

INTERNATIONAL



MASTERCLASSES 2026

hands on particle physics

Lezione introduttiva

Federico Betti

INFN Sezione di Bologna

IPPOG-INFN International Masterclasses LHCb

25 Marzo 2026



Programma della giornata



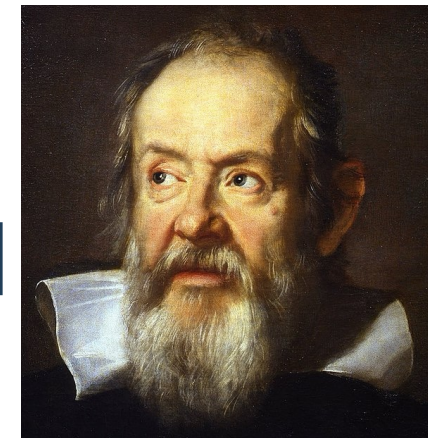
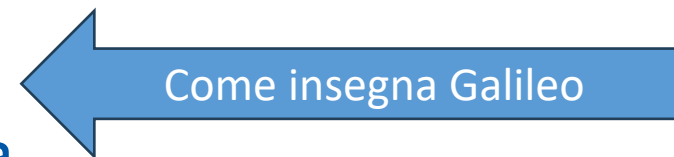
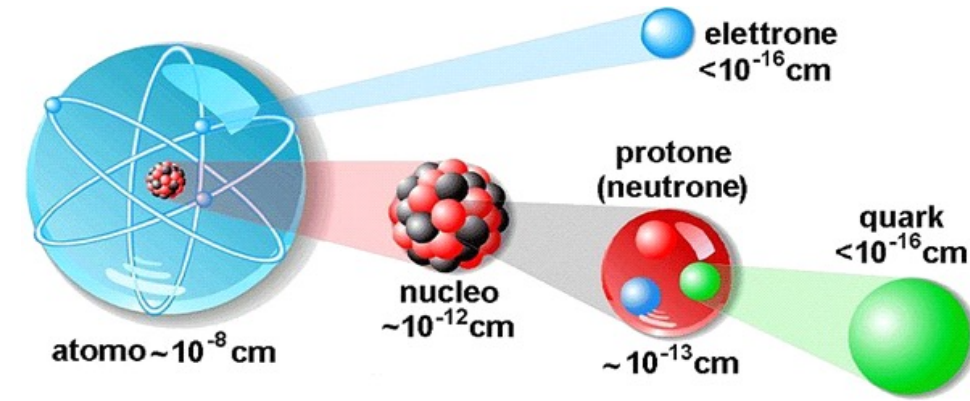
Orario	Argomento
ore 10:00	Benvenuto + lezione su fisica delle Particelle (prima parte)
ore 11:15	Pausa
ore 11:30	Lezione sulla fisica delle Particelle (seconda parte)
ore 12:30	Pranzo
ore 13:30	Preparazione per gli esercizi
ore 14:00	Svolgimento degli esercizi
ore 15:30	Discussione sul lavoro svolto
ore 16:00	Collegamento con il CERN
ore 17:30	Fine

Questa presentazione è fortemente ispirata a presentazioni passate svolte da Claudia Patrignani e Fabio Ferrari

Quali sono gli obiettivi della fisica delle particelle?

Obiettivi della fisica delle particelle

- Capire quali sono i costituenti fondamentali della materia (**particelle**)
- Capire come i costituenti interagiscono tra di loro (**forze**)
- Fornire un **modello** che descriva tutto questo
- **Testare** il modello: funziona per spiegare tutti i fenomeni fisici che vediamo nell'infinitamente piccolo e nell'infinitamente grande? (spoiler: **non del tutto...**)
- **Ripetere** il processo con nuovi esperimenti e predizioni teoriche per **migliorare** sempre di più la conoscenza

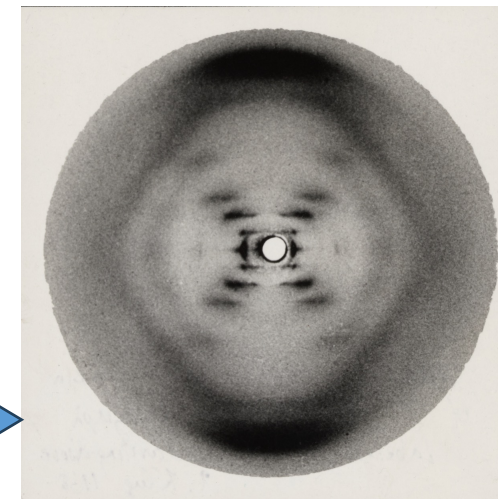


Come studiare l'infinitamente piccolo?

- **Microscopio ottico:** usa luce visibile
⇒ risoluzione massima circa $0.2\mu\text{m}$
- **Limite:** non si può avere risoluzione migliore della lunghezza d'onda della luce utilizzata!
- Serve una sonda con **lunghezza d'onda** più piccola
- La luce è solo una piccola parte dello spettro elettromagnetico, si può usare radiazione elettromagnetica con lunghezza d'onda minore (**raggi X**)

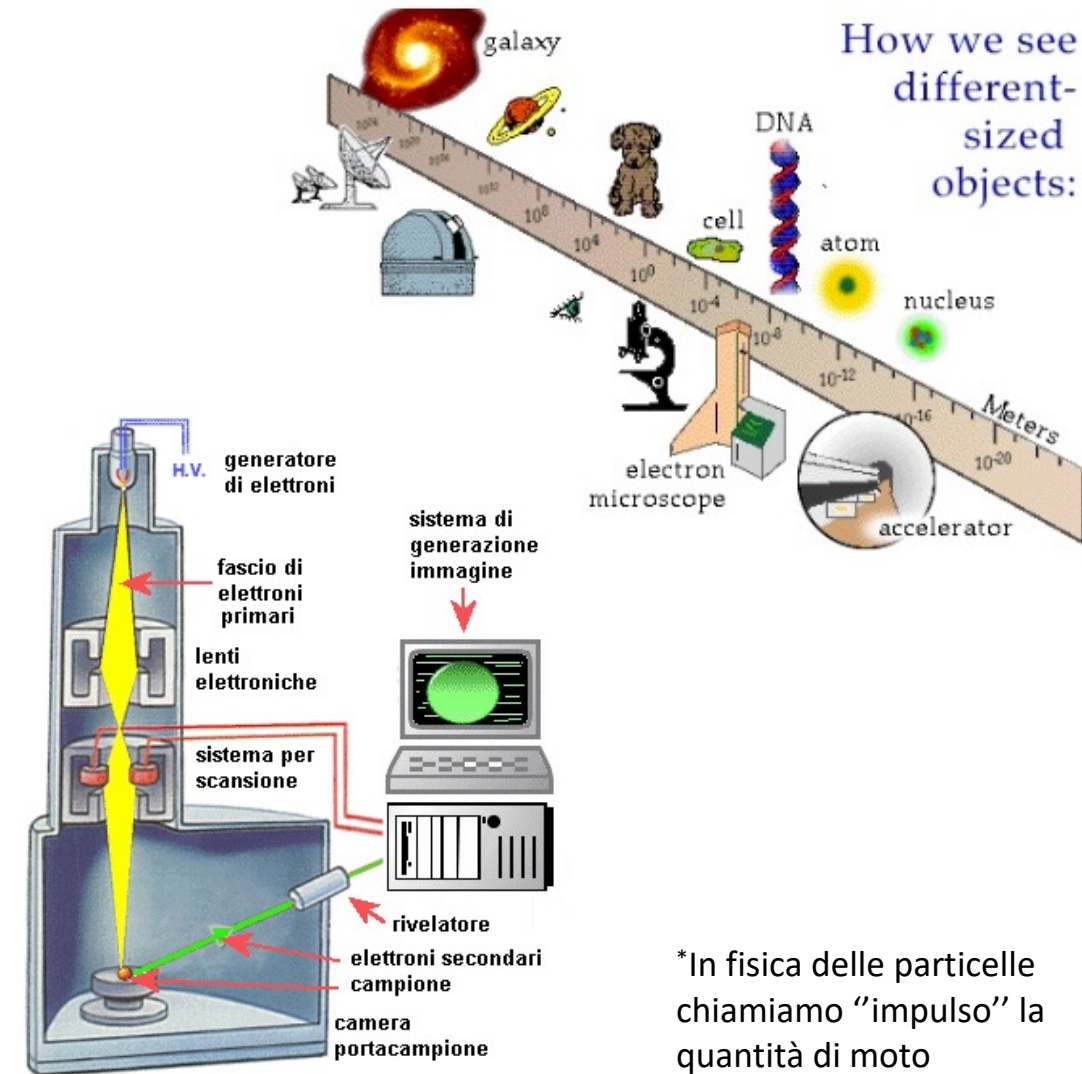


Usati ad esempio per "fotografare" il DNA



Come studiare l'infinitamente piccolo?

