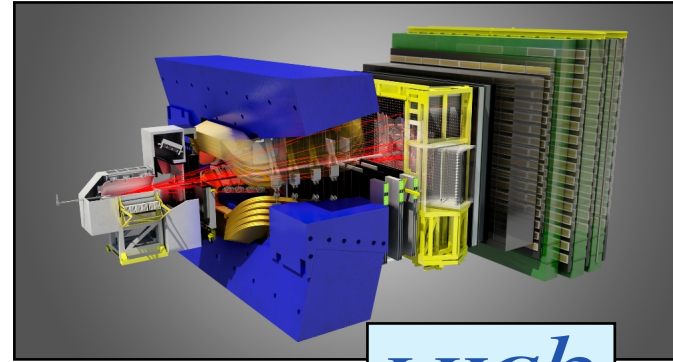
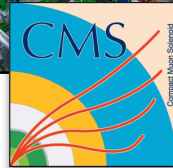
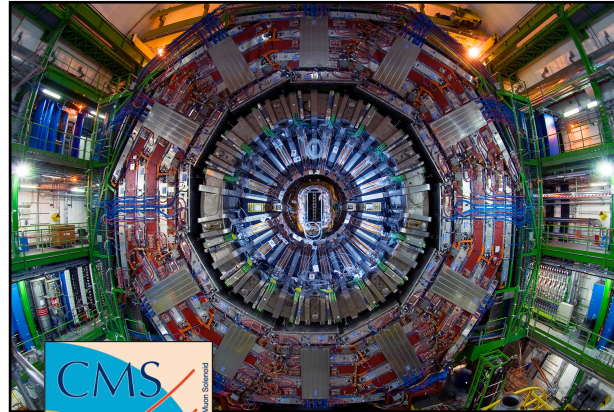
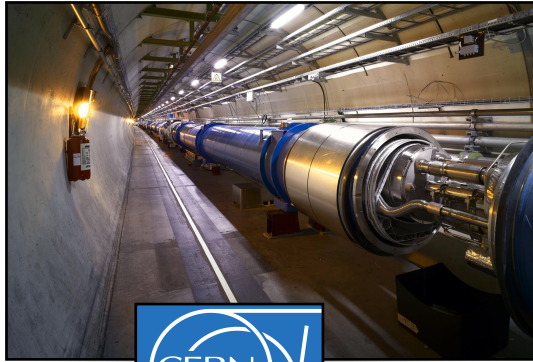


# Introduzione alla visita didattica al CERN



# Le interazioni fondamentali nel nostro universo

In modo descrittivo e non quantitativo ... per questo dovrete aspettare i  
prossimi corsi universitari 😊

# Come funziona l'Universo?

- Come è composto?
- Quali interazioni lo caratterizzano?
- Come si è formato e come evolverà?



# Un viaggio a ritroso nel tempo ....

- Dal Big Bang l'universo si espande quindi, in passato, era **più denso e più caldo**
- Studiare le interazioni elementari tra i componenti ultimi della materia ad energie sempre più alte è come compiere **un viaggio a ritroso nel tempo** verso l'origine dell'Universo
- **“High Energy Physics (HEP) as a time machine”**



# Un viaggio a ritroso nel tempo ....

- Dal Big Bang l'universo si espande quindi, in passato, era **più denso e più caldo**
- Studiare le interazioni elementari tra i componenti ultimi della materia ad energie sempre più alte è come compiere **un viaggio a ritroso nel tempo** verso l'origine dell'Universo
- **“High Energy Physics (HEP) as a time machine”**

Big Bang

Universe Age

**LHC**

$10^{-10}$  -  $10^{-5}$  s dopo il Big Bang  
temperatura di  $10^{15}$  -  $10^{12}$  K

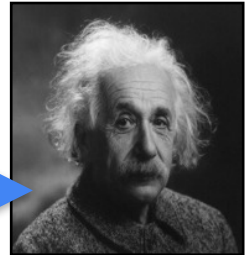
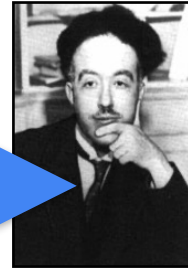
Reionization

reion disks

# Perché studiare interazioni ad alta energia?

Alta energia di interazione  $\Leftrightarrow$  Acceleratori di particelle

- Studiare la natura a “piccola distanza  $\rightarrow E \sim 1/d$ ”  
Acceleratori di particelle sono “**potenti microscopi**”
- Permettono di scoprire nuovi costituenti della materia con grossa massa  $\rightarrow E = mc^2 \rightarrow$  Acceleratori di particelle sono “**fabbriche di materia**”
- Permettono di studiare l’universo primordiale  $\rightarrow E \sim k_b T$   
Acceleratori di particelle sono “**macchine del tempo**”



# Perché studiare interazioni ad alta energia?

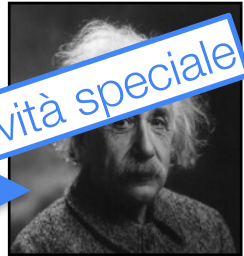
Alta energia di interazione  $\Leftrightarrow$  Acceleratori di particelle

- Studiare la natura a “piccola distanza  $\rightarrow E \sim 1/d$ ”  
Acceleratori di particelle sono “**potenti microscopi**”
- Permettono di scoprire nuovi costituenti della materia con grossa massa  $\rightarrow E = mc^2 \rightarrow$  Acceleratori di particelle sono “**fabbriche di materia**”
- Permettono di studiare l’universo primordiale  $\rightarrow E \sim k_b T$   
Acceleratori di particelle sono “**macchine del tempo**”

Dualismo onda-particella



Relatività speciale



Legge di Boltzmann



# Fisica delle Particelle

”La fisica delle particelle è un nome moderno che indica lo sforzo ed il tentativo, lungo diversi secoli, di capire le leggi fondamentali della natura” ... (Edward Witten)

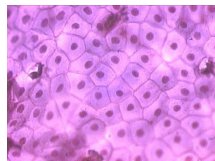


Nata per rispondere a due semplici domande:

- Quali sono i **costituenti ultimi** dell'universo ?
- Quali sono le **forze fondamentali** con cui si relazionano?



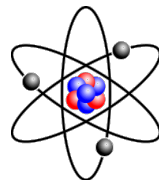
1 m



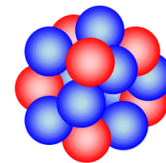
$10^{-4}$ - $10^{-5}$  m



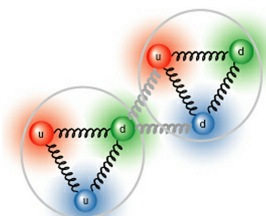
$10^{-9}$  m



$10^{-10}$  m



$10^{-15}$  m



$10^{-18}$  m





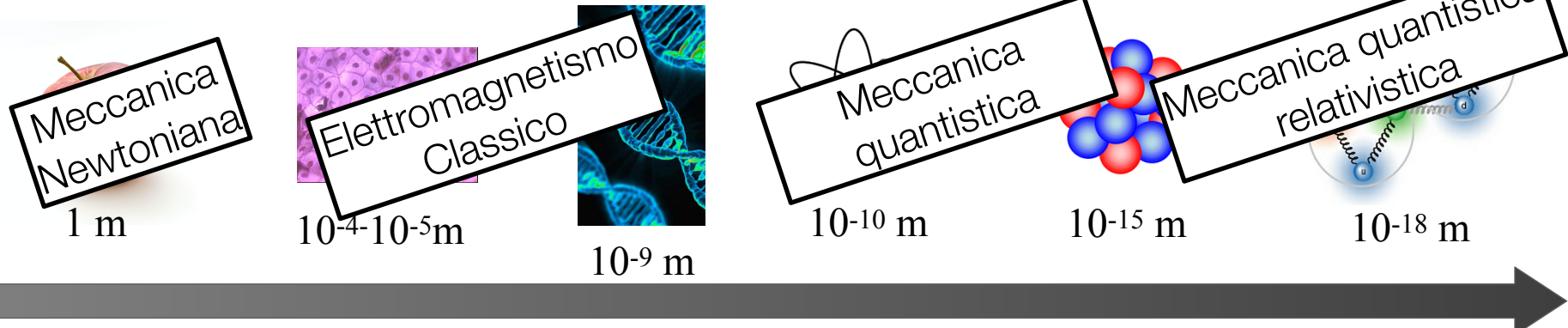
# Fisica delle Particelle

”La fisica delle particelle è un nome moderno che indica lo sforzo ed il tentativo, lungo diversi secoli, di capire le leggi fondamentali della natura” ... (Edward Witten)



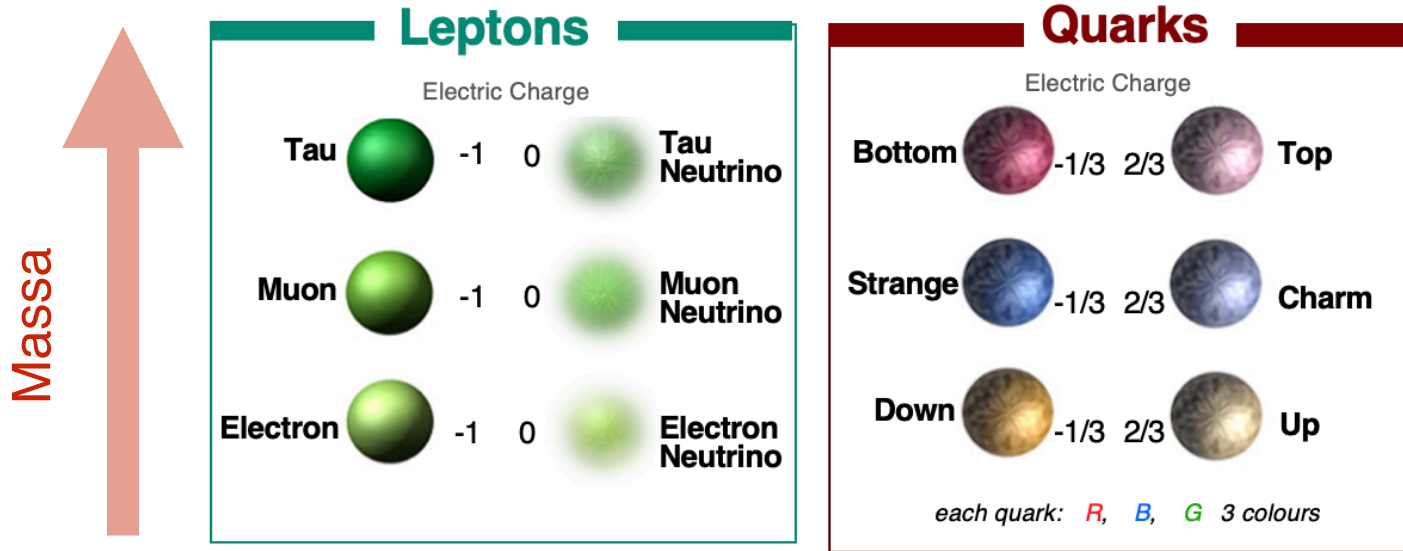
Nata per rispondere a due semplici domande:

- Quali sono i **costituenti ultimi** dell'universo ?
- Quali sono le **forze fondamentali** con cui si relazionano?



# Costituenti ultimi → particelle materiali

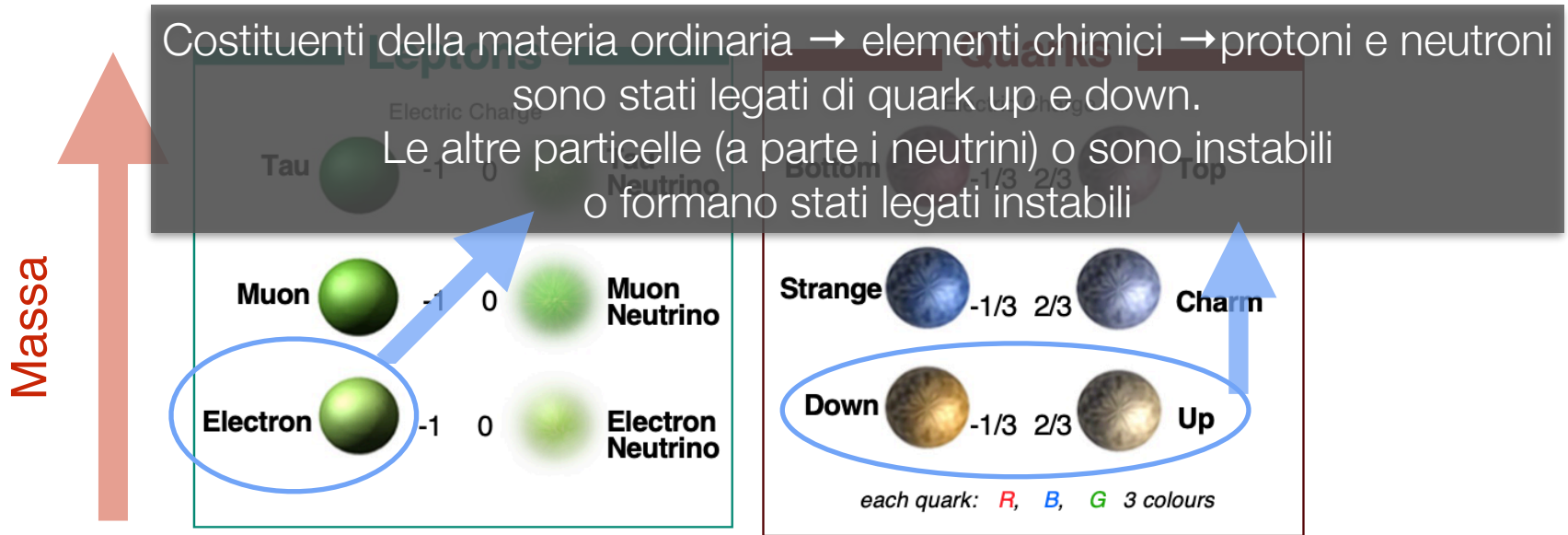
- 12 fermioni (spin= $\pm 1/2$ ) elementari che si differenziano per **massa** e **numeri quantici**



Tipo di interazione / forze a cui sono soggette

# Costituenti ultimi → particelle materiali

- 12 fermioni (spin= $\pm 1/2$ ) elementari che si differenziano per **massa** e **numeri quantici**



# Particelle materiali: leptoni carichi

- 12 particelle elementari che si differenziano per **massa** e **proprietà** (numeri quantici)



