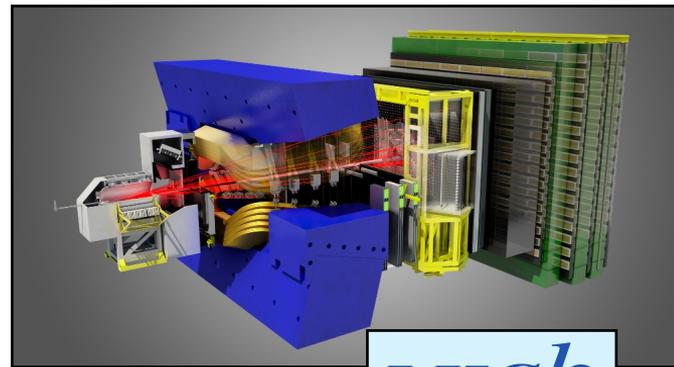
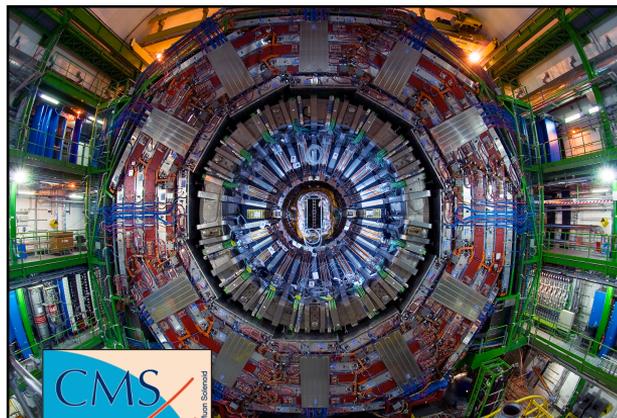
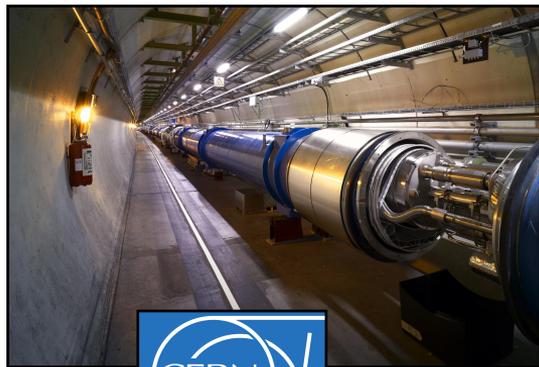


Introduzione alla visita didattica al CERN



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

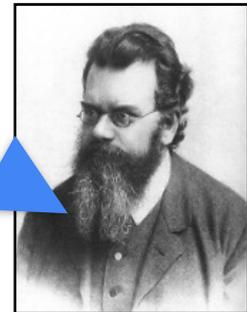
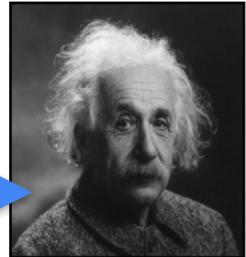
Reionization

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

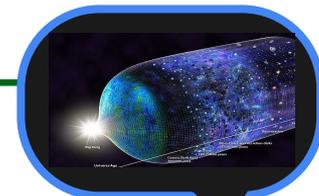


Legge di Boltzmann



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)

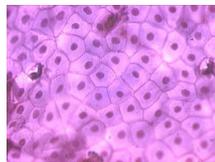


Nata per rispondere a due semplici domande:

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



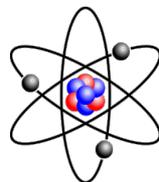
1 m



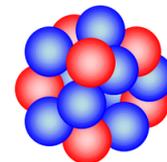
10^{-4} - 10^{-5} m



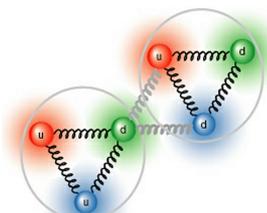
10^{-9} m



10^{-10} m



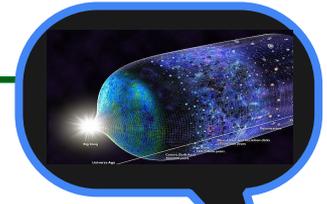
10^{-15} m



10^{-18} m

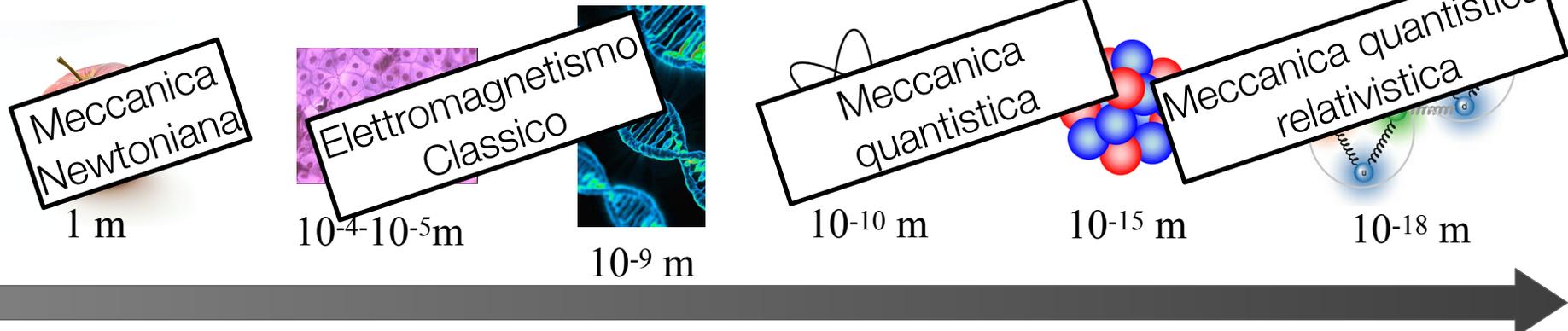
Fisica delle Particelle

”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)



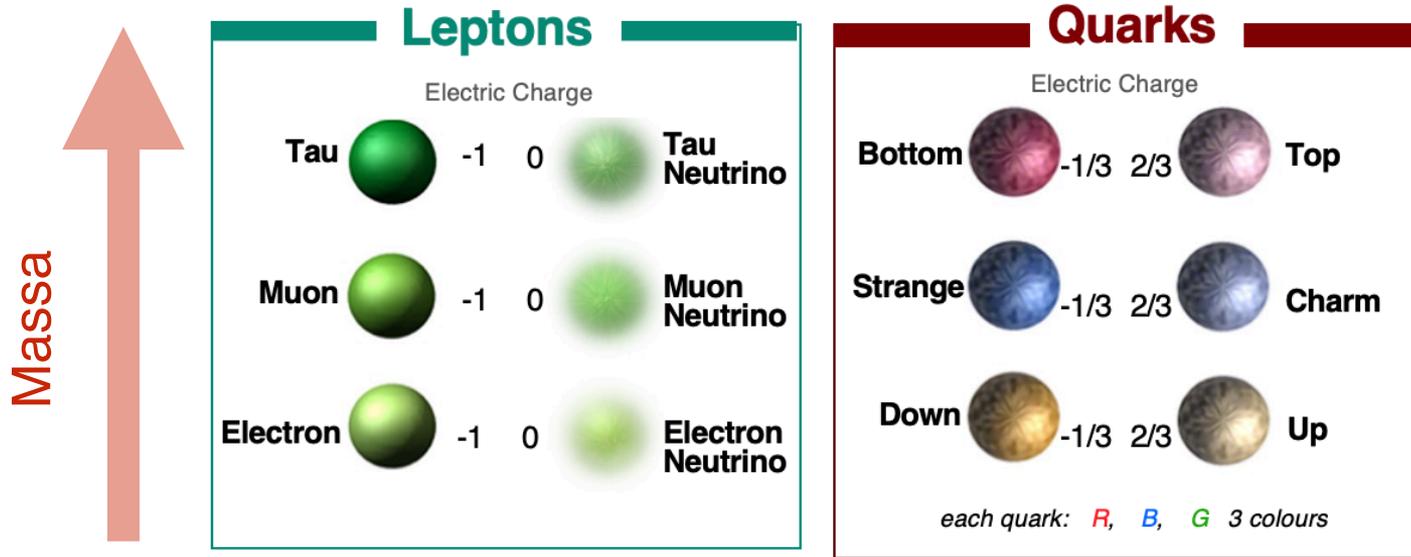
Nata per rispondere a due semplici domande:

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



Costituenti ultimi → particelle materiali

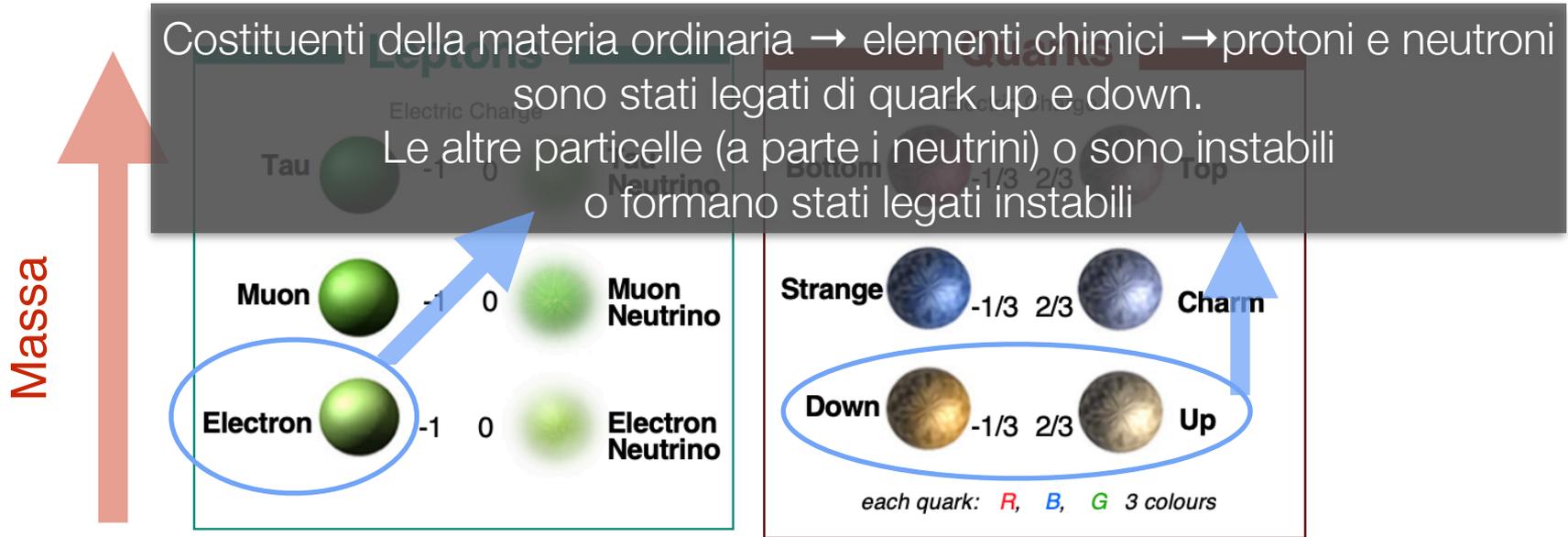
- 12 fermioni (spin= $\pm 1/2$) elementari che si differenziano per **massa** e **numeri quantici**



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)