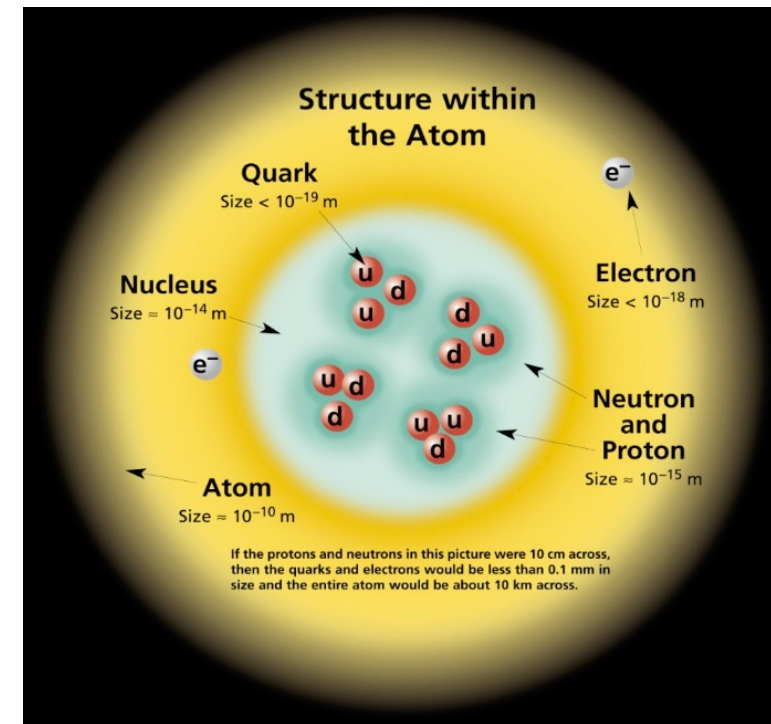
- Ma si possono anche usare **particelle** al posto della luce!
- Per il dualismo **onda-corpuscolo** della meccanica quantistica (De Broglie), una particella di impulso* p ha una lunghezza d'onda $\lambda = \frac{h}{p}$
- Più alto è l'impulso (e quindi l'energia), più piccole sono le dimensioni che riusciamo a studiare!
- È il principio di funzionamento del **microscopio elettronico**, in cui fasci di elettroni vengono usati invece della luce



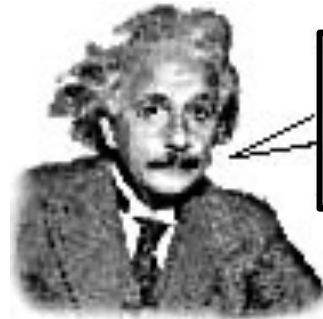
*In fisica delle particelle chiamiamo "impulso" la quantità di moto

Come studiare l'infinitamente piccolo?

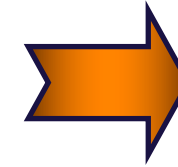
- Col **microscopio elettronico** si arriva a vedere dimensioni di circa 0.2nm (1000 volte più potente del microscopio ottico!)
- I nuclei atomici sono grandi circa 10^{-15} m (e quark ed elettroni ancora più piccoli) \Rightarrow serve una sonda ancora più energetica per studiarli
- Ecco che entrano in gioco gli **acceleratori** di particelle!
- Ma questo non è l'unico vantaggio del far scontrare particelle altamente energetiche...



Equivalenza massa-energia

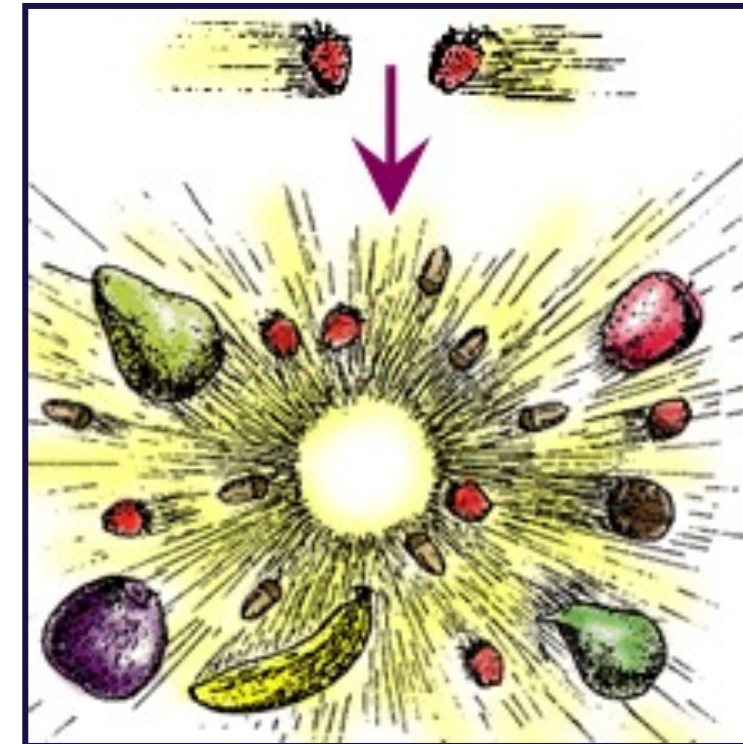


*La massa è una
forma di energia*



$$E=mc^2$$

- Nello scontro di particelle, parte della loro **energia** può diventare **massa**, e quindi trasformarsi in altre particelle (sempre a patto che la somma totale di massa e energia rimanga costante)
- Questo permette la **creazione** di tantissime **particelle** che non vediamo in natura e che possiamo così studiare



Cosa sappiamo oggi?

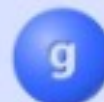


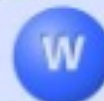
Il Modello Standard della fisica delle particelle

6 quark

UP mass $2,3 \text{ MeV}/c^2$ charge $\frac{2}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ 	CHARM mass $1,275 \text{ GeV}/c^2$ charge $\frac{2}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ 	TOP mass $173,07 \text{ GeV}/c^2$ charge $\frac{2}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ 
DOWN mass $4,8 \text{ MeV}/c^2$ charge $-\frac{1}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ 	STRANGE mass $95 \text{ MeV}/c^2$ charge $-\frac{1}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ 	BOTTOM mass $4,18 \text{ GeV}/c^2$ charge $-\frac{1}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ 

6 leptoni

ELECTRON mass $0,511 \text{ MeV}/c^2$ charge -1 spin $\frac{1}{2}$ 	MUON mass $105,7 \text{ MeV}/c^2$ charge -1 spin $\frac{1}{2}$ 	TAU mass $1,777 \text{ GeV}/c^2$ charge -1 spin $\frac{1}{2}$ 
ELECTRON NEUTRINO mass $<2,2 \text{ eV}/c^2$ charge 0 spin $\frac{1}{2}$ 	MUON NEUTRINO mass $<0,17 \text{ MeV}/c^2$ charge 0 spin $\frac{1}{2}$ 	TAU NEUTRINO mass $<15,5 \text{ MeV}/c^2$ charge 0 spin $\frac{1}{2}$ 

GLUON mass 0 charge 0 spin 1 
PHOTON mass 0 charge 0 spin 1 
Z BOSON mass $91,2 \text{ GeV}/c^2$ charge 0 spin 1 
W BOSON mass $80,4 \text{ GeV}/c^2$ charge ± 1 spin 1 

GAUGE BOSONS

HIGGS BOSON mass $126 \text{ GeV}/c^2$ charge 0 spin 0 

Un bosone di Higgs

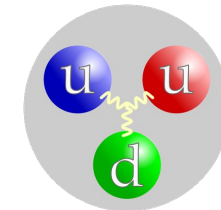
4 mediatori di forze

Per ogni particella (eccetto i bosoni neutri) esiste una antiparticella!

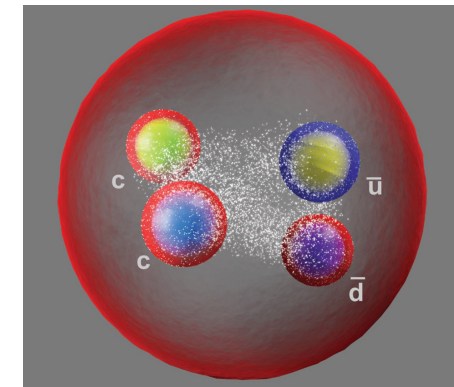
UP mass 2,3 MeV/c ² charge 2/3 spin 1/2 	CHARM 1,275 GeV/c ² 2/3 1/2 	TOP 173,07 GeV/c ² 2/3 1/2 
DOWN 4,8 MeV/c ² -1/3 1/2 	STRANGE 95 MeV/c ² -1/3 1/2 	BOTTOM 4,18 GeV/c ² -1/3 1/2 

Gli Adroni possono essere:

- **Mesoni**: un quark e un antiquark (es. $D^0 = c\bar{u}$)
- **Barioni**: 3 quark (es. $p = uud$)
- **Tetraquark**: 2 quark e 2 antiquark (es. $T_{cc}^+ = cc\bar{d}\bar{u}$)
- **Pentaquark**: 4 quark e 1 antiquark (es. $P_c = uudc\bar{c}$)
- Ecc....