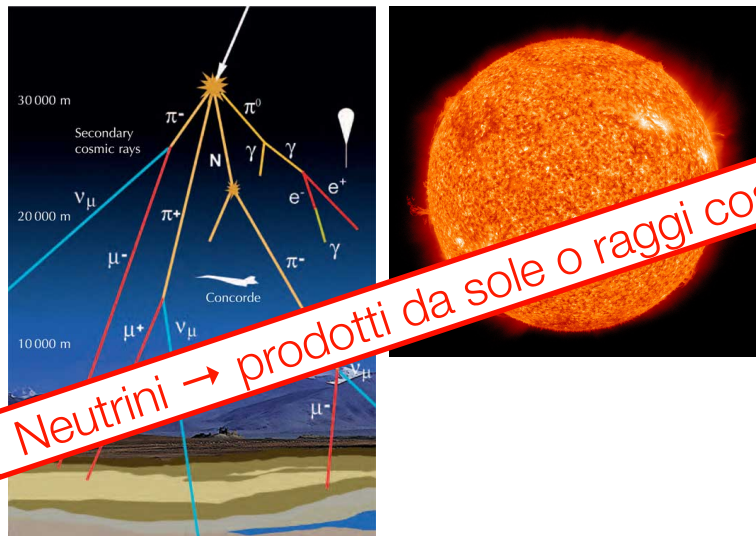
Elettrone → corrente elettrica

Leptons			
	Electric Charge		
Tau	-1	0	Tau Neutrino
Muon	-1	0	Muon Neutrino
Electron	-1	0	Electron Neutrino

- Elettroni, muoni, e tau hanno **carica elettrica**, interagiscono **elettromagneticamente**
- Muoni e tau sono **instabili** e **decadono** in particelle più leggere

# Particelle materiali: neutrini

- 12 fermioni (spin= $\pm 1/2$ ) elementari che si differenziano per **massa** e **numeri quantici**



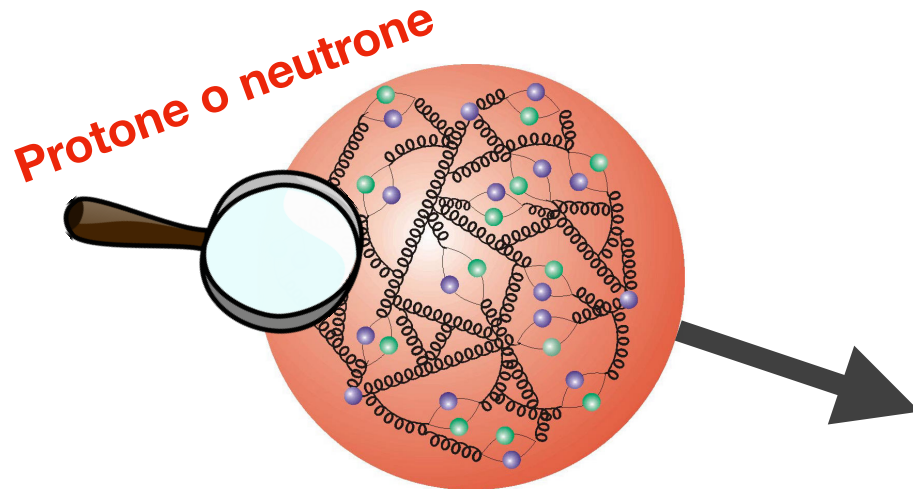
Neutrini → prodotti da sole o raggi cosmici

Leptons		Electric Charge		
Tau		-1	0	Tau Neutrino
Muon		-1	0	Muon Neutrino
Electron		-1	0	Electron Neutrino

- Neutrini sono particelle **leggere**, **stabili**, che interagiscono solo **debolmente**
- Sulla superficie terrestre si ha un flusso di neutrini  $\sim 100$  miliardi /  $\text{cm}^2 \text{ s}$

# Particelle materiali: quarks

- 12 fermioni (spin= $\pm 1/2$ ) elementari che si differenziano per **massa** e **numeri quantici**



Quarks	
Electric Charge	
Bottom	$-1/3$ $2/3$ Top
Strange	$-1/3$ $2/3$ Charm
Down	$-1/3$ $2/3$ Up

each quark: *R*, *B*, *G* 3 colours

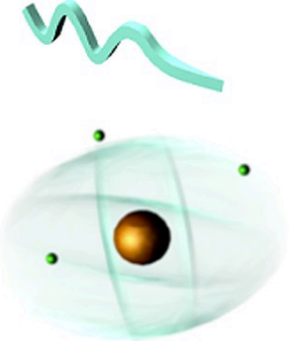
- Sono particelle di carica **elettrica frazionaria**
- Non esistono liberi** in natura ma sono **confinati** in stati legati
- Sensibili ad interazioni **elettromagnetiche**, **nucleari forti**, e **deboli**
- Protoni e neutroni possono essere disintegrati solo ad alta energia → collider di particelle

# Interazioni fondamentali

- Le **forze fondamentali** sono 4 e, a ciascuna, è associata un **campo bosonico**
- **Interazione** è descritta attraverso lo **scambio** di un **quanto (bosone)**

## Electromagnetic

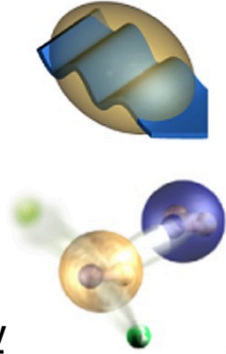
**Photon**



**Atoms**  
**Light**  
**Chemistry**  
**Electronics**

## Weak

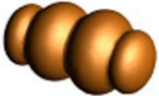
**Bosons (W,Z)**




**Neutron decay**  
**Beta radioactivity**  
**Neutrino interactions**  
**Burning of the sun**

## Strong


**Gluons (8)**



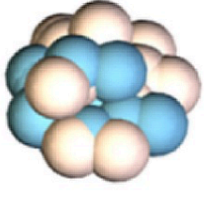
**Quarks**



**Mesons**  
**Baryons**

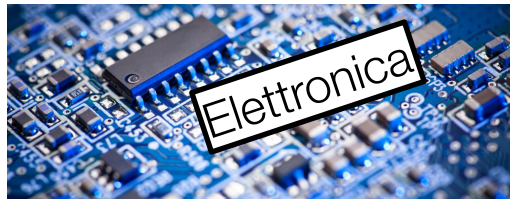
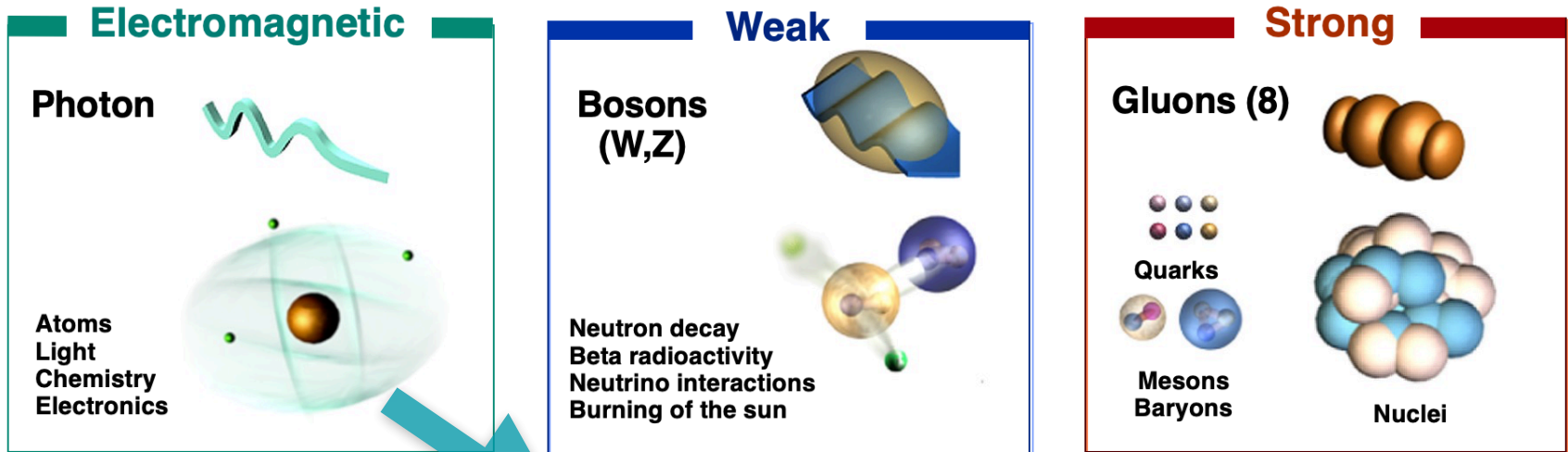


**Nuclei**



# Interazioni fondamentali

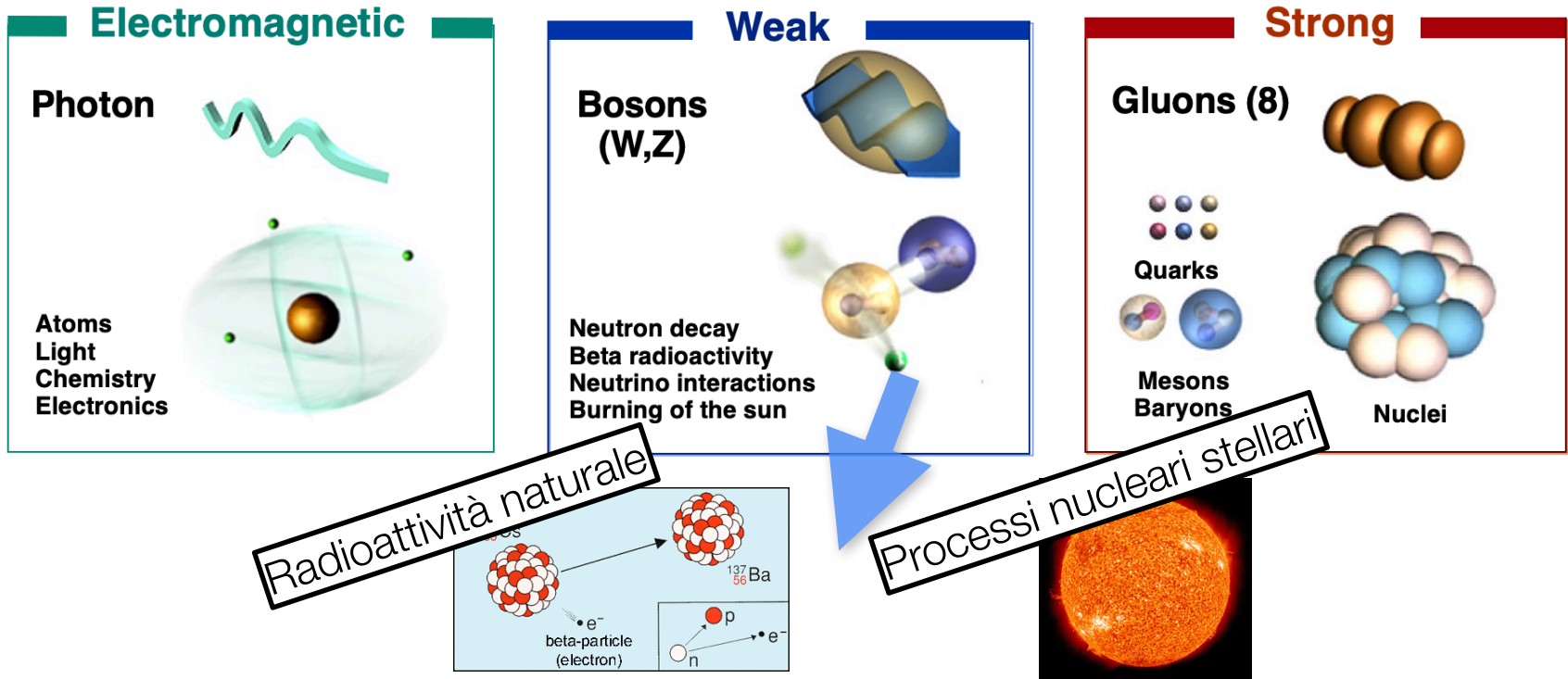
- Le **forze fondamentali** sono 4 e, a ciascuna, è associata un **campo bosonico**
- **Interazione** è descritta attraverso lo **scambio** di un **quanto (bosone)**





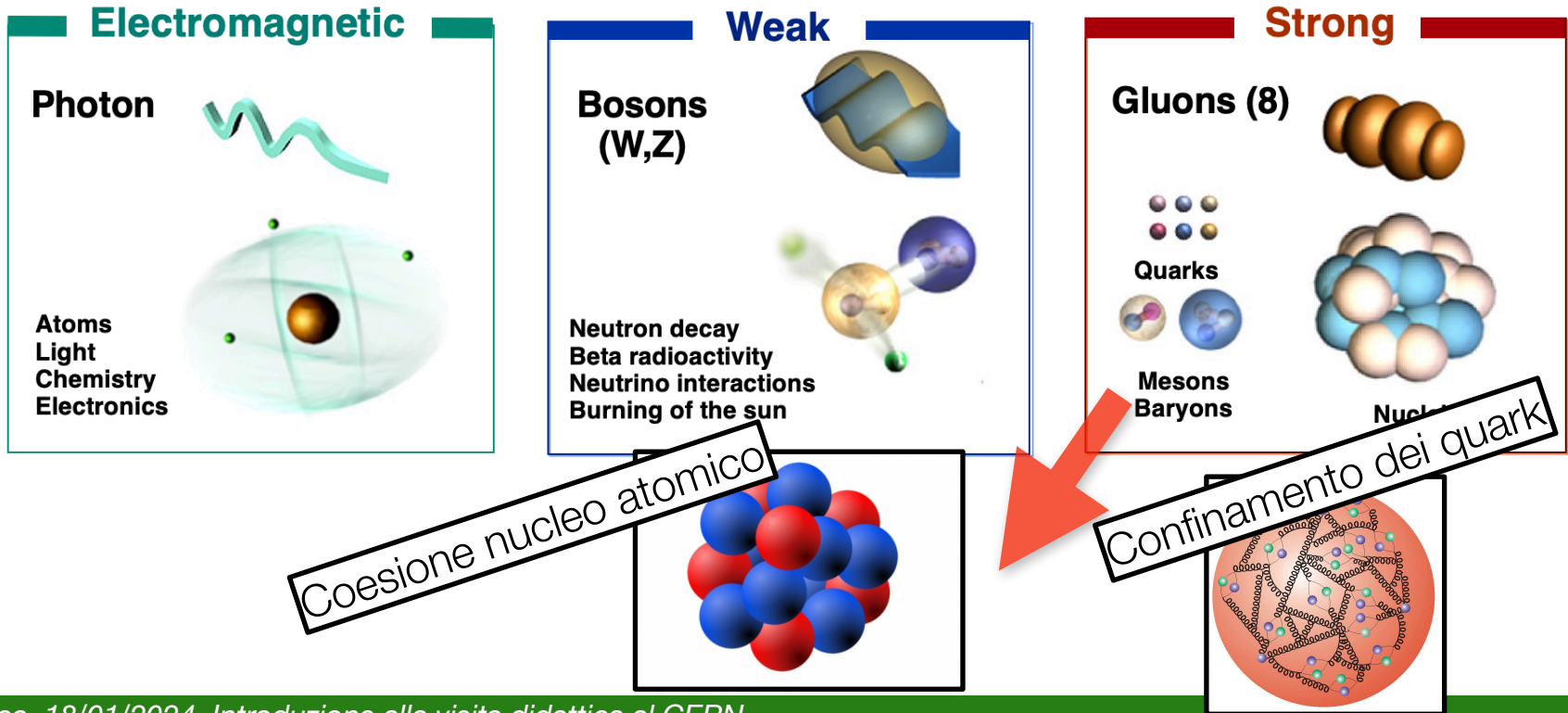
# Interazioni fondamentali

- Le **forze fondamentali** sono 4 e, a ciascuna, è associata un **campo bosonico**
- Interazione** è descritta attraverso lo **scambio** di un **quanto (bosone)**



