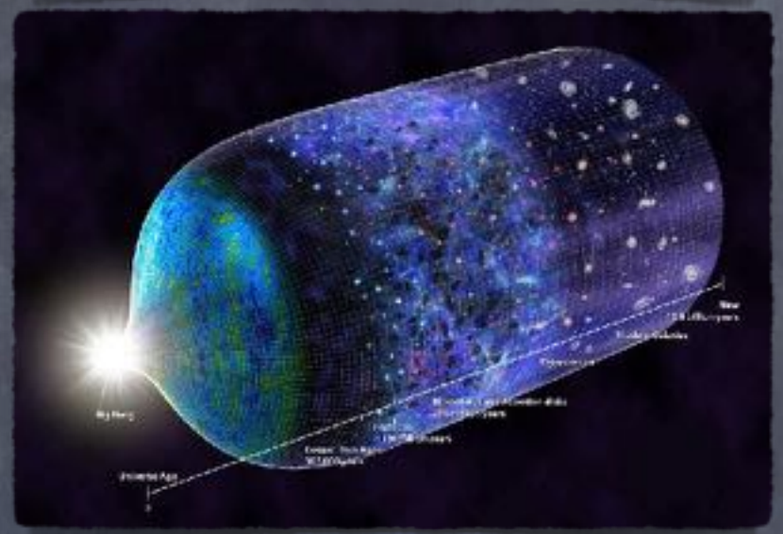
Teoria delle particelle a collider

Giuliano Panico

Le nuove frontiere

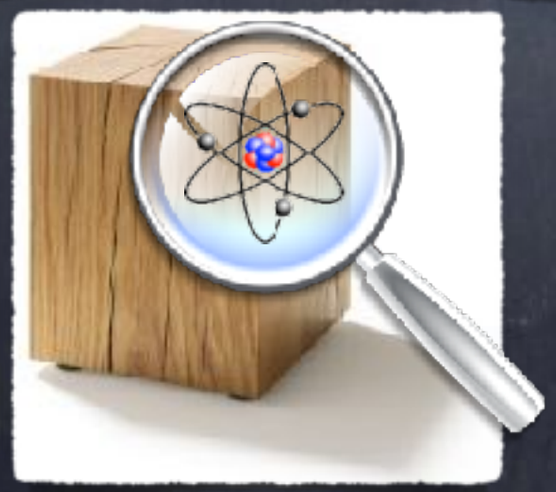
l'origine del tempo



Cosmologia

- Big Bang
- Evoluzione dell'universo
- Energia oscura

l'infinitamente piccolo



Fisica delle Particelle

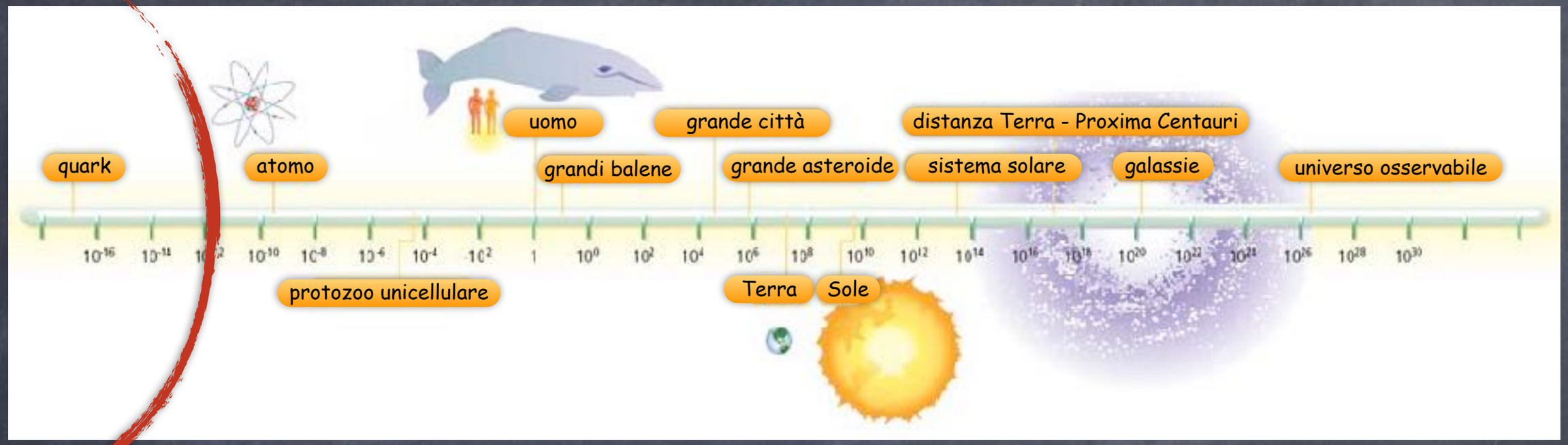
- Costituenti della materia
- Forze ed energia

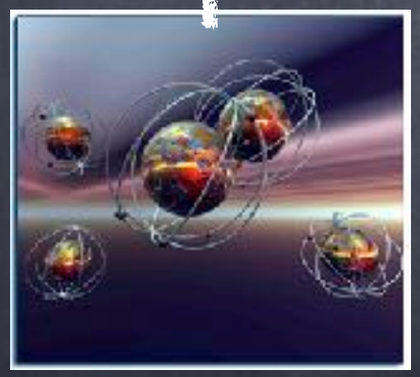
l'infinitamente grande

Cosmologia/Astrofisica

- Galassie, stelle
- Materia oscura

Una questione di scale



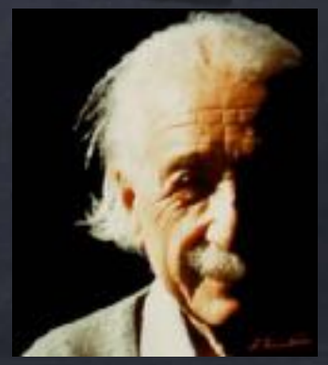


Meccanica Quantistica

Pauli, Heisenberg, Fermi ...

Meccanica Classica

Relatività Generale



Einstein

I collider

Dualità onda – particella

Secondo la meccanica quantistica, le particelle si comportano come corpuscoli ed onde allo stesso tempo

[Einstein 1905, de Broglie 1924]

Louis de Broglie

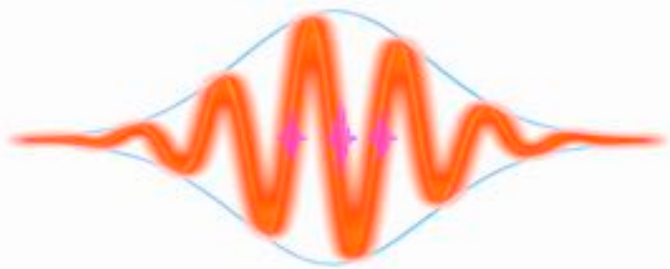
$$E = h\,\nu$$

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

ν = frequenza

λ = lunghezza d'onda di de Broglie

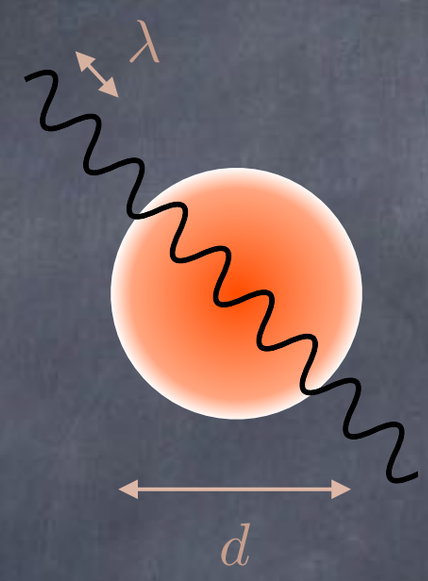
h = costante di Planck



onda = particella

I collider: i nostri più potenti microscopi

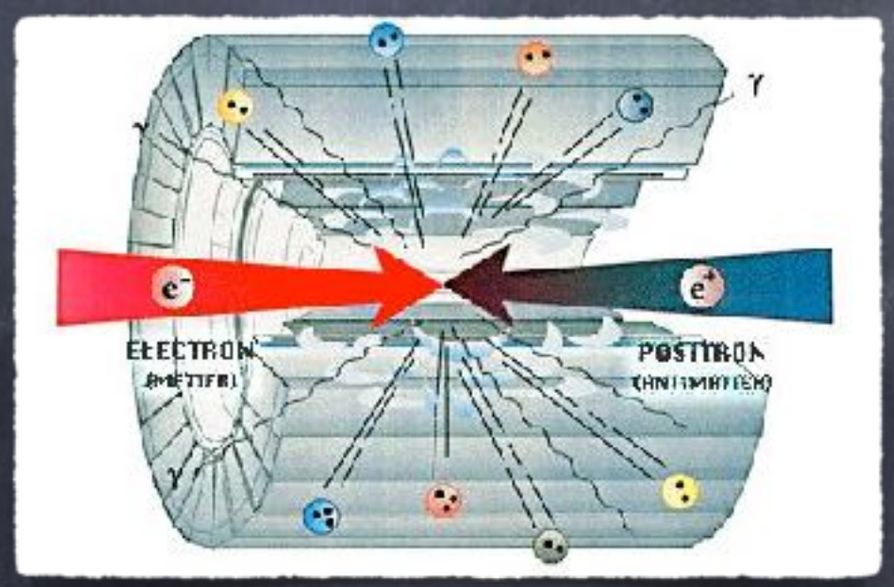
Esplorare piccole distanze richiede sonde con piccola lunghezza d'onda, ovvero grande quantità di moto



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

lunghezza d'onda di de Broglie

Per studiarne la struttura interna, le particelle vengono accelerate e fatte collidere



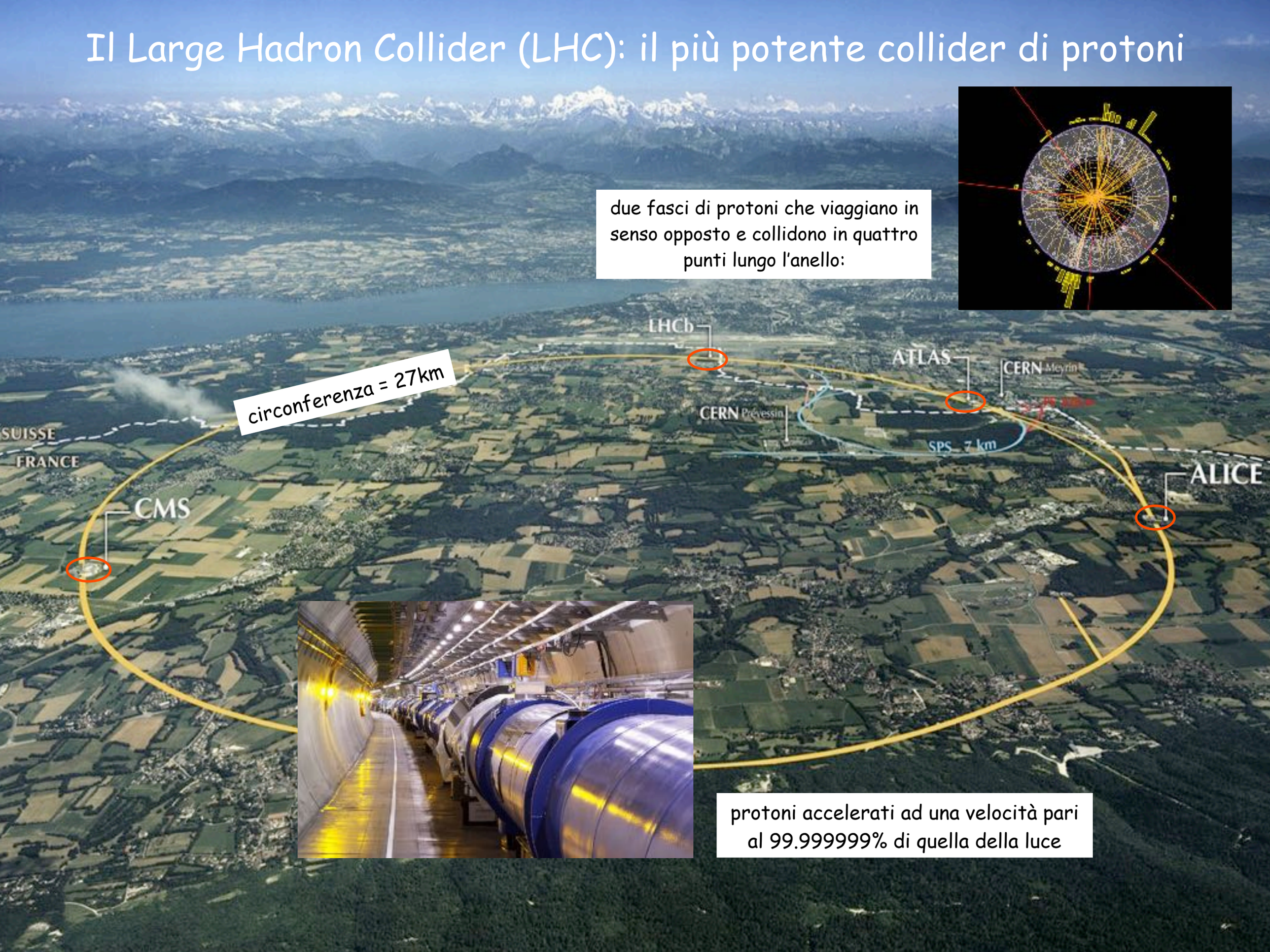
Dall'urto si creano nuove particelle secondo la relazione tra massa ed energia di Einstein