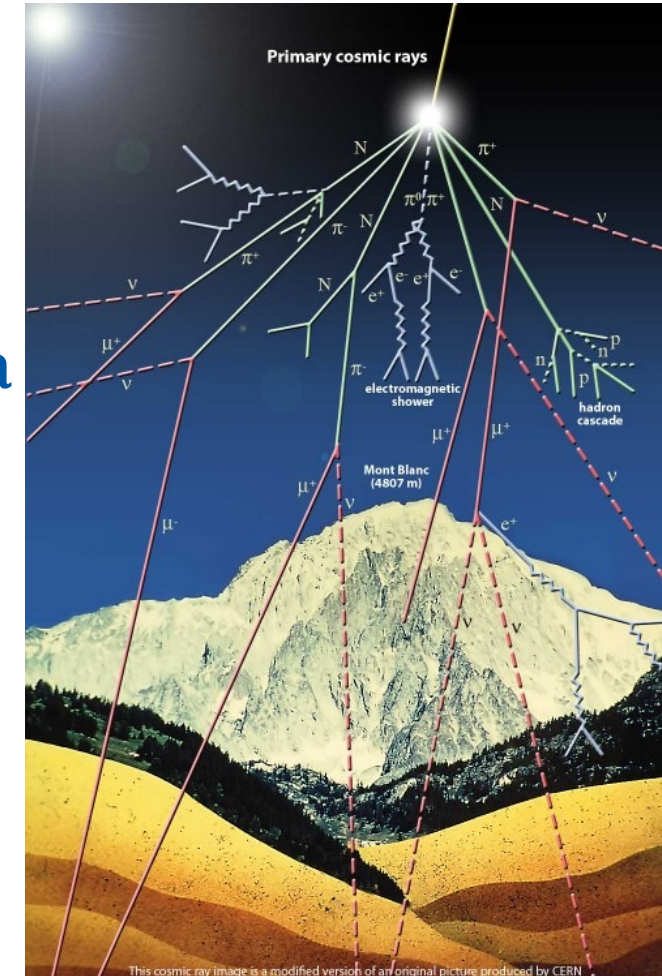


- I quark più leggeri (u e d) formano i **protoni** e **neutroni** della materia ordinaria
- Oltre alla carica elettrica portano una carica di **colore** (ce ne sono 6 in tutto)
- Non è possibile vederli isolati, ma solo legati in **adroni**



- Il leptone carico più leggero è **l'elettrone**, a noi familiare, **muone** e **tauone** sono i suoi cugini più pesanti
- Il muone è visibile nei **raggi cosmici**
- I **neutrini** sono quasi privi di massa e molto difficili da osservare, ma molto presenti nelle reazioni nucleari

ELECTRON 0,511 MeV/c ² -1 ½ 	MUON 105,7 MeV/c ² -1 ½ 	TAU 1,777 GeV/c ² -1 ½ 
ELECTRON NEUTRINO <2,2 eV/c ² 0 ½ 	MUON NEUTRINO <0,17 MeV/c ² 0 ½ 	TAU NEUTRINO <15,5 MeV/c ² 0 ½ 



Le forze di interazione

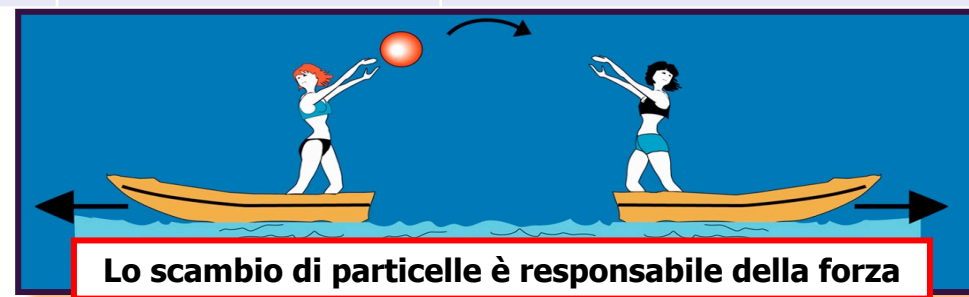
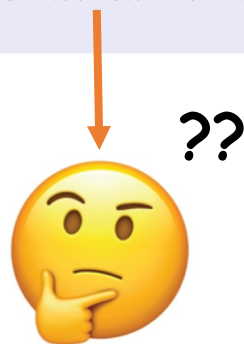
GLUON
0
0
1 **g**

PHOTON
0
0
1 **γ**

Z BOSON
91,2 GeV/c²
0
1 **Z**

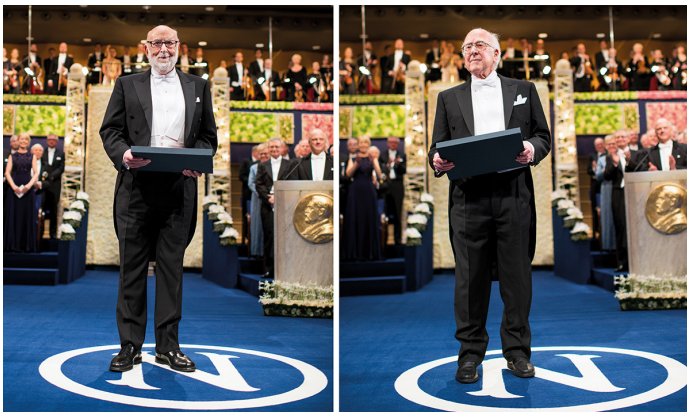
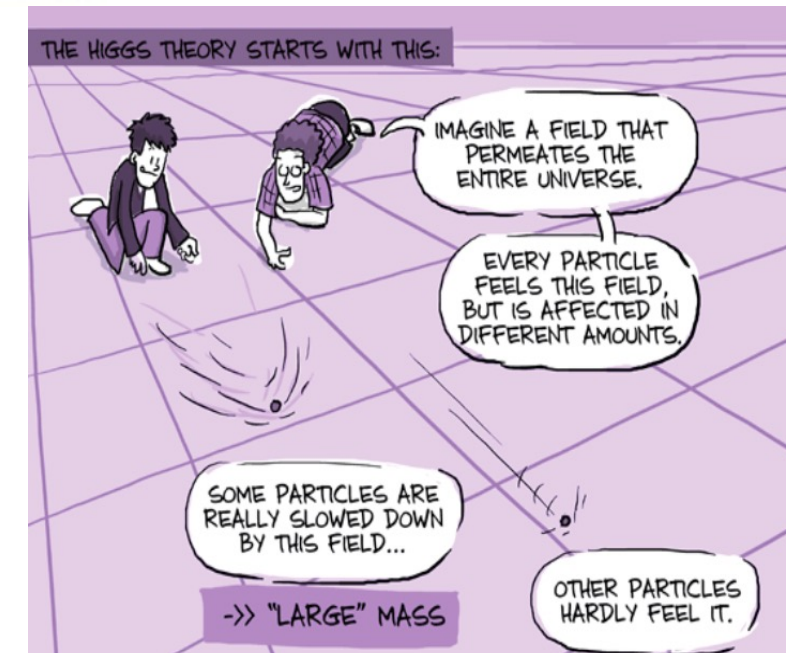
W BOSON
80,4 GeV/c²
±1
1 **W**

Tipo di forza	Intensità relativa	“Carica”	Dove si manifesta (esempi)
Nucleare forte	1	Colore	Nuclei atomici
Elettromagnetica	0.001	Carica elettrica	Elettricità, magnetismo
Nucleare debole	0.00001	Carica debole	Decadimenti radioattivi, reazioni nucleari stellari
Gravitazionale	10 ⁻³⁸	Massa	Caduta dei gravi, moti celesti