# Interazioni fondamentali

- Le **forze fondamentali** sono 4 e, a ciascuna, è associata un **campo bosonico**
- **Interazione** è descritta attraverso lo **scambio** di un **quanto (bosone)**



# Pezzo mancante: la gravità

- La gravità é trascurabile in fisica delle particelle essendo le masse in gioco piccole
- In piú non esiste una teoria di **quantizzazione** delle **gravità** che sia **coerente** con le **osservazioni sperimentali**
- La teoria delle relatività generale é ciò che si utilizza per spiegare meccanismi di dinamica cosmologica dell'universo attuale

Interazione	Mediatore e carica	Distanza di interazione	Intensità relativa	Esempio in natura
Nucleare forte	Gluone Colore	$10^{-15}$ m	1	Nucleo atomico
Elettromagnetica	Fotone Carica elettrica	-	$< 0.01$	Legami atomici
Debole	W/Z Ipercarica	$< 10^{-17}$ m	$10^{-5}$	Radioattività
Gravitazionale	Gravitone?? Massa	-	$10^{-38}$	Dinamica galassie

# Interazioni fondamentali: bosone di Higgs

- Le **forze fondamentali** sono 4 e, a ciascuna, è associata un **campo bosonico**
- **Interazione** è descritta attraverso lo **scambio** di un **quanto (bosone)**

**Bosone di Higgs**



- Le **particelle elementari** hanno **masse molto diverse** tra loro → **misura sperimentale**
- **Alcune** di esse sono **senza massa** ( $\gamma, g$ )
- **Ruolo “speciale” del bosone di Higgs:**
  - Interagisce con tutte le particelle con massa a riposo  $m \neq 0$  e proporzionalmente alla loro massa
  - Pervade lo spazio in ogni punto poiché il suo valore di aspettazione nel vuoto è  $\neq 0$

# Interazioni fondamentali: bosone di Higgs

- Le **forze fondamentali** sono 4 e, a ciascuna, è associata un **campo bosonico**
- **Interazione** è descritta attraverso lo **scambio** di un **quanto (bosone)**

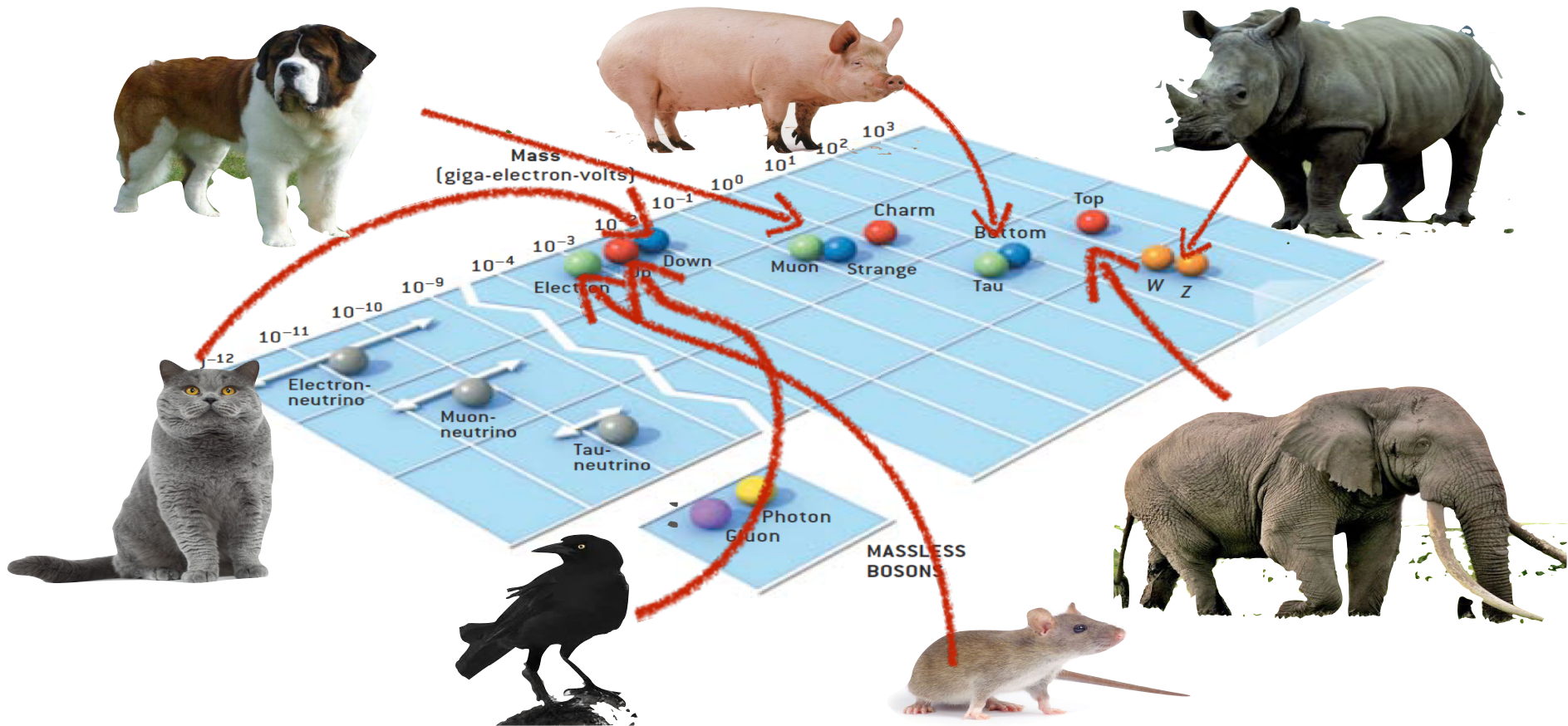
**Bosone di Higgs**



**Attrito volvente gomma-neve frena le macchine più pesanti → così il campo di Higgs interagisce proporzionalmente alla massa**



# A proposito delle massa delle particelle

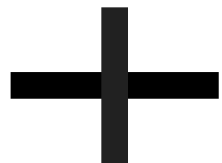


# Risultato finale: il Modello Standard

- Tutto quanto descritto sino ad ora sono i mattoni essenziali dal **Modello Standard (MS)**
- Il **Modello Standard** é una **teoria quantistica relativistica** invariante per il gruppo di Gauge  **$U(1)_Y \times SU(2)_L \times SU(3)$**
- Sviluppata e verificata sperimentalmente grazie alle misure condotte agli acceleratori di particelle

Tre generazioni della materia (fermioni)

	I	II	III		
massa→	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV	0	125 GeV
carica→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
nome→	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b><math>\gamma</math></b> fotone	<b>h</b> higgs
	<b>Quark</b>				
	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluone	
	<15,5 MeV	<15,5 MeV	<15,5 MeV	91,2 GeV	
	0	0	0	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b><math>\nu_e</math></b> neutrino elettronico	<b><math>\nu_\mu</math></b> neutrino muonico	<b><math>\nu_\tau</math></b> neutrino tauonico	<b>Z<sup>0</sup></b> forza debole	
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV	
	-1	-1	-1	$\pm 1$	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b>e</b> elettrone	<b><math>\mu</math></b> muone	<b><math>\tau</math></b> tauone	<b>W<sup>±</sup></b> forza debole	
	<b>Leptoni</b>			<b>Bosoni di gauge</b>	



	I	II	III
massa→	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV
carica→	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
nome→	<b><math>\bar{u}</math></b> up	<b><math>\bar{c}</math></b> charm	<b><math>\bar{t}</math></b> top
	<b>an Quark</b>		
	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV
	$+\frac{1}{3}$	$+\frac{1}{3}$	$+\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	<b><math>\bar{d}</math></b> down	<b><math>\bar{s}</math></b> strange	<b><math>\bar{b}</math></b> bottom
	<15,5 MeV	<15,5 MeV	<15,5 MeV
	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	<b><math>\bar{\nu}_e</math></b> neutrino elettronico	<b><math>\bar{\nu}_\mu</math></b> neutrino muonico	<b><math>\bar{\nu}_\tau</math></b> neutrino tauonico
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV
	+1	+1	+1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	<b><math>e^+</math></b> elettrone	<b><math>\mu^+</math></b> muone	<b><math>\tau^+</math></b> tauone
	<b>an Leptoni</b>		

**Particelle di Materia**

**Particelle di anti-materia**

# Excursus: simmetrie in fisica

- Alla base delle più importanti equazioni in fisica ci sono spesso **considerazioni di simmetria**
- La **simmetria** di un sistema è una trasformazione che **lascia invariate** le sue proprietà

Riflessione



Traslazione  
spaziale o temporale



Rotazione





# Simmetrie in fisica classica

---

- **Teorema di Noether:** la presenza di un'invariata per simmetria nasconde sempre una grandezza fisica che si conserva nell'evoluzione del sistema

Invarianza per traslazioni temporali	Conservazione dell'energia
Invarianza per traslazioni spaziali	Conservazione della quantità di moto
Invarianza per rotazioni rispetto ad un asse	Conservazione del momento angolare

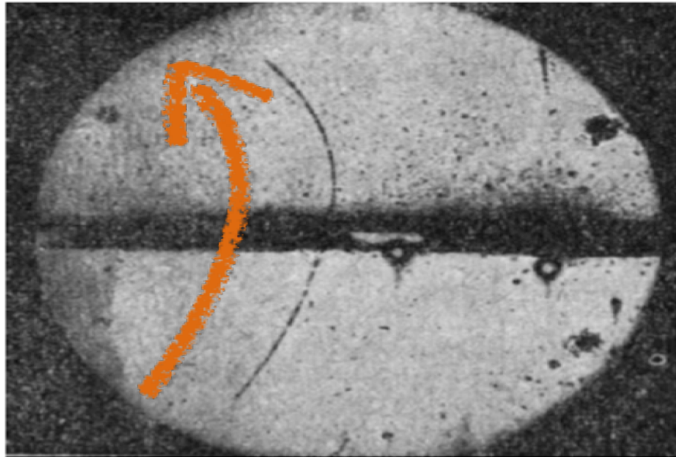
- Il Modello Standard ha delle simmetrie (quantità conservate) in assenza della massa delle particelle
- Si può dare massa alle particelle, mantenendo le simmetria, con il meccanismo di Higgs
- Il **bosone di Higgs** è l'effetto della cosiddetta **rottura spontanea** della **simmetria elettrodebole**

# Breve storia\*\* delle verifiche sperimentali del Modello Standard

\*\* Sommaria e per nulla completa 😊 .. per la vera storia della fisica nucleare e subnucleare dovrete aspettare la Laurea Magistrale per chi lo vorrà

# La scoperta dell'antimateria

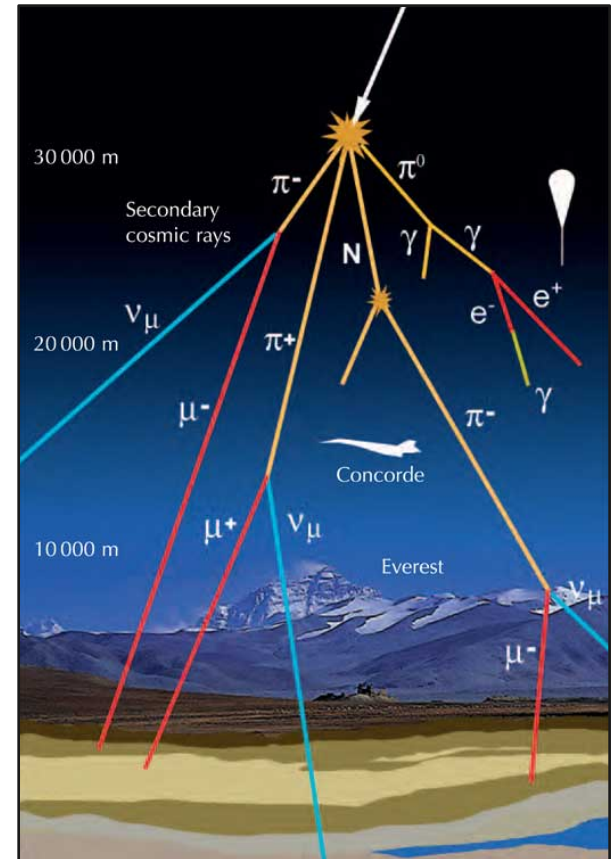
- **Prevista** dalle equazioni scritte da P.M. Dirac nel 1928 per rendere compatibili la meccanica quantistica con la teoria della relatività ristretta
- **Compresa** da E. Majorana che fu il primo a vedere nelle equazioni di Dirac un nuovo insieme di particelle rispetto a quelle esistenti
- **Per ogni particella esiste un gemello perfettamente identico, di carica opposta.** I due gemelli, se interagiscono, producono energia per annichilazione



Una delle prime immagini (1932) di un **positrone**, che viaggia dal basso verso l'alto in una camera a nebbia

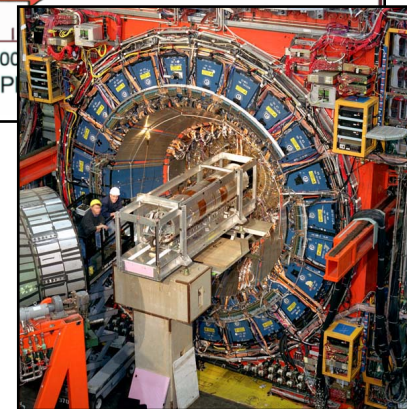
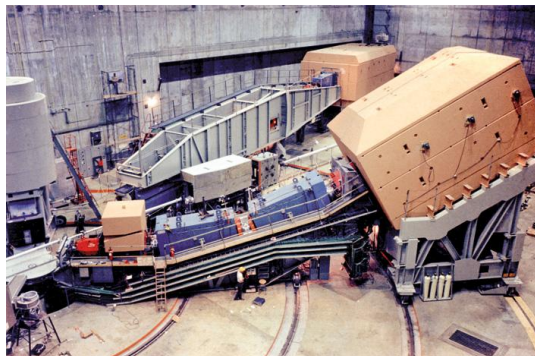
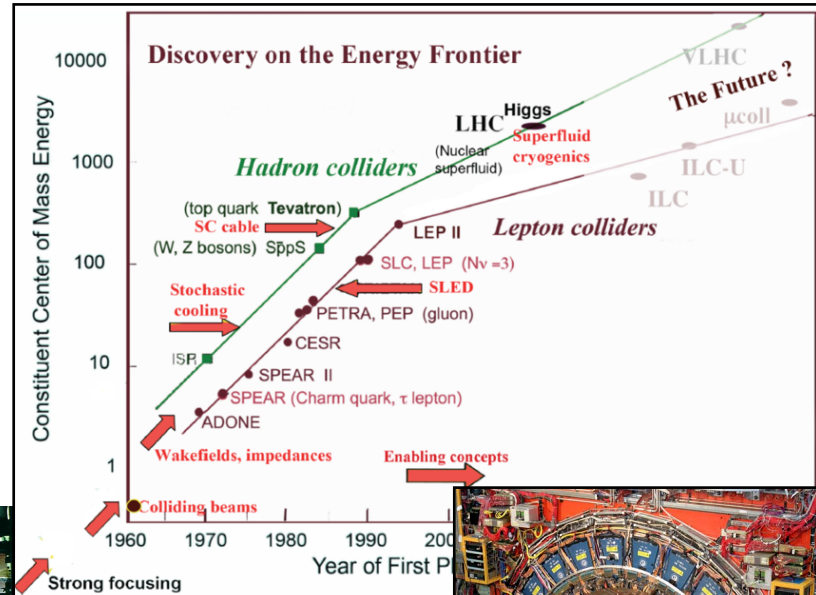
# Lo studio dei raggi cosmici

