salvare l'evento per poi analizzarlo

COSA IMPARIAMO DALLO STUDIO DELLE PARTICELLE ELEMENTARI ?



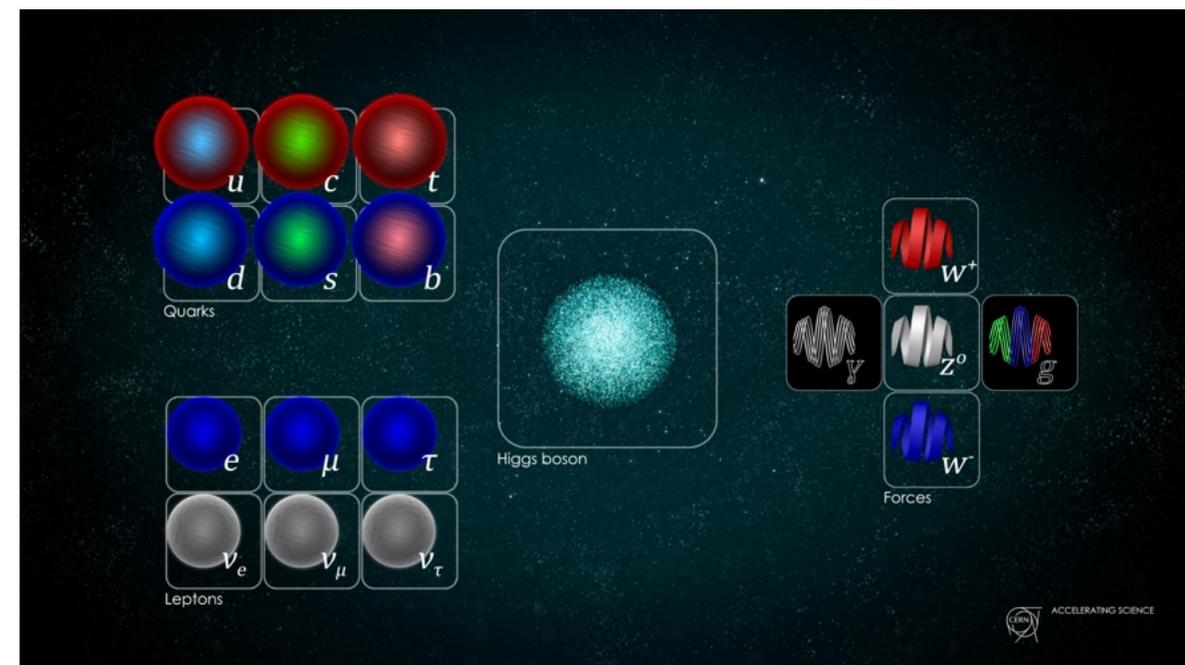
INTERAZIONI FONDAMENTALI

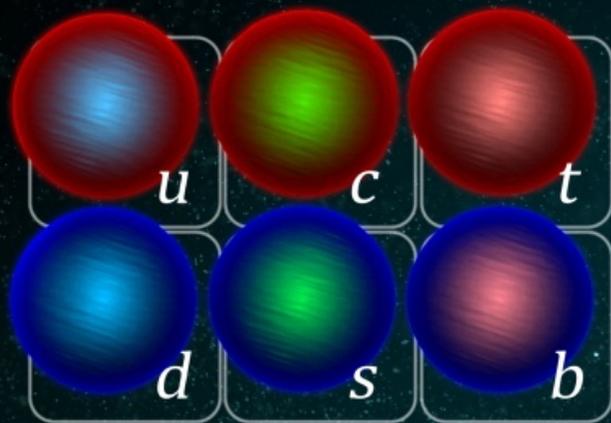


Tutte le interazioni macroscopiche che vediamo sono una conseguenza delle interazioni elementari, anche se hanno effetti molto diversi a diverse scale (microscopiche/macroscopiche)

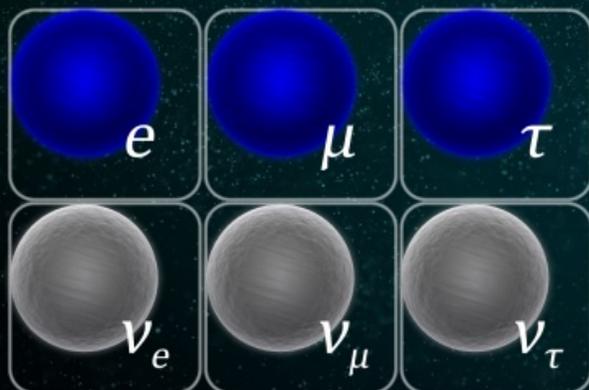
MODELLO STANDARD

- Modello che racchiude tutte le particelle fondamentali e le loro interazioni.
- Queste particelle sono indivisibili e compongono tutta la materia conosciuta
- Le forze sono “mediate” da particelle
 - Collegano particelle che hanno una certa “carica”: elettromagnetica, isospin, colore
 - Il fotone (luce) e’ una di queste
- In piu’ c’e’ un ingrediente in piu’: bosone di Higgs
 - Da la massa a tutte le particelle





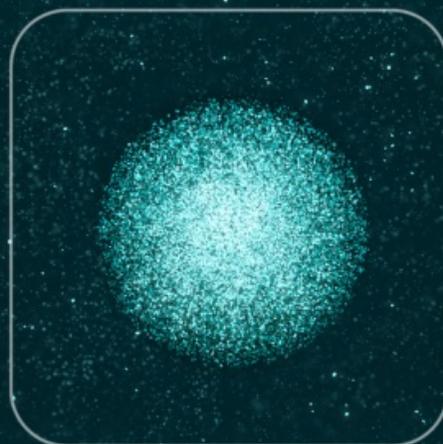
Quarks



Leptons

Quarks:

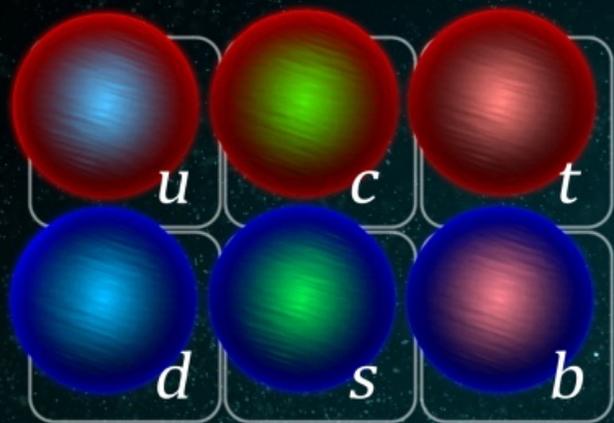
- Componenti fondamentali dei nuclei
- Interagiscono con elettromagnetismo, interazione forte, debole e gravita'
- Non possono essere osservati al di fuori di stati legati (e.g. protone)