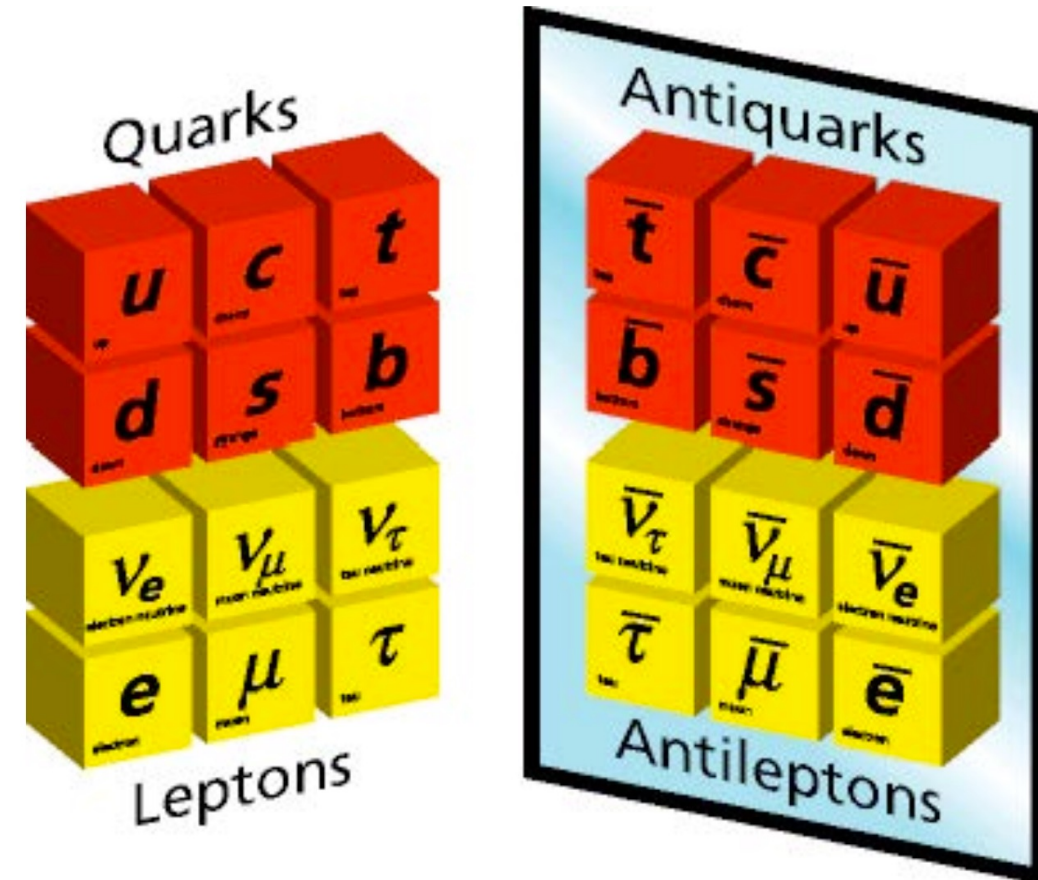
Il bosone di Higgs

- **Englert, Brout e Higgs** ipotizzarono l'esistenza di un campo che permea tutto l'Universo e che, interagendo con le particelle fondamentali con differente intensità, dà loro diversi valori di **massa**
- Osservato nel 2012 da ATLAS e CMS!
⇒ valse il **Nobel** a Higgs e Englert!



L'antimateria

- Ogni particella (eccetto i bosoni neutri) ha una corrispettiva **antiparticella**, uguale a essa ma con numeri quantici (come la carica) opposti
- Quando particella e antiparticella si incontrano si **annichilano** (si convertono spesso in coppie di fotoni)
- Non presenti nella vita quotidiana, ma osservabili ad esempio nei raggi **cosmici**
- Prodotti (oltre che negli acceleratori) nei decadimenti, usati anche a fini medici (**PET**)



Video sulla scoperta dell'antimateria:

<https://www.youtube.com/watch?v=Y-W-w8yNiKU>

Cosa ci resta da capire?

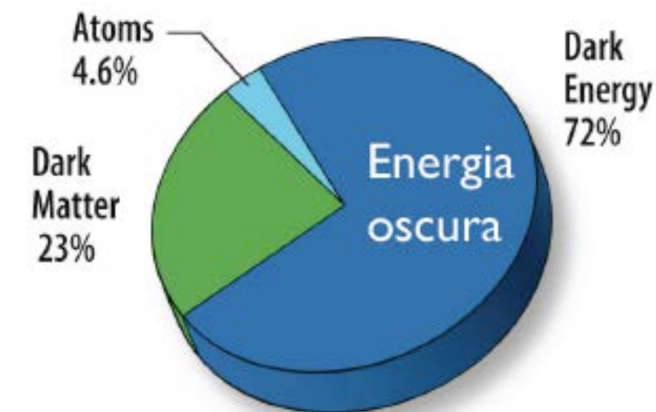
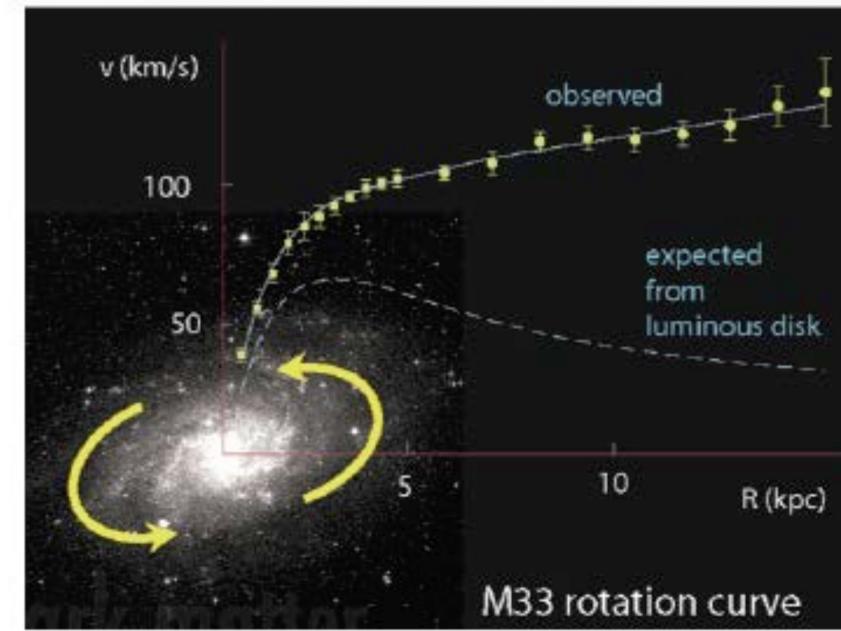
Asimmetria materia-antimateria

- Ci si aspetta che dal **Big Bang** materia e antimateria siano state prodotte in egual misura, ma oggi non abbiamo evidenza di una quantità apprezzabile di antimateria → come è sparita?
- **Qualitativamente** il Modello Standard ha tutti gli ingredienti per spiegare l'asimmetria materia-antimateria (violazione *CP*)
- **Quantitativamente NO**: le predizioni sono sbagliate di **10 ordini di grandezza rispetto** alle osservazioni sperimentali
- Questo è uno dei principali ambiti di ricerca dell'esperimento **LHCb**

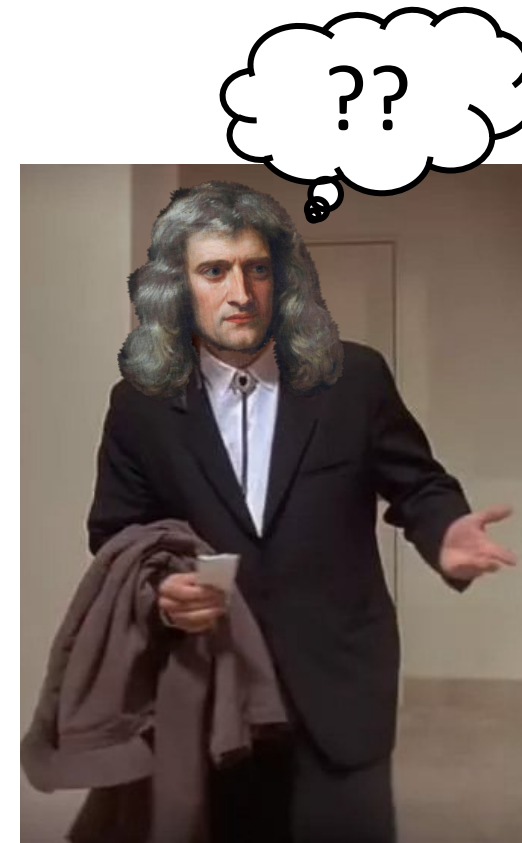


Materia e energia oscura

- L'universo ha una **massa molto maggiore** di quella visibile dovuta alla materia ordinaria
- Ce ne siamo accorti misurando la **velocità di rotazione delle galassie**, che dipende dalla massa all'interno dell'orbita
- La massa misurata è circa 20 volte più grande di quella visibile \Rightarrow deve esistere qualcosa oltre la materia ordinaria, che noi chiamiamo **Materia oscura!**
- La **cerchiamo** con esperimenti dedicati (ad esempio ai Laboratori del Gran Sasso) o negli acceleratori di particelle
- E non basta: la velocità di espansione dell'universo non è compatibile con la sua massa \Rightarrow **Energia oscura?**



- La **gravità** è la più debole delle interazioni
- È importante a distanze macroscopiche in presenza di grandi masse, ma è del tutto **trascurabile** quando si ha a che fare con singole particelle
- La gravità non è inclusa nel **Modello Standard**
- Non siamo ancora riusciti a **integrare** in maniera completa la sua descrizione all'interno di una teoria coerente