- 1937: scoperta una **nuova particella elementare** che piove dal cielo (prodotta dai raggi cosmici)
- 1947: B. Pontecorvo mostra che è una **copia pesante dell'elettrone** chiamato **muone**
- 1940-50 uno **zoo di nuove particelle** emerge dallo studio dei raggi cosmici
- Non si trovano nella materia ordinaria in quanto **instabili**, ma si possono **studiare in laboratorio**



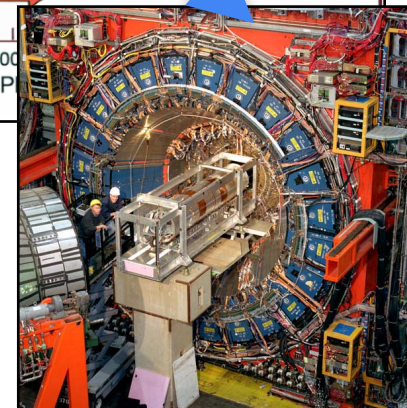
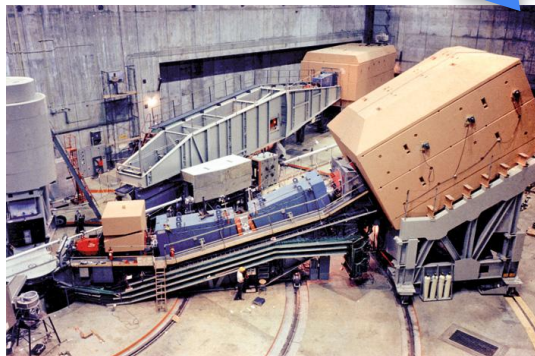
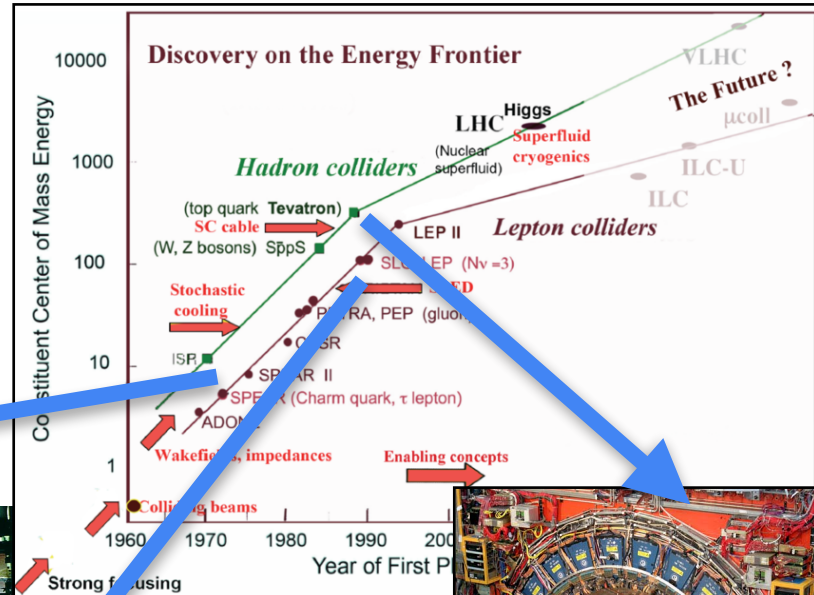
# Breve storia sugli acceleratori di particelle

- **1950-60**: costruzione dei primi sincrotroni
- **1960-80**: scoperta del leptone  $\tau$  e dei quark (s,c,b) dalla produzione mesoni ed adroni
- **1980-90**: scoperta dei bosoni vettori W,Z
- **1990-2000**: misure di precisione dello Standard Model a LEP e scoperta del quark top



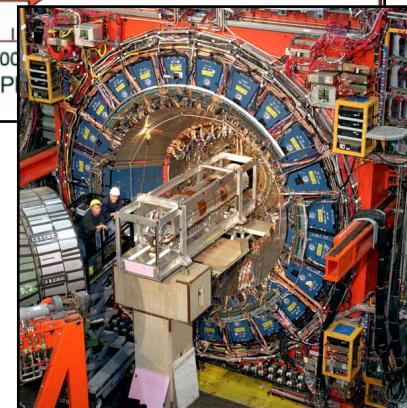
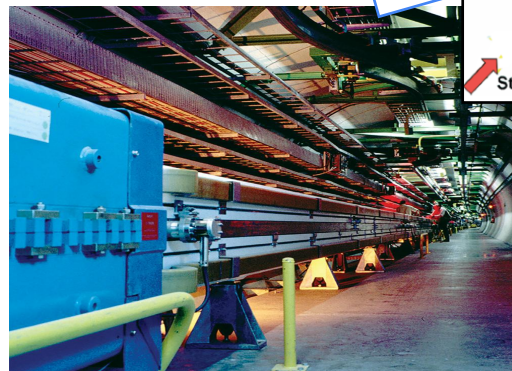
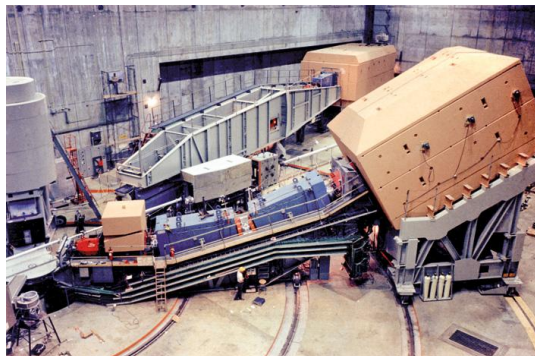
# Breve storia sugli acceleratori di particelle

- **1950-60:** costruzione dei primi sincrotroni
- **1960-80:** scoperta del leptone  $\tau$  e dei quark (s,c,b) dalla produzione mesoni ed adroni
- **1980-90:** scoperta dei bosoni vettori W,Z
- **1990-2000:** misure di precisione dello Standard Model a LEP e scoperta del quark top



# Breve storia sugli acceleratori di particelle

- **1950-60**: costruzione dei primi sincrotroni
- **1960-80**: scoperta del leptone  $\tau$  e dei quark (s,c,b) dalla produzione mesoni ed adroni
- **1980-90**: scoperta dei bosoni vettori W,Z
- **1990-2000**: misure di precisione dello Standard Model a LEP e scoperta del quark top



# Il Large Hadron Collider (LHC)



# Questioni aperte in fisica delle particelle

---

Perché non si può unificare  
la gravità alle al tre forze  
(quantizzare la gravità) ?



# Questioni aperte in fisica delle particelle

---

Perché non si può unificare la gravità alle altre tre forze (quantizzare la gravità) ?

Perché è l'universo fatto di Materia? Dove è finita l'antimateria?



# Questioni aperte in fisica delle particelle



Perché non si può unificare la gravità alle altre tre forze (quantizzare la gravità)?

C'è qualche motivo fondamentale per cui le particelle hanno masse così diverse?

Perché è l'universo fatto di Materia? Dove è finita l'antimateria?

# Questioni aperte in fisica delle particelle



Perché non si può unificare la gravità alle altre tre forze (quantizzare la gravità) ?

C'è qualche motivo fondamentale per cui le particelle hanno masse così diverse?

Perché è l'universo fatto di Materia? Dove è finita l'antimateria?

Qual è la massa del neutrino ?  
C'è violazione di simmetria CP nel settore leptonico ?

# Questioni aperte in fisica delle particelle



Perché non si può unificare la gravità alle altre tre forze (quantizzare la gravità)?

C'è qualche motivo fondamentale per cui le particelle hanno masse così diverse?

Il neutrino è uguale (Majorana) o diverso (Dirac) dalla sua anti-particella?

Perché è l'universo fatto di Materia? Dove è finita l'antimateria?

Qual è la massa del neutrino? C'è violazione di simmetria CP nel settore leptonic?

# Questioni aperte in fisica delle particelle



Perché non si può unificare la gravità alle altre tre forze (quantizzare la gravità)?

C'è qualche motivo fondamentale per cui le particelle hanno masse così diverse?

Il neutrino è uguale (Majorana) o diverso (Dirac) dalla sua anti-particella?

Perché è l'universo fatto di Materia? Dove è finita l'antimateria?

Qual è la massa del neutrino? C'è violazione di simmetria CP nel settore leptonic?

La materia oscura è solo una congettura o esiste realmente in natura partecipando al settore elettrodebole?

# Questioni aperte in fisica delle particelle

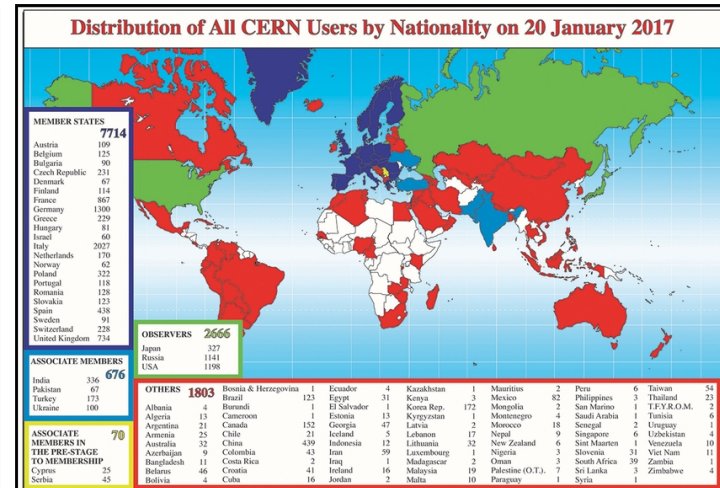
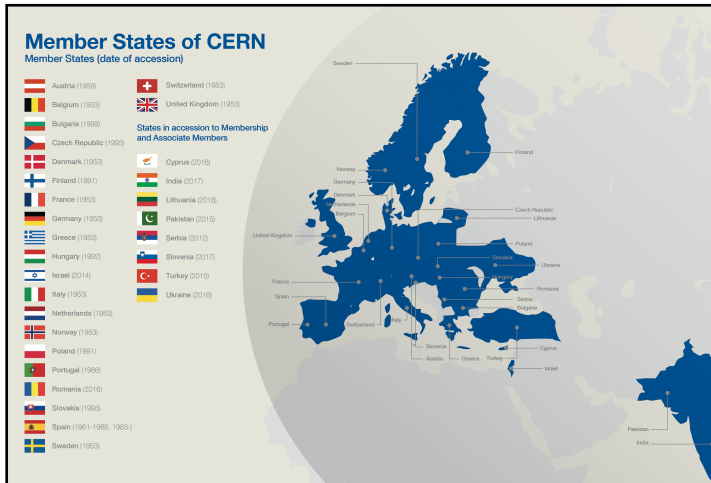
---



**Quanti nuove fenomeni esistono che non possono essere inglobati e spiegati dal Modello Standard?**

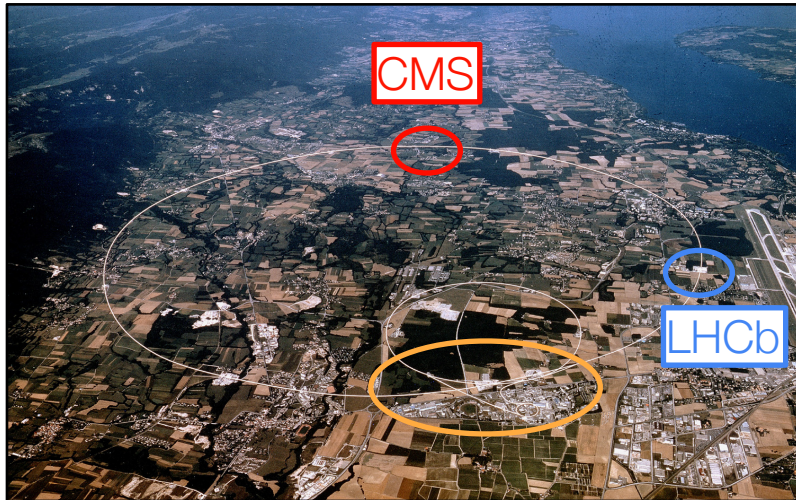
# Consiglio Europeo Ricerche Nucleari (CERN)

- **Obiettivo:** laboratorio di fisica fondamentale che cerca di costruire setup sperimentali per rispondere a **questi quesiti fondamentali**
- Ad oggi è il **più grande laboratorio di ricerca fondamentale** al mondo
  - **Budget laboratorio:** 1 miliardo di CHF anno
  - Contributo economico italiano ~ 10%
  - Collaboratori diretti e indiretti: 10k persone (fisici, ingegneri, IT, ..)