Higgs boson



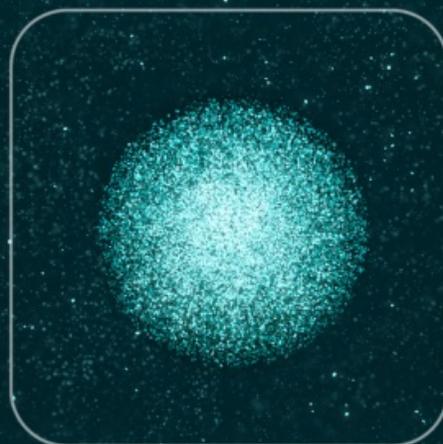
Forces



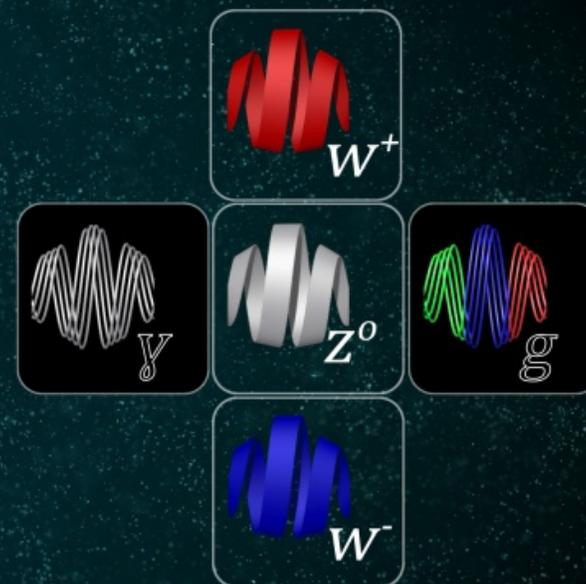
Quarks



Leptons



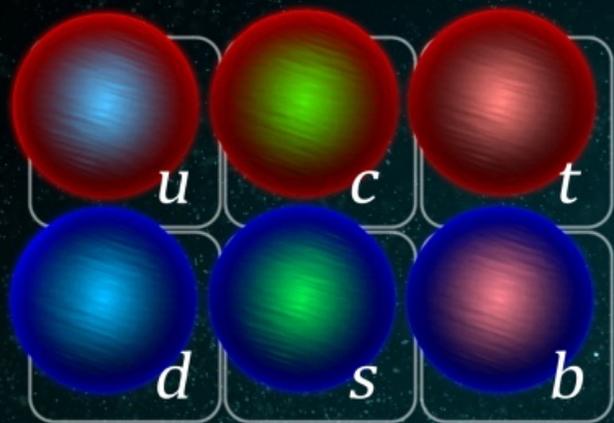
Higgs boson



Forces

Leptoni carichi:

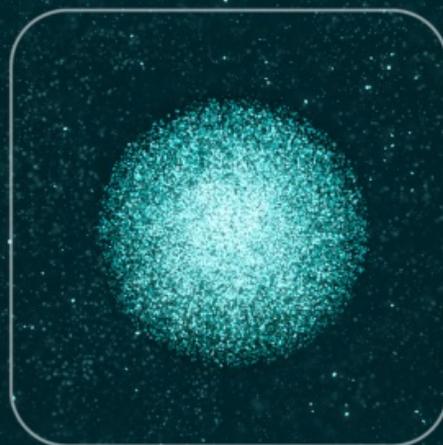
- Fanno parte del mondo a cui siamo abituati (corrente, atomi)
- Non formano stati legati (ma sono negli atomi)
- Interagiscono con con elettromagnetismo, interazione debole e gravita'



Quarks



Leptons



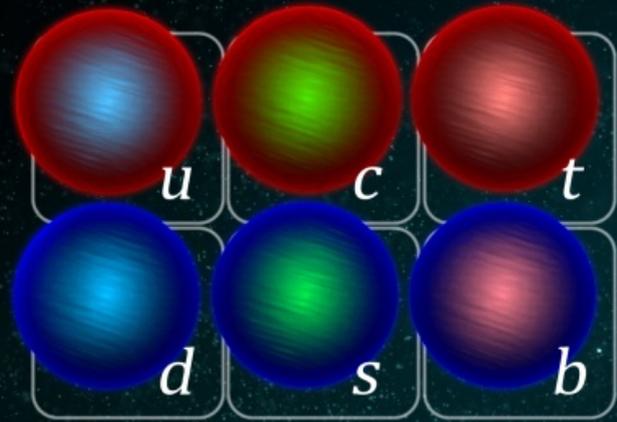
Higgs boson



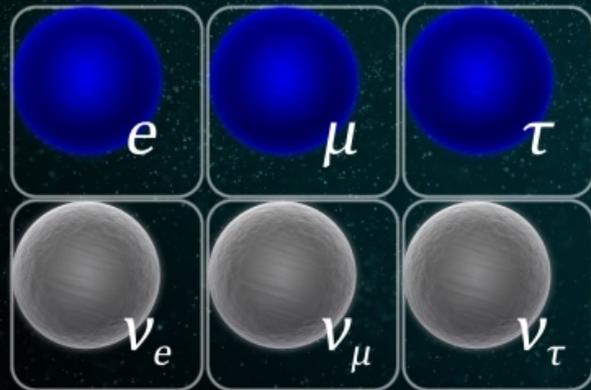
Forces

Neutrini:

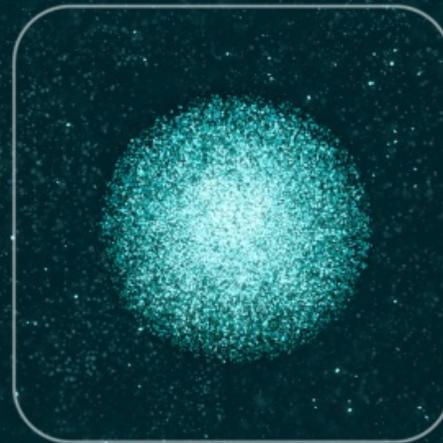
- Particelle quasi prive di massa
- Interagiscono solo con interazione debole
- Impossibili da vedere



Quarks



Leptons



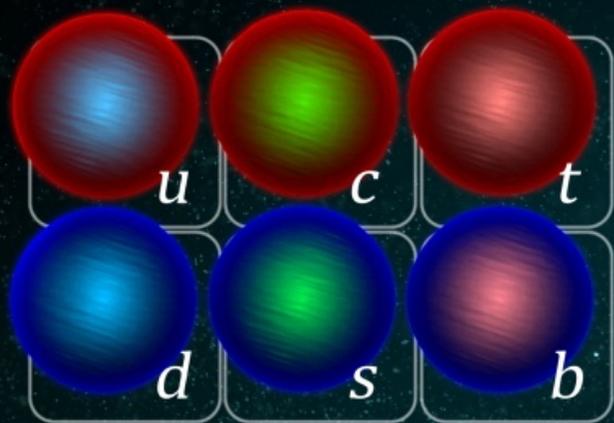
Higgs boson

Bosoni elettrodeboli:

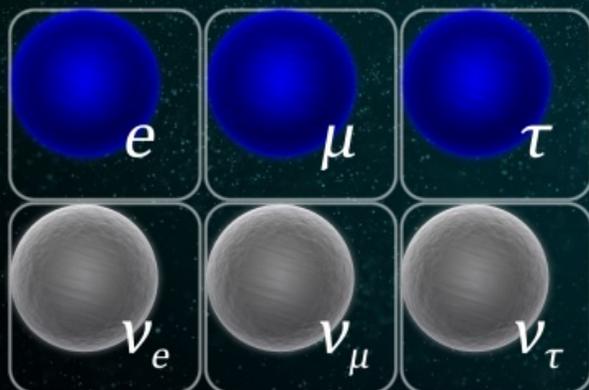
- Mediano l'interazione debole
 - Interazione a corto raggio
- Sono molto pesanti (~meta' di un atomo di oro)