$$E = m\,c^2$$

Il Large Hadron Collider (LHC): il più potente collider di protoni

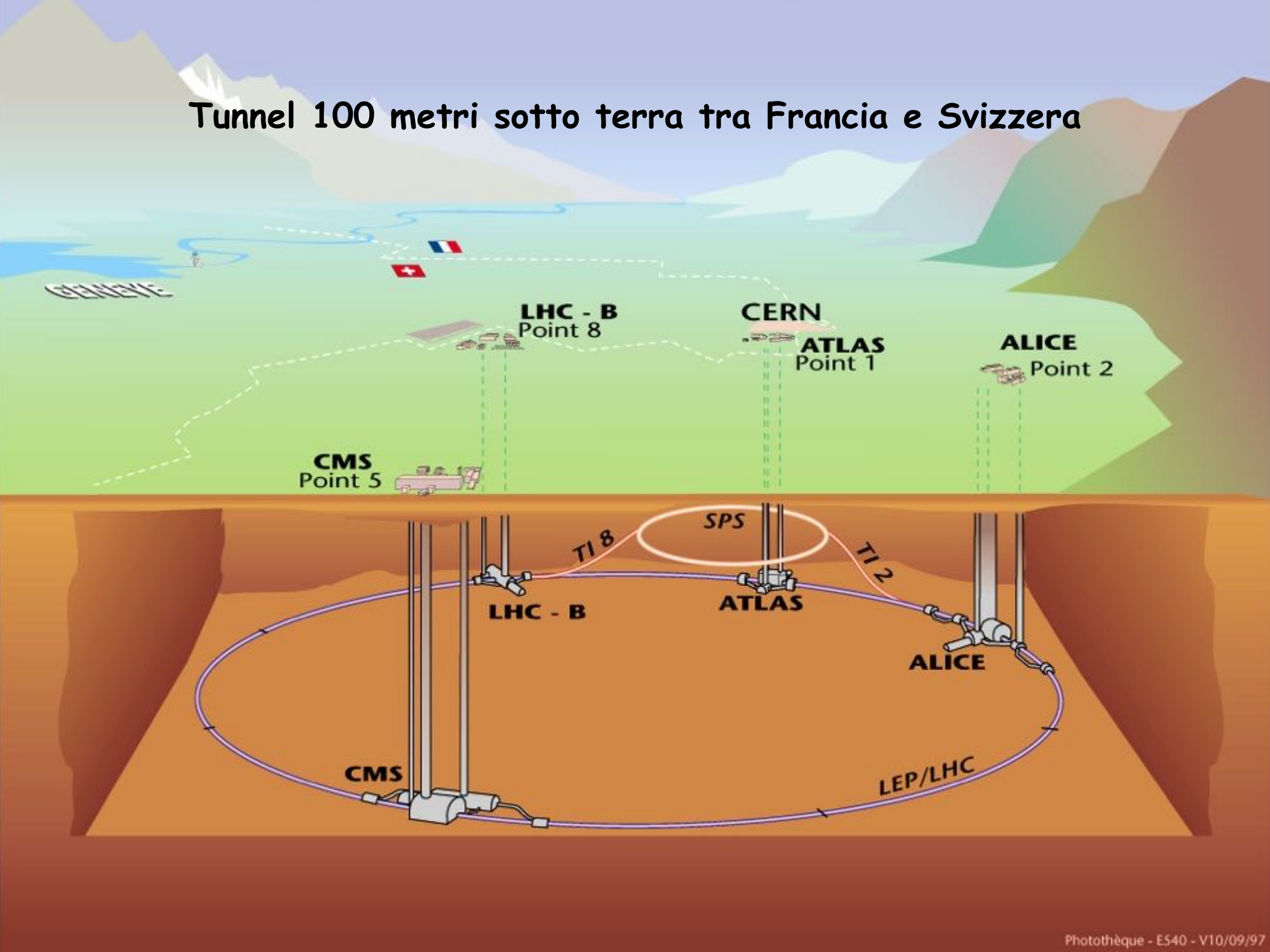
due fasci di protoni che viaggiano in senso opposto e collidono in quattro punti lungo l'anello:

circonferenza = 27km

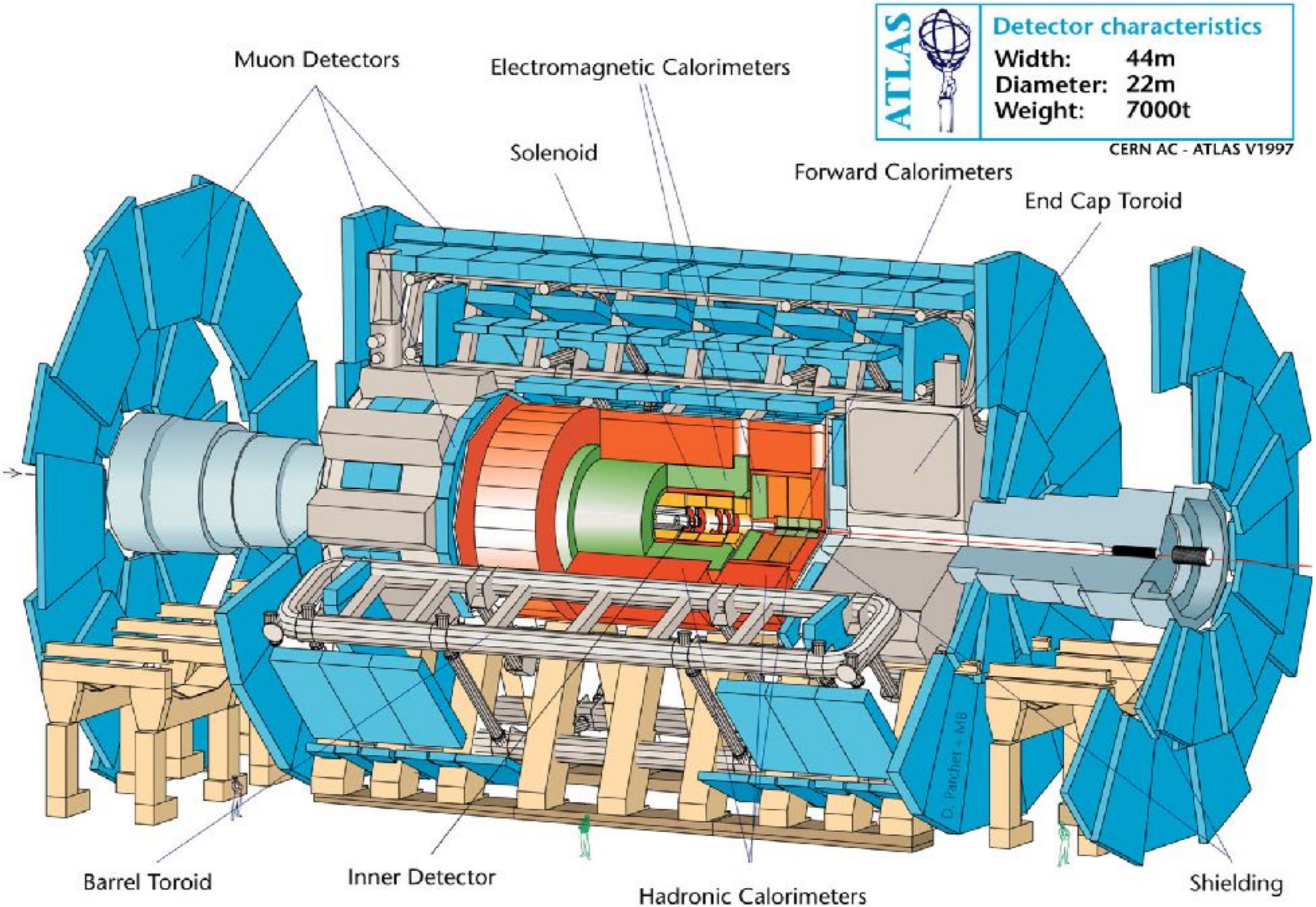


protoni accelerati ad una velocità pari al 99.999999% di quella della luce

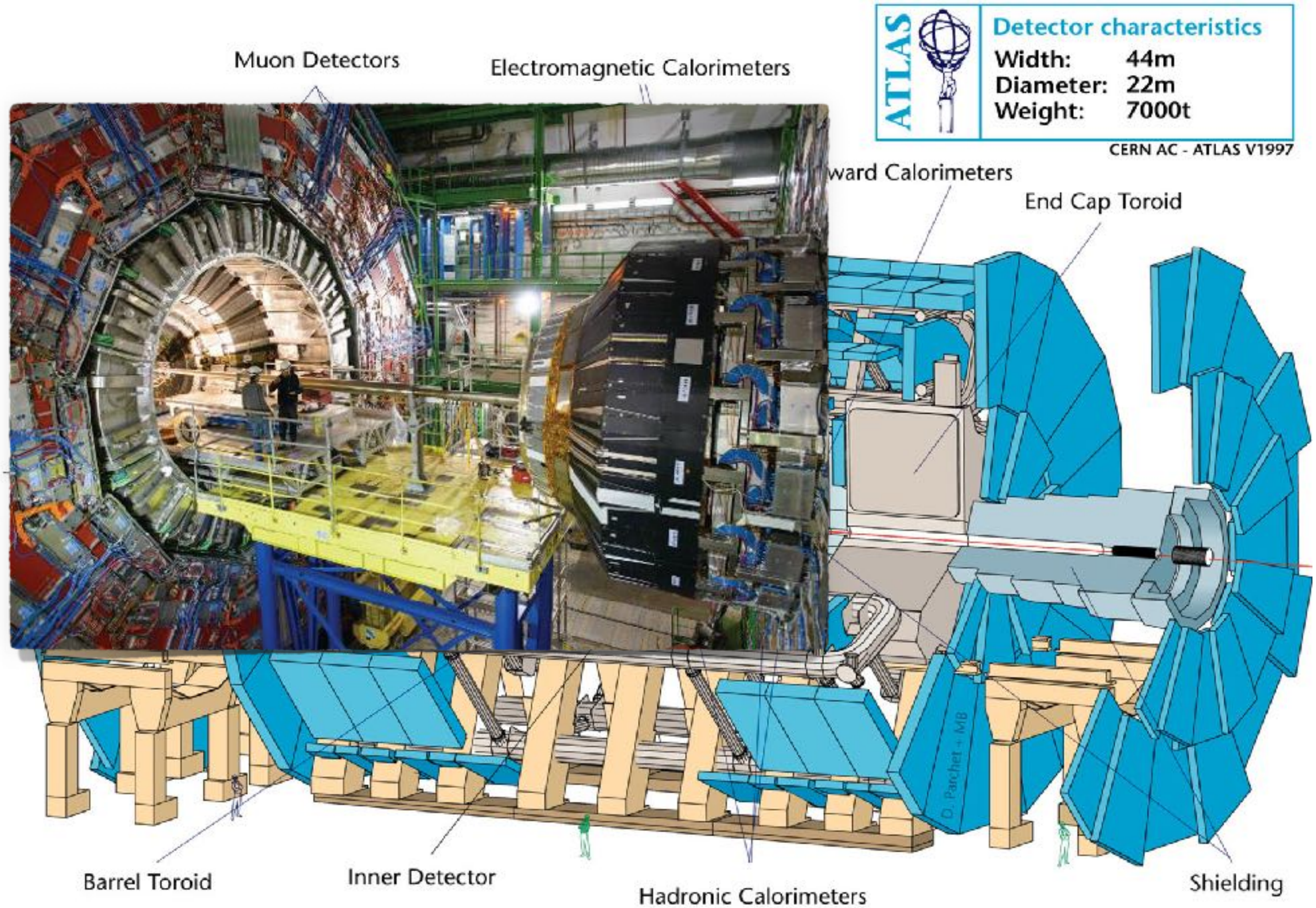
Tunnel 100 metri sotto terra tra Francia e Svizzera