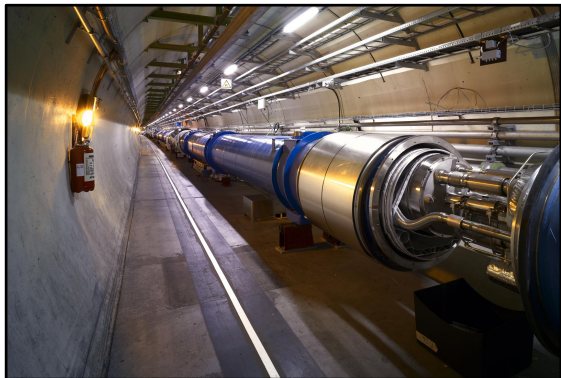




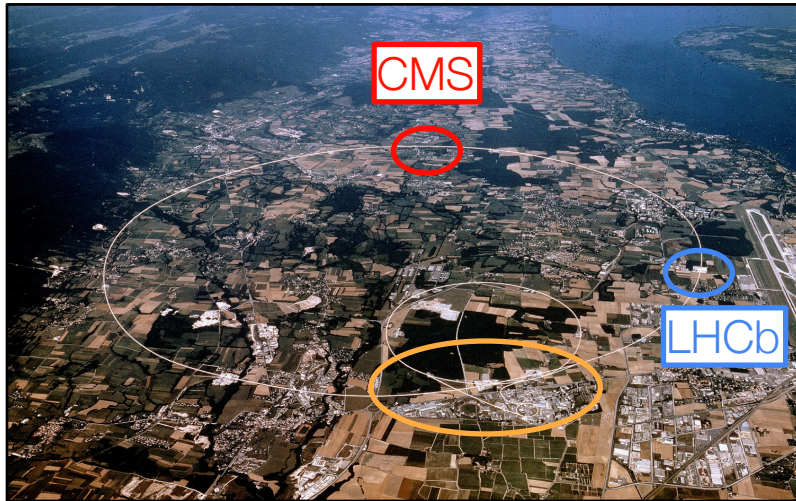
# Large Hadron Collider (LHC)



**Large** → acceleratore circolare 27 km circonferenza.  
**Hadron** → acceleratore di protoni cioè adroni  
**Collider** → protoni collidono in punti determinati lungo la loro orbita

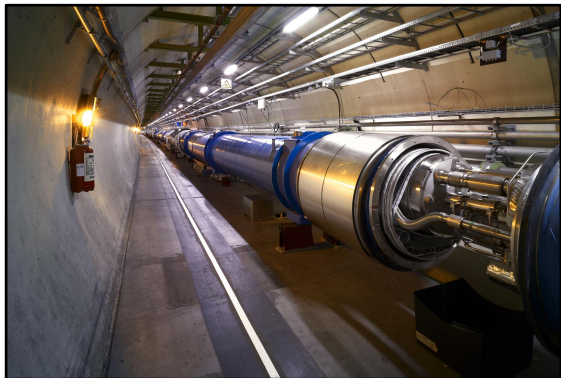


# Large Hadron Collider (LHC)

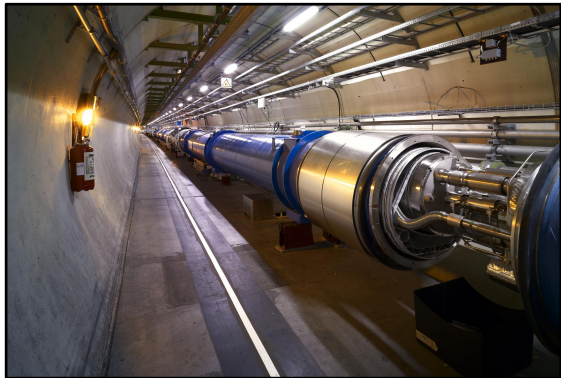
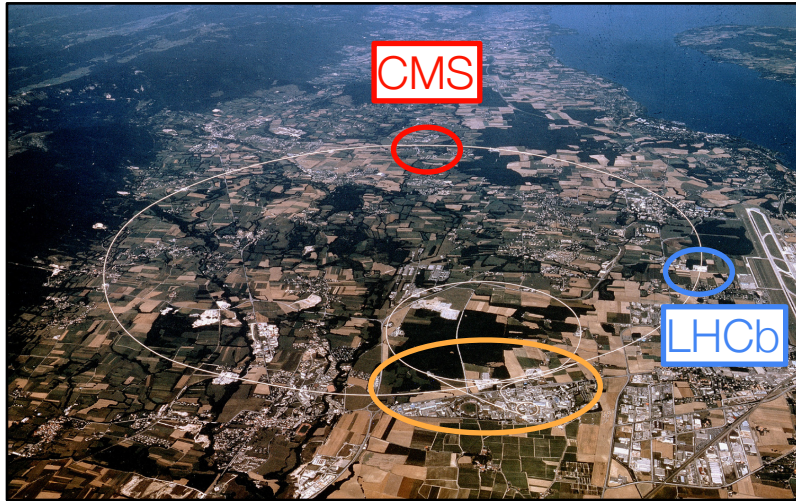


**Large** → acceleratore circolare 27 km circonferenza.  
**Hadron** → acceleratore di protoni cioè adroni  
**Collider** → protoni collidono in punti determinati lungo la loro orbita

Come funziona un acceleratore?



# Large Hadron Collider (LHC)



**Large** → acceleratore circolare 27 km circonferenza.  
**Hadron** → acceleratore di protoni cioè adroni  
**Collider** → protoni collidono in punti determinati lungo la loro orbita

## Come funziona un acceleratore?

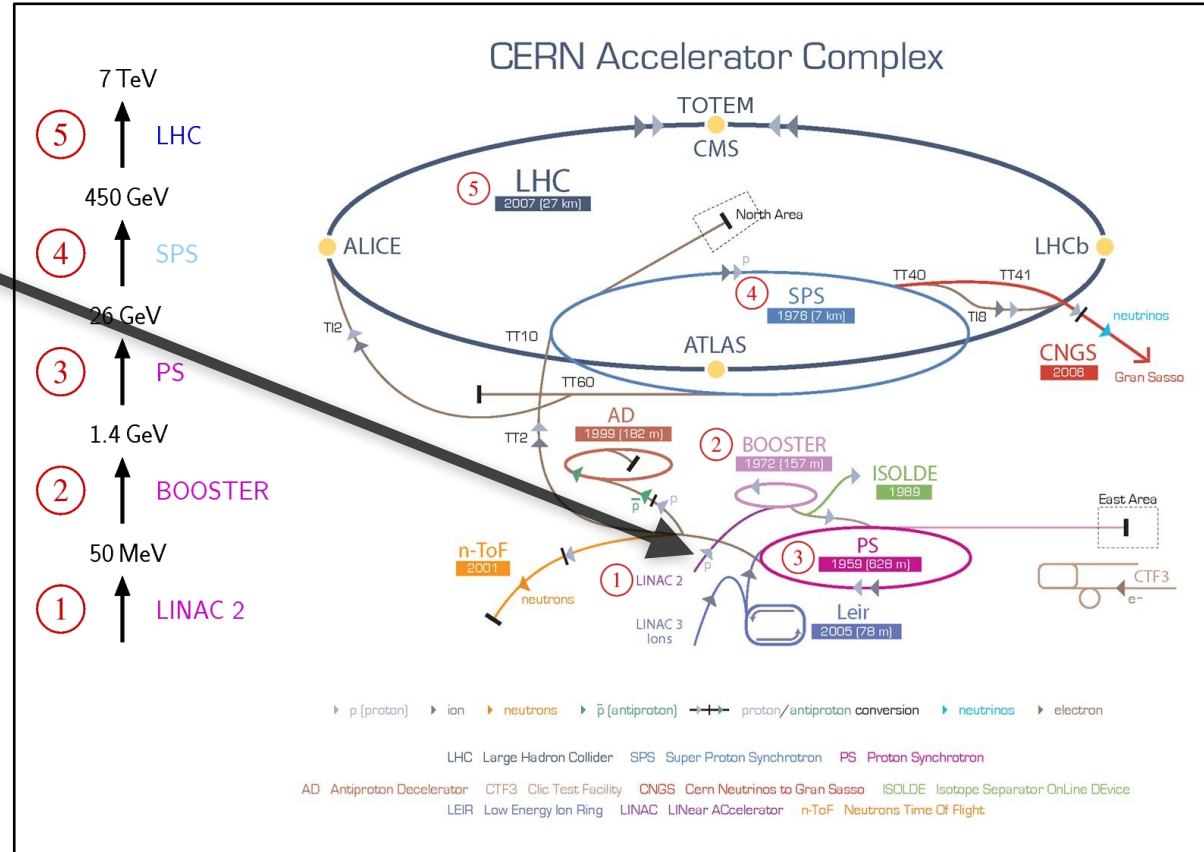
### Elettromagnetismo + relatività speciale

- Protoni circolano in tubi dove viene fatto un vuoto spinto  $10^{-10}$ - $10^{-11}$  mbar
- Accelerazione: cavità risonanti EM → protoni relativistici con energia cinetica di 6.8 TeV per fascio
- Curvatura del fascio con dipoli magnetici
- Focalizzazione con quadrupoli magnetici

# Come si arriva ad LHC?

## Stadi di accelerazione

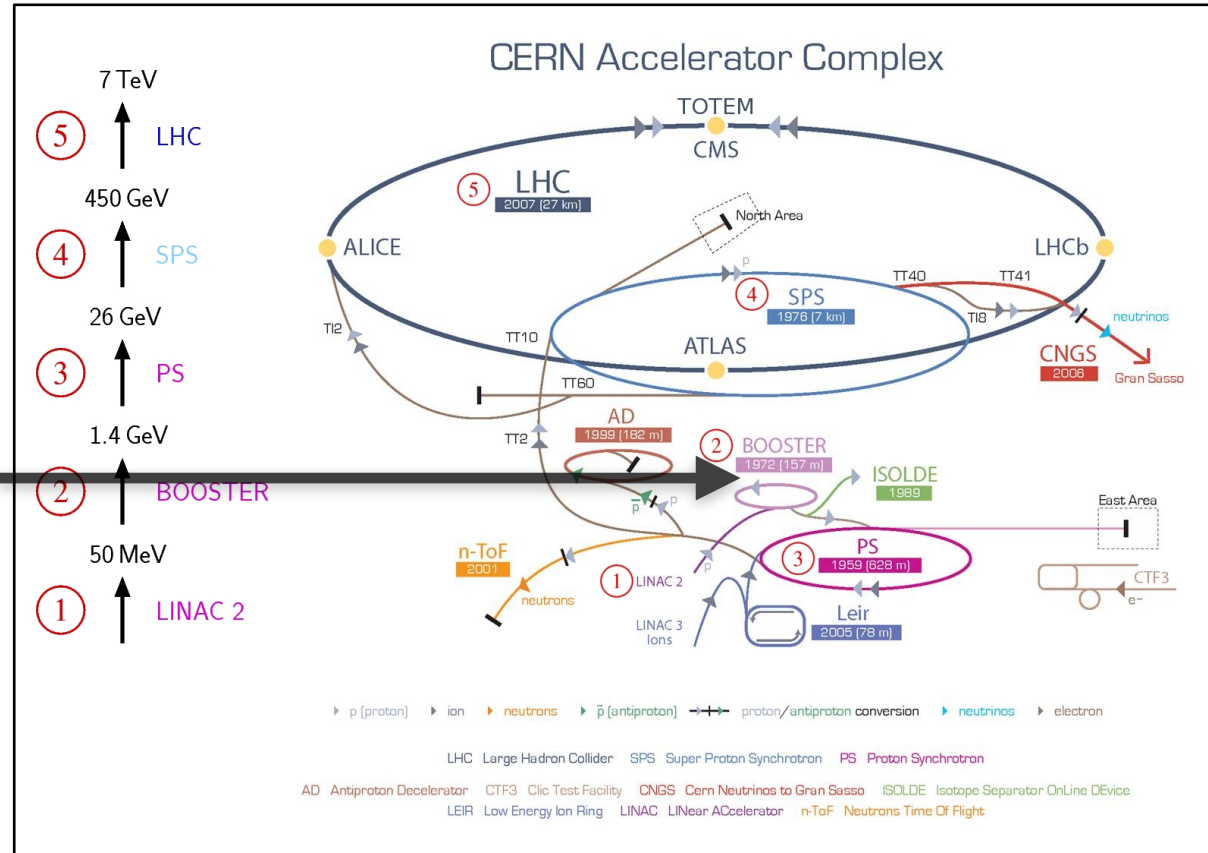
- **Sorgente:** bottiglia di idrogeno ( $H_2$ ) + ionizzazione
- Acceleratore lineare (**LINAC**)  
→ come una pila da 50 MV → energia del fascio 50 MeV
- **Booster:** primo anello circolare che accumula protoni e li porta a 1.4 GeV
- **PS:** sincrotrone circolare porta il fascio a 25 GeV
- **SPS:** sincrotrone circolare che porta i protoni a 450 GeV



# Come si arriva ad LHC?

## Stadi di accelerazione

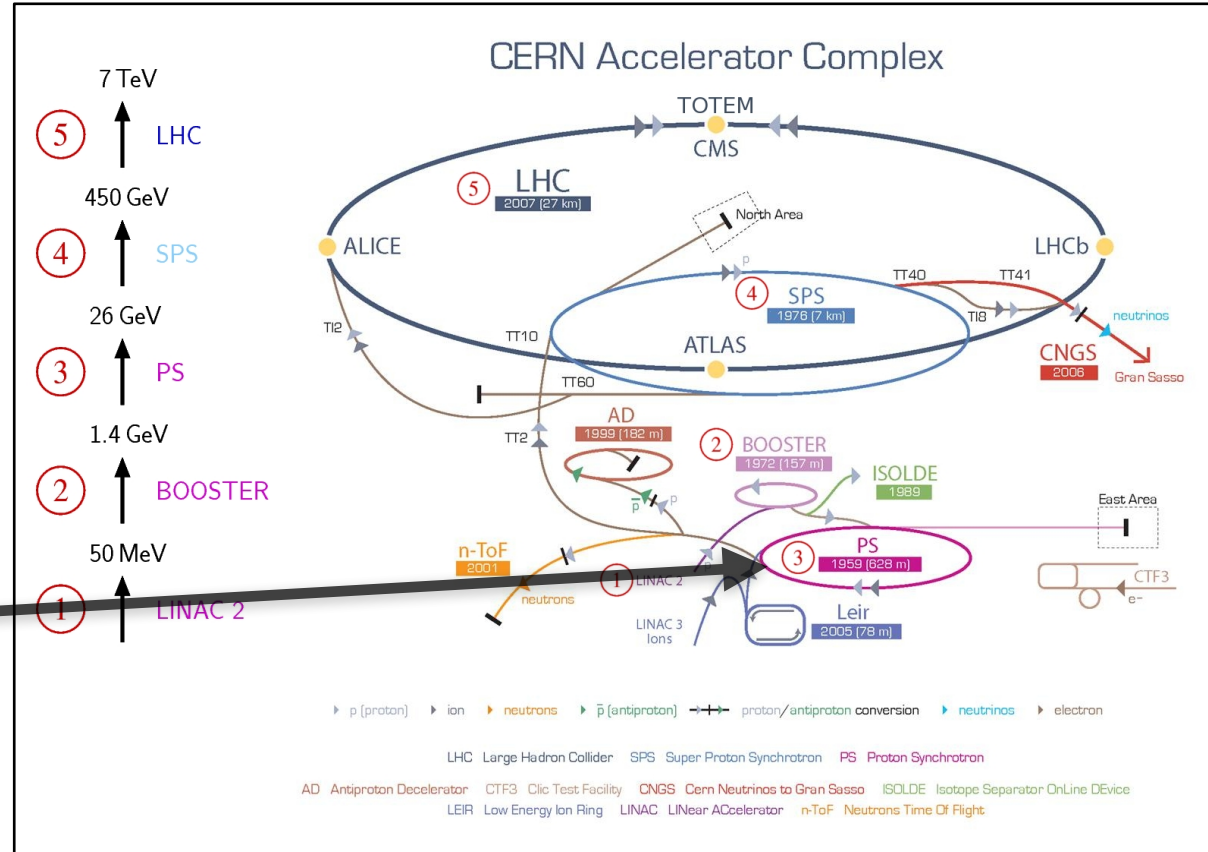
- **Sorgente:** bottiglia di idrogeno ( $H_2$ ) + ionizzazione
- Acceleratore lineare (**LINAC**)  
→ come una pila da 50 MV → energia del fascio 50 MeV
- **Booster:** primo anello circolare che accumula protoni e li porta a 1.4 GeV
- **PS:** sincrotrone circolare porta il fascio a 25 GeV
- **SPS:** sincrotrone circolare che porta i protoni a 450 GeV