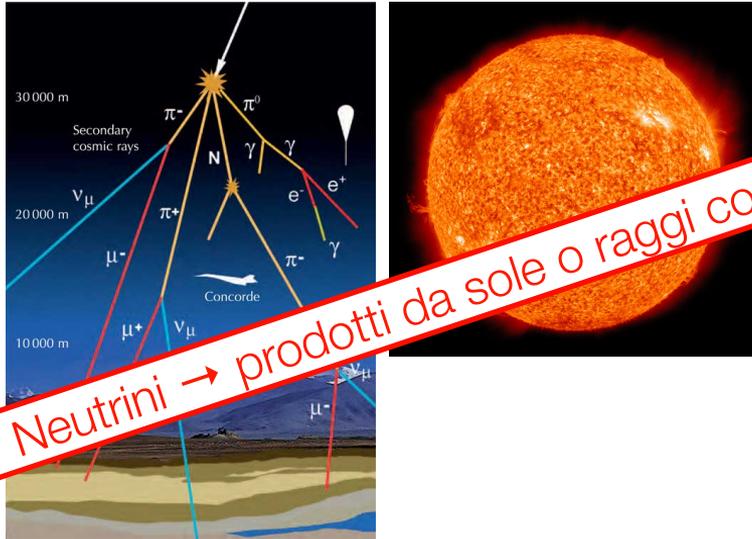
Elettrone → corrente elettrica

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**



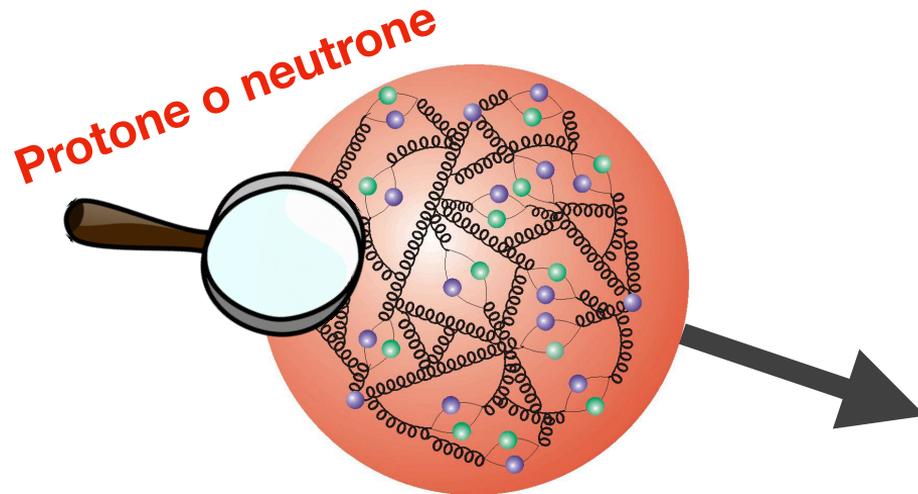
Neutrini → prodotti da sole o raggi cosmici

		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 ~ 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

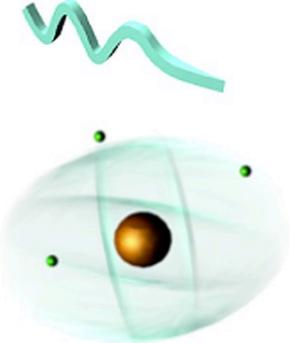
- Sono particelle di carica **elettrica frazionaria**
- Non esistono liberi** in natura ma sono **confinati** in stati legati
- Sensibili ad interazioni **elettromagnetiche**, **nucleari forti**, e **deboli**
- Protoni e neutroni possono essere disintegrati solo ad alta energia → collider di particelle

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

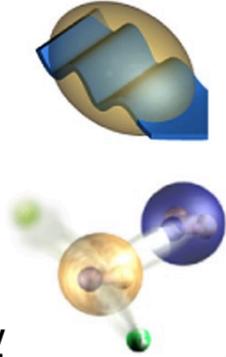
Photon



Atoms
Light
Chemistry
Electronics

Weak

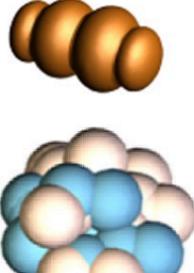
Bosons (W,Z)



Neutron decay
Beta radioactivity
Neutrino interactions
Burning of the sun

Strong

Gluons (8)



Quarks

Mesons
Baryons

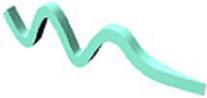
Nuclei

Interazioni fondamentali

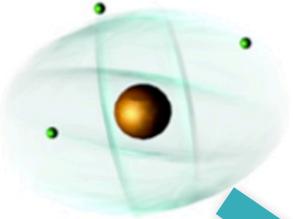
- Le **forze fondamentali** sono 4 e, a ciascuna, è associata un **campo bosonico**
- **Interazione** è descritta attraverso lo **scambio** di un **quanto (bosone)**

Electromagnetic

Photon

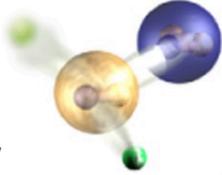
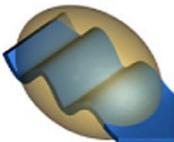


Atoms
Light
Chemistry
Electronics



Weak

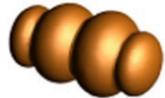
Bosons (W,Z)



Neutron decay
Beta radioactivity
Neutrino interactions
Burning of the sun

Strong

Gluons (8)