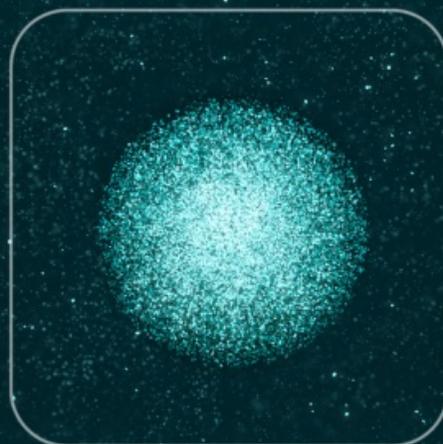
Forces



Quarks



Leptons



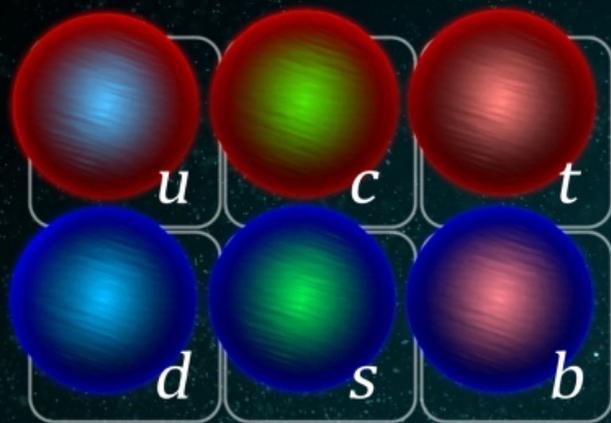
Higgs boson



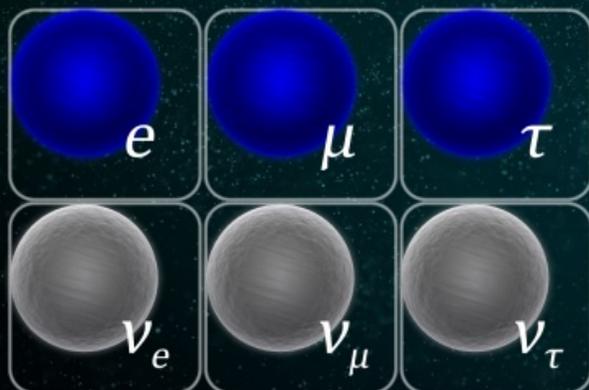
Forces

Fotoni:

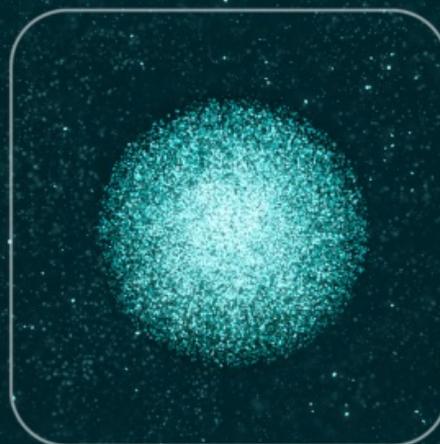
- Mediano l'interazione elettromagnetica
- Non hanno massa
- Possono collegare particelle a lunghissima distanza



Quarks



Leptons



Higgs boson

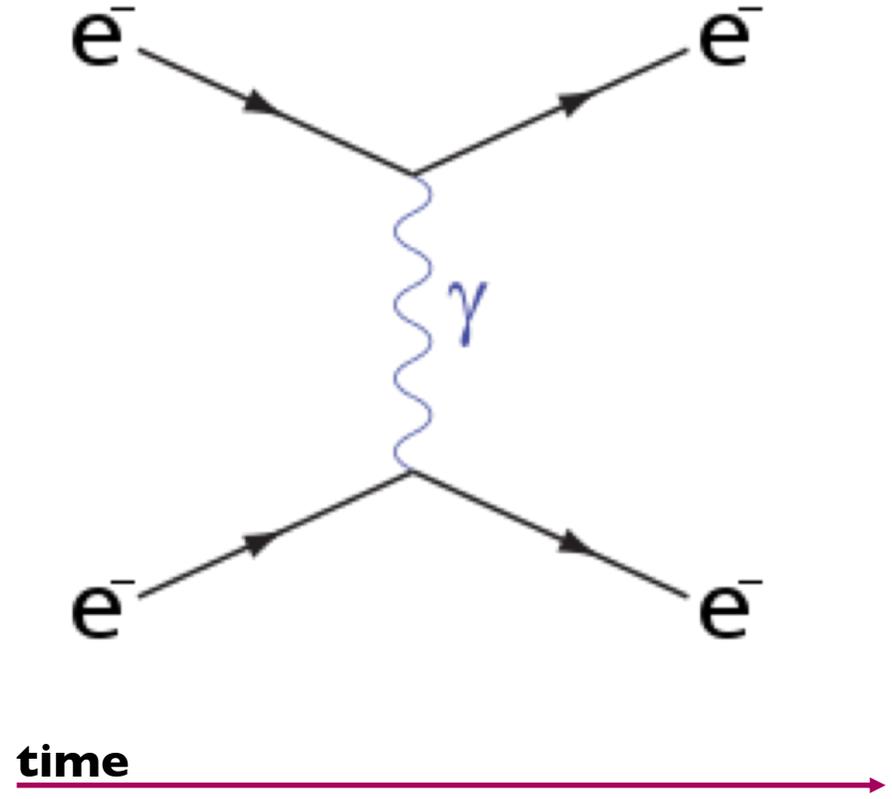
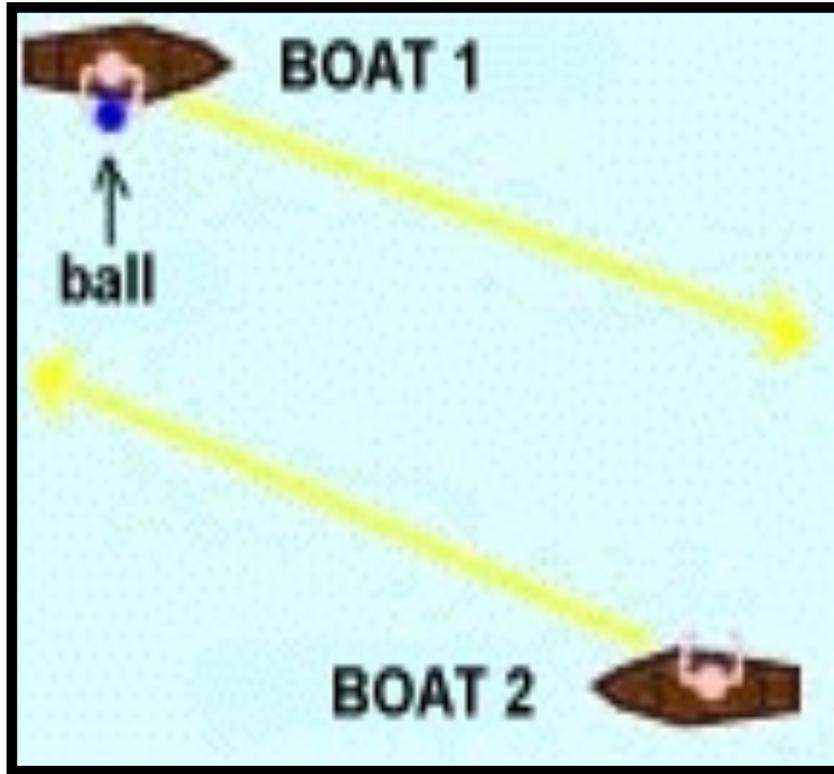


Forces

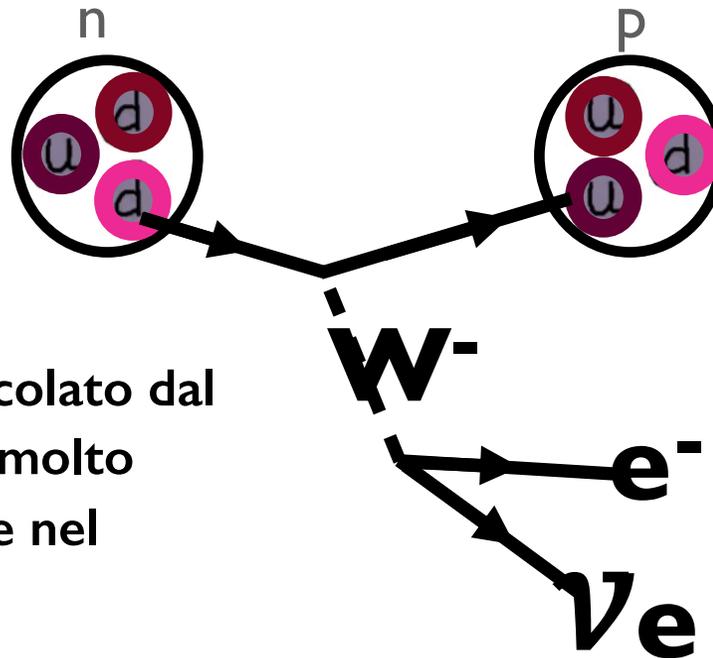
Gluoni:

- Mediano l'interazione forte (carica di colore)
 - Non hanno massa
- Possono collegare particelle solo a cortissima distanza
- Sono responsabili della formazione dei protoni e nuclei
 - Ogni stato "osservabile" e' bianco, non colorato

INTERAZIONI TRA PARTICELLE



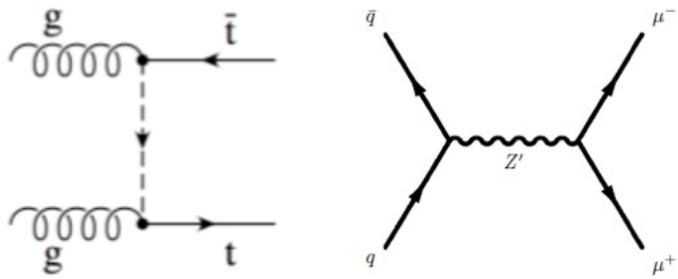
DECADIMENTI



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

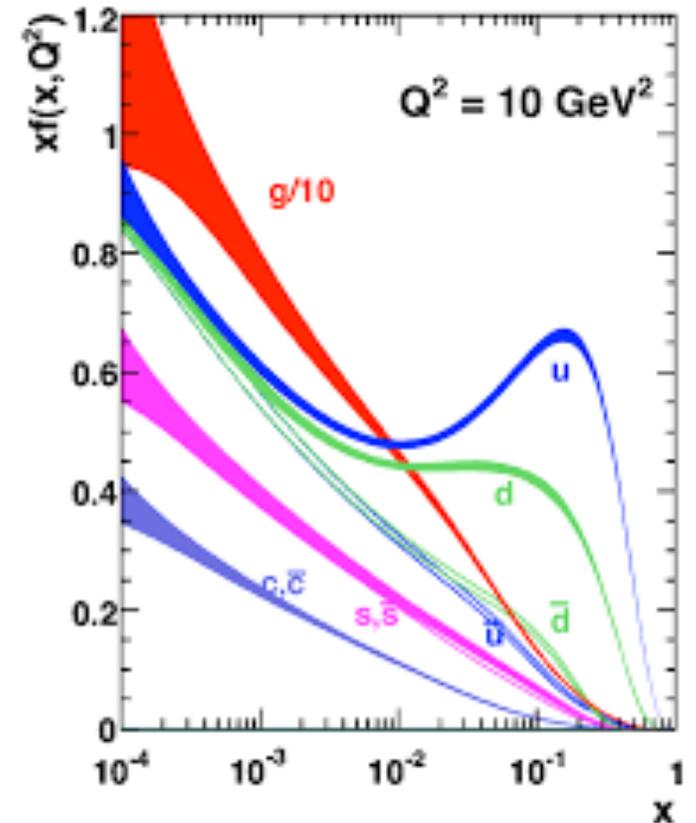
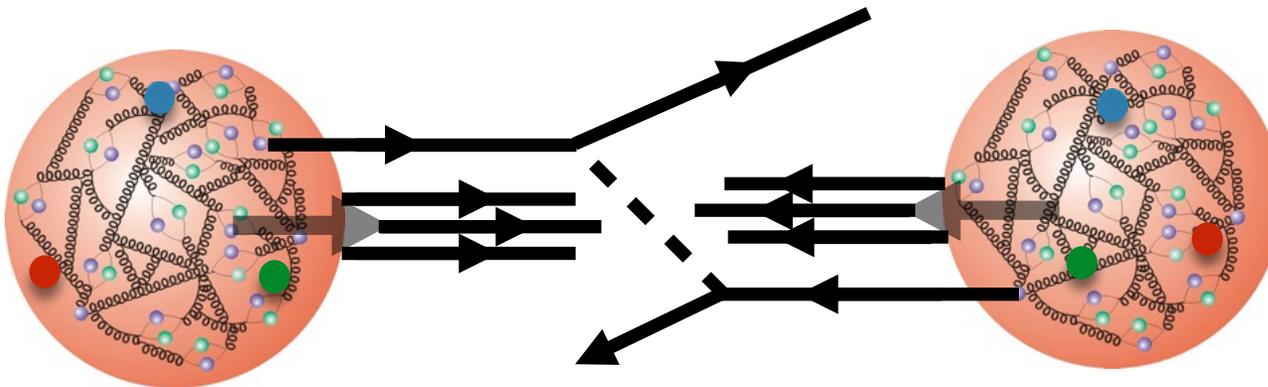
Corto raggio di azione: il mediatore sopravvive per un tempo compatibile con il principio di indeterminazione

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



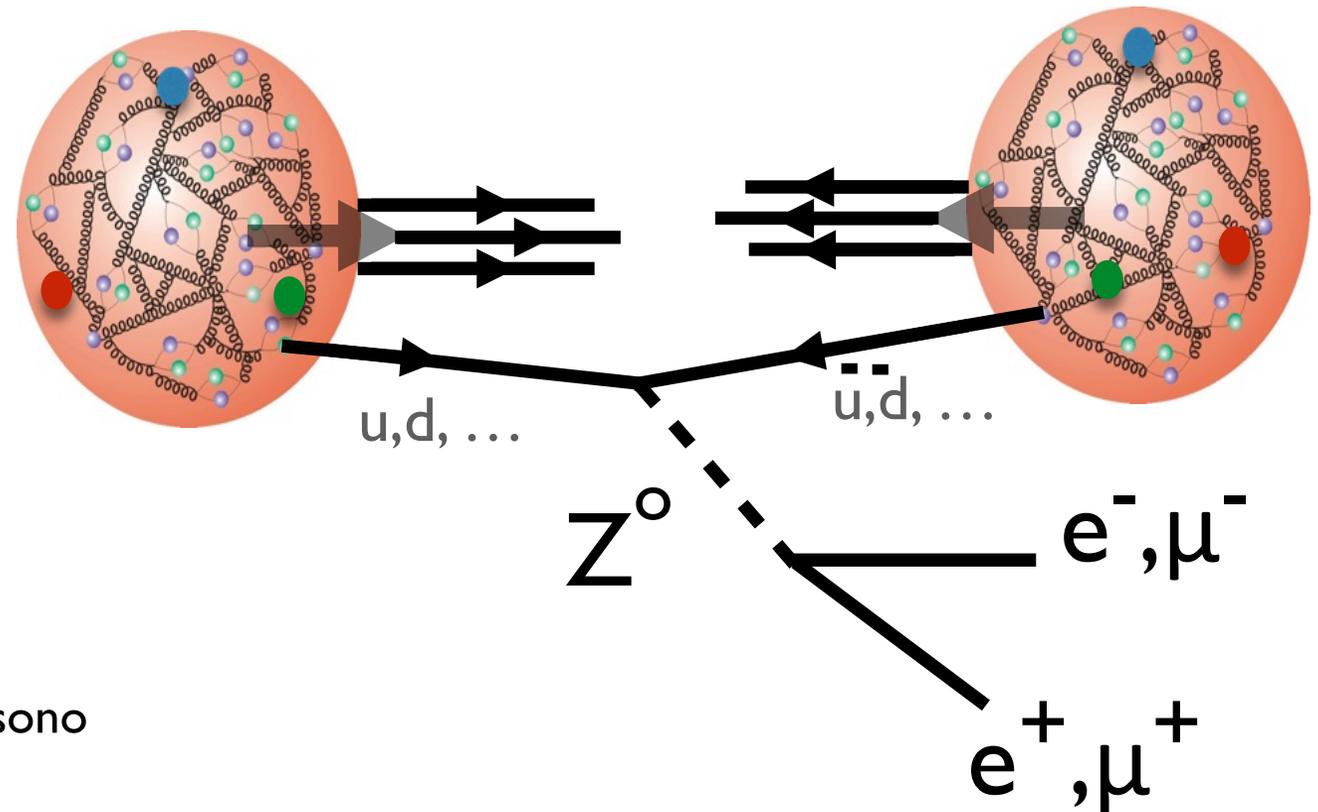
COLLISIONI DI PROTONI

- Alle alte energie raggiunte la collisione non avviene davvero tra protoni, ma tra i costituenti dei protoni.
- I costituenti dei protoni non sono solo i quark ma anche i gluoni e altre particelle che vivono per un tempo molto breve