# Come si arriva ad LHC?

## Stadi di accelerazione

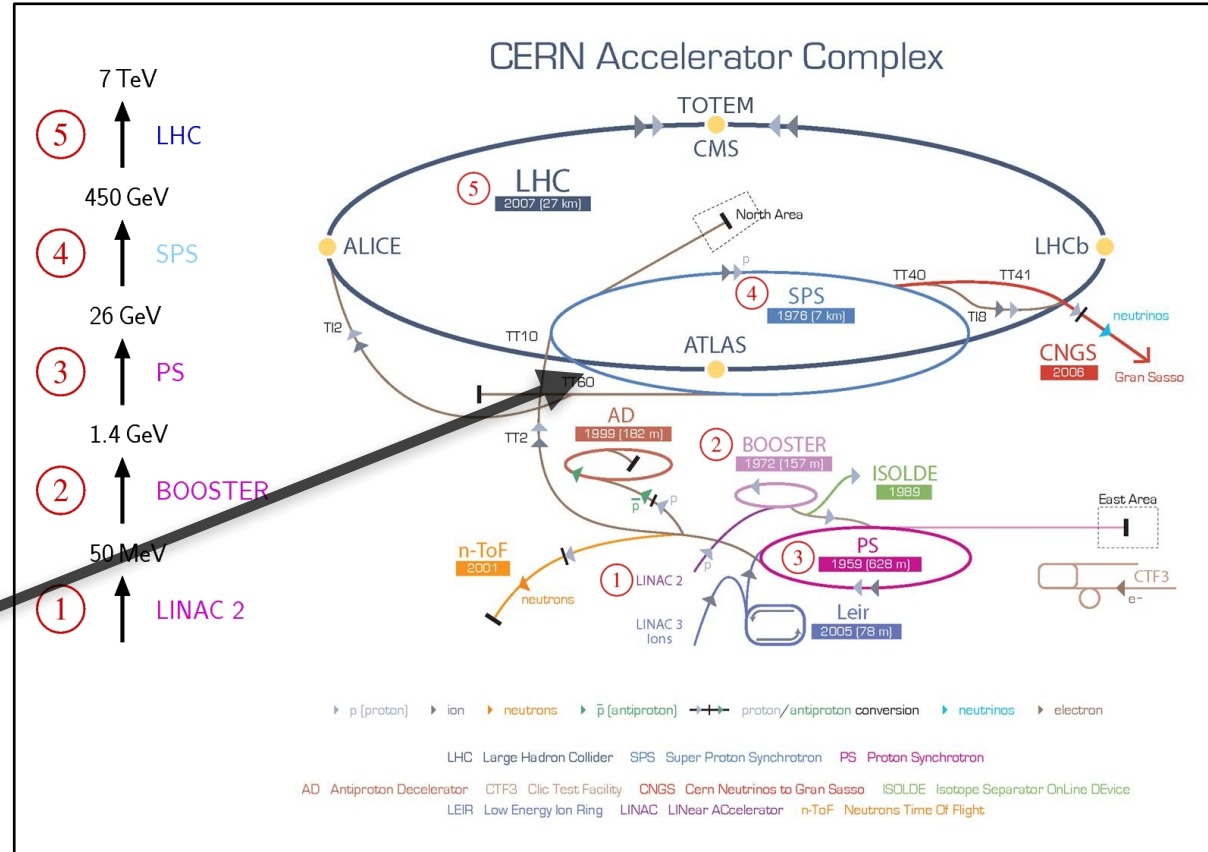
- **Sorgente:** bottiglia di idrogeno ( $H_2$ ) + ionizzazione
- Acceleratore lineare (**LINAC**)  
→ come una pila da 50 MV → energia del fascio 50 MeV
- **Booster:** primo anello circolare che accumula protoni e li porta a 1.4 GeV
- **PS:** sincrotrone circolare porta il fascio a 25 GeV
- **SPS:** sincrotrone circolare che porta i protoni a 450 GeV



# Come si arriva ad LHC?

## Stadi di accelerazione

- **Sorgente:** bottiglia di idrogeno ( $H_2$ ) + ionizzazione
- Acceleratore lineare (**LINAC**)  
→ come una pila da 50 MV → energia del fascio 50 MeV
- **Booster:** primo anello circolare che accumula protoni e li porta a 1.4 GeV
- **PS:** sincrotrone circolare porta il fascio a 25 GeV
- **SPS:** sincrotrone circolare che porta i protoni a 450 GeV



# LHC: caratteristiche e curiosità

---

Come si riassume LHC in 4 parole chiave?



# LHC: caratteristiche e curiosità

---

Come si riassume LHC in 4 parole chiave?



LHC è **vuoto**



LHC è **freddo**



LHC è **caldo**



LHC è **connesso**

# LHC: caratteristiche e curiosità

Come si riassume LHC in 4 parole chiave?

LHC è vuoto

10<sup>-11</sup> mbar lungo i  
27 km dell'anello ...  
**P<sub>LHC</sub> ~ P<sub>Luna</sub>**

LHC è freddo

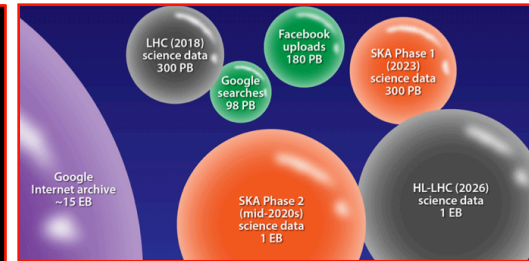
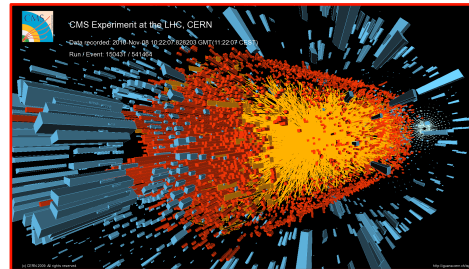
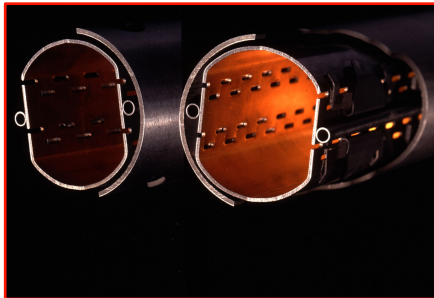
**Più freddo dello spazio  
interstellare.**  
He-liquido refrigerante per  
portare magneti in stato di  
super-conduzione.

LHC è caldo

**T nel punto di  
collisione:  
5 GK (5 trillion °C)**  
Un milione di volte > di  
quella del nucleo solare

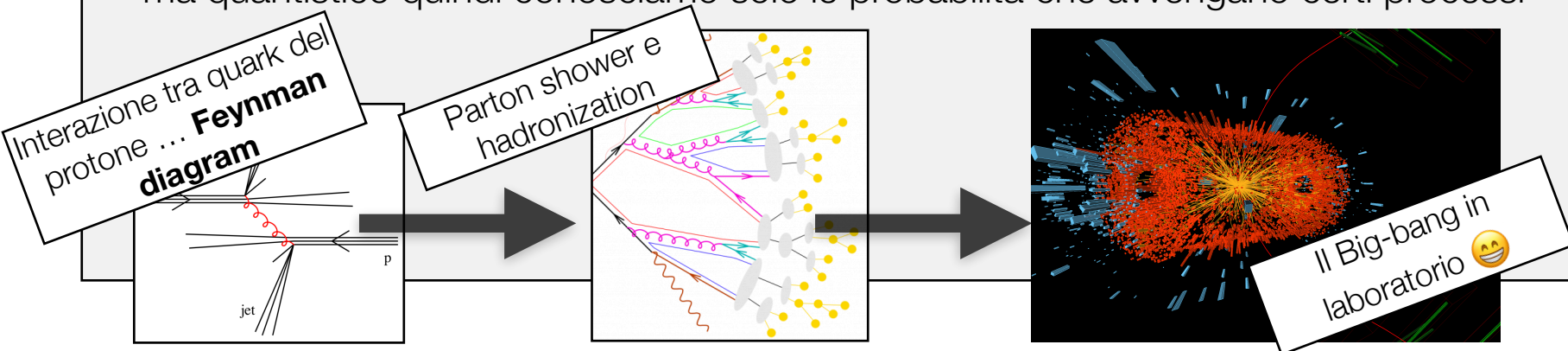
LHC è connesso

**Computing grid:**  
collega computing  
center con ~ 100k-1M  
processori



# LHC: diamo qualche numero ...

- **Protoni** nella macchina si dividono i pacchetti detti **bunch**
- **Quanti bunch?** → in **LHC** possono essere inseriti fino a **2832 bunch** di protoni
- **Quanti protoni per bunch?** →  $1.0-1.2 \times 10^{11}$
- **Quante collisioni tra bunch al secondo?** → 40 milioni cioè 40 MHz di bunch crossing
- **Quanti protoni interagiscono in ogni bunch crossing?** → in media 60, processo di natura statistica
- **Cosa succede quando due protoni interagiscono?** → processo non deterministico ma quantistico quindi conosciamo solo le probabilità che avvengano certi processi



# Esperimenti ad LHC

---

Che cosa sono gli esperimenti installati ad LHC?

# Esperimenti ad LHC

---

Che cosa sono gli esperimenti installati ad LHC?



Sono delle macchine fotocamere ad alta risoluzione ....

Risoluzione di tipo: **spaziale**, **temporale**, **energetica**

# Esperimenti ad LHC

Che cosa sono gli esperimenti installati ad LHC?



Sono delle macchine fotocamere ad alta risoluzione ....  
Risoluzione di tipo: **spaziale**, **temporale**, **energetica**

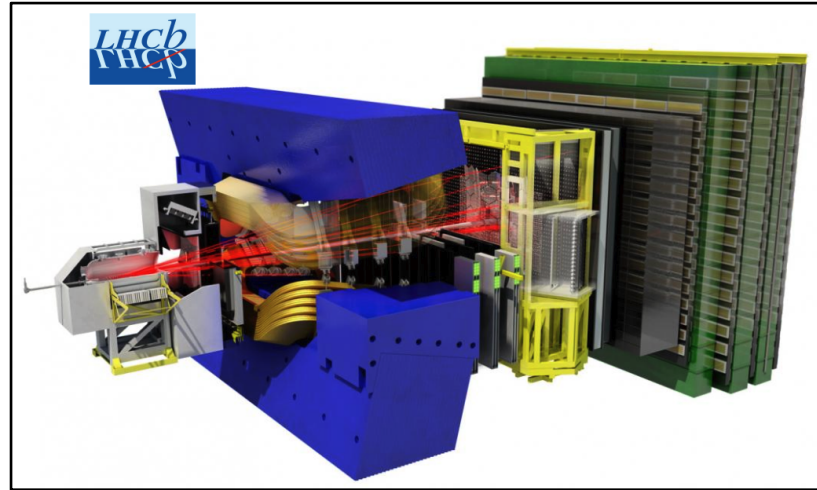
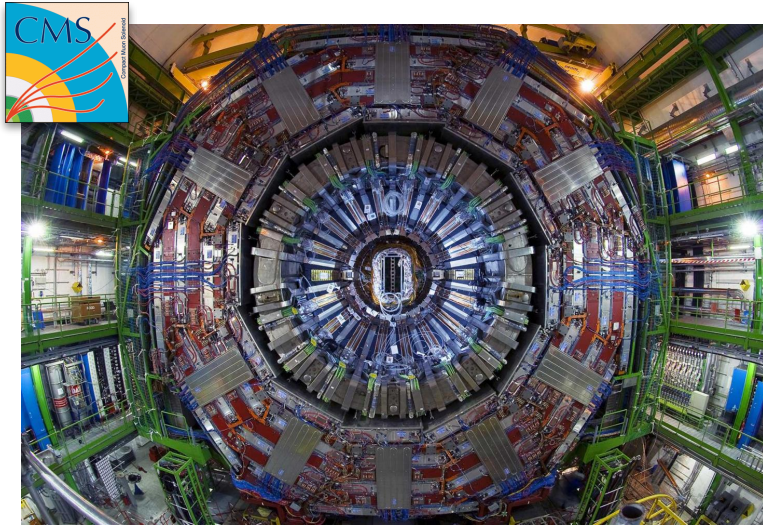


**Non queste  
macchine  
fotografiche!!!**

\*\* La fotocamera di uno smartphone brucerebbe dopo 1s ad LHC

# Rivelatori di particelle

---

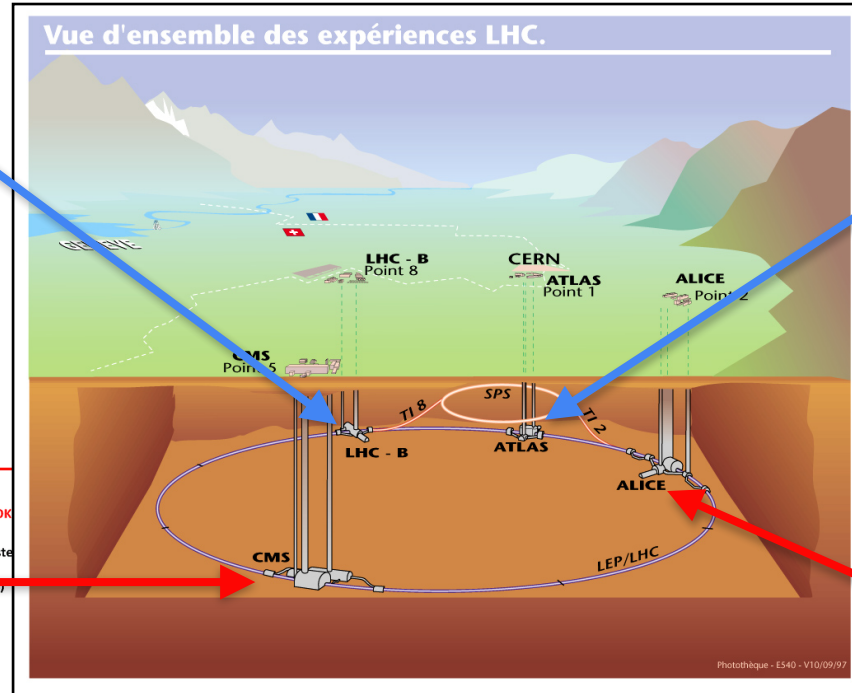
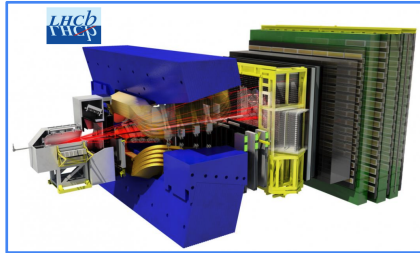


Queste macchine fotografiche!!!