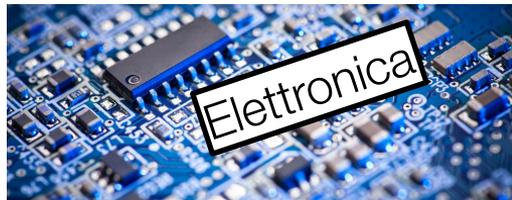
Quarks



Mesons
Baryons

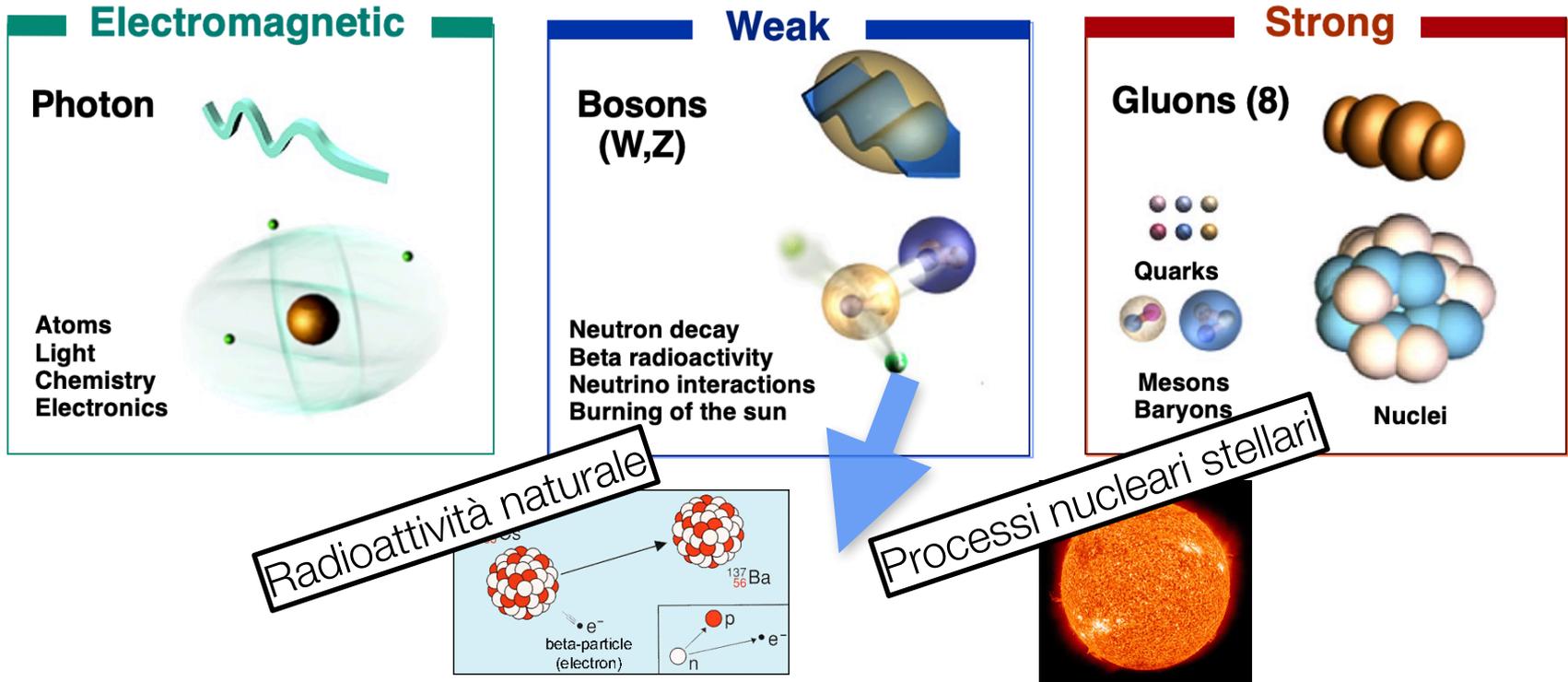


Nuclei



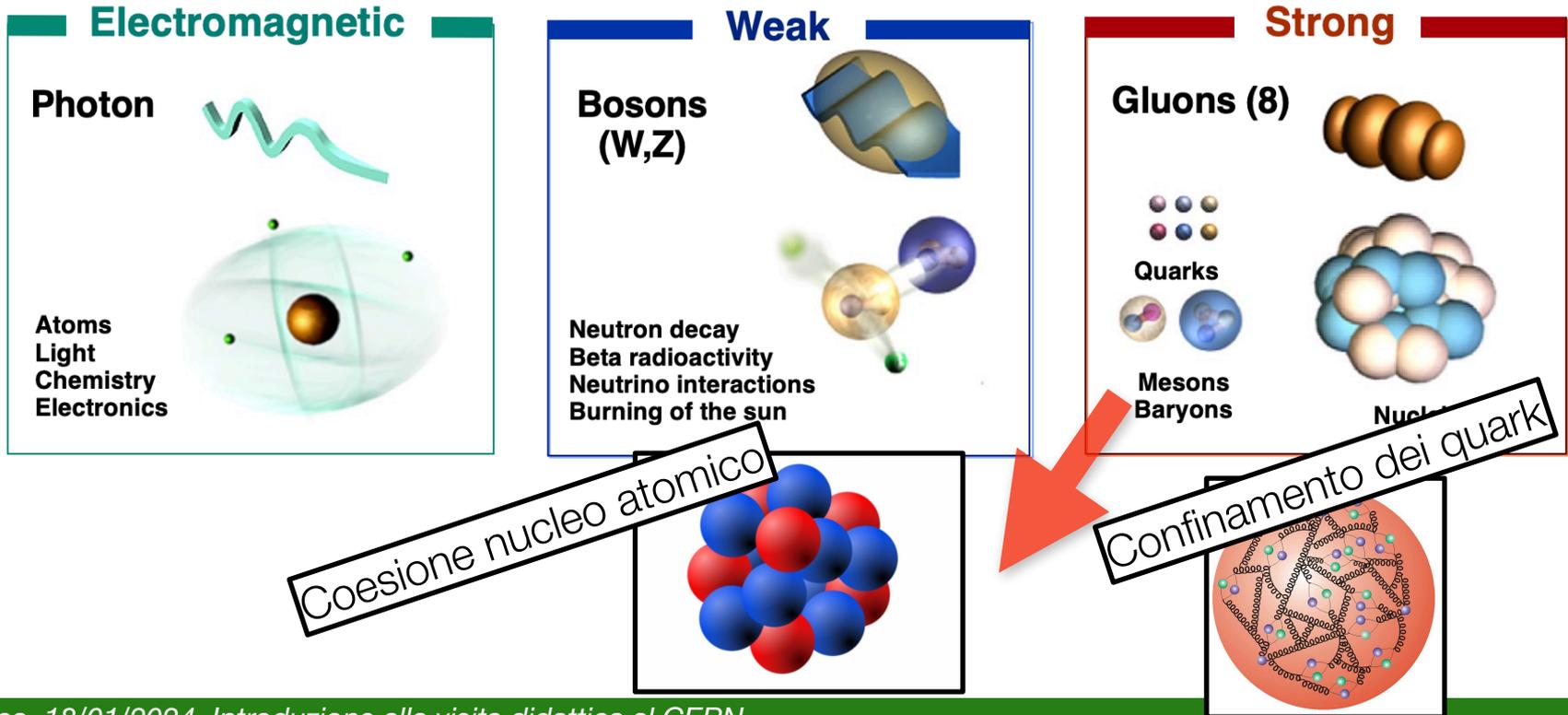
Interazioni fondamentali

- 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)**



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)**

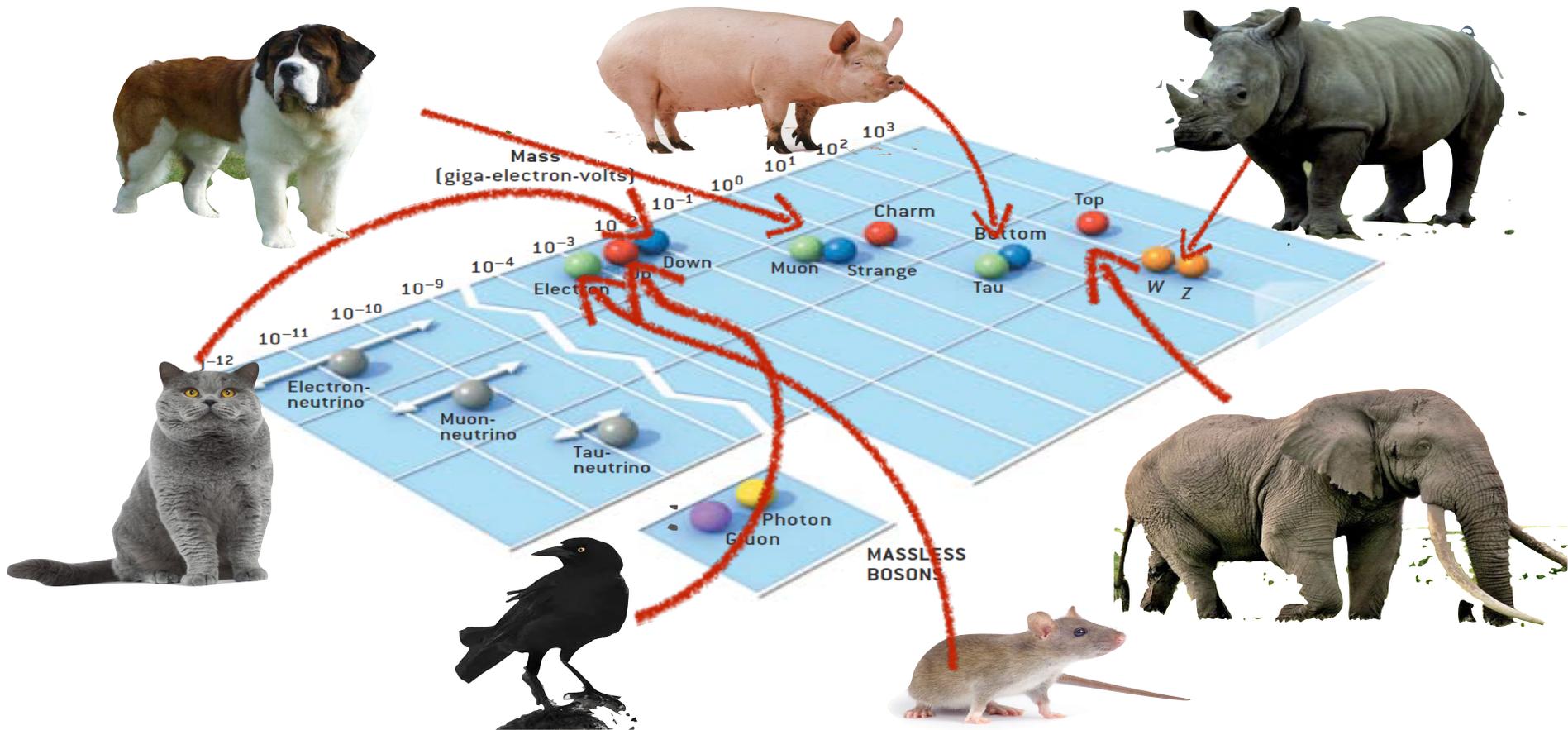
Bosone di Higgs



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



A proposito delle massa delle particelle



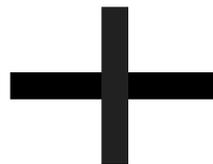
Risultato finale: il Modello Standard

- 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 →	u up	c charm	t top	γ fotone	h higgs
	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	
Quark	d down	s strange	b bottom	g 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	
	ν_e neutrino elettronico	ν_μ neutrino muonico	ν_τ neutrino tauonico	Z⁰ forza debole	
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV	
	-1	-1	-1	± 1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
Leptoni	e elettrone	μ muone	τ tauone	W[±] forza debole	

Bosoni di gauge



	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 →	ū up	c̄ charm	t̄ top
	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV
	$+\frac{1}{3}$	$+\frac{1}{3}$	$+\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
an Quark	d̄ down	s̄ strange	b̄ bottom
	<15,5 MeV	<15,5 MeV	<15,5 MeV
	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	ν̄_e neutrino elettronico	ν̄_μ neutrino muonico	ν̄_τ neutrino tauonico
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV
	+1	+1	+1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
an Leptoni	e⁺ elettrone	μ⁺ muone	τ⁺ tauone

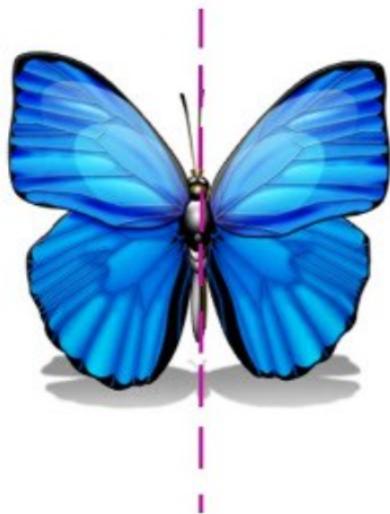
Particelle di Materia

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

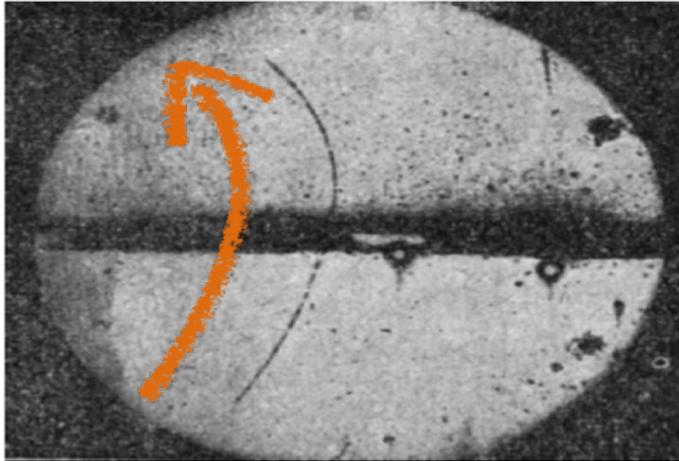
- Il Modello Standard ha delle simmetrie (quantità conservate) in assenza della massa delle particelle
- Si può dare massa alle particelle, mantenendo le simmetria, con il meccanismo di Higgs
- Il **bosone di Higgs** è l'effetto della cosiddetta **rottura spontanea** della **simmetria elettrodebole**

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

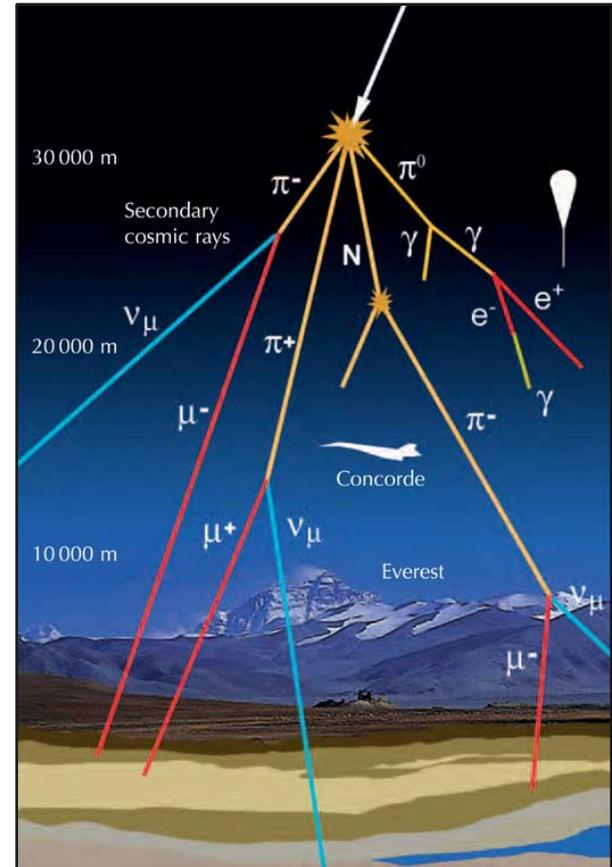
- **Prevista** dalle equazioni scritte da P.M. Dirac nel 1928 per rendere compatibili la meccanica quantistica con la teoria della relatività ristretta
- **Compresa** da E. Majorana che fu il primo a vedere nelle equazioni di Dirac un nuovo insieme di particelle rispetto a quelle esistenti
- **Per ogni 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

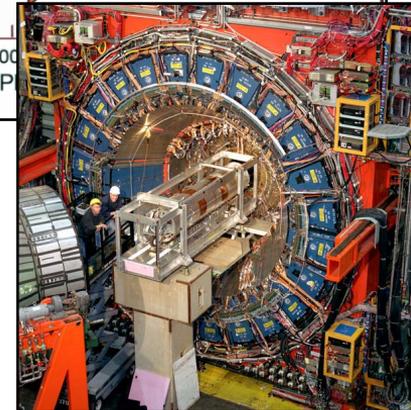
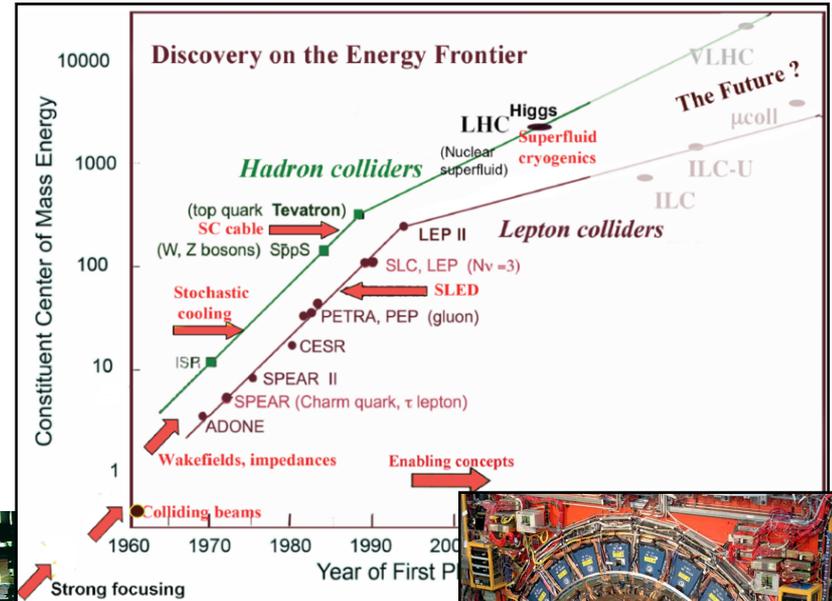
Lo studio dei raggi cosmici