BOSONE Z

- Neutro: carica elettrica = 0
- Molto pesante (91 volte la massa del protone)
- Non e' una particella stabile:
 - Decade molto rapidamente
 - Prima di poter interagire con il detector
- I suoi prodotti del decadimento sono particelle cariche
 - Sono ricostruite nel detector, possono essere usate per ricostruire la Z



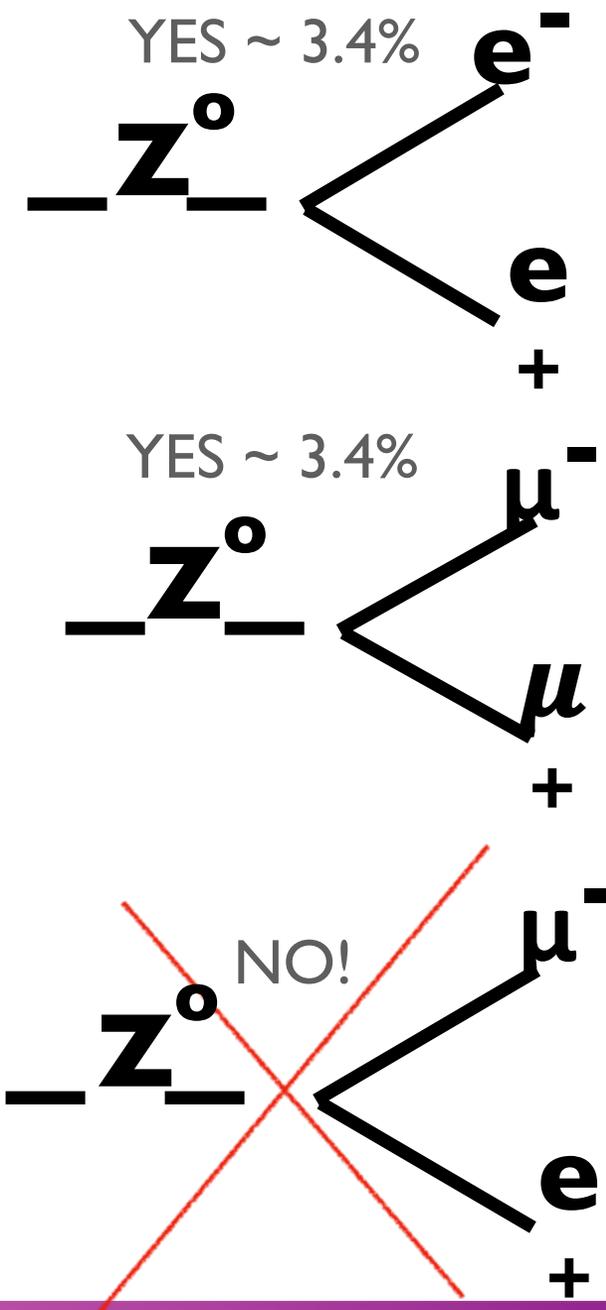
DECADIMENTO DELLA Z

- Il decadimento della Z deve seguire certe regole:
 - Conservazione dell'energia ($E=mc^2$)
 - Conservazione della carica
 - Deve decadere in due particelle con lo stesso "sapore"
 - I leptoni carichi sono semplici da osservare
 - Sono solo il ~7% dei possibili stati finali della Z

Massa invariante

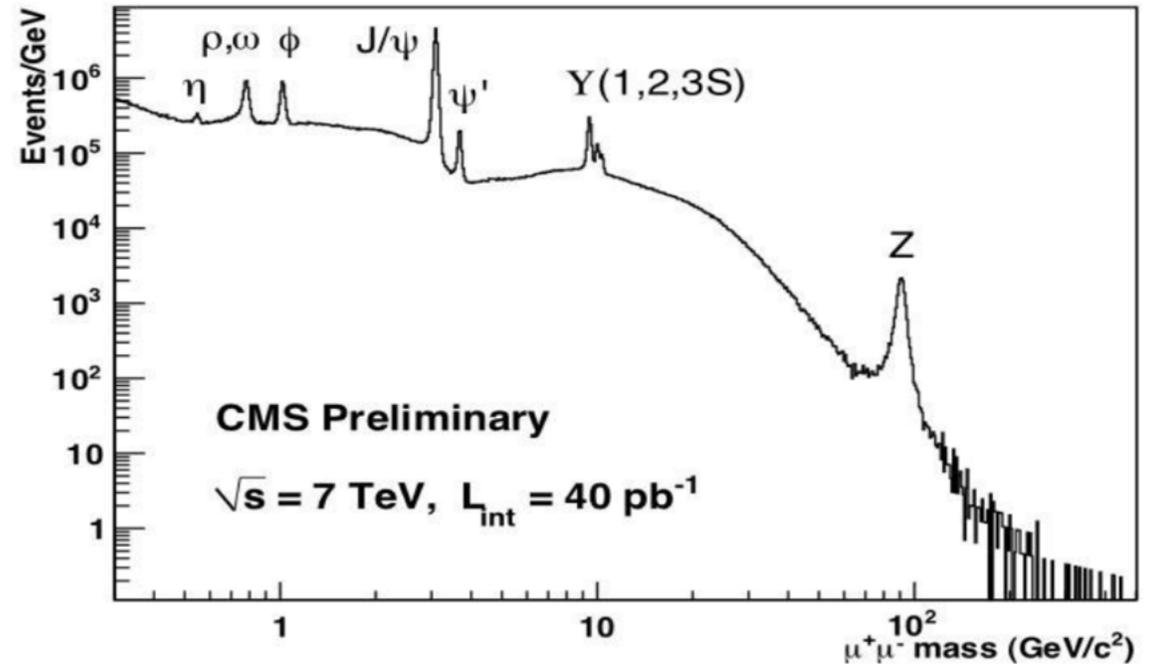
$$m^2 = (E_1/c^2 + E_2/c^2)^2 - (\vec{p}_1/c + \vec{p}_2/c)^2$$

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



RICOSTRUZIONE DI PARTICELLE INSTABILI

- Gli stessi concetti possono essere estesi anche ad altre particelle che sono prodotte nelle collisioni
- La produzione di due leptoni puo' essere "mediate" da fotoni o avvenire con altri processi che non sia la creazione di particelle
 - Gli eventi possono avere qualsiasi massa
 - Ci sono dei picchi in corrispondenza della creazione di particelle