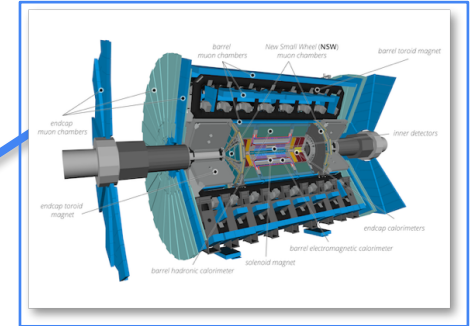
\*\* Chiamate solitamente **rivelatori di particelle** o **detector** o **esperimenti**

# Gli esperimenti di LHC

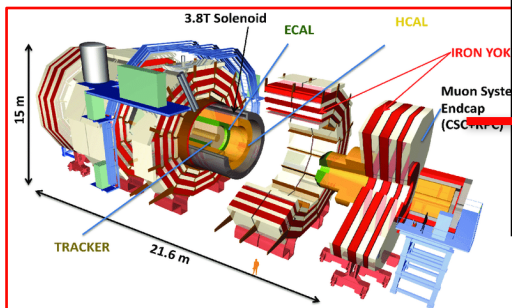
LHCb



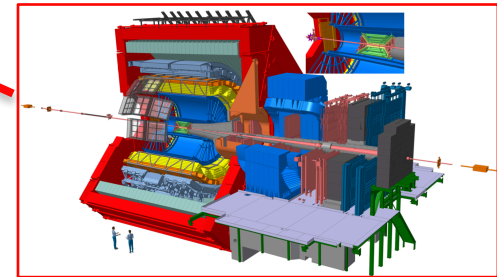
ATLAS



CMS



ALICE





# Programma di fisica a LHC

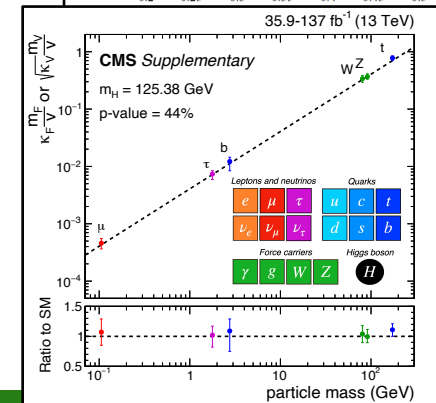
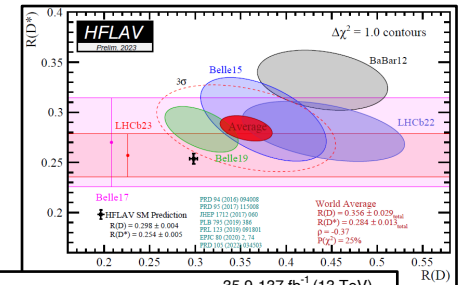
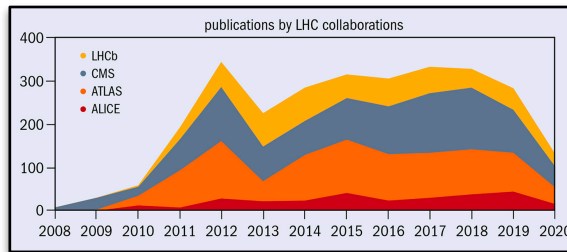
**Scopo:** studiare interazioni ad una scale di energia mai sondata prima  $O(\text{TeV})$

## Ricerca di nuovi fenomeni:

- **Osservazione diretta** di nuove particelle oltre il modello standard
- Misurare di **deviazioni significative** dalle predizioni del modello standard

## Misure di precisione del modello standard:

- **Fisica elettro-debole** con multipli bosoni vettori e top quark
- **Fisica** del quark top
- **Fisica** del bosone di Higgs
- Fisica del **flavour** e **violazione** simmetria **CP**
- **Spettroscopia adronica** : barioni, **tetra** e **penta-quarks**



# Quanto ci sta costando?

**Principio fondamentale:** ricerca fondamentale  $\Leftrightarrow$  innovazione tecnologica  $\Leftrightarrow$  **costa !!!**

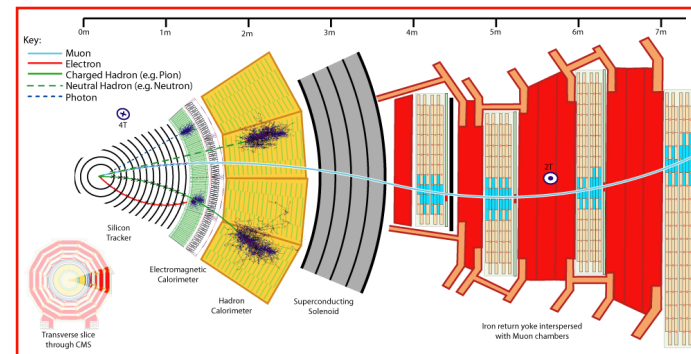
Progetti scientifici	Periodo storico	Costo in \$
Progetto Manhattan	1942-1946	25 miliardi
NASA: moon landing	1957 al 1969	100 miliardi
Stazione spaziale internazionale	1998-oggi	150 miliardi
LHC + esperimenti	1998-oggi	8-10 miliardi

\*\* Costo di LHC infinitamente minore del costo di operazioni militari come Guerra in Iraq, invasione Ucraina, etc.

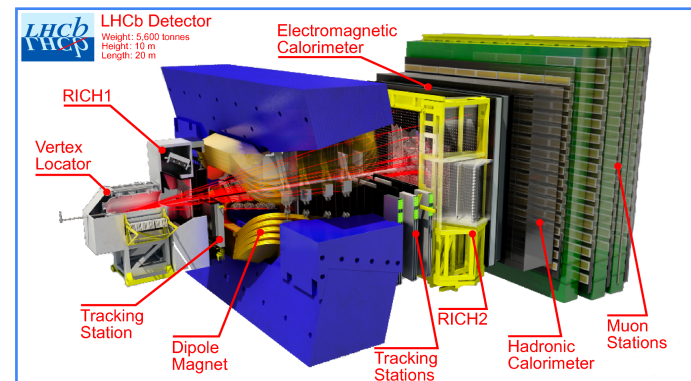
# La rivelazione delle particelle

## Come funziona e da cosa è composto un detector di particelle?

- **Struttura a cipolla:** ogni strato misura un **tipo / proprietà** delle particelle prodotte
- **Proprietà da misurare:** **carica** elettrica, **massa** a riposo, **energia**, **posizione**, e **tempo** di produzione
- **Misura posizione:** sensori che ricostruiscono il punto di passaggio di una particelle → **traiettoria** (x,y,z) → **quantità di moto** ( $p_x, p_y, p_z$ )
- **Misura energia:** dispositivi che **fermano le particelle** convertendo la loro energia in un segnale misurabile (**calorimetri**)
- **Misura di tempo:** sensori veloci con risoluzione migliore del tempo di volo



CMS

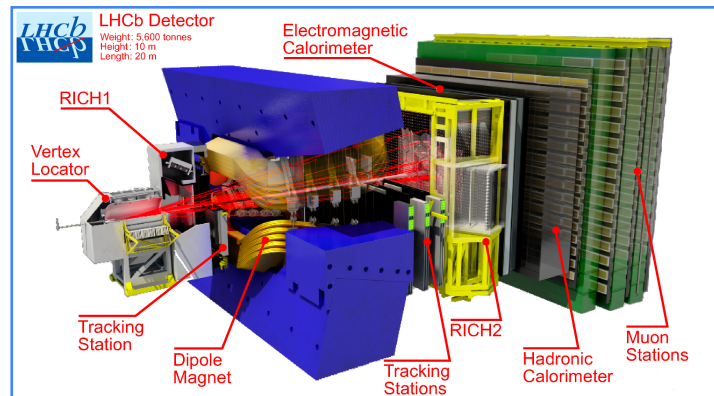
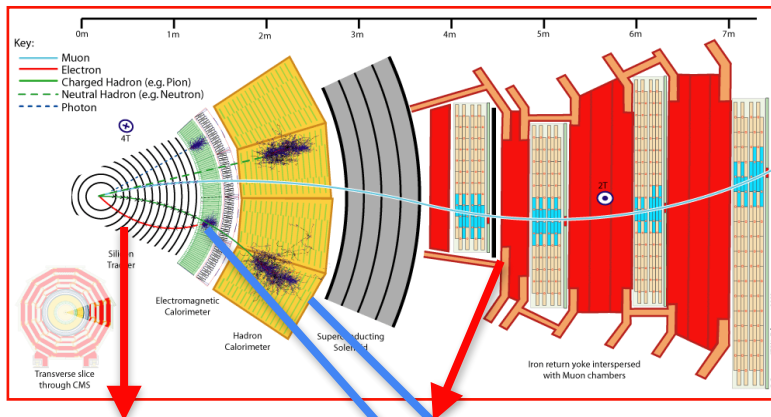


LHCb

# La rivelazione delle particelle

**Come funziona e da cosa è composto un detector di particelle?**

CMS



LHCb

## Tracciatori e identificazione

Silicon sensor (pixel, strip)

Detector a gas (DT,CSC,GEM,RPC)

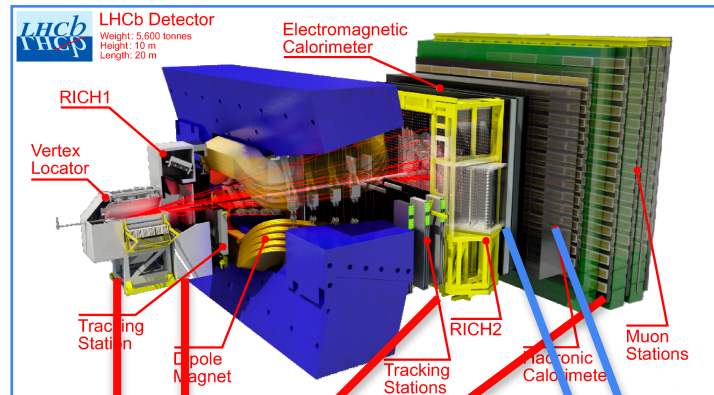
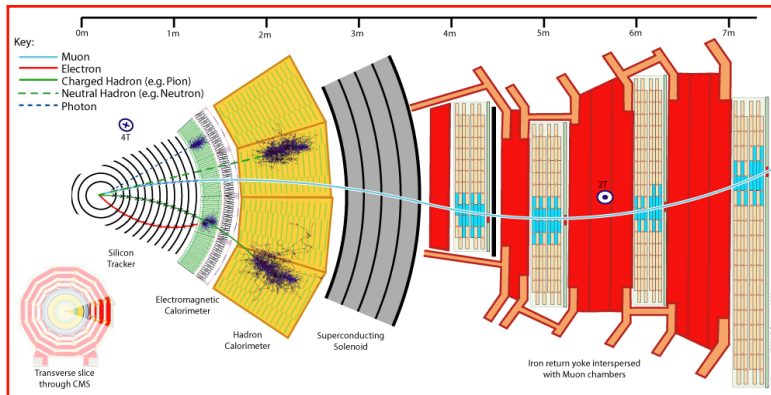
## Calorimetri

Elettromagnetico e adronico  
basati su scintillatori

# La rivelazione delle particelle

**Come funziona e da cosa è composto un detector di particelle?**

CMS



LHCb

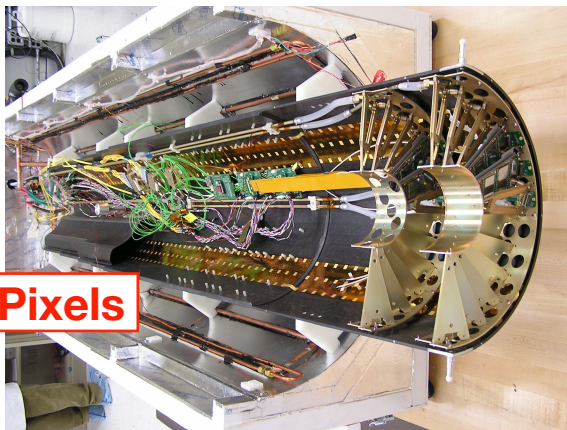
## Tracciatori e identificazione

Silicon sensor (pixel, strip)  
RICH: Cherenkov detector  
Detector a gas (DT,CSC,GEM,RPC)