- 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**



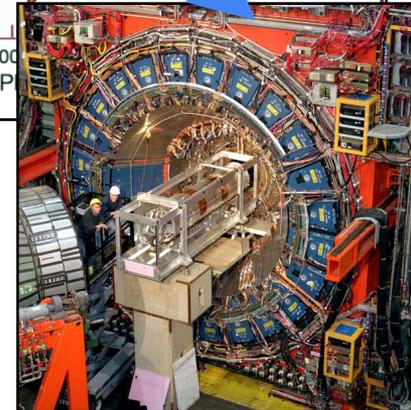
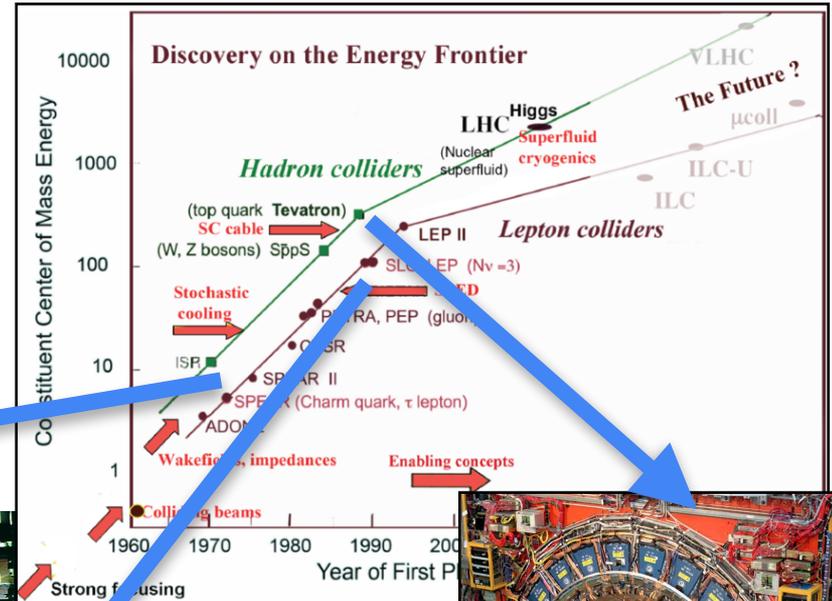
Breve storia sugli acceleratori di particelle

- **1950-60**: costruzione dei primi sincrotroni
- **1960-80**: scoperta del leptone τ 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



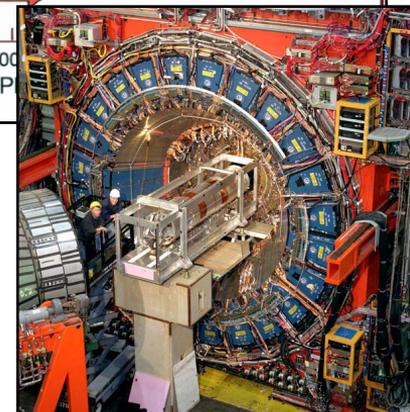
Breve storia sugli acceleratori di particelle

- **1950-60:** costruzione dei primi sincrotroni
- **1960-80:** scoperta del leptone τ 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 τ 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 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?

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?

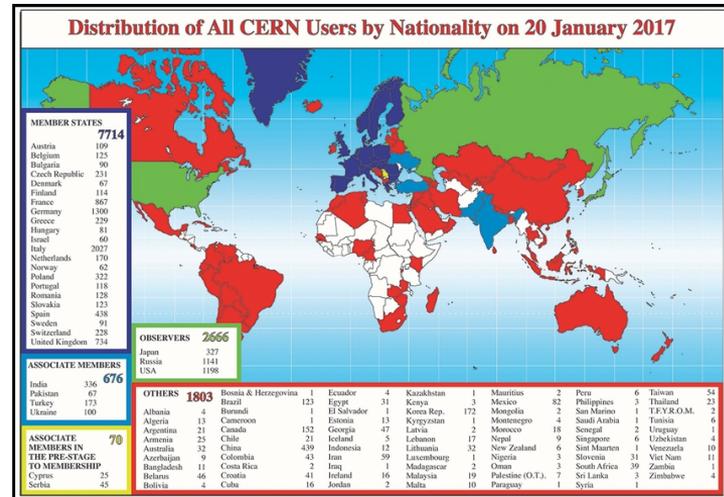
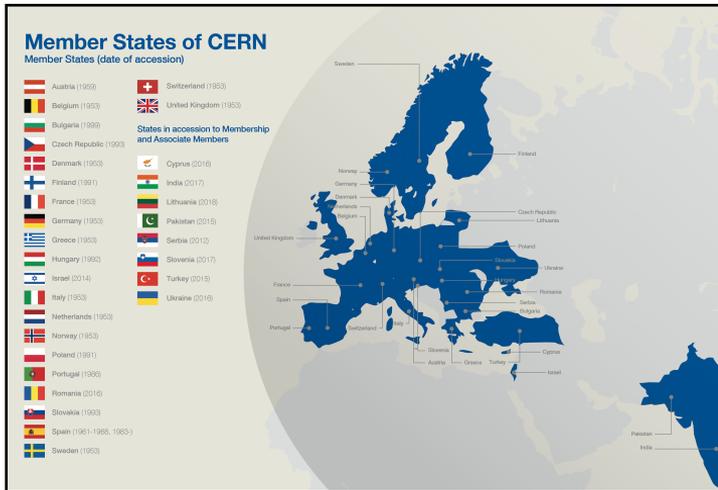
Questioni aperte in fisica delle particelle



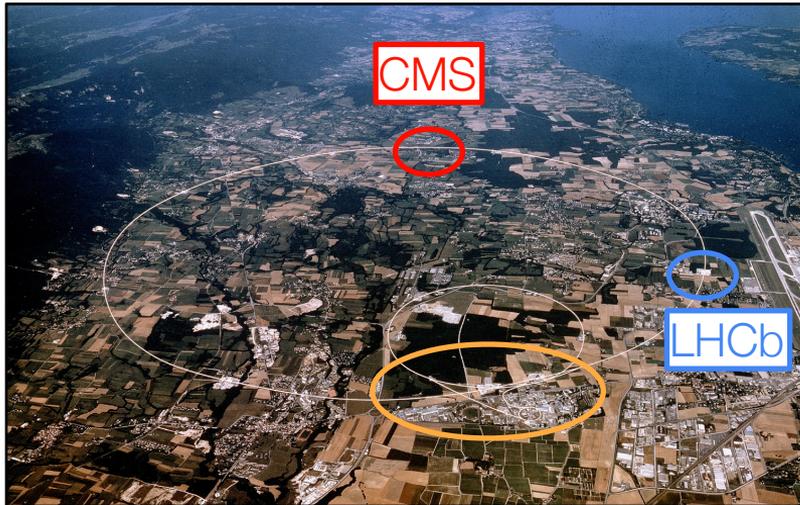
Quanti nuove fenomeni esistono che non possono essere inglobati e spiegati dal Modello Standard?

Consiglio Europeo Ricerche Nucleari (CERN)

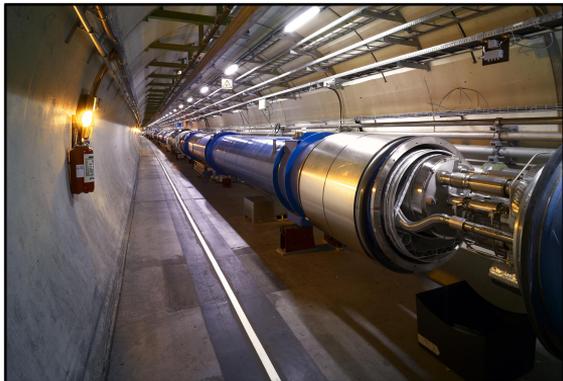
- **Obiettivo:** laboratorio di fisica fondamentale che cerca di costruire setup sperimentali per rispondere a **questi quesiti fondamentali**
- Ad oggi è il **più grande laboratorio di ricerca fondamentale** al mondo
 - **Budget laboratorio:** 1 miliardo di CHF anno
 - Contributo economico italiano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



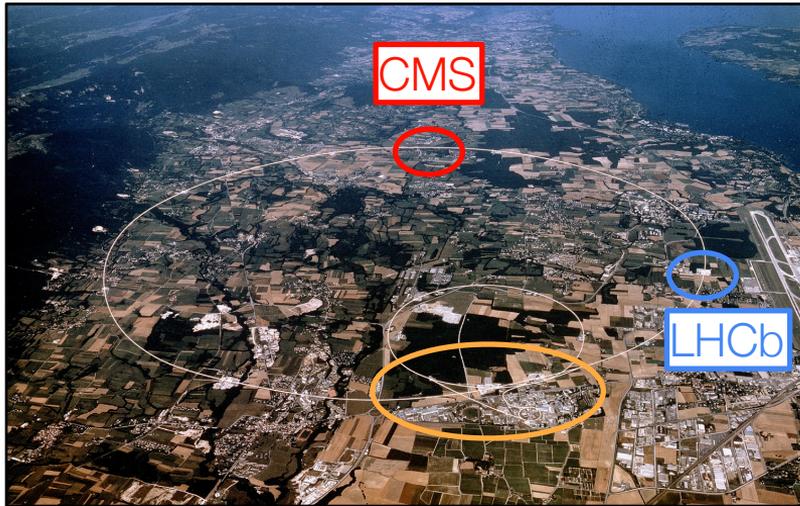
Large Hadron Collider (LHC)



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

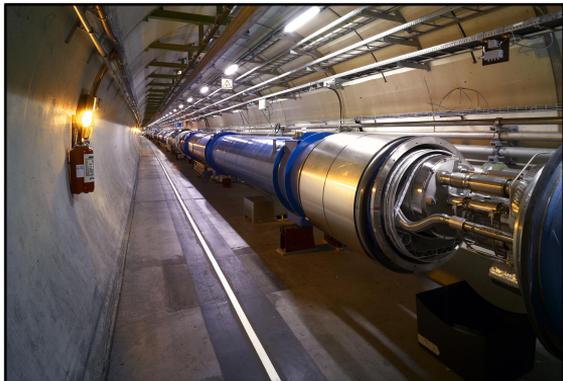


Large Hadron Collider (LHC)

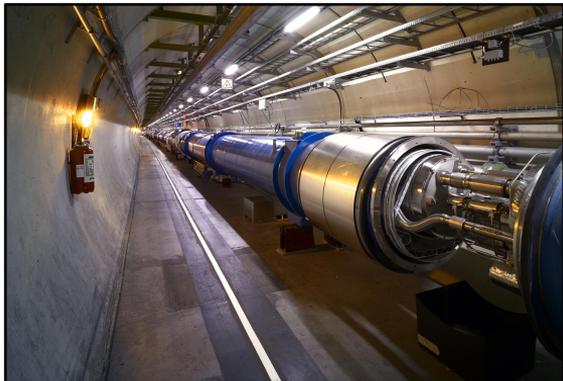
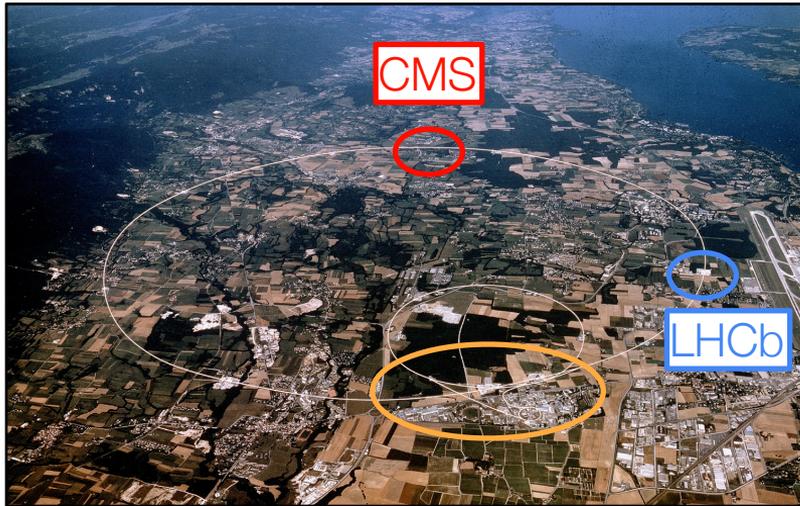


Large → acceleratore circolare 27 km circonferenza.
Hadron → acceleratore di protoni cioè adroni
Collider → protoni collidono in punti determinati lungo la loro orbita

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?