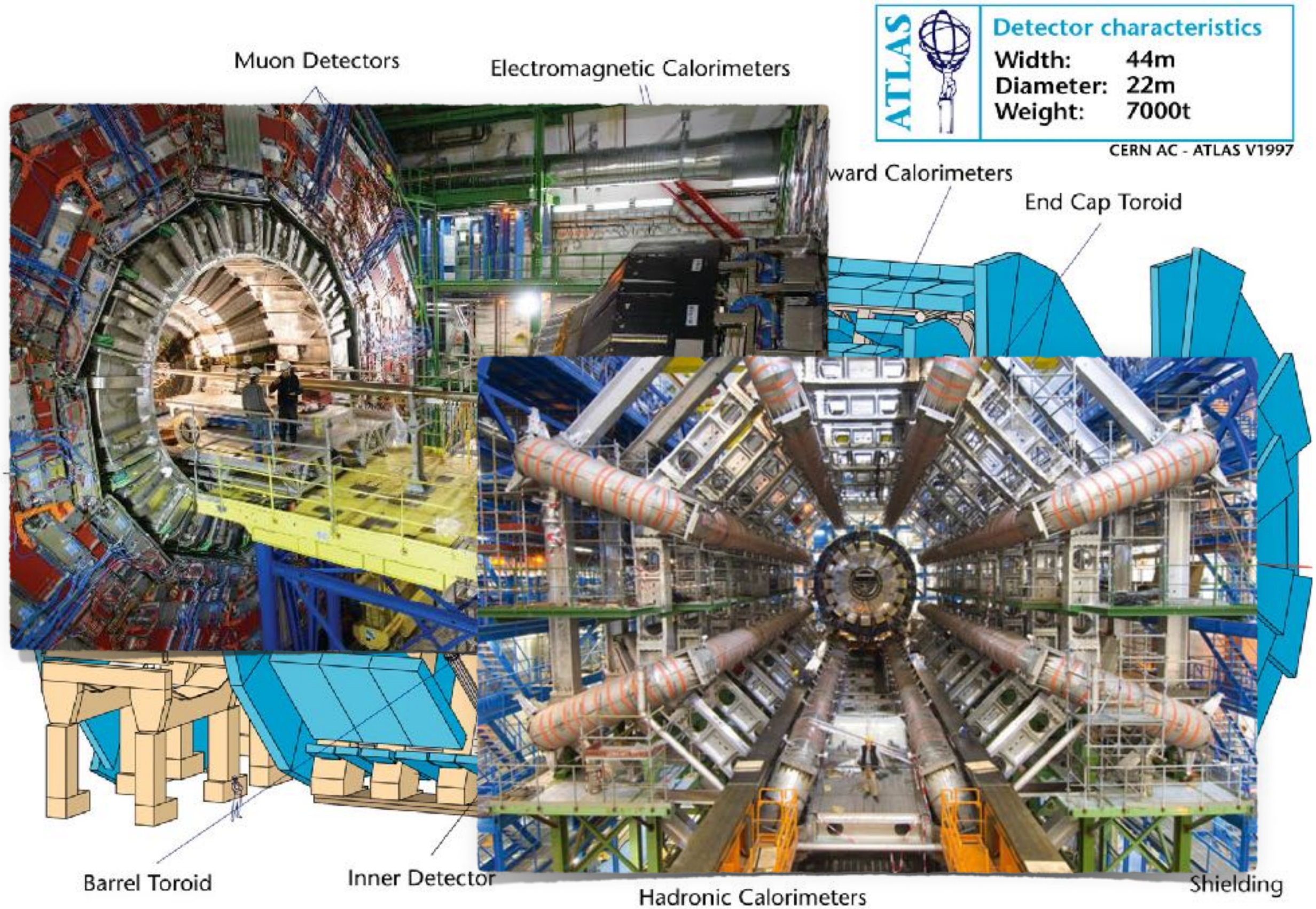
Enormi rivelatori



Enormi rivelatori



Enormi rivelatori

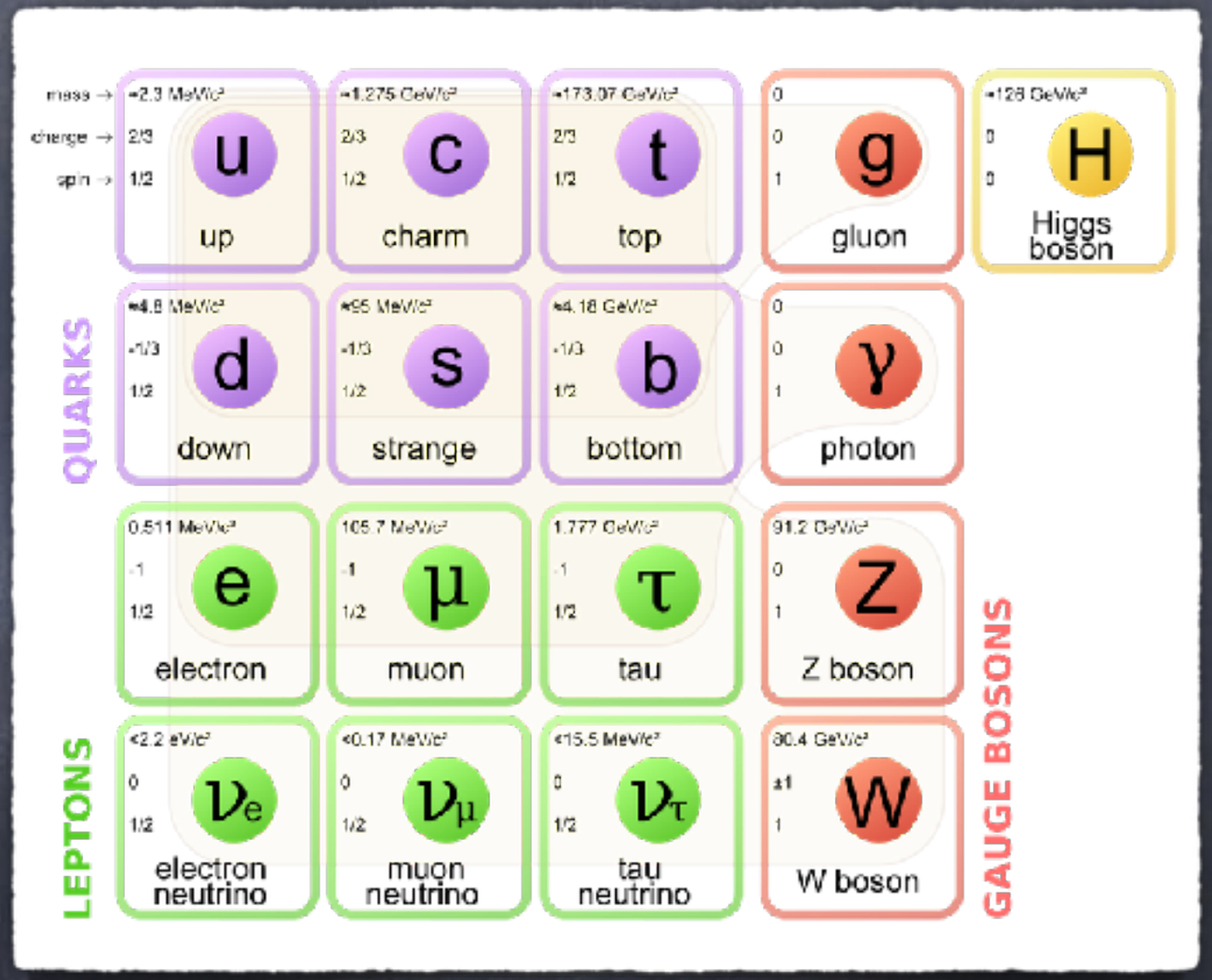


La teoria:
il Modello Standard

Il Modello Standard

- Una teoria basata su un piccolo numero di particelle fondamentali (quark, leptoni e bosoni vettori), spiega tutti i fenomeni in natura, eccetto la gravità

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i \bar{\psi} \not{D} \psi + \bar{\psi}_i y_{ij} \psi_j \phi + h.c. + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$



- Coronamento della scienza del XX secolo e traguardo di più di 100 anni di ricerche teoriche e sperimentali

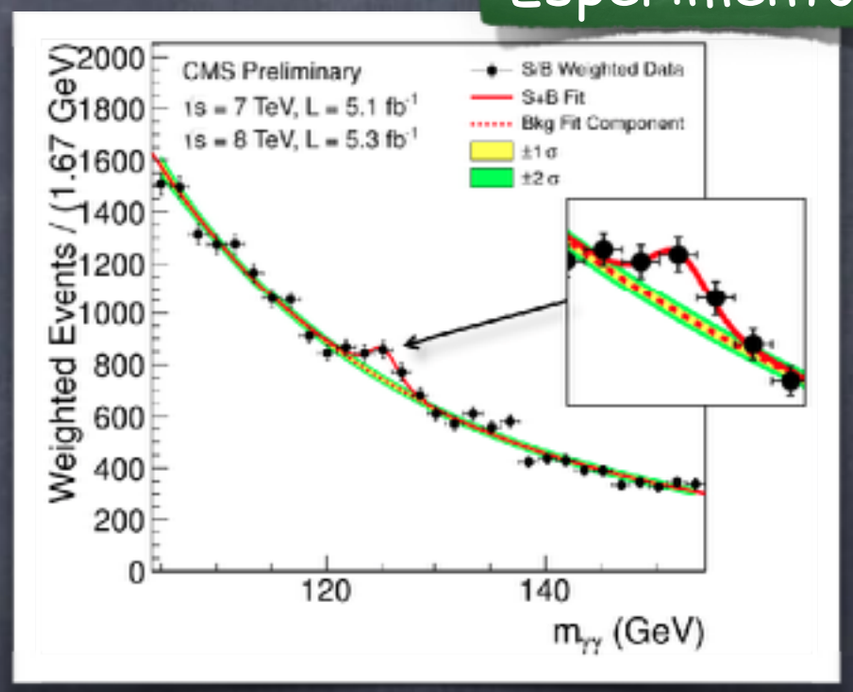
Teoria ed esperimento

- Teoria ed esperimento sono essenziali l'uno per l'altro!

Teoria

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$
$$+ i \bar{\psi} \not{D} \psi$$
$$+ \bar{\psi}_i y_{ij} \psi_j \phi + h.c.$$
$$+ |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

Esperimento

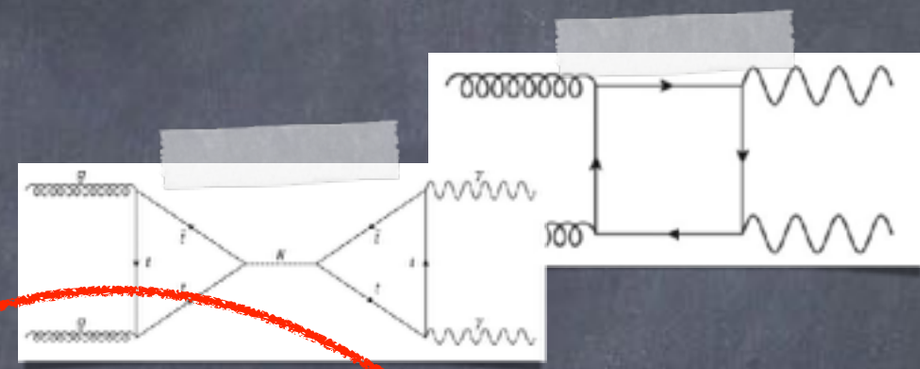


Teoria ed esperimento

- Teoria ed esperimento sono essenziali l'uno per l'altro!