## Calorimetri

elettromagnetico e adronico  
basato su scintillatori

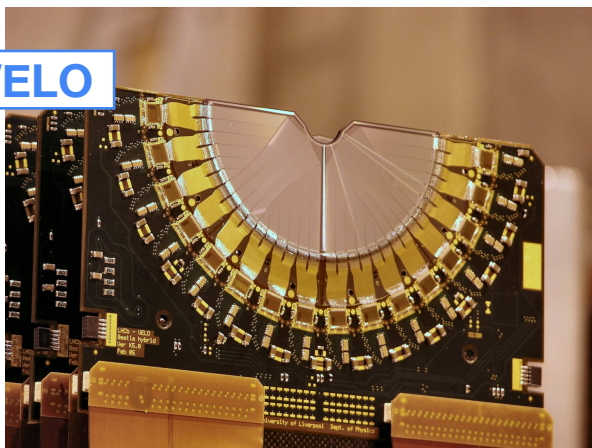
# Detector: tracciatori



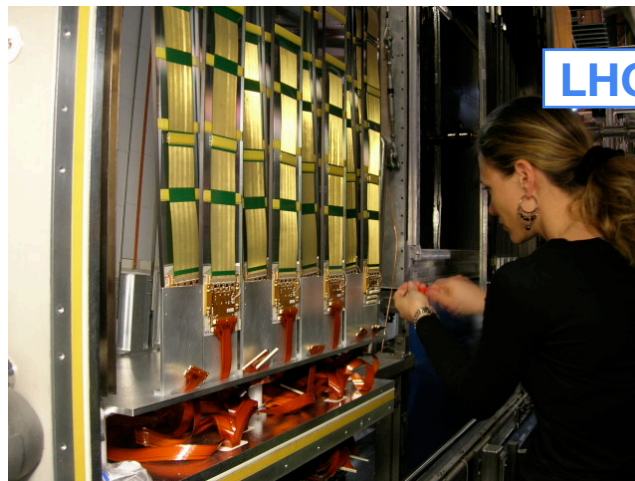
CMS Si-Pixels



CMS Si-Strips



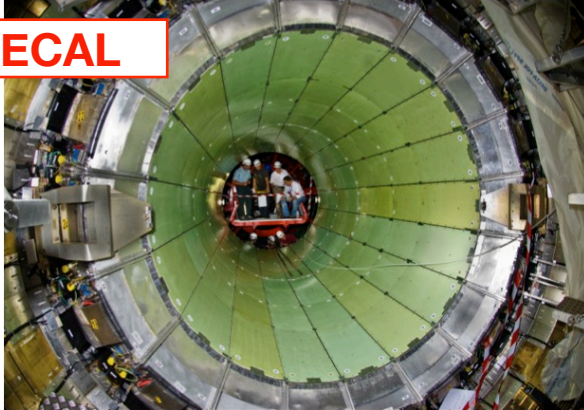
LHCb VELO



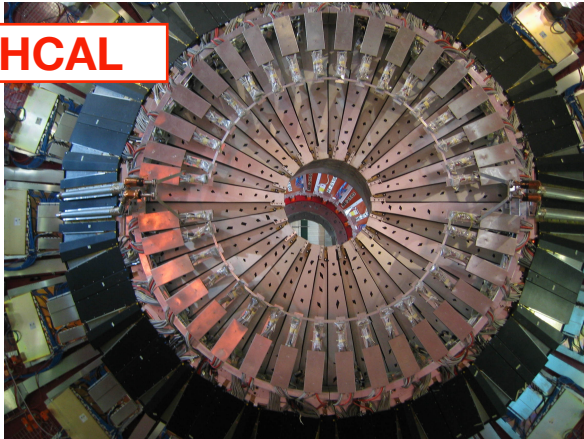
LHCb Tracker

# Detector: RICH e Calorimetri

CMS ECAL



CMS HCAL



RICH LHCb



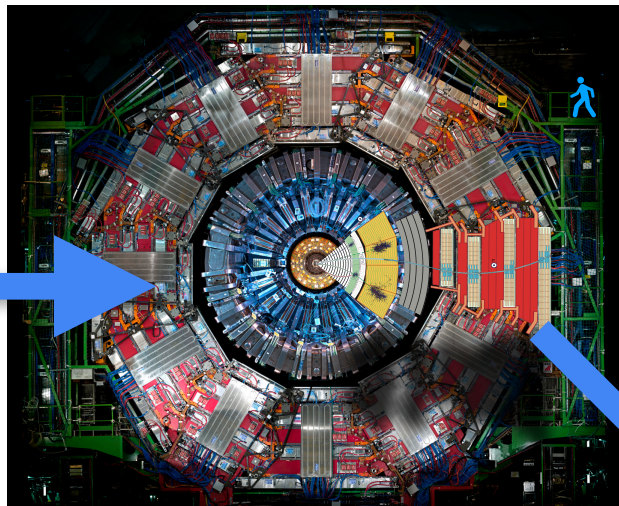
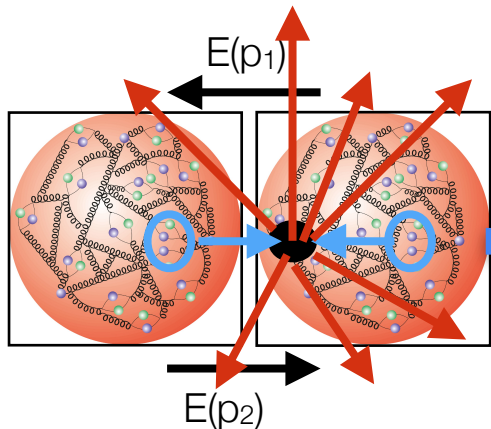
HCAL LHCb



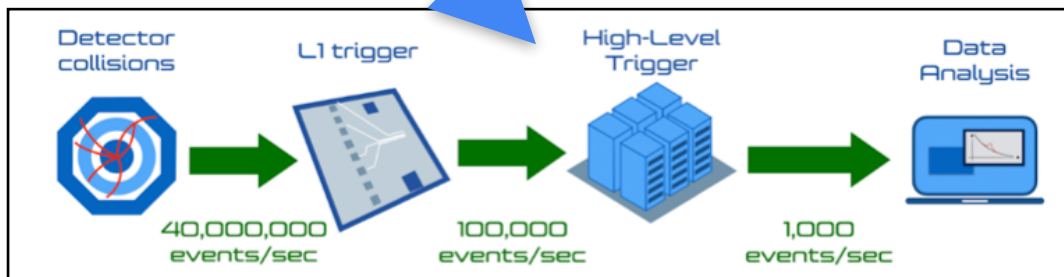
# Acquisizione e salvataggio dei dati

## Detector

pp collisions



Data acquisition

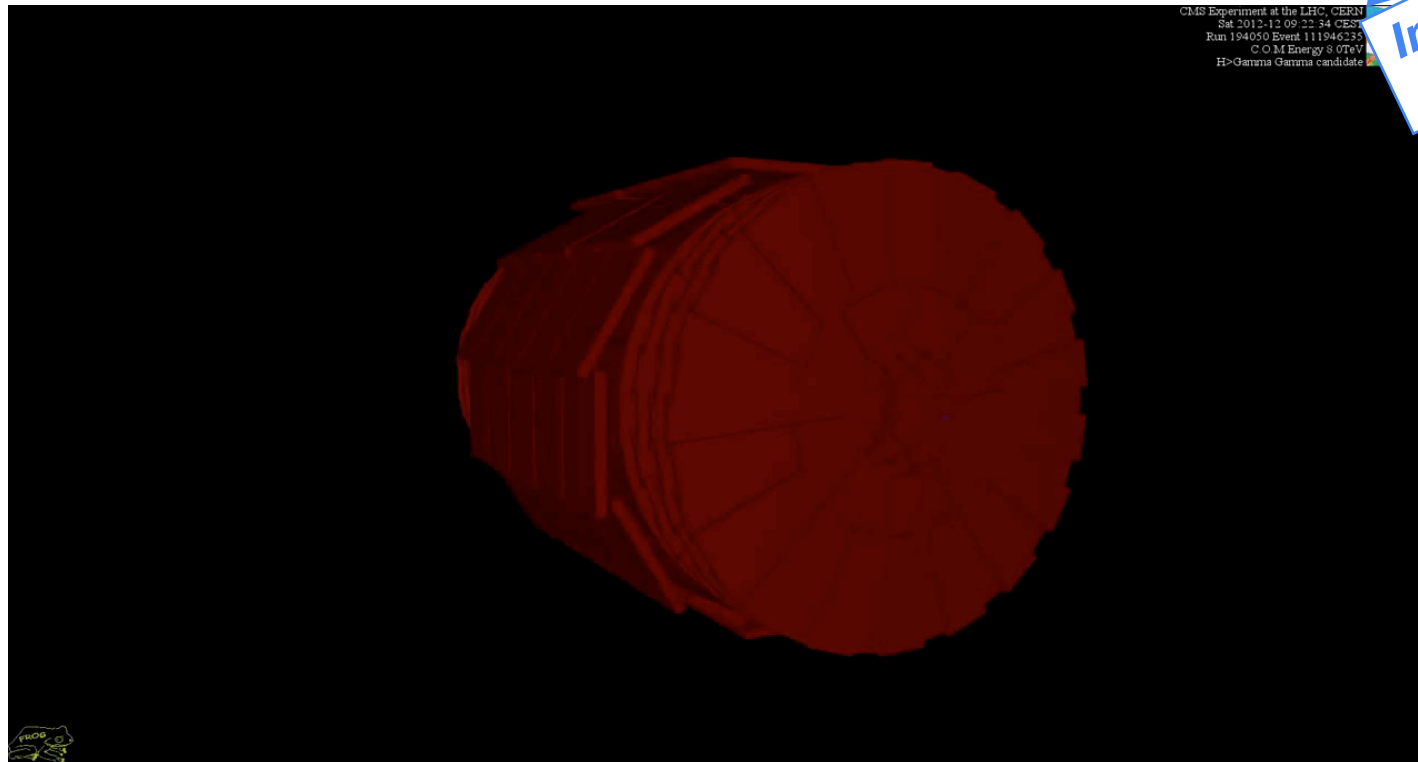




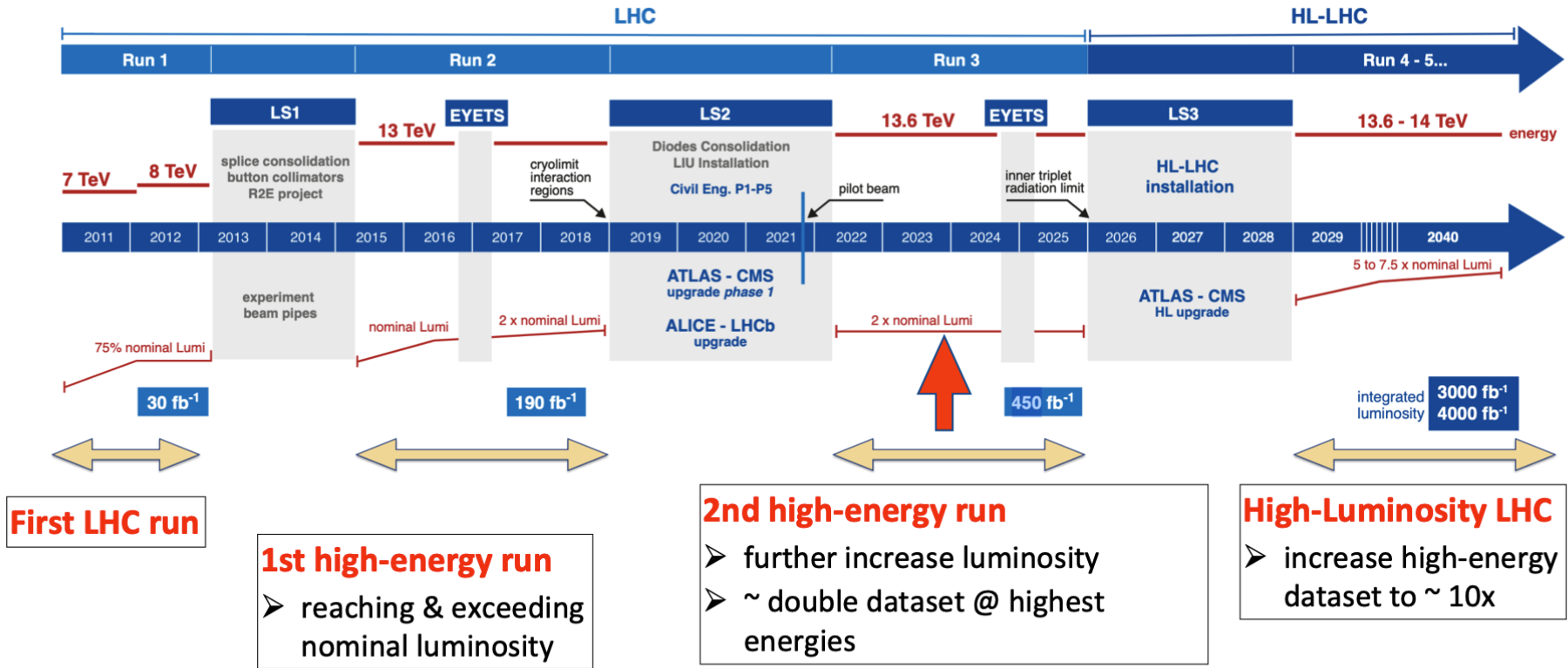
# Visualizzazione di un evento

- **Detector** =  $O(10^{10})$  di sensori che si accendono se una particella interagisce
- Alcuni sensori si accende proporzionalmente all'energia depositata

Immagine 3D di una collisione



# Il futuro di LHC: aumentiamo l'intensità

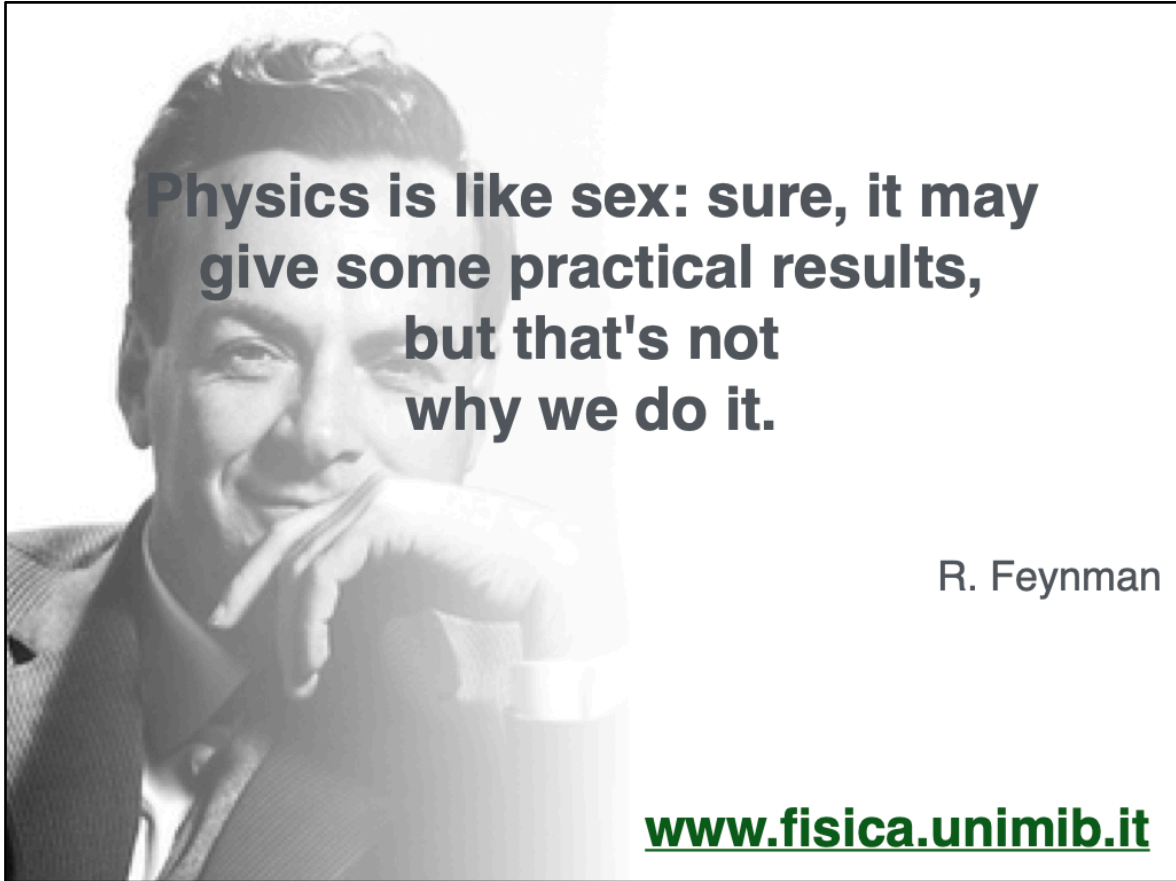


LS = Long Shutdown; EYETS = Extended Year-End Technical Stop; HL-LHC = high-luminosity LHC

# Perché fare fisica delle particelle?

# Perché fare fisica delle particelle?

---



**Physics is like sex: sure, it may  
give some practical results,  
but that's not  
why we do it.**

R. Feynman

[www.fisica.unimib.it](http://www.fisica.unimib.it)