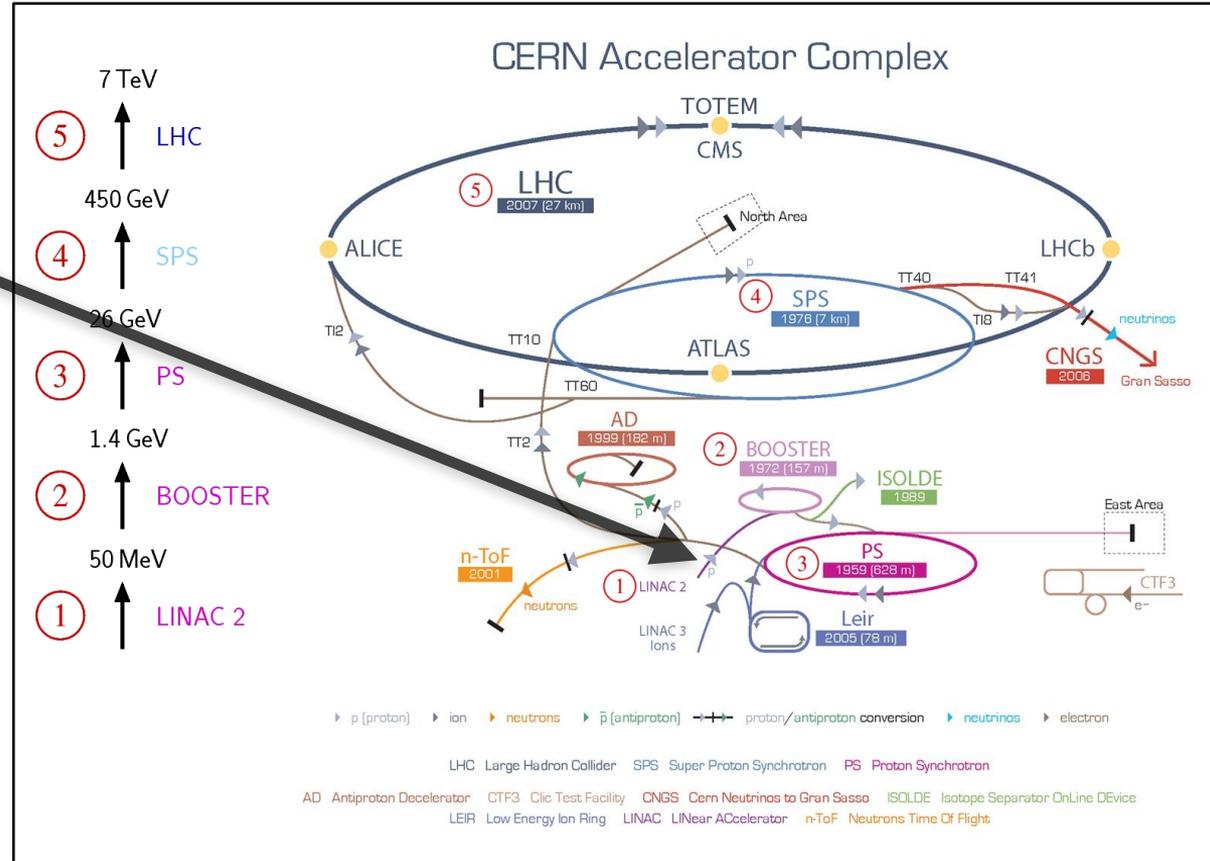
Elettromagnetismo + relatività speciale

- 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

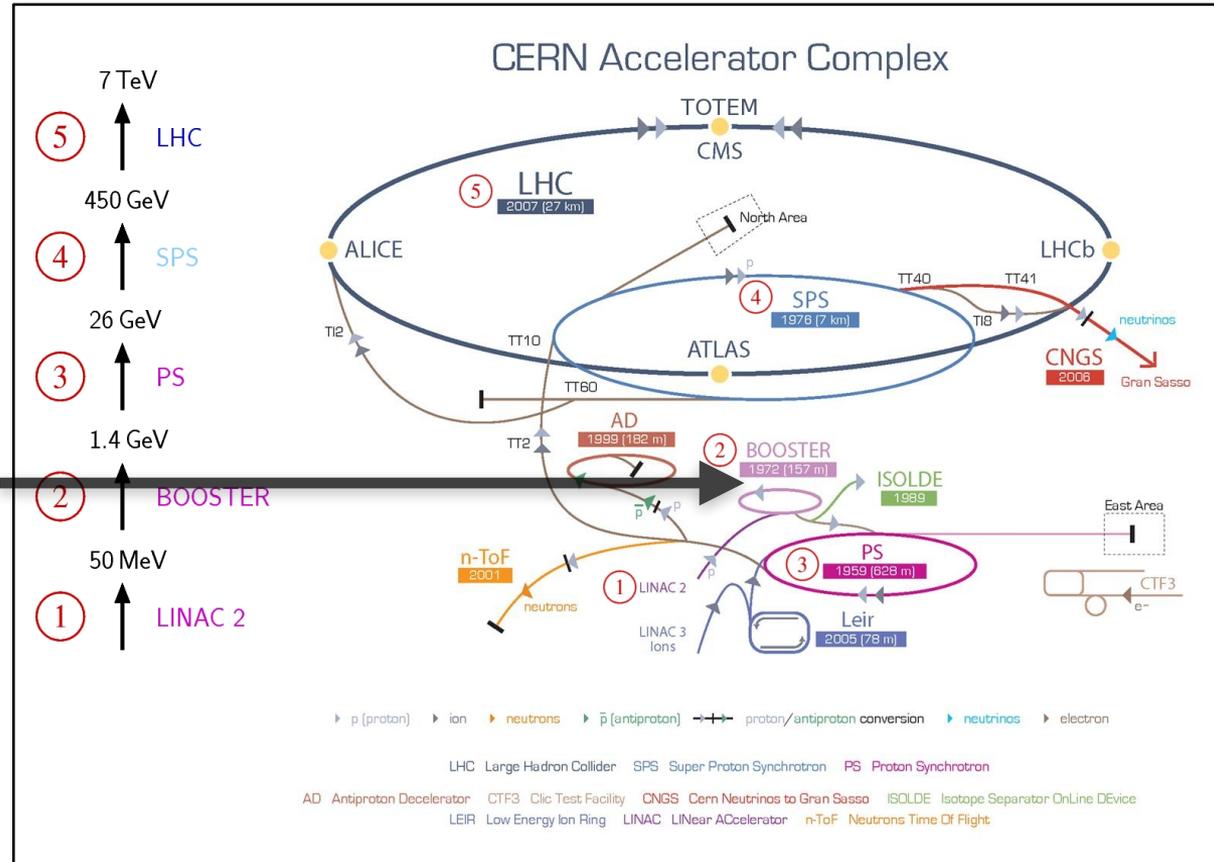
- **Sorgente:** bottiglia di idrogeno (H_2) + ionizzazione
- Acceleratore lineare (**LINAC**)
→ come una pila da 50 MV → energia del fascio 50 MeV
- **Booster:** primo anello circolare che accumula protoni e li porta a 1.4 GeV
- **PS:** sincrotrone circolare porta il fascio a 25 GeV
- **SPS:** sincrotrone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



Come si arriva ad LHC?

Stadi di accelerazione

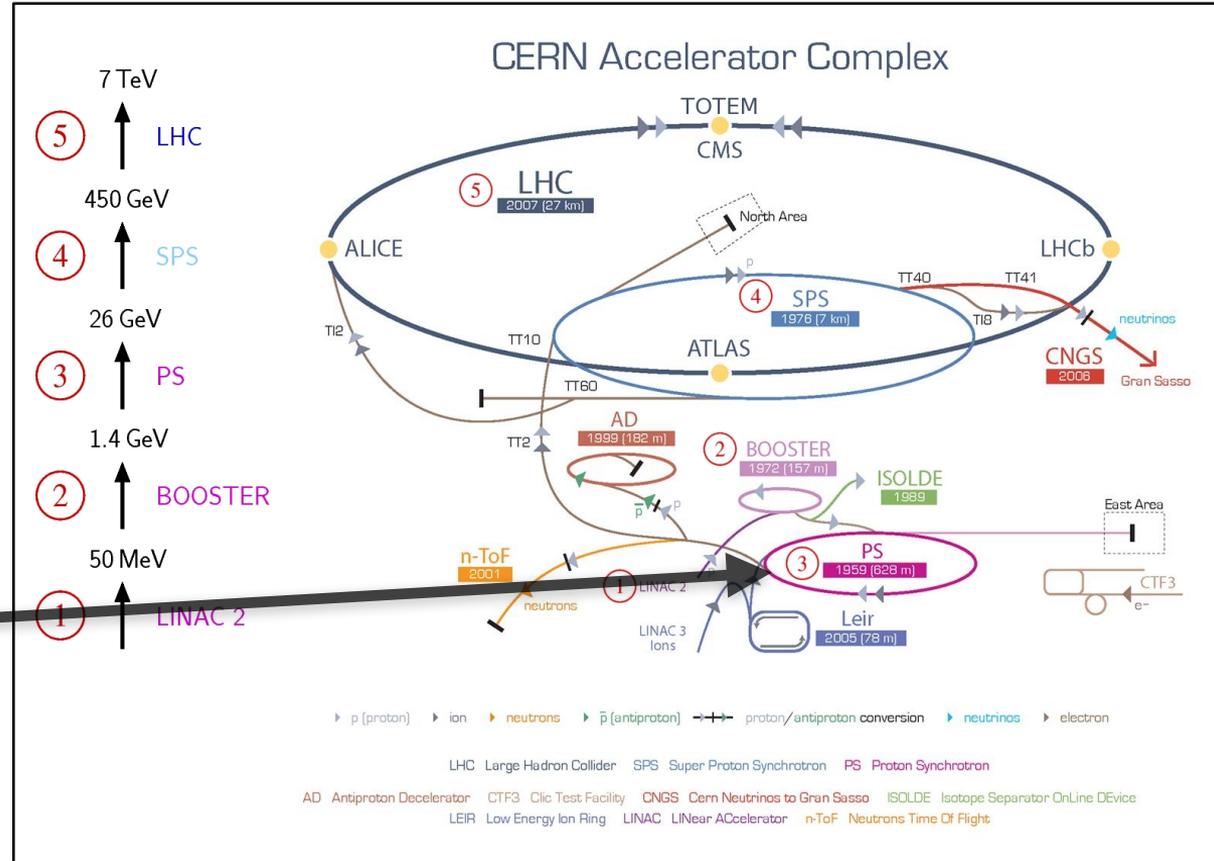
- **Sorgente:** bottiglia di idrogeno (H_2) + ionizzazione
- Acceleratore lineare (**LINAC**)
→ come una pila da 50 MV → energia del fascio 50 MeV
- **Booster:** primo anello circolare che accumula protoni e li porta a 1.4 GeV
- **PS:** sincrotrone circolare porta il fascio a 25 GeV
- **SPS:** sincrotrone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



Come si arriva ad LHC?