Teoria

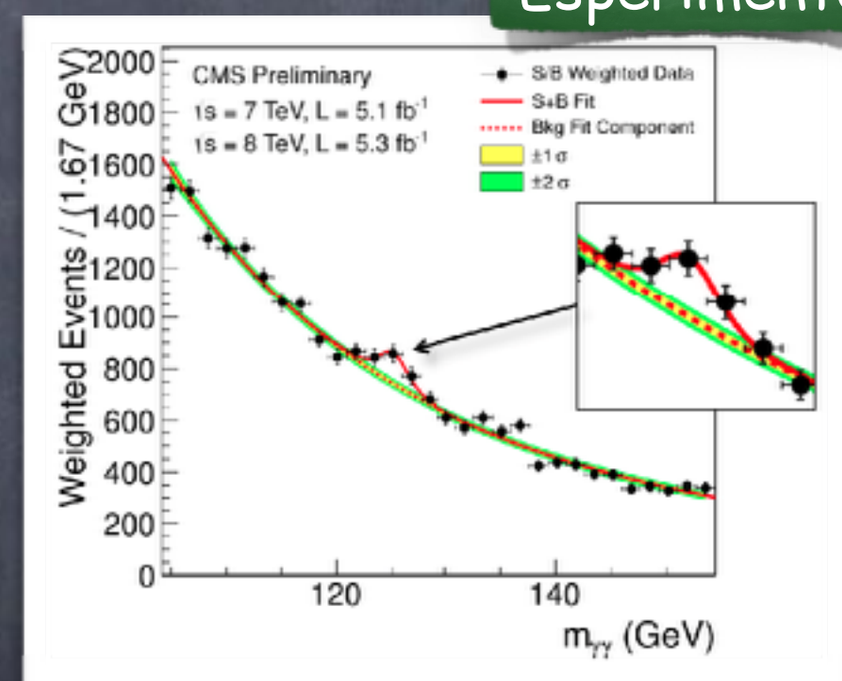
- Formulare ipotesi
- Tradurre le ipotesi in predizioni
- Interpretare i dati sperimentali



Teoria

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$
$$+ i \bar{\psi} \not{D} \psi$$
$$+ \bar{\psi}_i y_{ij} \psi_j \phi + h.c.$$
$$+ |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

Esperimento

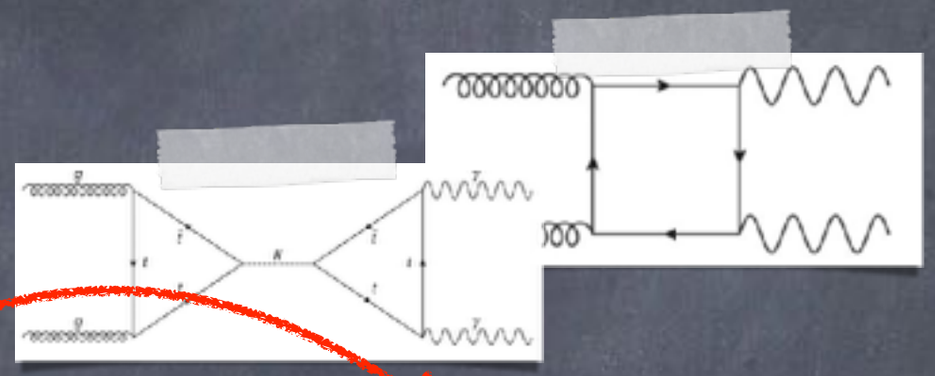


Teoria ed esperimento

- Teoria ed esperimento sono essenziali l'uno per l'altro!

Teoria

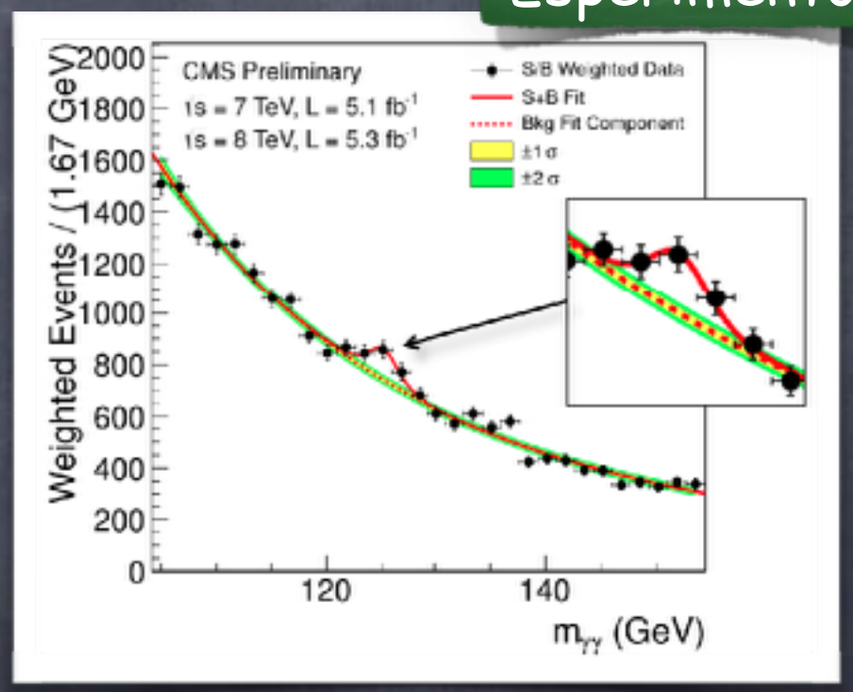
- Formulare ipotesi
- Tradurre le ipotesi in predizioni
- Interpretare i dati sperimentali



Teoria

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$
$$+ i \bar{\psi} \not{D} \psi$$
$$+ \bar{\psi}_i y_{ij} \psi_j \phi + h.c.$$
$$+ |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

Esperimento



Esperimento

- Testare/confermare le ipotesi teoriche
- Fornire indicazioni su nuovi fenomeni

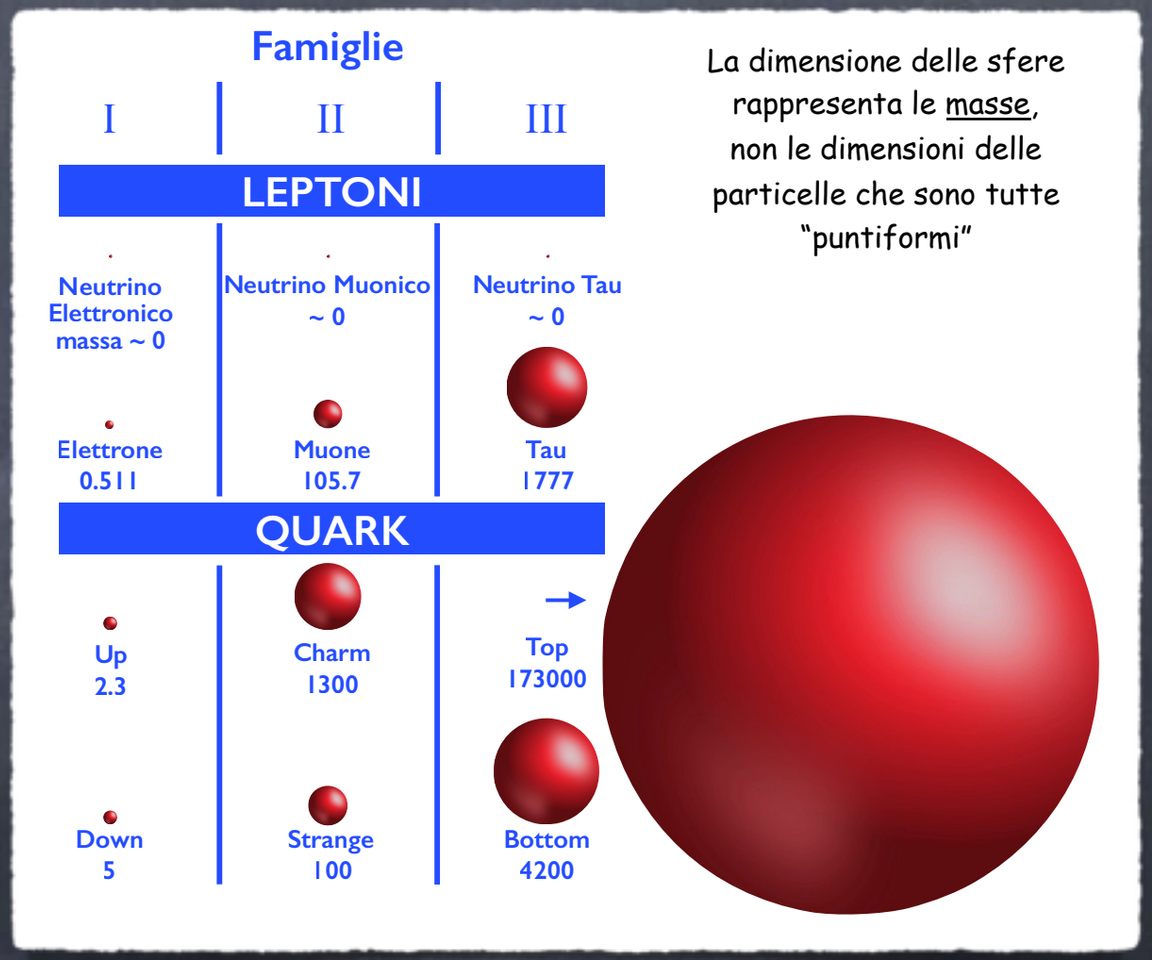
La caccia al Bosone di Higgs

L'origine delle Masse

Il Modello Standard prevede che ogni fermione (leptoni e quark) esista in 3 "copie"

Le "copie" hanno esattamente le stesse proprietà ...

... ma masse diverse!

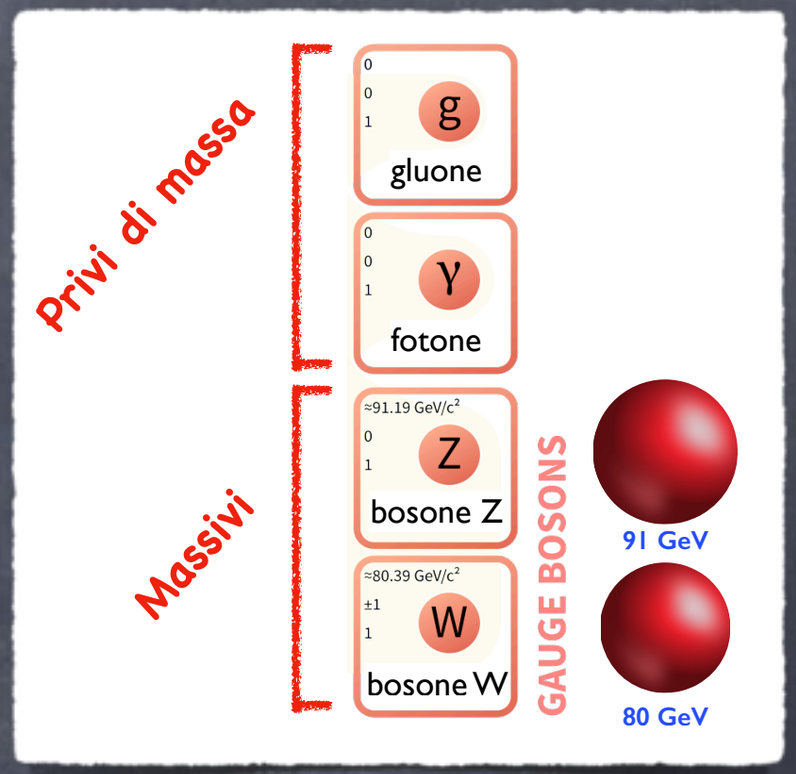


L'origine delle Masse

Ancora più importanti sono le masse dei bosoni vettori (i mediatori delle forze)

- bosoni privi di massa (fotone e gluone) mediano forze a lunga distanza
  (elettromagnetismo e forza forte ⟶ struttura atomica)

- bosoni massivi (bosoni W e Z) mediano forze a corta distanza
  (forza debole ⟶ fenomeni di radioattività)



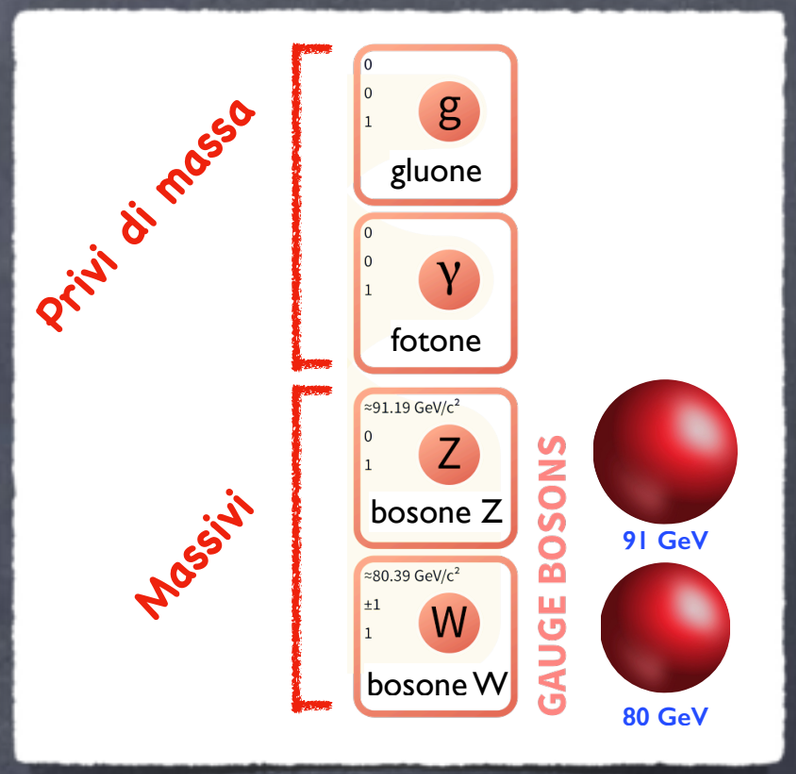
Se i bosoni W e Z non avessero massa le forze deboli agirebbero su distanze macroscopiche

L'origine delle Masse

Ancora più importanti sono le masse dei bosoni vettori (i mediatori delle forze)

- bosoni privi di massa (fotone e gluone) mediano forze a lunga distanza
  (elettromagnetismo e forza forte ⟶ struttura atomica)