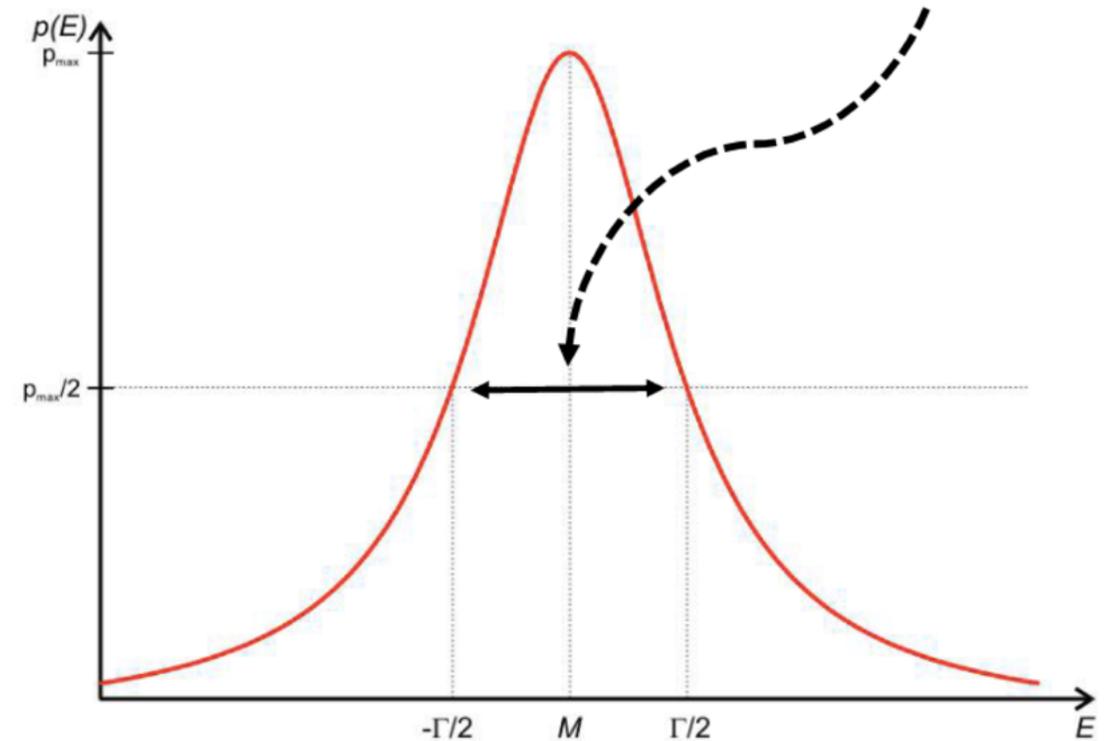


PERCHE' LA MASSA NON E' PRECISA?

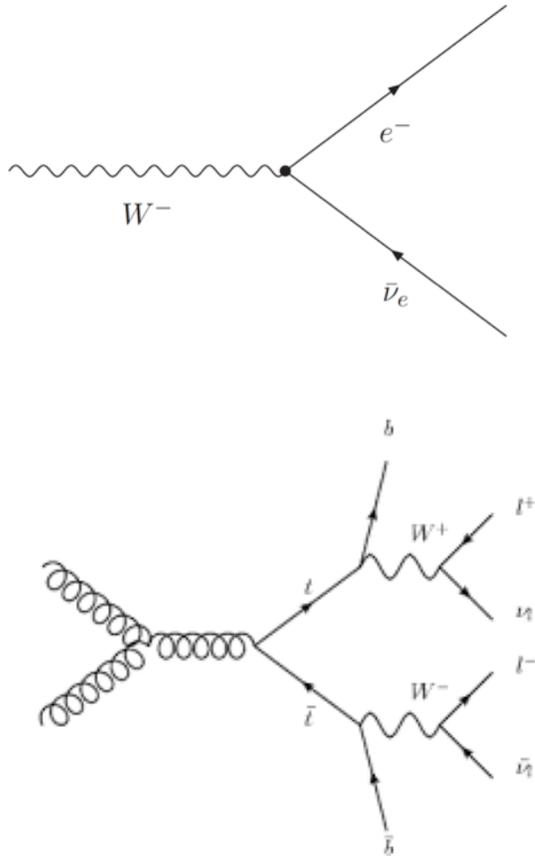
- Particella che “nasce e muore” in un tempo brevissimo: la sua massa (energia) è quindi indeterminata
- Principio di indeterminazione di Heisenberg:

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

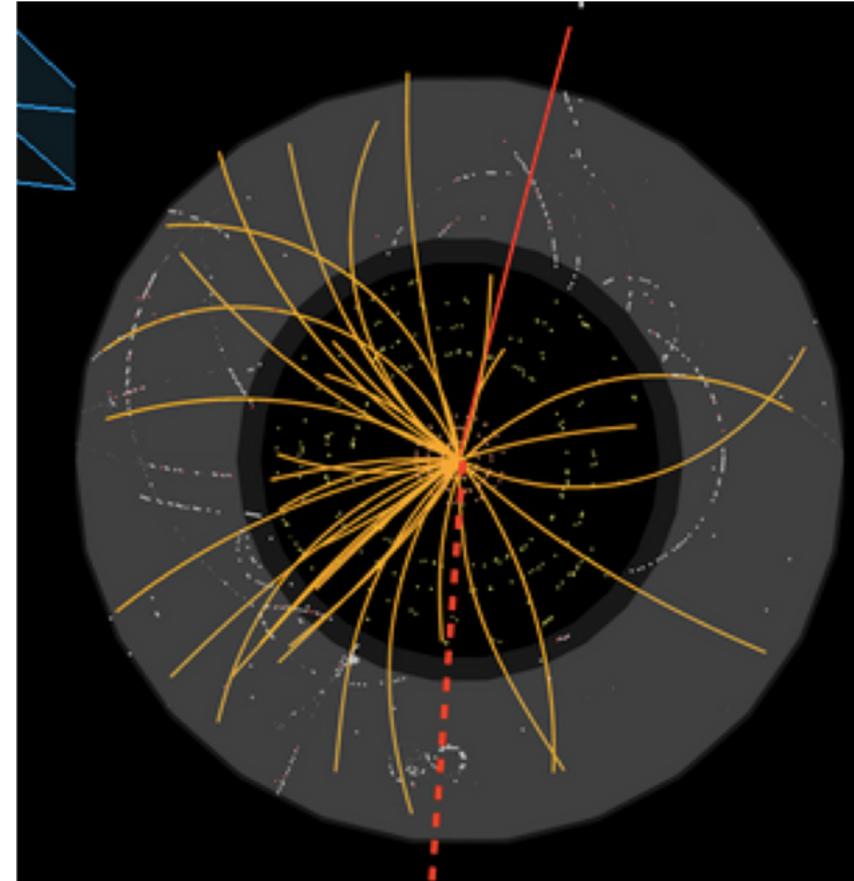
Vita media di una
particella



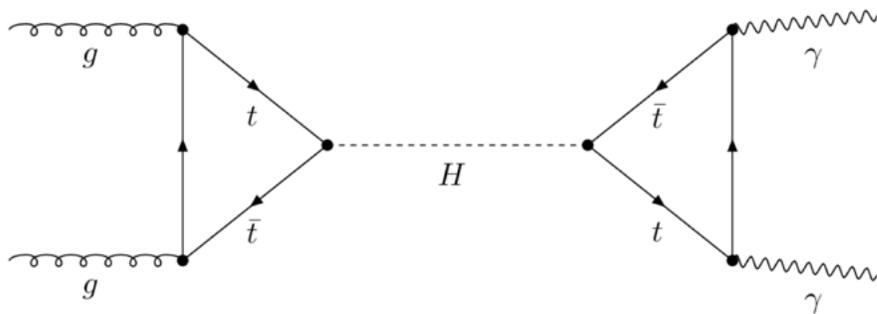
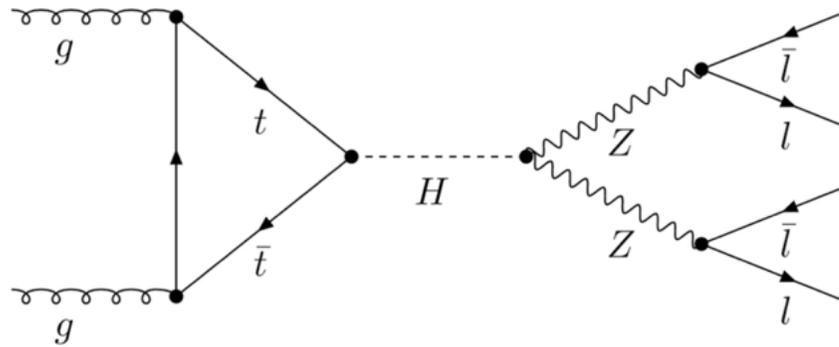
PROCESSI CON LEPTONI NELLO STATO FINALE



- Ci sono molti processi che creano leptoni ad alta energia nello stato finale.
- In caso di particelle cariche la carica del leptone permette di ricostruire la carica della particella iniziale
- I neutrino non possono essere ricostruiti
- Possibile dedurre la loro presenza dalla conservazione dell'energia.