Stadi di accelerazione

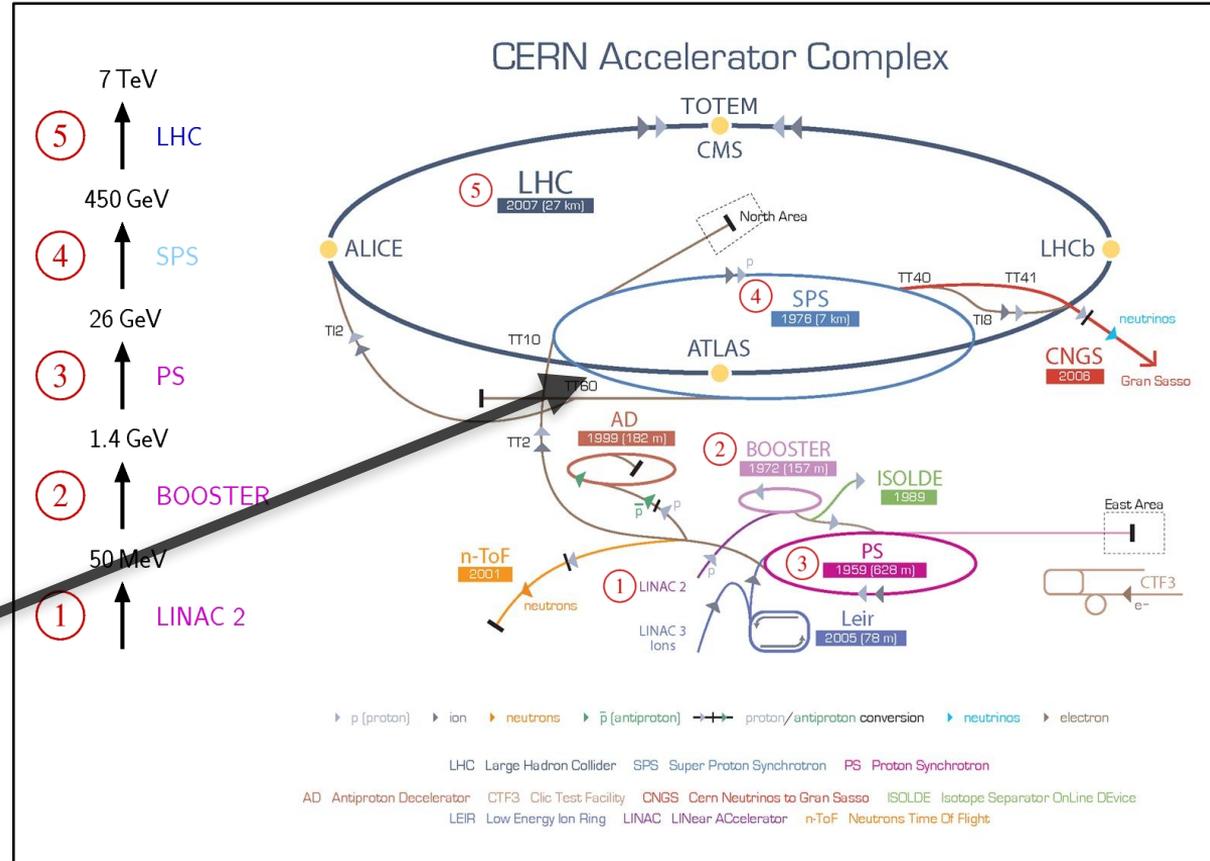
- **Sorgente:** bottiglia di idrogeno (H_2) + ionizzazione
- Acceleratore lineare (**LINAC**)
→ come una pila da 50 MV → energia del fascio 50 MeV
- **Booster:** primo anello circolare che accumula protoni e li porta a 1.4 GeV
- **PS:** sincrotrone circolare porta il fascio a 25 GeV
- **SPS:** sincrotrone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

10⁻¹¹ mbar lungo i
27 km dell'anello ...
P_{LHC} ~ P_{Luna}

LHC è freddo

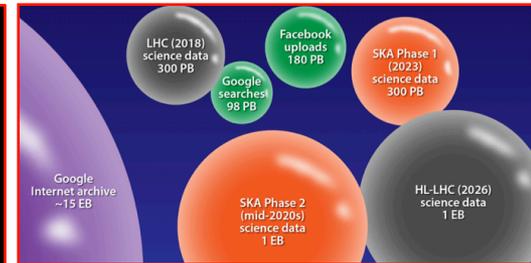
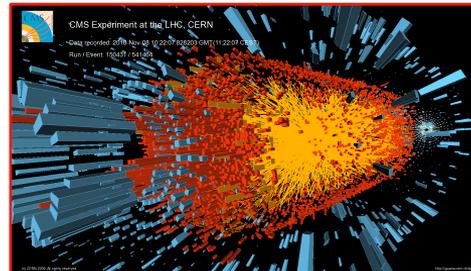
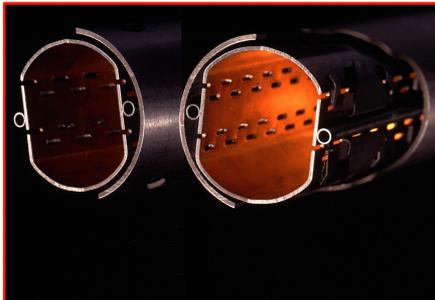
**Più freddo dello spazio
interstellare.**
He-liquido refrigerante per
portare magneti in stato di
super-conduzione.

LHC è caldo

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

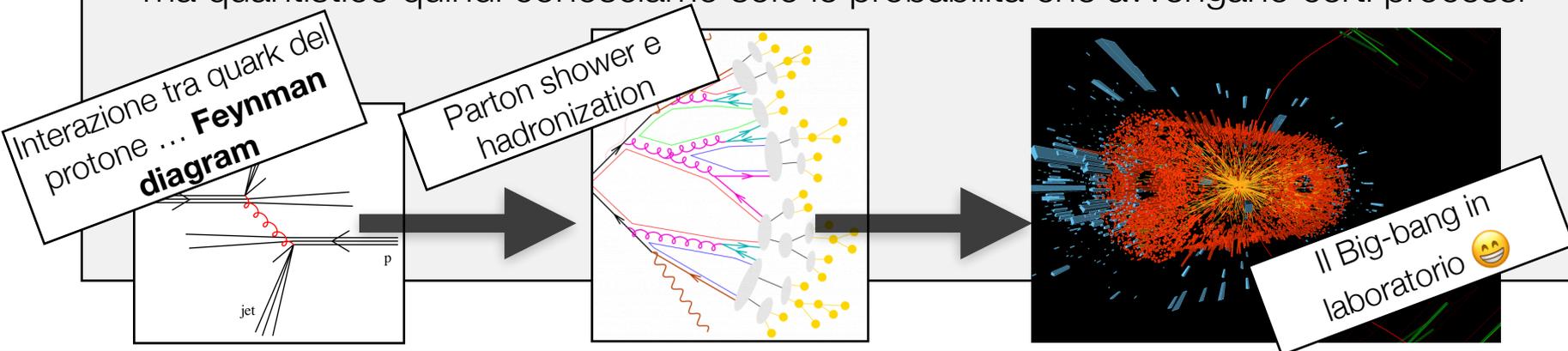
LHC è connesso

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?



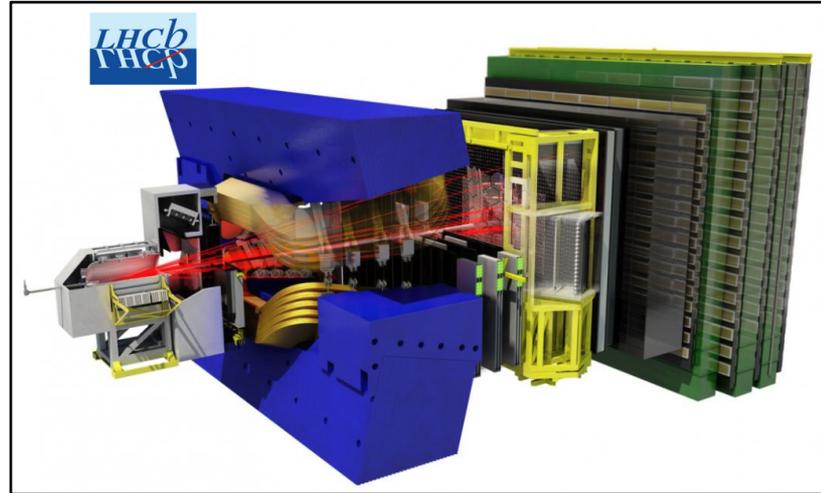
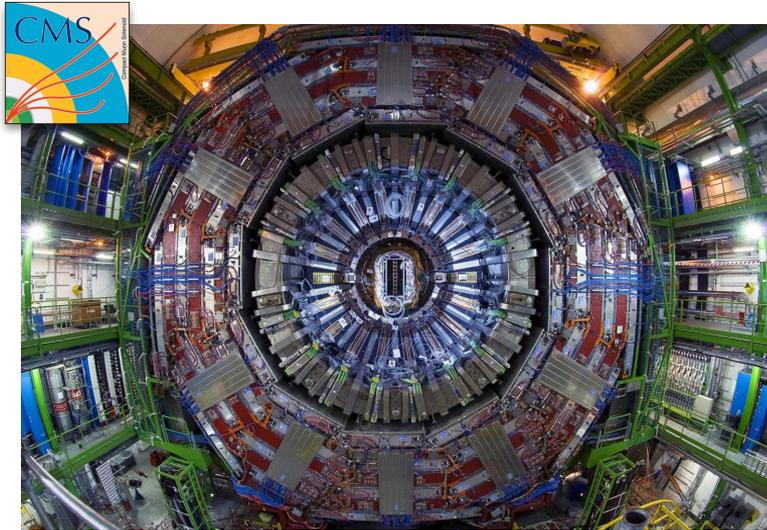
Sono delle macchine fotocamere ad alta risoluzione
Risoluzione di tipo: **spaziale**, **temporale**, **energetica**



**Non queste
macchine
fotografiche!!!**

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

Rivelatori di particelle

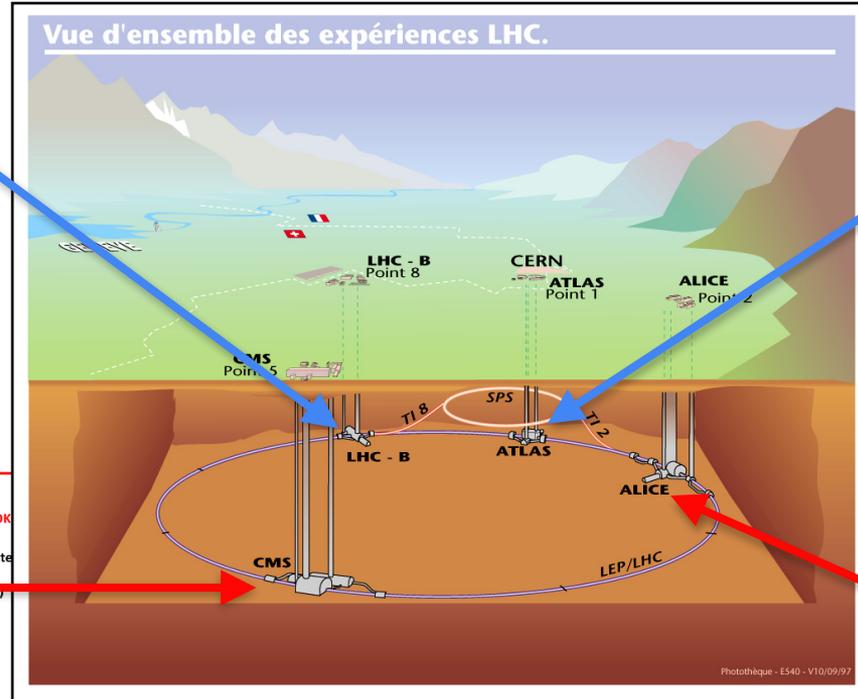


Queste macchine fotografiche!!!