- bosoni massivi (bosoni W e Z) mediano forze a corta distanza
  (forza debole ⟶ fenomeni di radioattività)

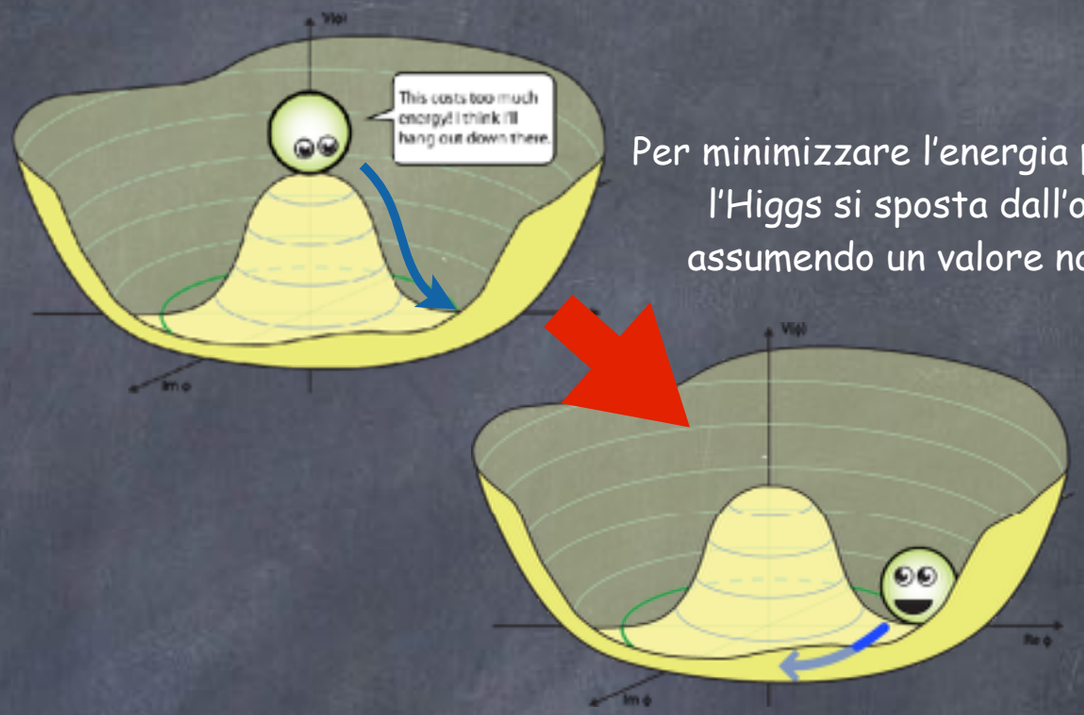


Se i bosoni W e Z non avessero massa le forze deboli agirebbero su distanze macroscopiche

Quale è l'origine delle Masse?

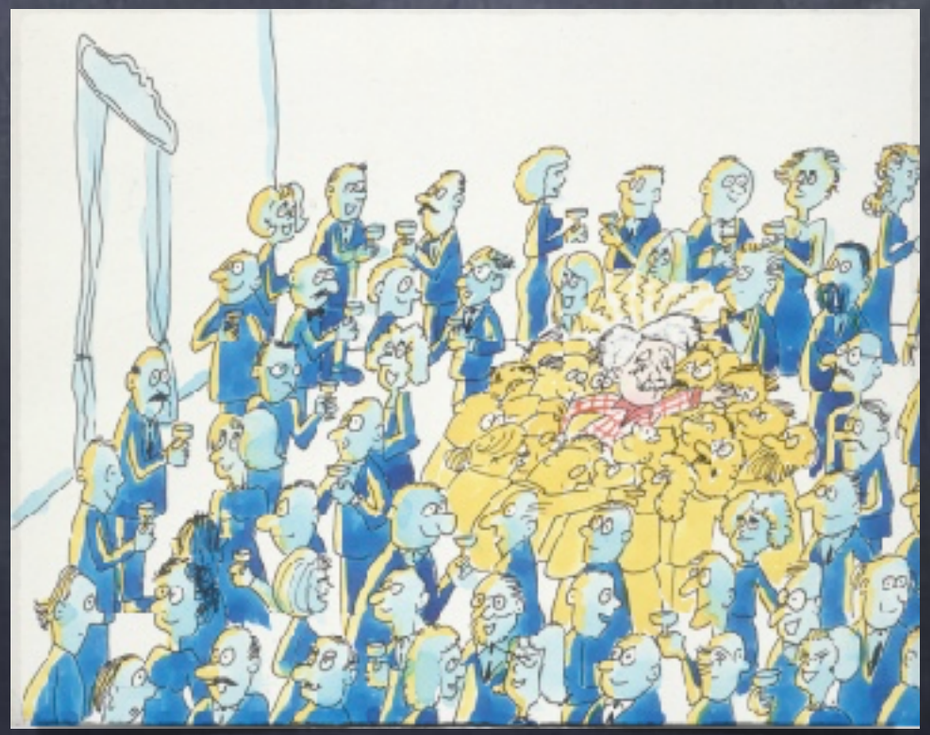
Il bosone di Higgs e l'origine delle Masse

Il campo di Higgs permea tutto lo spazio, assumendo un valore costante non nullo



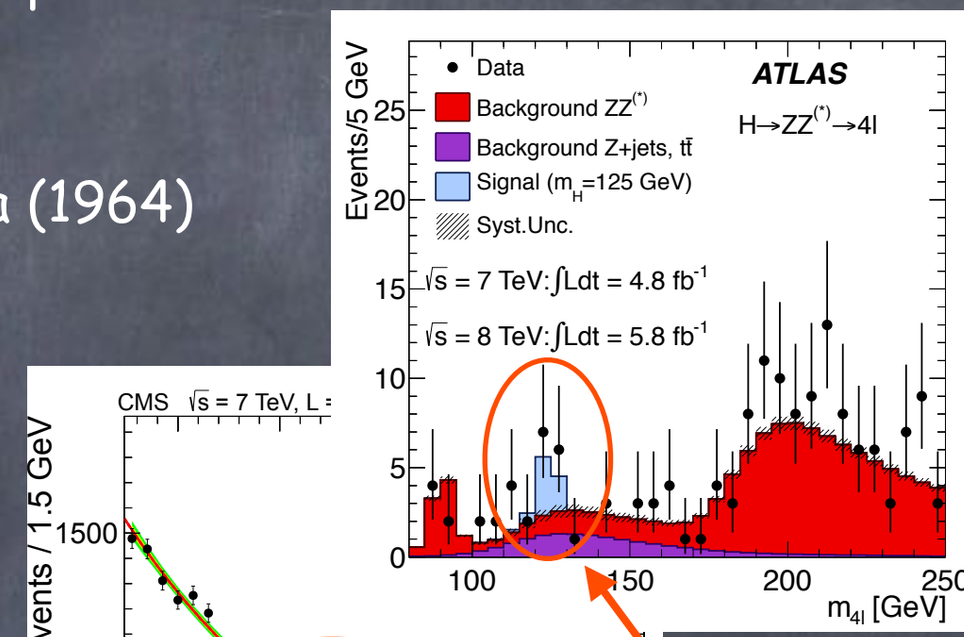
Per minimizzare l'energia potenziale l'Higgs si sposta dall'origine assumendo un valore non nullo

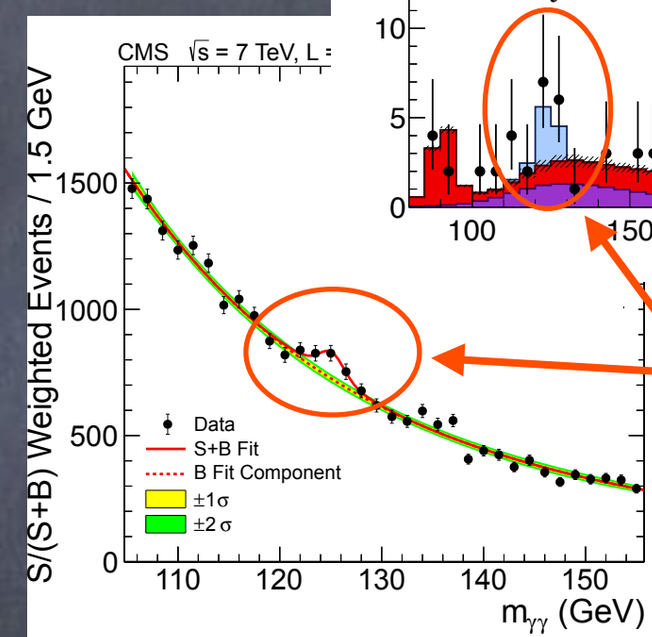
L'interazione delle particelle col campo di Higgs crea un effetto di "attrito" che corrisponde alla massa

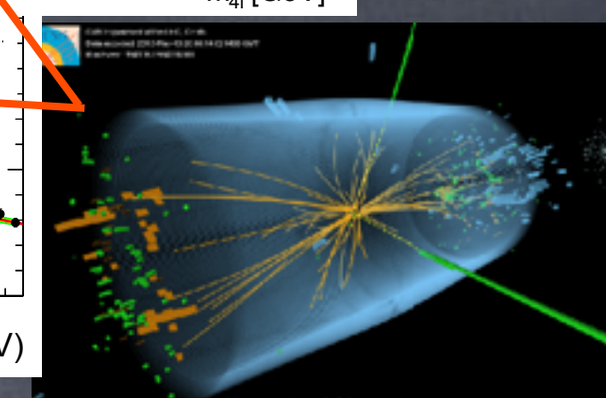


Il 4 Luglio 2012 le collaborazioni ATLAS e CMS presso l'LHC hanno finalmente annunciato la scoperta del bosone di Higgs!

… ben 48 anni dopo la sua previsione teorica (1964)







Englert e Higgs hanno ricevuto il premio Nobel 2013 per la Fisica

" … for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle …"

Le domande aperte

La scoperta del bosone di Higgs ha aggiunto l'ultimo tassello per completare il Modello Standard ...

ora abbiamo una teoria matematicamente consistente che descrive (con successo, finora) ogni tipo di processo a collider

La scoperta del bosone di Higgs ha aggiunto l'ultimo tassello per completare il Modello Standard ...

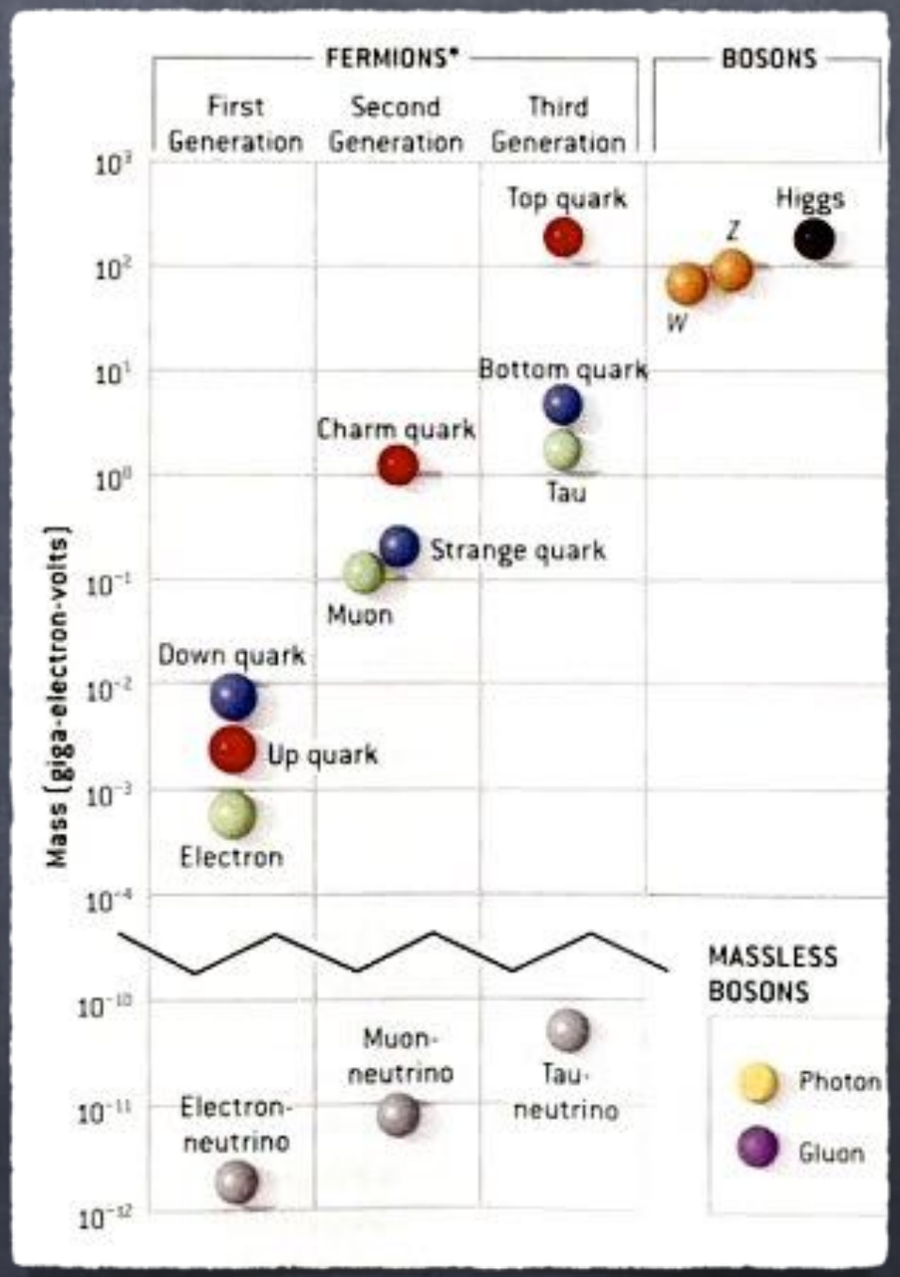
ora abbiamo una teoria matematicamente consistente che descrive (con successo, finora) ogni tipo di processo a collider

ma molte altre domande rimangono ancora aperte !