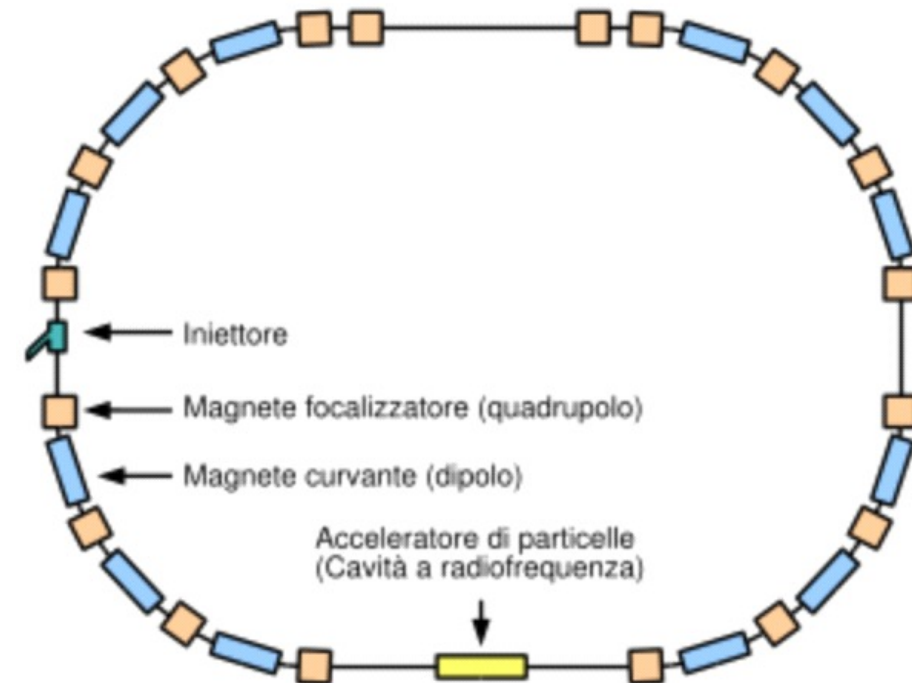
GLUON	
0	g
0	
1	
PHOTON	
0	γ
0	
1	
Z BOSON	
91,2 GeV/c ²	
0	Z
1	
W BOSON	
80,4 GeV/c ²	
±1	W
1	

- Perché 3 **famiglie** di quark e 3 di leptoni?
- Perché le **masse** delle particelle sono così diverse?
- Quali sono le masse dei **neutrini**?
- Perché non vediamo **asimmetria** materia-antimateria nelle interazioni **forti**?

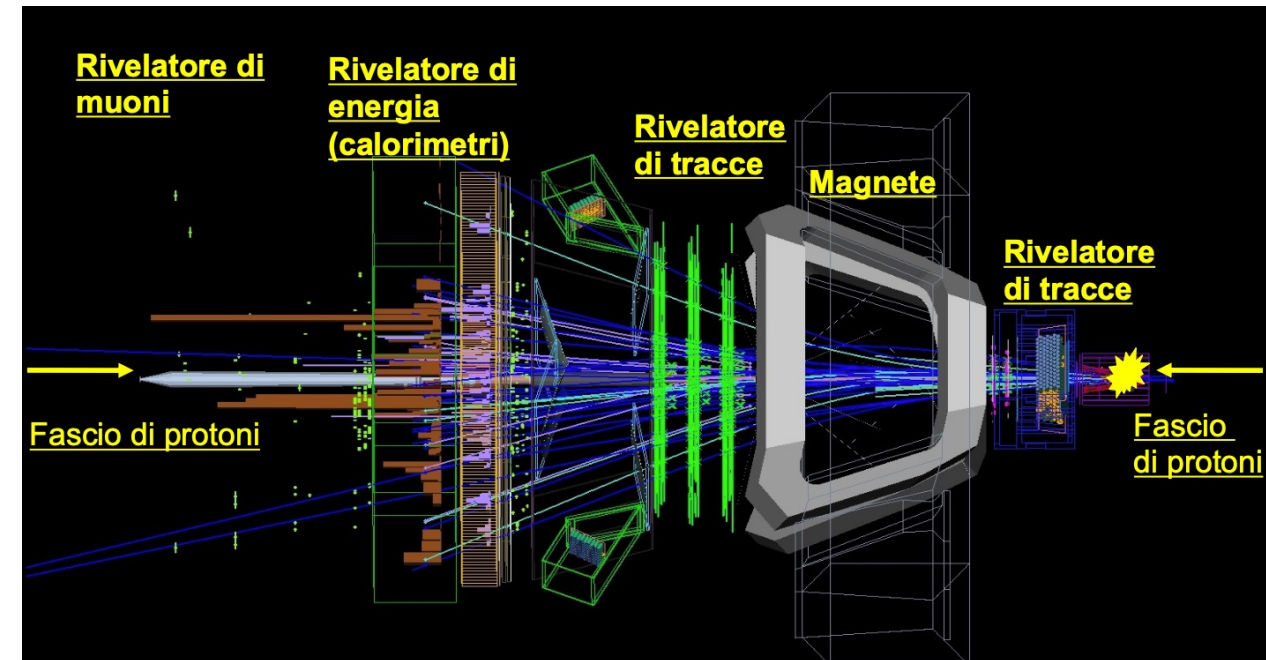
- I fisici teorici producono continuamente **nuovi modelli** teorici che estendono o cambiano il Modello Standard
- Alcuni modelli prevedono le cosiddette particelle **supersimmetriche**, cioè particelle molto più pesanti associate alle particelle ordinarie
- Altri modelli ipotizzano un secondo bosone di **Higgs** o un bosone **Z** aggiuntivo
- Altri modelli ipotizzano particelle che interagiscono contemporaneamente con leptoni e quark (i **leptoquark**)

Quali strumenti utilizziamo?

- Facendo collidere particelle ad **alta energia**, possiamo **crearne** molte altre per studiarle
- È necessario avere milioni di collisioni al secondo per accumulare moltissima **statistica**: alcune particelle che cerchiamo (e/o i loro decadimenti) possono essere prodotte molto **raramente**
- Gli acceleratori possono essere sia **lineari** che **circolari** (pro e contro in entrambi i casi)
- Molte **applicazioni** oltre la ricerca: medicina, cristallografia, analisi di semiconduttori, analisi di opere d'arte...



- Le particelle create vanno poi viste, ovviamente non a occhio nudo ma cercando le **tracce** che lasciano nel rivelatore
- Non solo le tracce sono importanti, ma anche altre proprietà come **energia e impulso**
- Un rivelatore è generalmente formato da vari **sottorivelatori**, ognuno con una **funzione** specifica



- Quasi tutte le particelle che vogliamo studiare vivono pochi millimetri (o anche pochi micron, o addirittura meno) prima di **decadere**, cioè trasformarsi in altre particelle che poi attraversano il rivelatore e vengono rilevate
- Si fa perciò una **ricostruzione** a ritroso della particella iniziale partendo dalle particelle dello **stato finale**

- Quasi tutte le particelle che vogliamo studiare vivono pochi millimetri (o anche pochi micron, o addirittura meno) prima di **decadere**, cioè trasformarsi in altre particelle che poi attraversano il rivelatore e vengono rilevate
- Si fa perciò una **ricostruzione** a ritroso della particella iniziale partendo dalle particelle dello **stato finale**



Un po' come Aragorn quando ricostruisce
le vicende di Merry e Pipino...



- Il **Large Hadron Collider** (LHC) è il più potente acceleratore di particelle al mondo, installato in un tunnel lungo 27 km al CERN, vicino a Ginevra
- Due fasci di **protoni** circolanti in versi opposti (ma anche fasci di **nuclei** leggeri e pesanti!)
- **4 rivelatori** posti su LHC
- Progettato per lavorare fino a 7 TeV di **energia** per ciascuno dei due fasci



- Ma cos'è un TeV?
- **L'energia** è misurata in Joule in S.I.: $1 \text{ J} = 1 \text{ N} \times 1 \text{ m}$
- Nel mondo delle particelle si usa **l'elettronvolt**: $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$
- LHC raggiunge $6.8 \text{ TeV} = 6.8 \times 10^{12} \text{ eV}$ per fascio, cioè una energia massima nel punto di collisione di **13.6 TeV** → poco più che l'energia cinetica di una zanzara in volo, ma concentrato in un volume infinitamente più piccolo!
- Per l'equivalenza massa-energia, anche le **masse** vengono convenzionalmente espresse in eV (diviso per c^2) o suoi multipli: ad esempio $m(p) = 1 \text{ GeV}/c^2$, $m(e) = 511 \text{ keV}/c^2, \dots$

- 1949: prima proposta per un Laboratorio europeo da Louis **de Broglie**
- 1950: proposta **all'UNESCO**
- 1952: scelta **Ginevra** come sede, nome cambiato da *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire* a *Organisation européenne pour la recherche nucléaire* (ma acronimo CERN mantenuto), **Edoardo Amaldi** nominato Segretario Generale del CERN
- 1954: ratifica della convenzione tra i **12 Stati Fondatori** Repubblica Federale Tedesca, Belgio, Danimarca, Francia, Grecia, Italia, Norvegia, Olanda, Regno Unito, Svezia, Svizzera, Jugoslavia
- Oggi: **25 stati membri**, e altri associati e osservatori