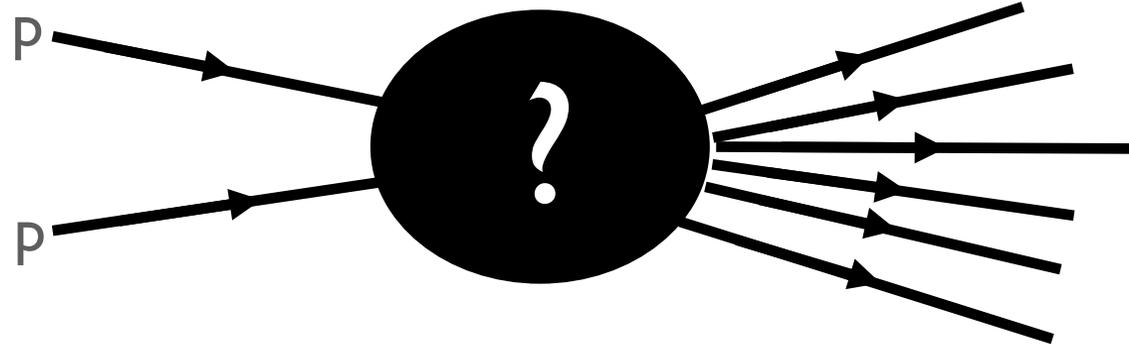
IL BOSONE DI HIGGS



- Un altro processo interessante puo' essere la misura della creazione del bosone di Higgs.
 - Particella scoperta nel 2012, la piu' recente aggiunta allo SM
- Ci sono molti stati finali per l'Higgs ma i piu' "facili" da osservare sono quelli con 4 leptoni nello stato finale o 2 fotoni
 - Coppia di fotoni rappresenta solo lo 0.2% dei casi
- Perche' gli altri stati sono difficili da osservare?
 - Ricordate che la massa di una particella e' sconosciuta prima della sua misura.

IL FONDO

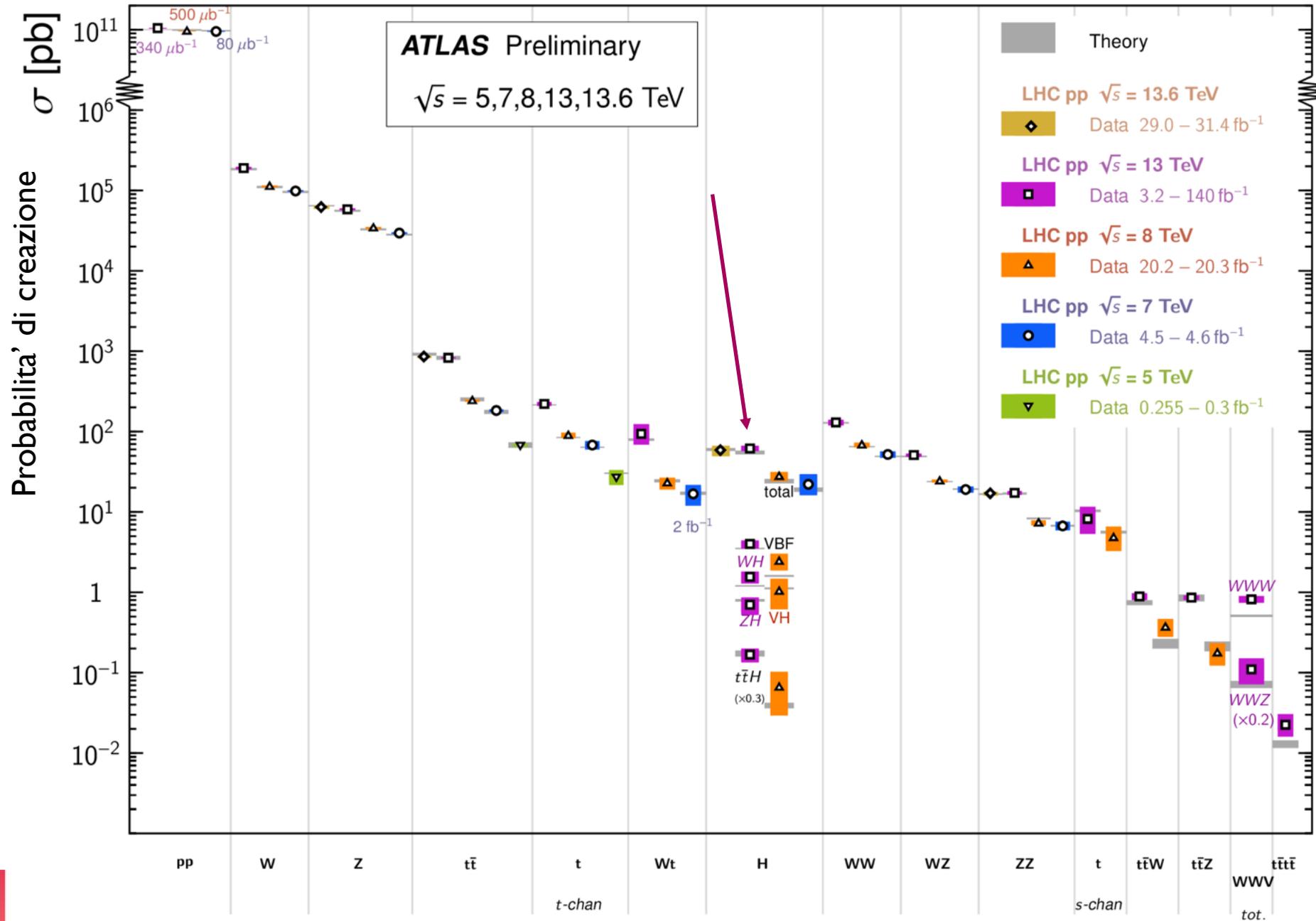
- L'unica informazione che abbiamo sull'evento sono le particelle che escono dall'interazione.



- Anche se vogliamo selezionare bosoni H o Z non c'è modo di sapere cosa stiamo selezionando, possiamo basarci solo sullo stato finale
- Possiamo selezionare eventi con uno stato finale che potrebbe interessarci (e.g. solo 2 fotoni) e vedere se questa selezione aumenta il segnale che abbiamo raccolto rispetto al fondo.
 - Se diversi processi hanno lo stesso stato finale non possiamo fare molto
 - Molto spesso produrre un evento di “fondo” è più probabile di produrne uno di segnale

Standard Model Total Production Cross Section Measurements

Status: October 2023



SEGNALE VS FONDO



Sensibilita': falsi negativi

Specificita': falsi positivi

ESEMPIO NUMERICO



negativo



positivo



- Il nostro campione iniziale e' dominato dal fondo e testiamo 100000 individui
- Assumendo l'assenza di falsi negativi
 - Se una persona e' infetta (segnale) e' sicuramente positiva
- Supponiamo di avere un falso positivo ogni 1000 test
- Qual'e' la probabilita' che un paziente positivo sia infetto? (Che un evento selezionato sia segnale)?

Dipende dall'incidenza dell'infezione(segnale)

1/100 → probabilita' = 0.9

1/10000 → probabilita' = 0.09

ESEMPIO NUMERICO



negativo



positivo



- Il nostro campione iniziale è dominato dal fondo e testiamo 100000 individui
- Assumendo l'assenza di falsi negativi
 - Se una persona è infetta (segnale) è sicuramente positiva
- Supponiamo di avere un falso positivo ogni **10000** test
- Qual'è la probabilità che un paziente positivo sia infetto? (Che un evento selezionato sia segnale)?