Ancora le masse ...

Le masse delle particelle elementari sono distribuite su diversi ordini di grandezza ... senza un ordine apparente

la massa dei neutrini è un milione di miliardi di volte (10^{15}) minore di quella del quark top!



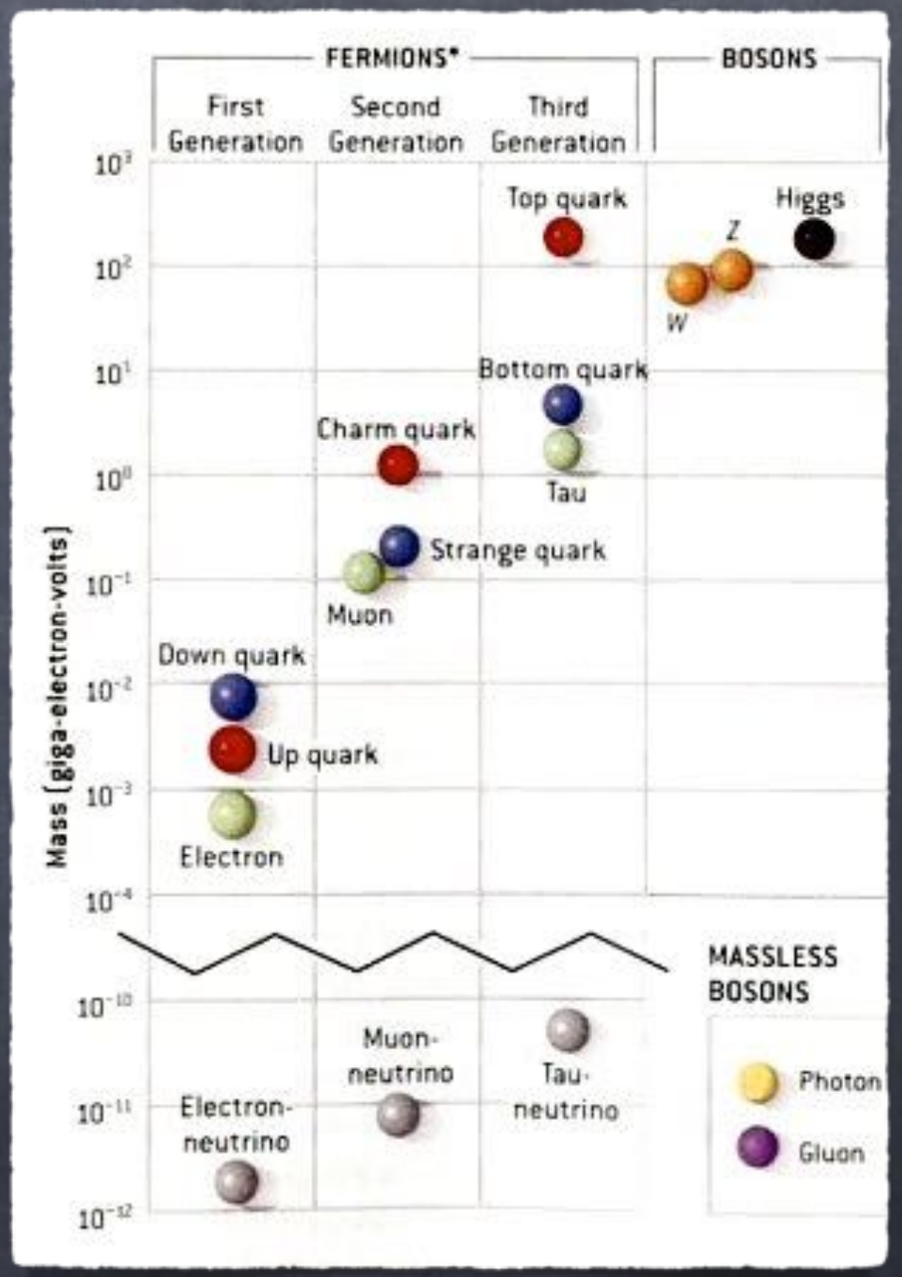
Ancora le masse ...

Le masse delle particelle elementari sono distribuite su diversi ordini di grandezza ... senza un ordine apparente

la massa dei neutrini è un milione di miliardi di volte (10^{15}) minore di quella del quark top!

Esiste un criterio o una dinamica fondamentale ancora da scoprire che spiega i valori delle masse?

Perché i neutrini sono molto più leggeri delle altre particelle di materia?



Il bosone di Higgs

Quali sono le proprietà del bosone di Higgs?

Cosa determina la sua massa?

È veramente elementare, o potrebbe essere composto da particelle più "piccole"?

Lo zoo delle particelle elementari è veramente completo?

Il Modello Standard potrebbe essere solo una descrizione parziale della natura

... e far parte di una teoria più ampia che si manifesta ad energie più elevate di quelle esplorate sino ad ora

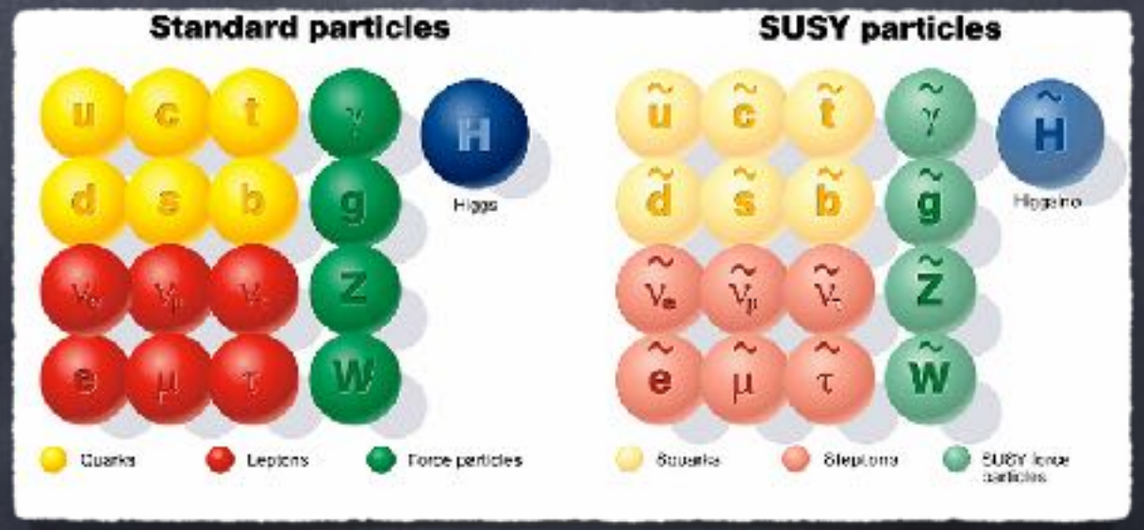
Lo zoo delle particelle elementari è veramente completo?

Il Modello Standard potrebbe essere solo una descrizione parziale della natura

… e far parte di una teoria più ampia che si manifesta ad energie più elevate di quelle esplorate sino ad ora

Molte estensioni del Modello Standard prevedono nuove particelle elementari

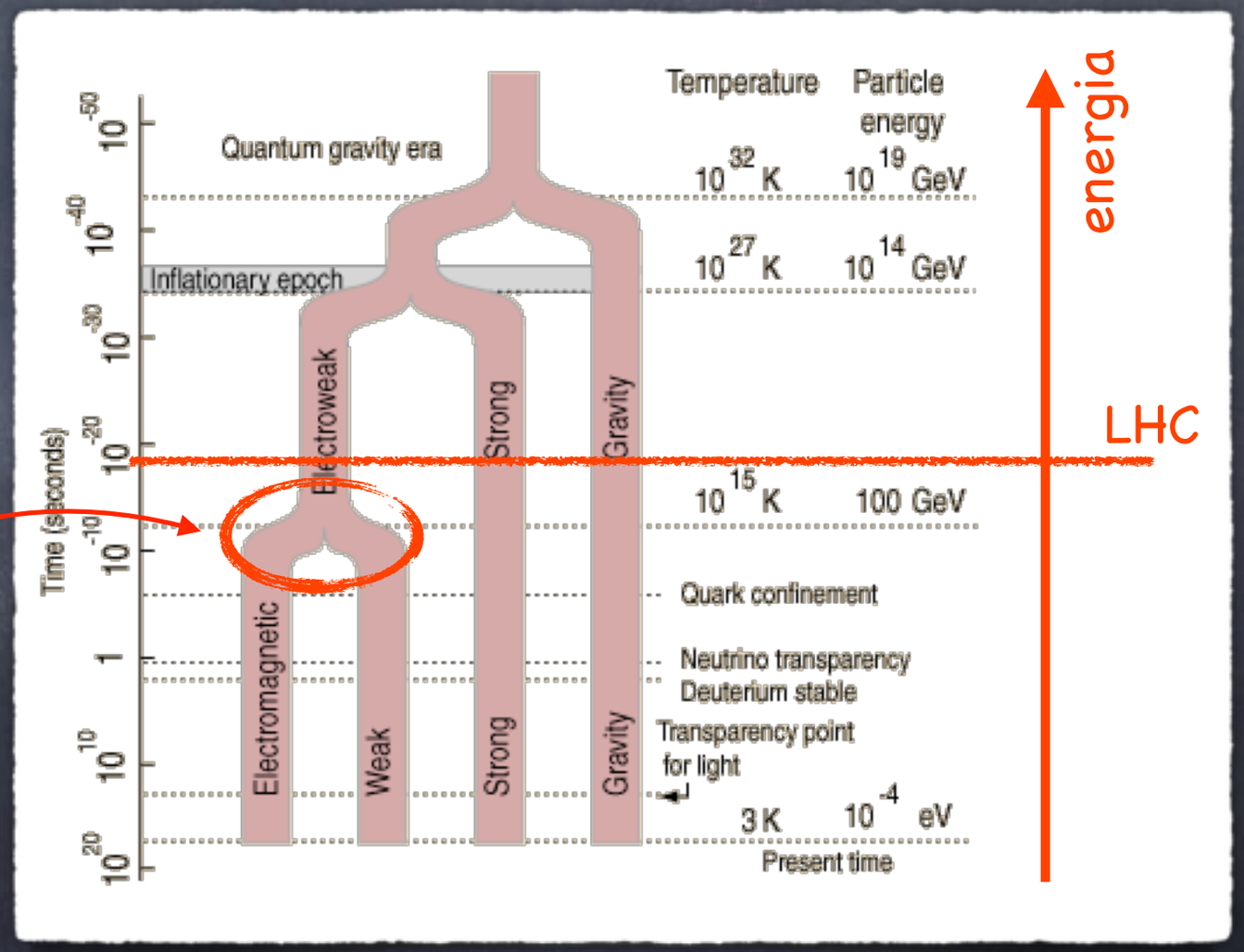
… ad esempio la Supersimmetria associa ad ogni particella del Modello Standard un partner di massa più elevata



Una o più forze?