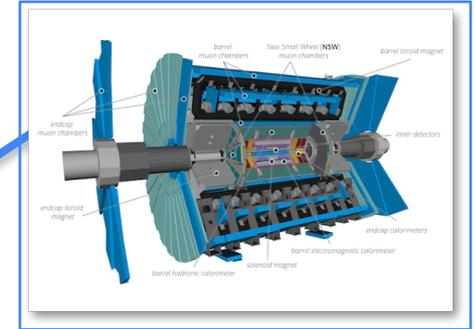
** Chiamate solitamente **rivelatori di particelle** o **detector** o **esperimenti**

Gli esperimenti di LHC

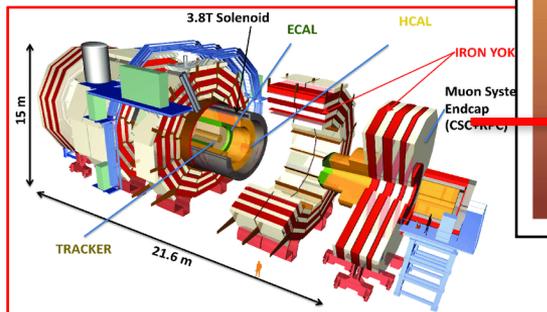
LHCb



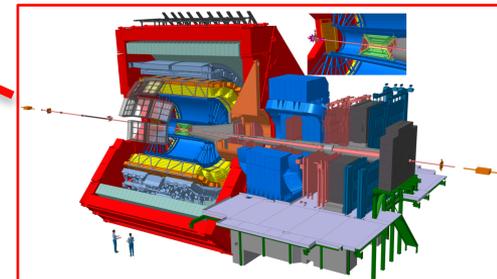
ATLAS



CMS



ALICE



Photothèque - E540 - V10/09/97

Programma di fisica a LHC

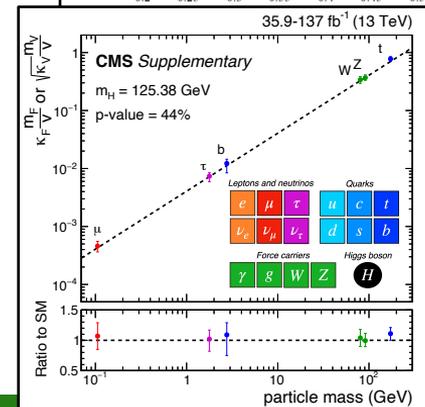
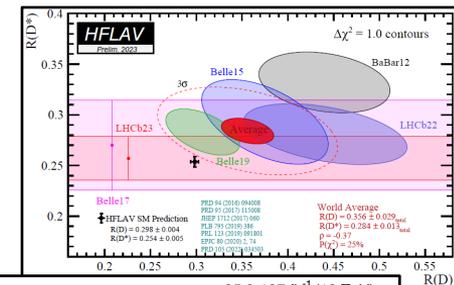
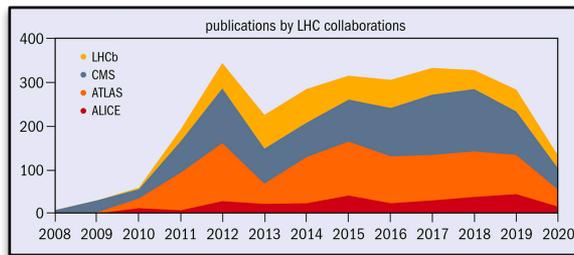
Scopo: studiare interazioni ad una scale di energia mai sondata prima $O(\text{TeV})$

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 !!!**

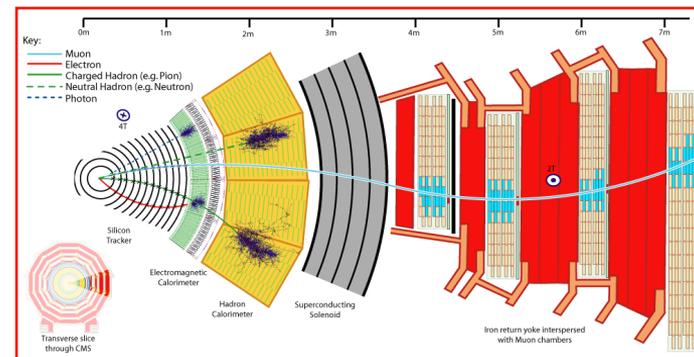
Progetti scientifici	Periodo storico	Costo in \$
Progetto Manhattan	1942-1946	25 miliardi
NASA: moon landing	1957 al 1969	100 miliardi
Stazione spaziale internazionale	1998-oggi	150 miliardi
LHC + esperimenti	1998-oggi	8-10 miliardi

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

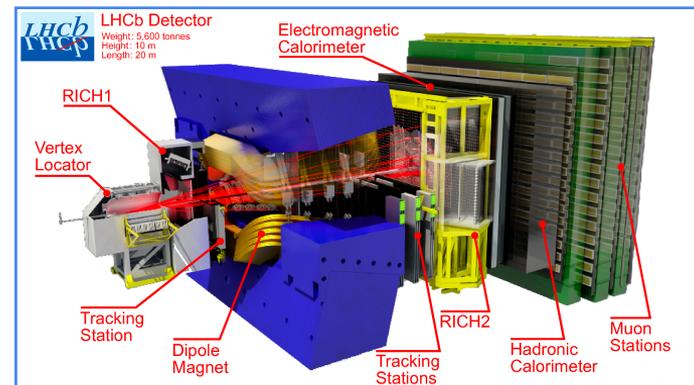
La rivelazione delle particelle

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

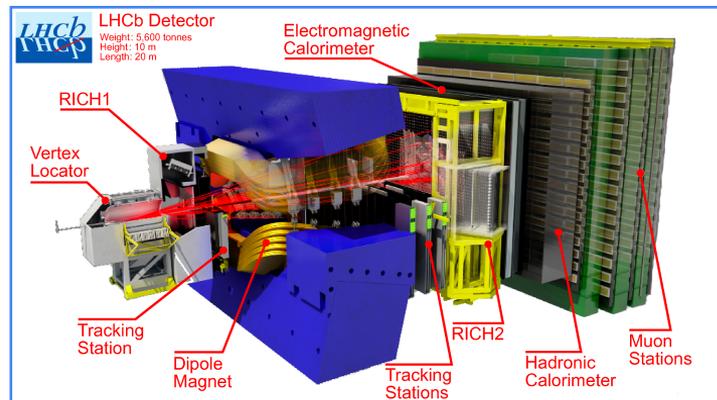
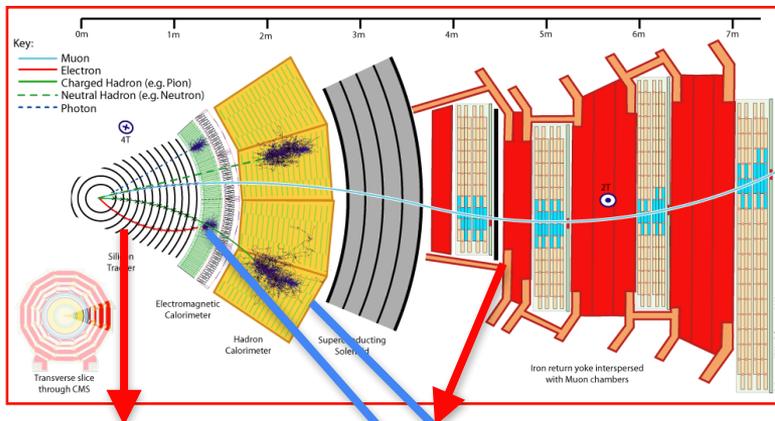


LHCb

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)