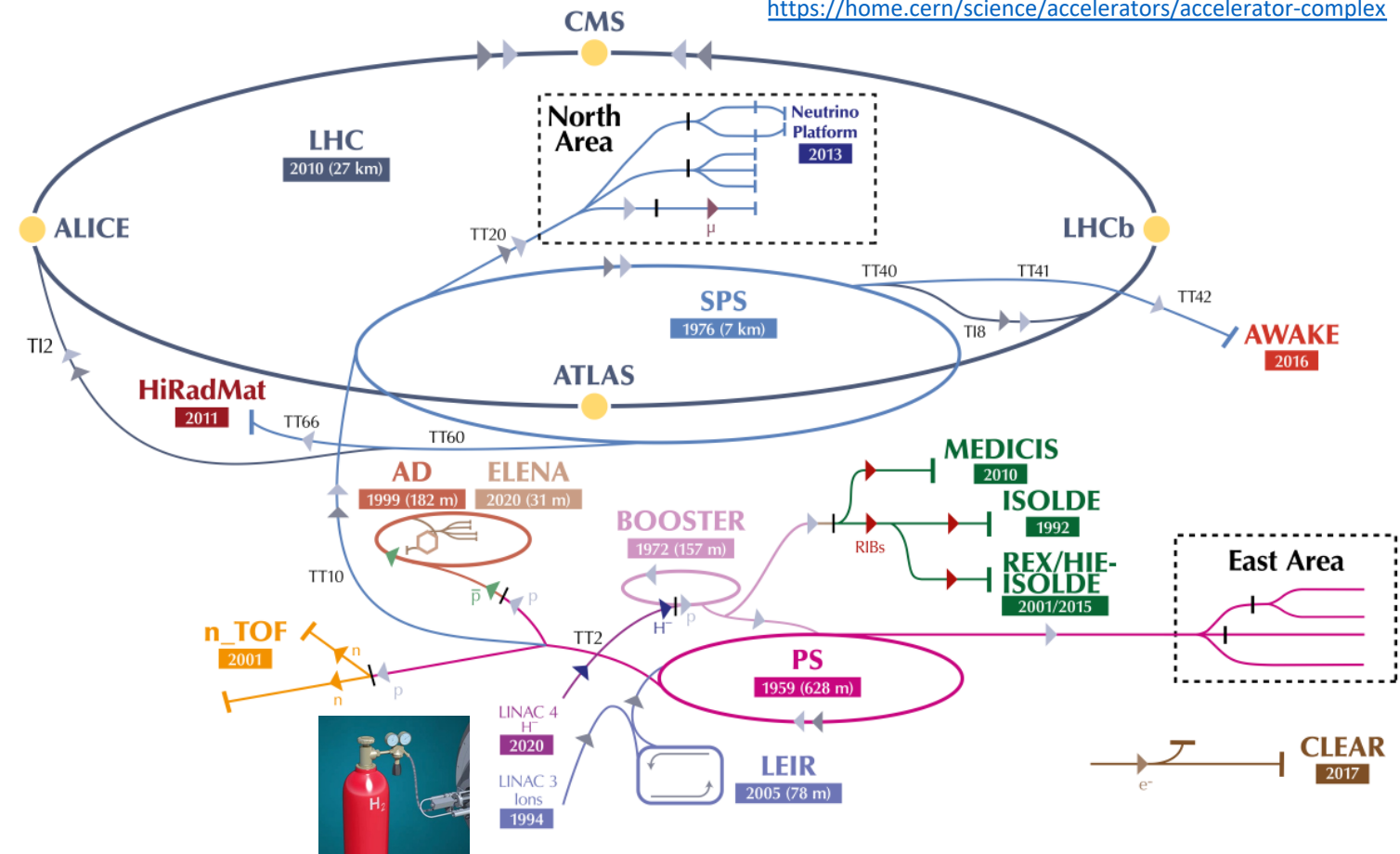


Gli acceleratori del CERN

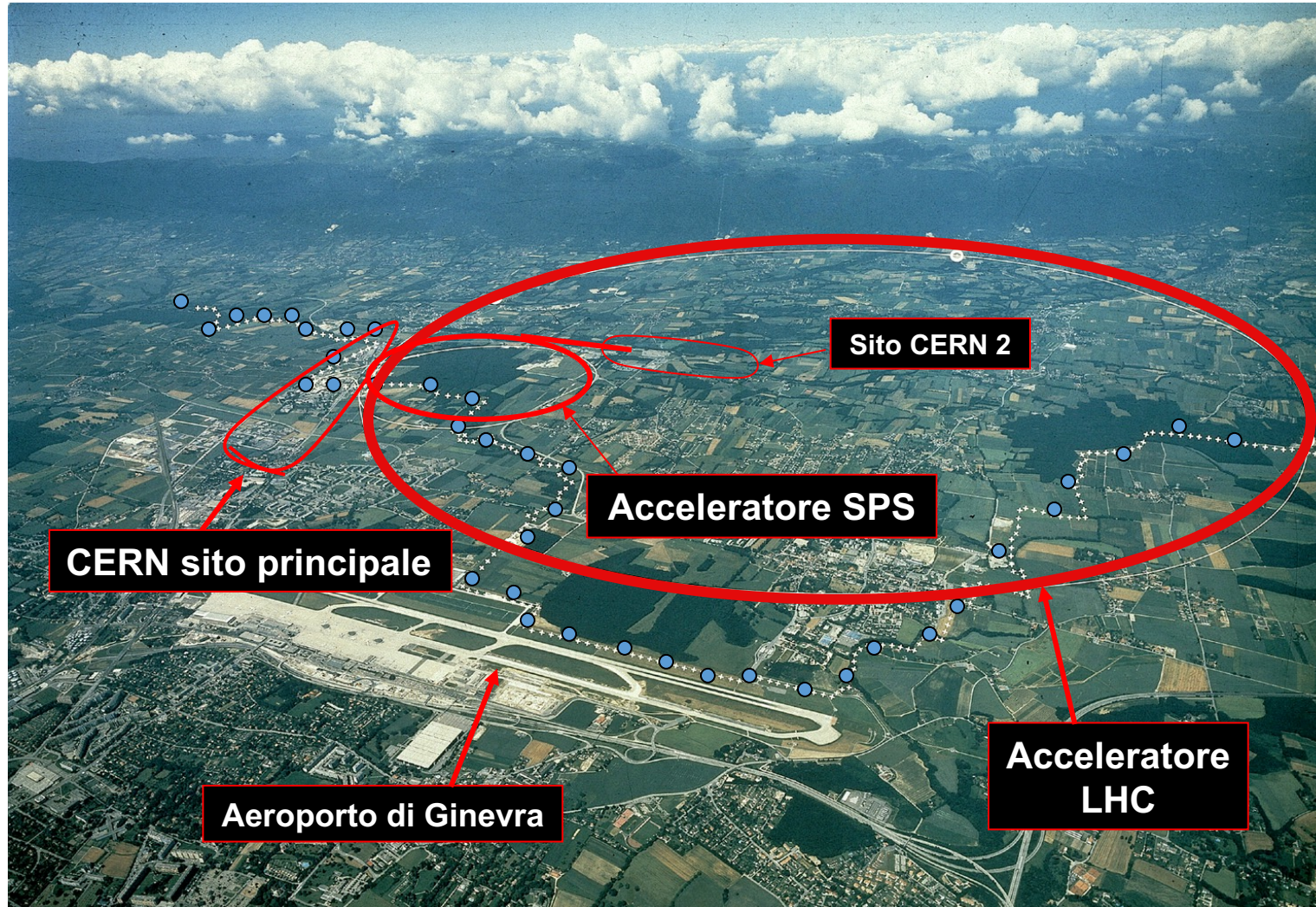
- Non c'è solo LHC, ma tanti altri **acceleratori!**
- I fasci di protoni vengono estratti da una **bottiglia di idrogeno**, e fatti accelerare **gradualmente** attraverso vari acceleratori prima di entrare in LHC