Gli esperimenti hanno dimostrato che la forza elettromegnetica e la forza debole si "unificano" ad alta energia:

sono entrambe parte di un'unica forza, la forza "elettrodebole"



unificazione nella forza elettrodebole

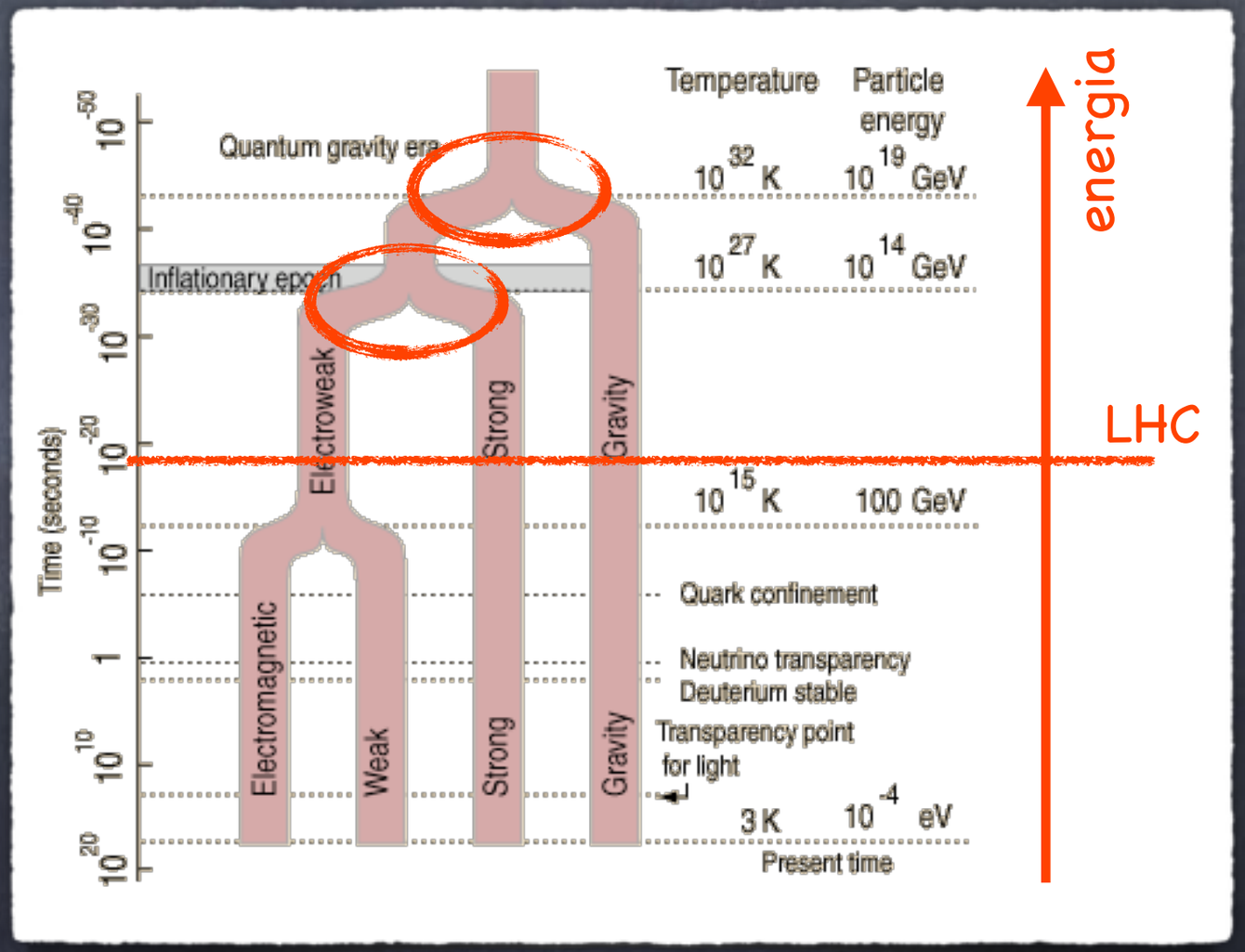
Una o più forze?

Gli esperimenti hanno dimostrato che la forza elettromegnetica e la forza debole si "unificano" ad alta energia:

sono entrambe parte di un'unica forza, la forza "elettrodebole"

Può accadere qualcosa di analogo per le altre forze?

Ad altissime energie tutte le forze potrebbero essere descritte da un'unica interazione!



Come trovare le risposte: Fisica Teorica e Collider

Alla ricerca di nuova fisica

Cercare nuova fisica non è facile!

600 milioni di collisioni (in 1s a LHC) ----→ 1 bosone di Higgs

- Non conosciamo in dettaglio le proprietà che ha la nuova fisica
- I processi con nuova fisica vanno distinti tra tantissimi altri processi già noti con caratteristiche spesso simili

Alla ricerca di nuova fisica

Cercare nuova fisica non è facile!

600 milioni di collisioni (in 1s a LHC) ----→ 1 bosone di Higgs

- Non conosciamo in dettaglio le proprietà che ha la nuova fisica
- I processi con nuova fisica vanno distinti tra tantissimi altri processi già noti con caratteristiche spesso simili

E' come cercare un ago in un pagliaio!

Alla ricerca di nuova fisica

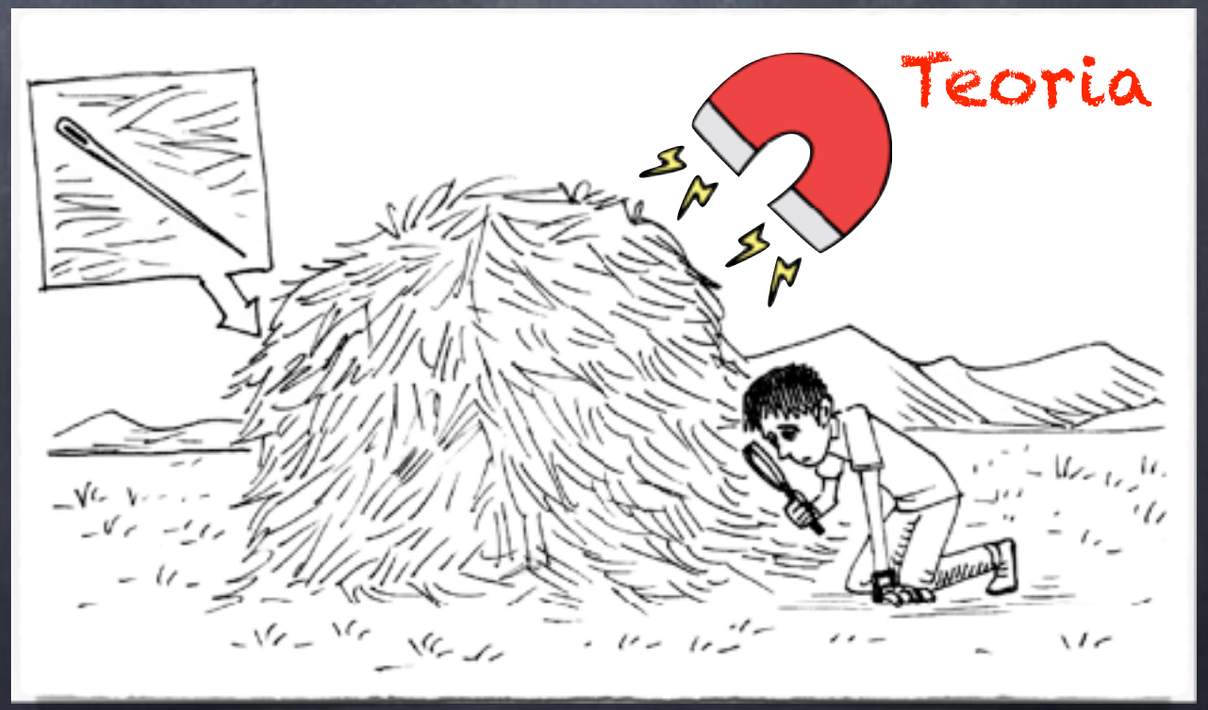
Cercare nuova fisica non è facile!

600 milioni di collisioni (in 1s a LHC) ----→ 1 bosone di Higgs

- Non conosciamo in dettaglio le proprietà che ha la nuova fisica
- I processi con nuova fisica vanno distinti tra tantissimi altri processi già noti con caratteristiche spesso simili

E' come cercare un ago in un pagliaio!

Ma la teoria può dare un grosso aiuto!



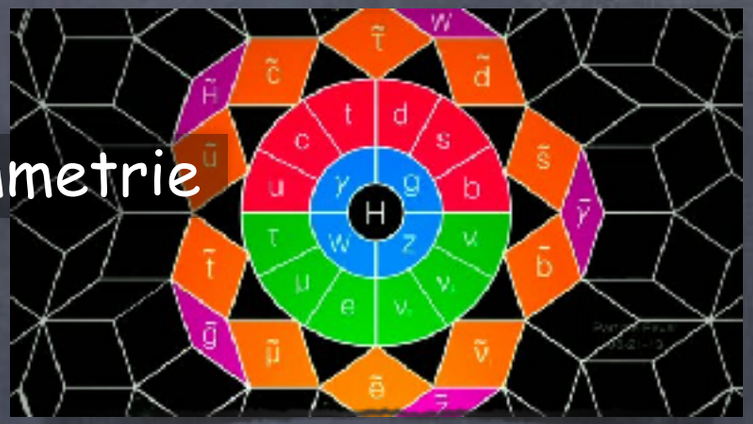
Uno sguardo oltre il Modello Standard

Esplorare la nuova fisica richiede formulare teorie che estendono il Modello Standard

$$[M^{\mu\nu}, Q_\alpha] = \frac{1}{2}(\sigma^{\mu\nu})_\alpha{}^\beta Q_\beta$$
$$[Q_\alpha, P^\mu] = 0$$
$$\{Q_\alpha, \bar{Q}_{\dot\beta}\} = 2(\sigma^\mu)_{\alpha\dot\beta} P_\mu$$

nuovi principi

nuove simmetrie



nuove particelle

Uno sguardo oltre il Modello Standard

Il linguaggio matematico ci permette di studiare le nuove teorie

Modello Standard

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i \bar{\psi} \not{D} \psi + \bar{\psi}_i y_{ij} \psi_j \phi + h.c. + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

Nuova Fisica

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i \bar{\psi} \not{D} \psi + \bar{\psi}_i y_{ij} \psi_j \phi + h.c. + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi) + \frac{1}{2} \partial_\mu a \partial^\mu a + \frac{g^2}{32\pi^2} \left(\bar{\theta} + \frac{a}{f} \right) G^a_{\mu\nu} \tilde{G}^{a\,\mu\nu}$$

Uno sguardo oltre il Modello Standard

Il linguaggio matematico ci permette di studiare le nuove teorie

… e prevederne le conseguenze sperimentali

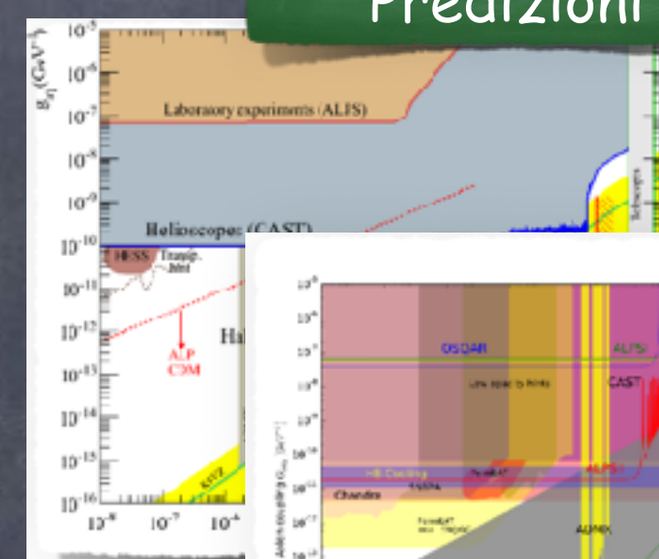
Modello Standard

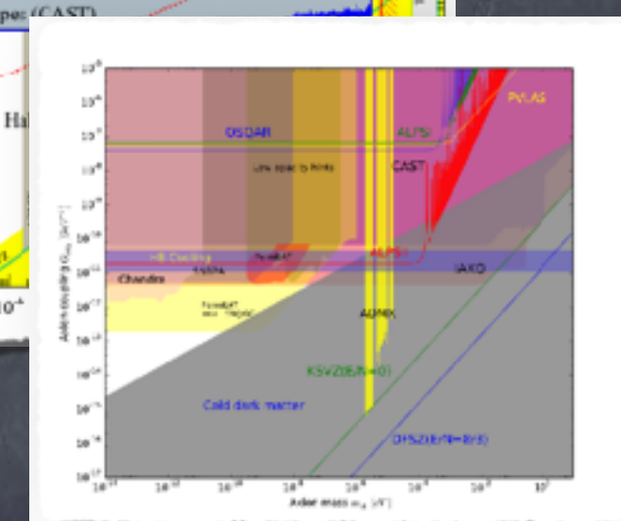
$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i \bar{\psi} \not{D} \psi + \bar{\psi}_i y_{ij} \psi_j \phi + h.c. + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

Nuova Fisica

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i \bar{\psi} \not{D} \psi + \bar{\psi}_i y_{ij} \psi_j \phi + h.c. + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi) + \frac{1}{2} \partial_\mu a \partial^\mu a + \frac{g^2}{32\pi^2} \left(\bar{\theta} + \frac{a}{f} \right) G^a_{\mu\nu} \tilde{G}^{a\,\mu\nu}$$