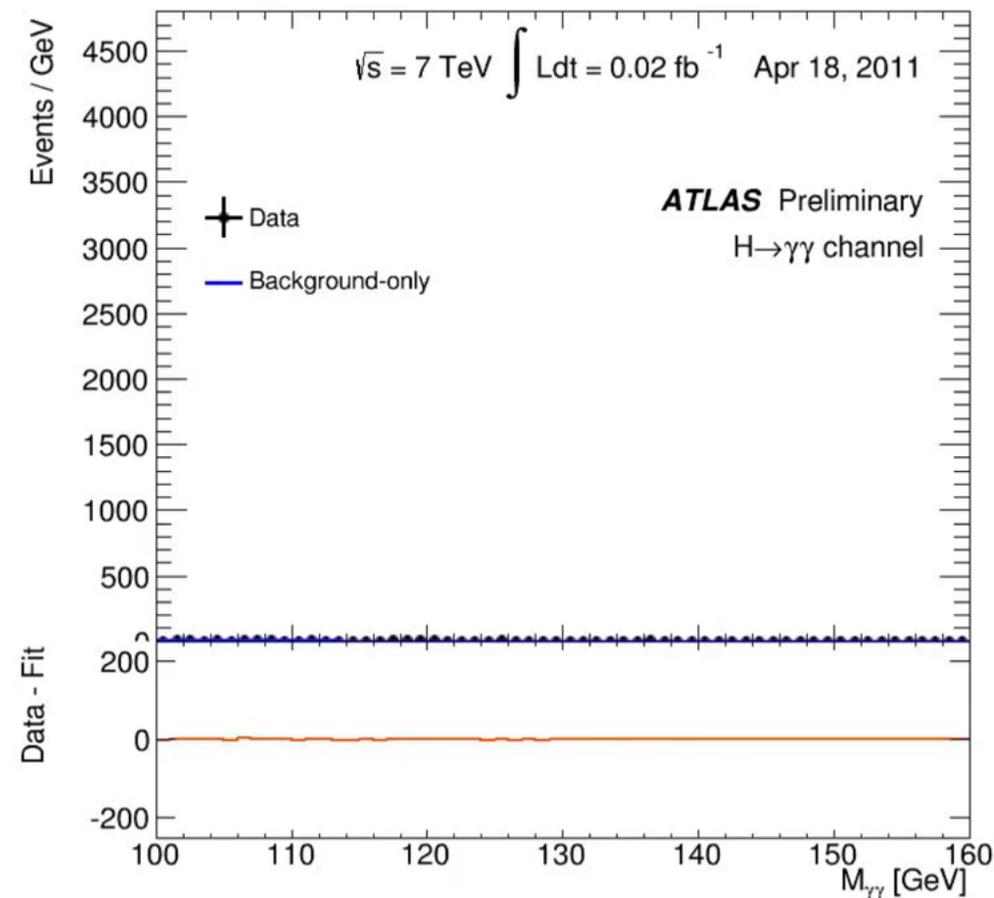
Dipende dall'incidenza dell'infezione(segnale)

1/100 → probabilità = **0.99**

1/10000 → probabilità = **0.5**

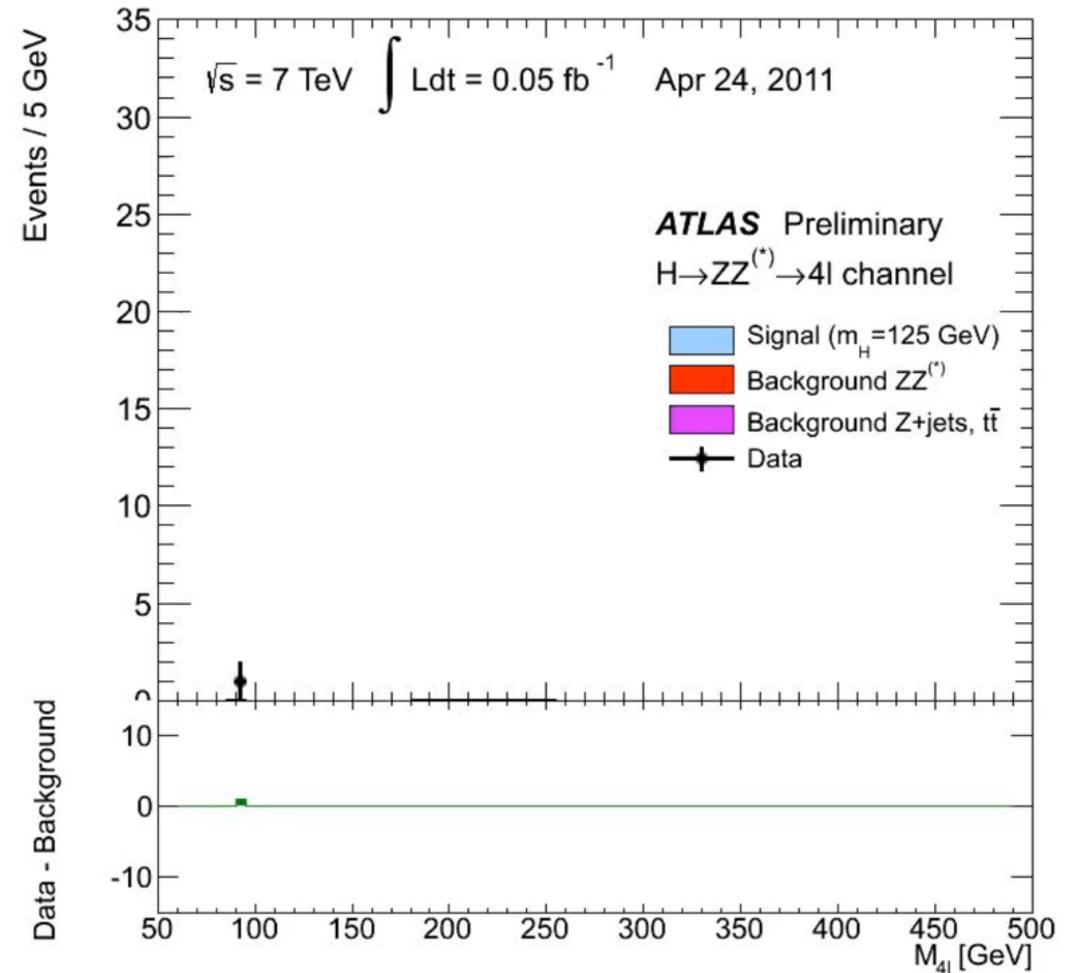
IDENTIFICARE L'HIGGS

- L'Higgs e' molto raro \rightarrow campione dominato dal fondo
- Selezionare eventi con due fotoni permette di avere pochi "falsi positivi"
- Eventi = probabilita' di creazione \times L



IDENTIFICARE L'HIGGS

- L'Higgs e' molto raro \rightarrow campione dominato dal fondo
- Selezionare eventi con 4 leptoni permette di avere pochi "falsi positivi"
- Eventi = probabilita' di creazione \times L



ESERCIZIO

- Nell'esercitazione vi verranno sottoposti eventi "reali" di collisioni protone protone ad LHC.
- Voi dovrete identificare elettroni, muoni e fotoni e cercare di capire se sono stati originati dal decadimento di altre particelle pesanti
 - $Z \rightarrow 2$ elettroni o 2 muoni (carica opposta)
 - Higgs $\rightarrow 2$ fotoni
 - Higgs $\rightarrow 4$ leptoni ($4e, 4\mu, 2e+2\mu$)
- Discutete tra di voi per capire le situazioni ambigue
- Non abbiate paura di fare domande e chiedere chiarimenti
- Cercate di non sbagliare ma non abbiate paura di farlo: i falsi positivi/negativi (es. identificare un elettrone come fotone) succedono....non solo a voi!
- Quello che state facendo e' la base del lavoro come fisico delle particelle, anche se abbiamo sviluppato metodi piu' efficienti per farlo 😊