The CERN accelerator complex
Complexe des accélérateurs du CERN

<https://home.cern/science/accelerators/accelerator-complex>

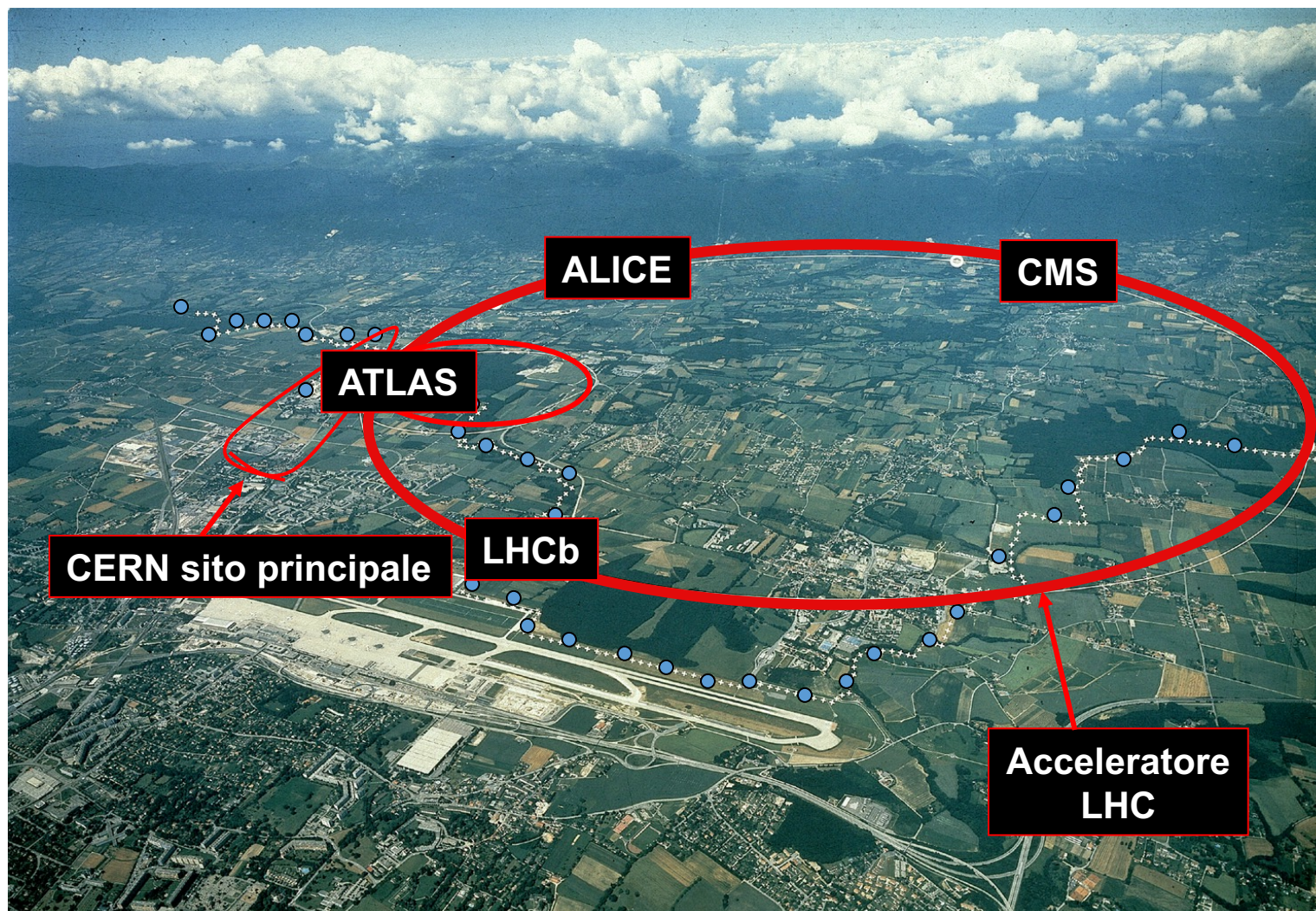


Il CERN visto dall'alto



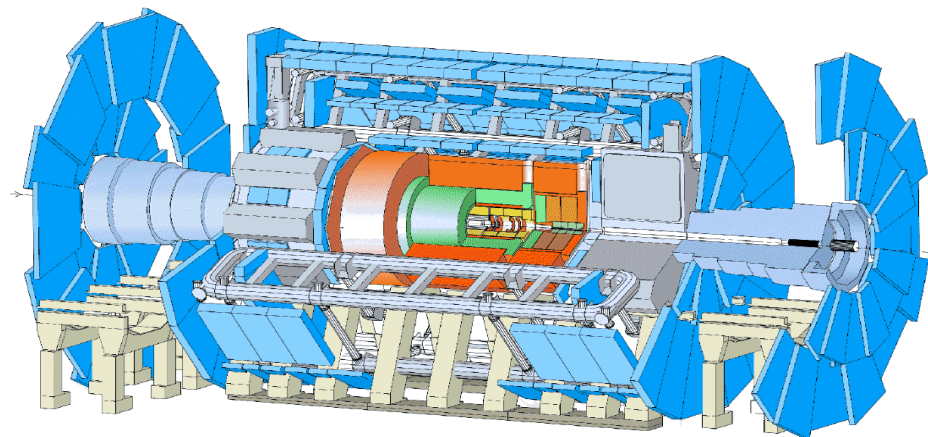
- Per accelerare le particelle nel moto circolare sono necessari circa **1300 magneti superconduttori** per curvarle
- Campi magnetici di **8 T**
- Temperatura di esercizio: **2 K**
- La beampipe (il tubo dove circolano i protoni) deve essere sottovuoto per evitare collisioni spurie \Rightarrow **vuoto spinto** di 10^{-13} atmosfere
- Le collisioni generano un'enorme quantità di **dati** che vanno raccolti e smistati in **centri di calcolo** appositi \Rightarrow ad esempio, il rivelatore LHCb colleziona circa **10 GByte/s** su disco \Rightarrow **800 TByte** al giorno!!

Gli esperimenti a LHC

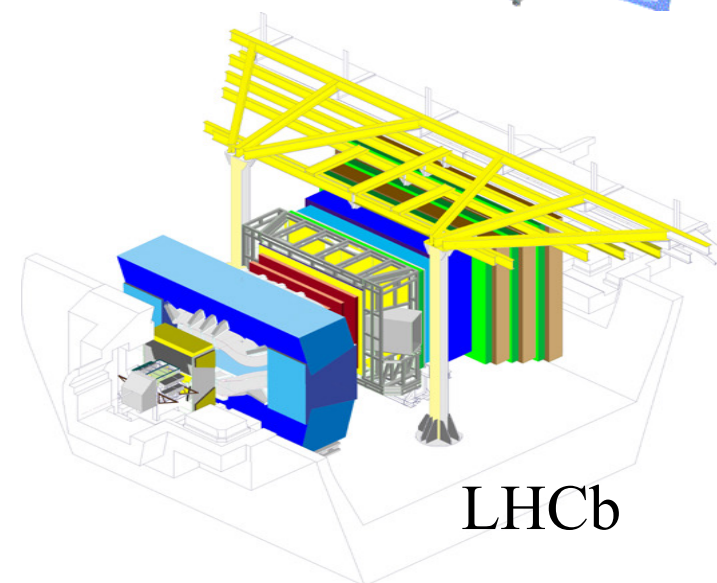
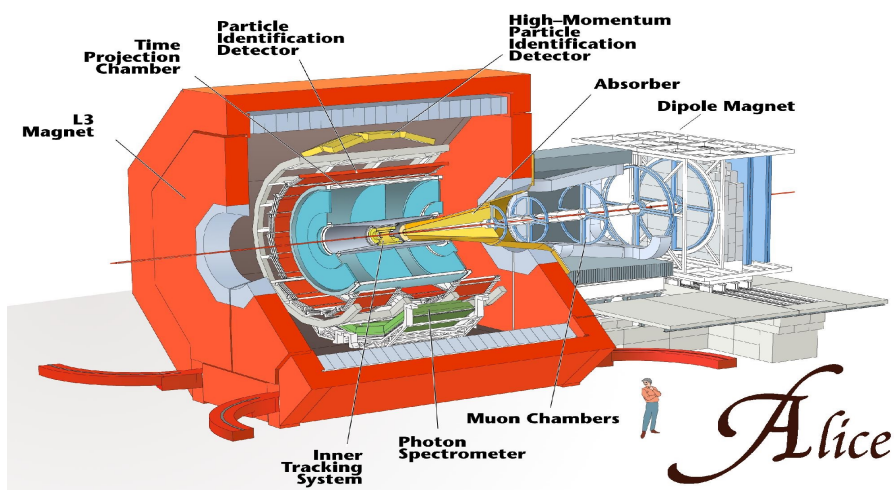
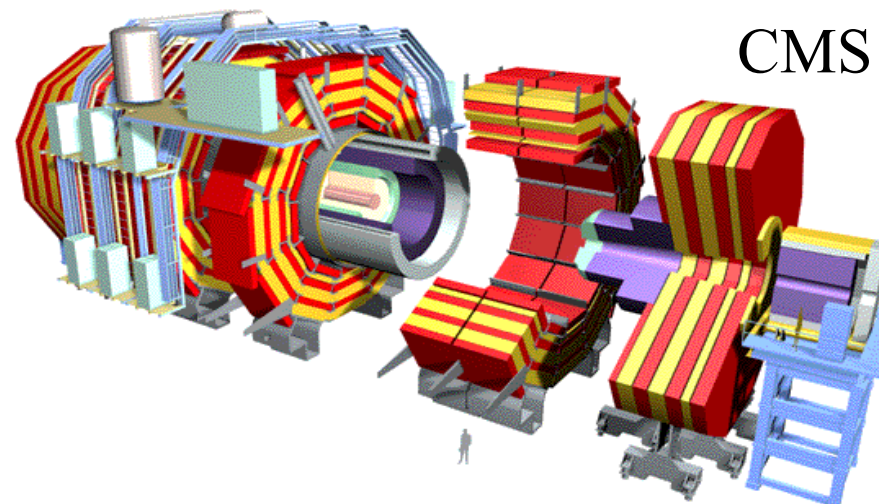