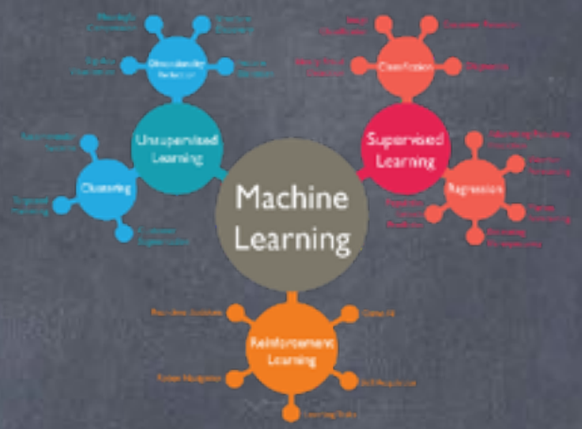
Predizioni





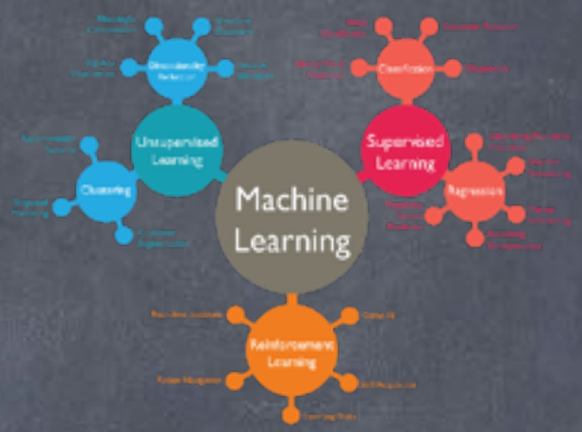
Come estrarre informazioni dai dati

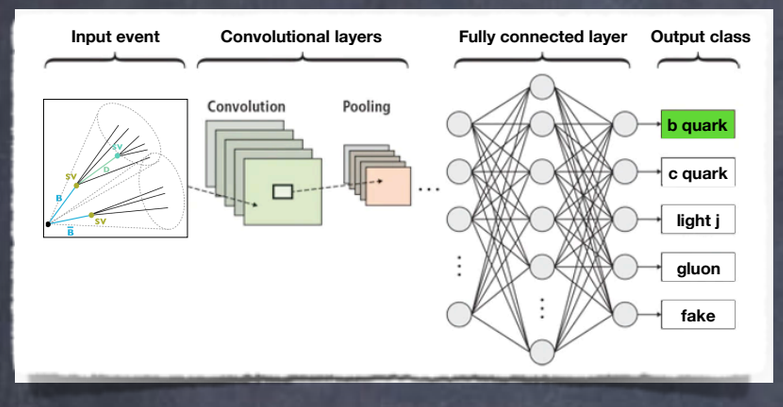
Nuovi approcci basati sull'intelligenza artificiale stanno rivoluzionando la ricerca di nuova fisica a collider



Come estrarre informazioni dai dati

Nuovi approcci basati sull'intelligenza artificiale stanno rivoluzionando la ricerca di nuova fisica a collider

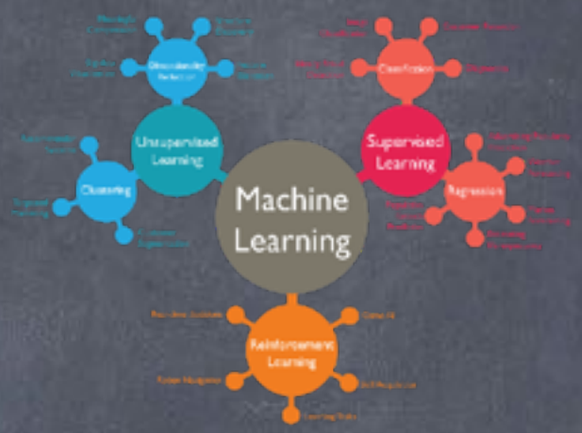


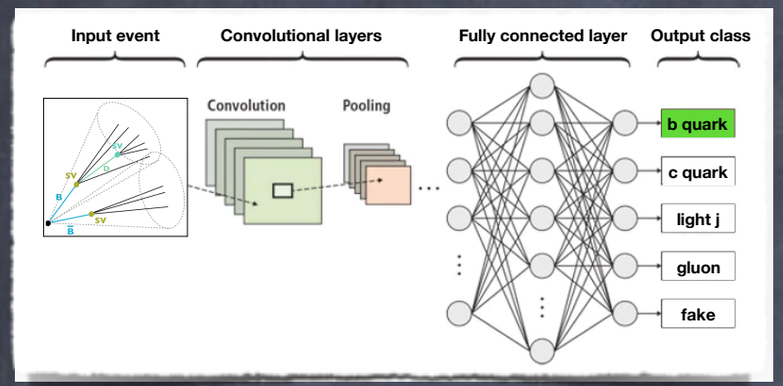


- Efficiente identificazione di particelle
  (evoluzione di algoritmi di riconoscimento immagini)

Come estrarre informazioni dai dati

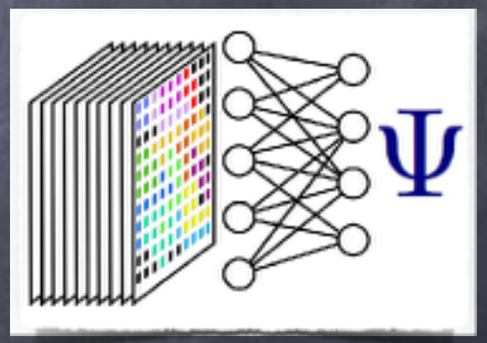
Nuovi approcci basati sull'intelligenza artificiale stanno rivoluzionando la ricerca di nuova fisica a collider





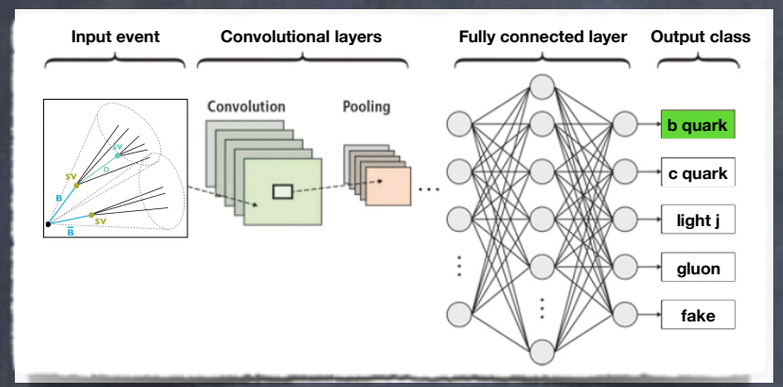
- Efficiente identificazione di particelle
  (evoluzione di algoritmi di riconoscimento immagini)

- Distinzione di segnali di nuova fisica dai processi del Modello Standard
  (boosted decision trees, anomaly detection)



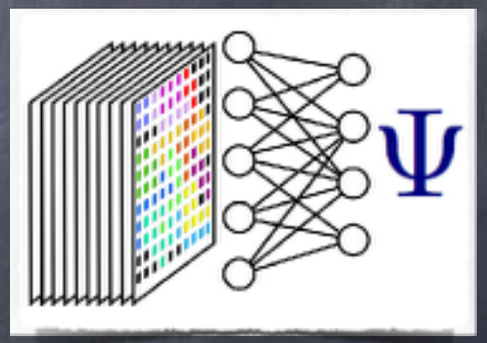
Come estrarre informazioni dai dati

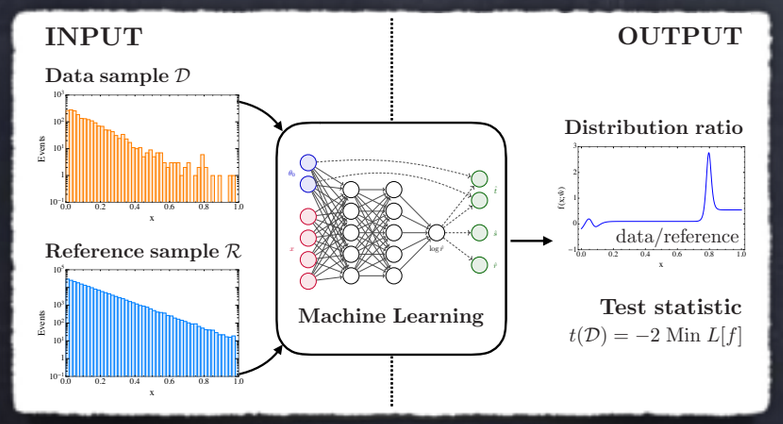
Nuovi approcci basati sull'intelligenza artificiale stanno rivoluzionando la ricerca di nuova fisica a collider



- Efficiente identificazione di particelle
  (evoluzione di algoritmi di riconoscimento immagini)

- Distinzione di segnali di nuova fisica dai processi del Modello Standard
  (boosted decision trees, anomaly detection)

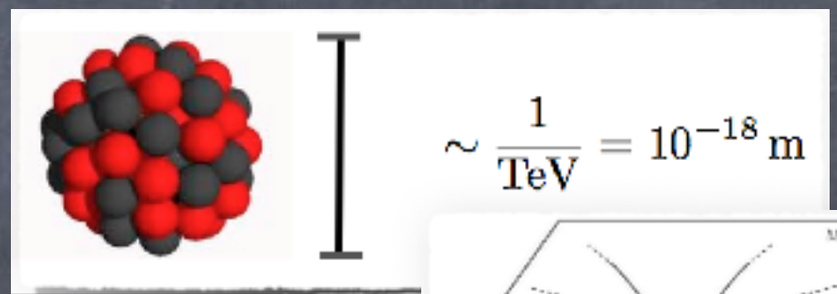


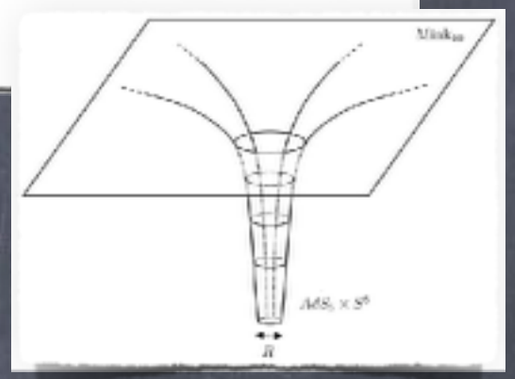


- Caratterizzazione analitica delle proprietà dei processi di nuova fisica
  (analytic representation of data)

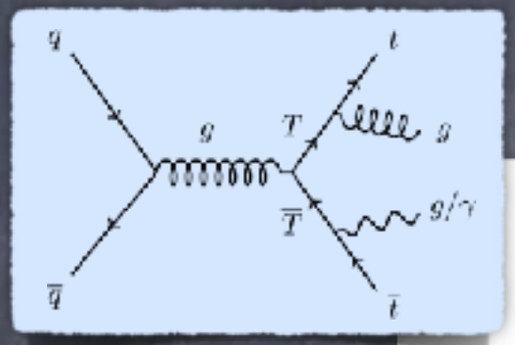
Attività del gruppo

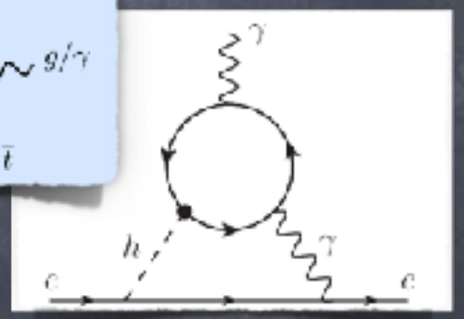
- Sviluppo di teorie oltre il Modello Standard (nuovi settori con dinamica fortemente accoppiata, Higgs composto, dimensioni extra)



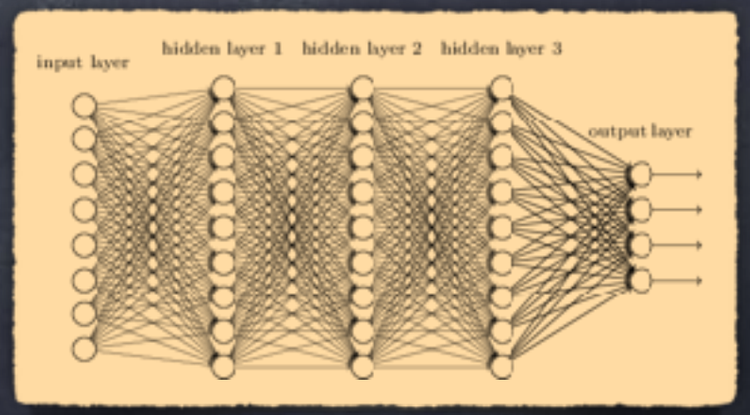


- Studio dei segnali di nuova fisica





- Sviluppo di tecniche di intelligenza artificiale per la scoperta di nuova fisica a collider



Grazie per l'attenzione!