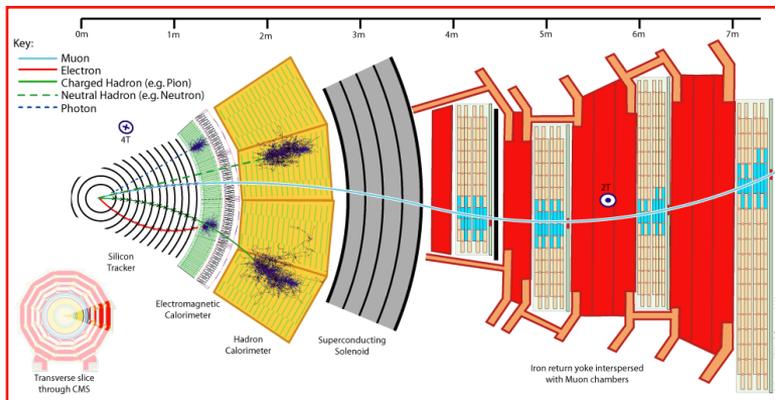
Calorimetri

Elettromagnetico e adronico
basati su scintillatori

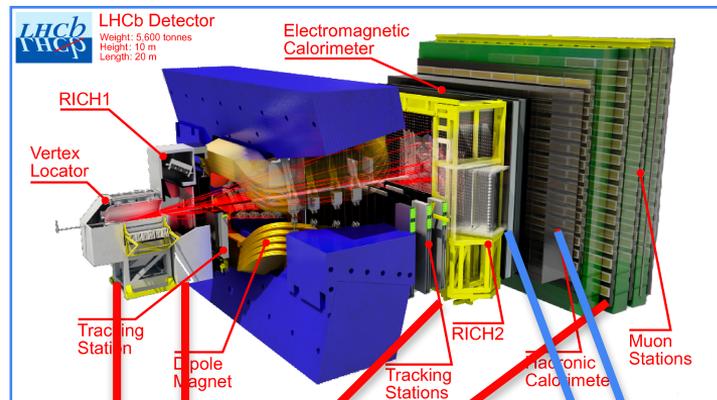
La rivelazione delle particelle

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

CMS



LHCb



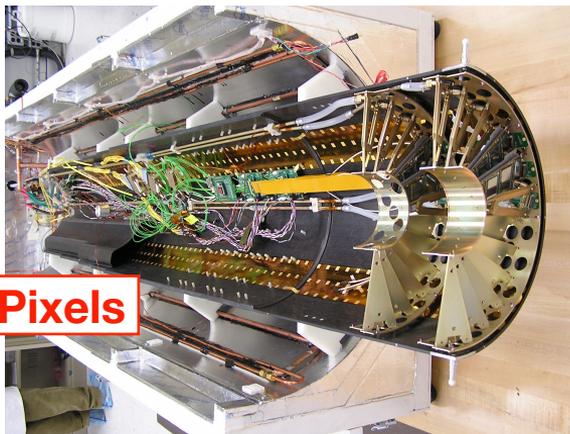
Tracciatori e identificazione

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

Calorimetri

elettromagnetico e adronico
basato su scintillatori

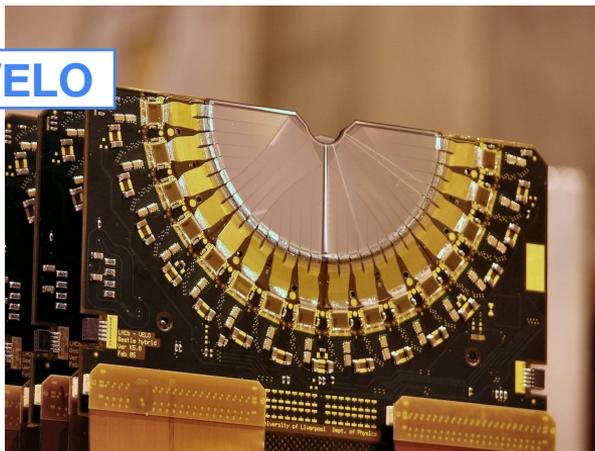
Detector: tracciatori



CMS Si-Pixels



CMS Si-Strips



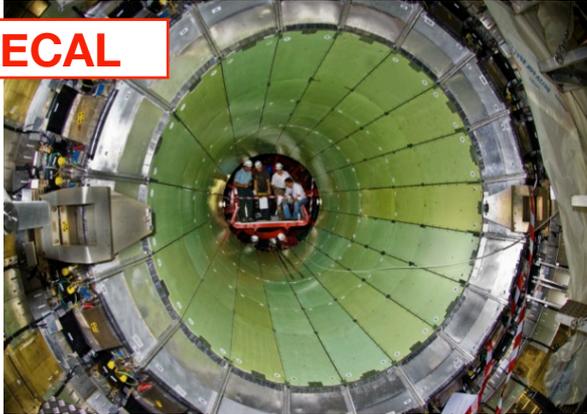
LHCb VELO



LHCb Tracker

Detector: RICH e Calorimetri

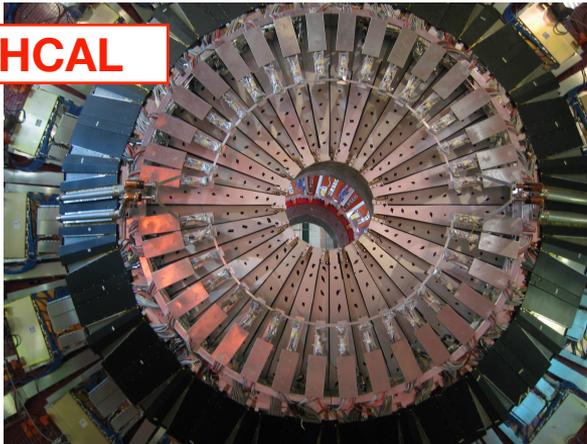
CMS ECAL



RICH LHCb



CMS HCAL



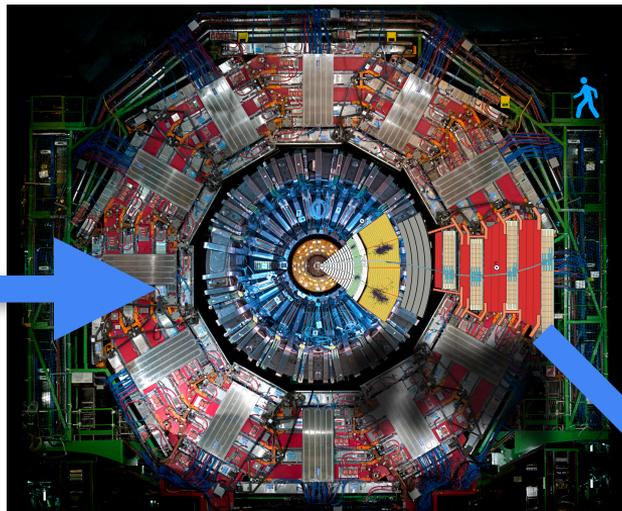
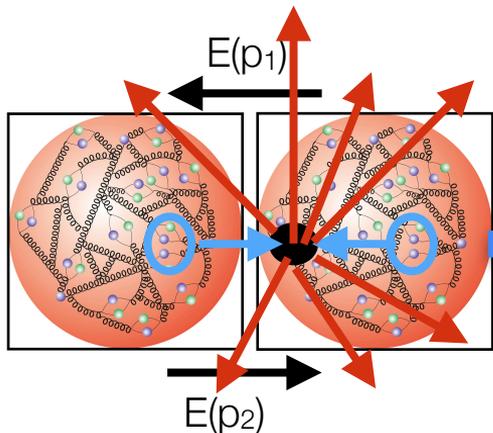
HCAL LHCb



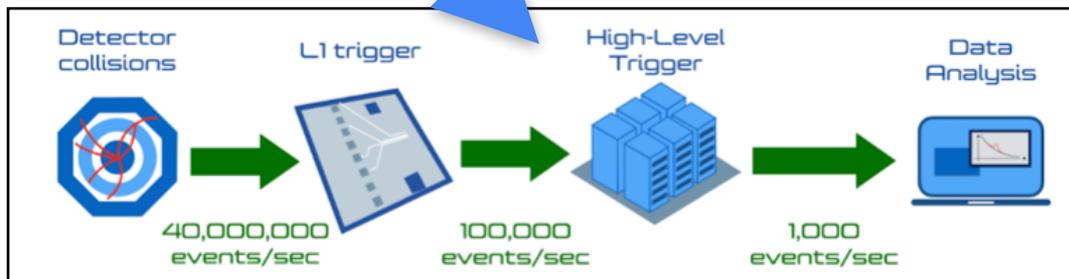
Acquisizione e salvataggio dei dati

Detector

pp collisions



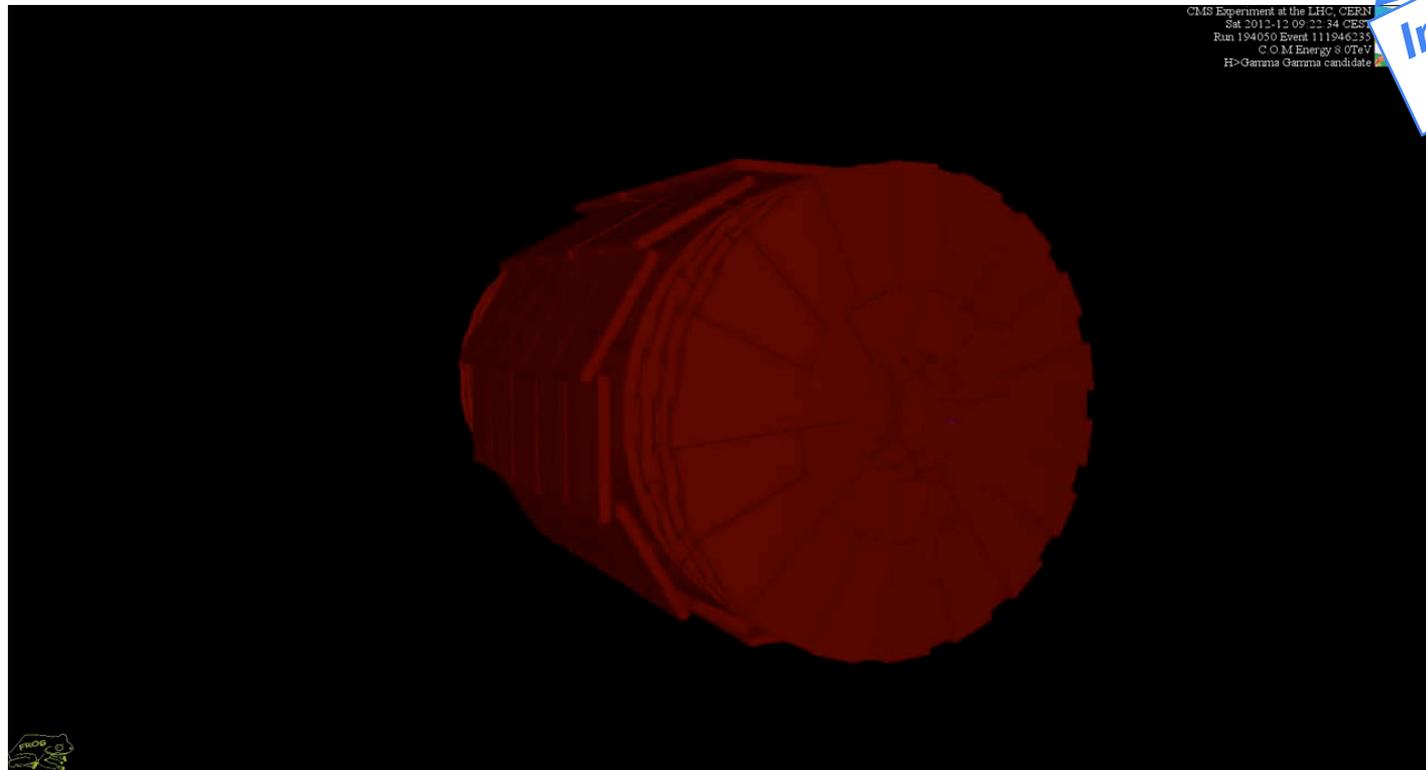
Data acquisition



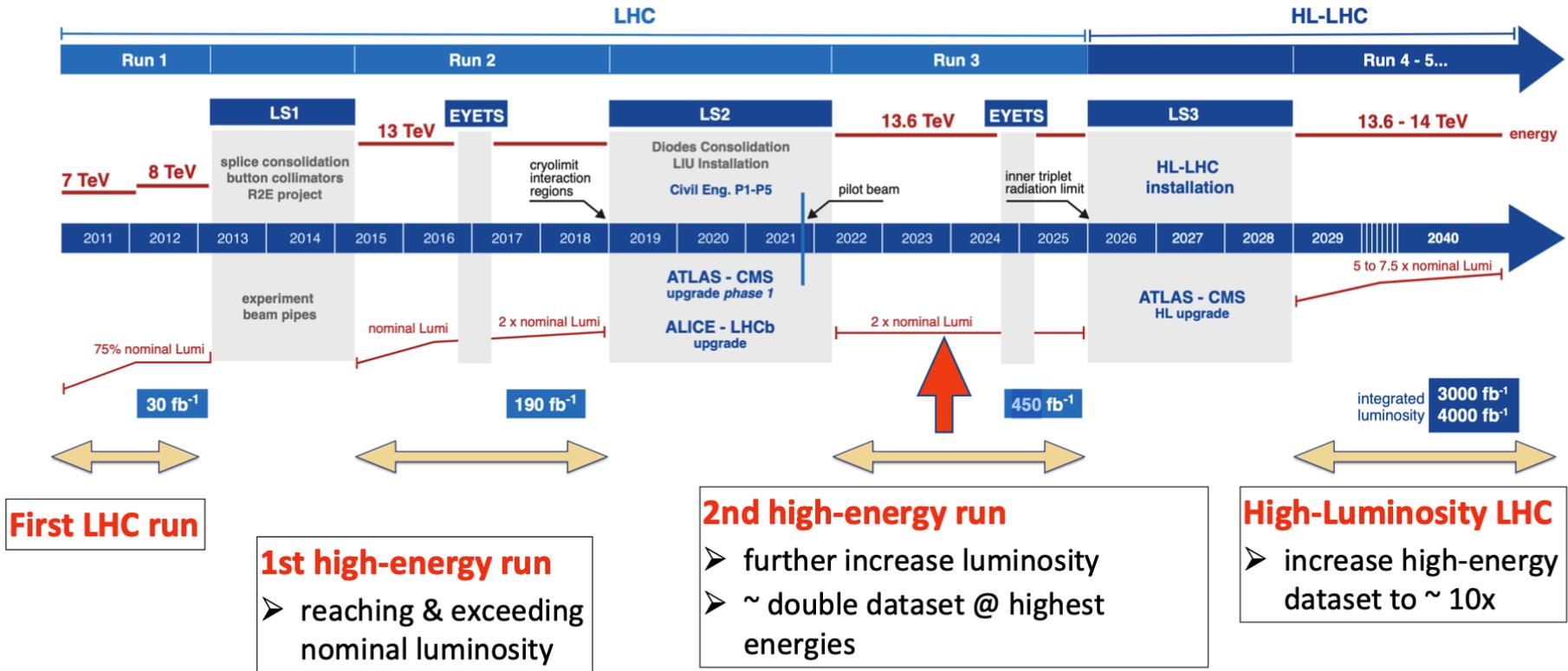
Visualizzazione di un evento

- **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?