Gli esperimenti a LHC

ATLAS



CMS



LHCb

- **ATLAS e CMS**

Dedicati alla misura di particelle di alta massa, ad esempio alla ricerca (ed ora allo studio) del bosone di **Higgs** e alla rivelazione di eventuali **nuove particelle** ancora mai osservate

- **ALICE**

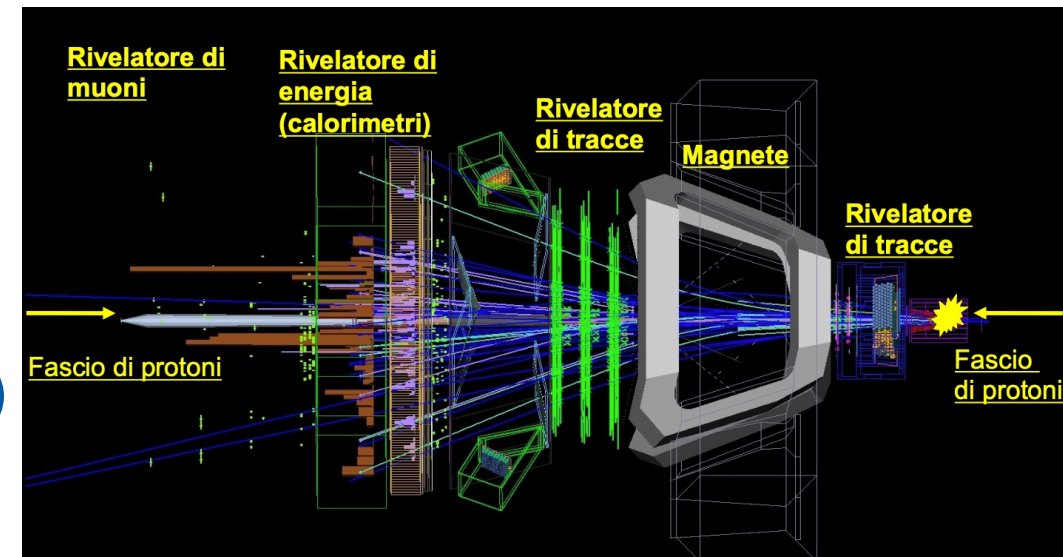
La sezione INFN di Bologna partecipa a tutti e 4!

Dedicato allo studio delle collisioni di **ioni pesanti** (ad esempio urti di nuclei di piombo) ad altissima energia, ed è pensato per studiare il **plasma di quark e gluoni** che si crea nell'urto → condizioni di densità di energia molto simili ai primissimi istanti di vita dell'Universo dopo il Big Bang

- **LHCb**

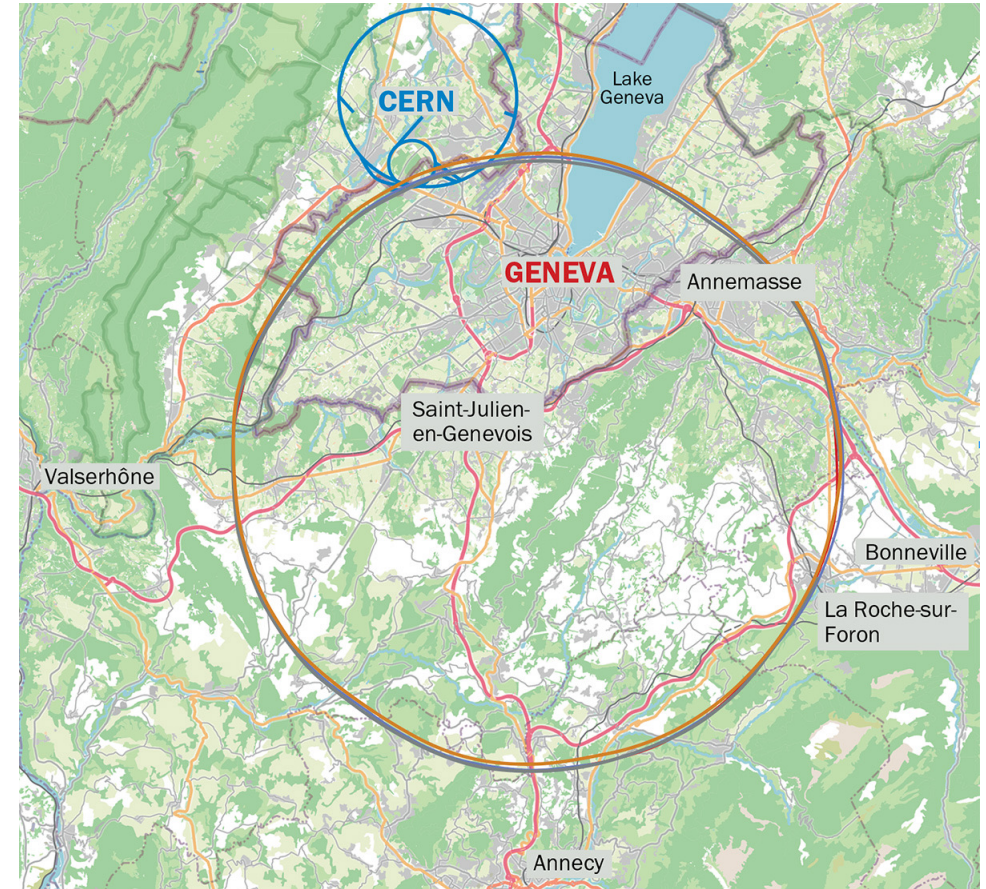
Pensato per studiare con grande precisione le asimmetrie di comportamento tra **materia e antimateria** e altre osservabili fisiche previste dal Modello Standard

- Si concentra sullo studio degli adroni contenenti il quark **beauty** (b) e/o **charm** (c), prodotti principalmente vicino al fascio di protoni (ecco il perché della sua geometria)
- Ha prodotto **risultati fondamentali**, come la scoperta di violazione di CP nei mesoni B_s^0 e D^0 e nei barioni, la prima osservazione di pentaquark e l'identificazione di vari tetraquark, la misura ad altissima precisione di parametri legati alla violazione di CP , l'osservazione di decadimenti rarissimi, l'indicazione di potenziali anomalie nel Modello Standard, ...
- Il gruppo di **Bologna** ha dato (e dà tuttora) contributi fondamentali alle misure di CP !



LHC: ieri, oggi e domani

- La presa dati degli esperimenti di LHC è iniziata nel **2010**, e la fine è prevista per il **2041** (circa)
- Per la fase successiva, si sta pianificando la costruzione di un nuovo acceleratore al CERN, denominato FCC (**Future Circular Collider**) con una circonferenza di circa 100 km (LHC sarà un suo iniettore!)
- Questa nuova macchina sarà operativa intorno al **2045** e funzionerà per vari decenni



Quanto costa tutto questo?



- Il costo di costruzione di LHC è stato di circa **6 miliardi** di €
- I 4 esperimenti sono costati in totale circa **4 miliardi** di €
- La manutenzione di LHC e degli esperimenti costa sugli **800 milioni** di € all'anno
- La cifra sembra altissima, ma considerate che il PIL totale degli stati membri del CERN è circa 20000 miliardi di € \Rightarrow LHC+esperimenti costa circa **0.005% del PIL** annuale!!
- Senza contare le ricadute favorevoli per le commesse alle **industrie** italiane (magneti, elettronica, meccanica di precisione, ...)

Non solo ricerca pura



- Non c'è solo ricaduta positiva per quanto riguarda il **progresso della conoscenza** (che rimane l'obiettivo primario!)
- Dallo sviluppo di **tecnologie** necessarie alla fisica delle particelle sono arrivati:
 - Strumenti per la diagnostica medica
 - Adroterapia per la cura di tumori
 - Radiofarmaci
 - Studio dei coni vulcanici con raggi cosmici
 - Il World Wide Web (nato al CERN)
 - ...
- Ancora non sappiamo quale vantaggio ci porterà in **futuro** la conoscenza del bosone di Higgs o della violazione di *CP*; ma sapevamo forse a cosa avrebbero portato la corrente elettrica o i semiconduttori quando sono stati scoperti? ⇒ anche a questo serve la ricerca di base!

- Non solo ricadute tecnologiche/economiche
- Il CERN è frequentato da migliaia di scienziati al giorno (sia in presenza fissa che di passaggio) che provengono da quasi tutto il **mondo**
- La **diversità** e la **varietà culturale** sono all'ordine del giorno in ambienti come il CERN
- Vivere e lavorare quotidianamente in un tale contesto non può che arricchire profondamente da un punto di vista **umano**, oltre che scientifico

Domande?