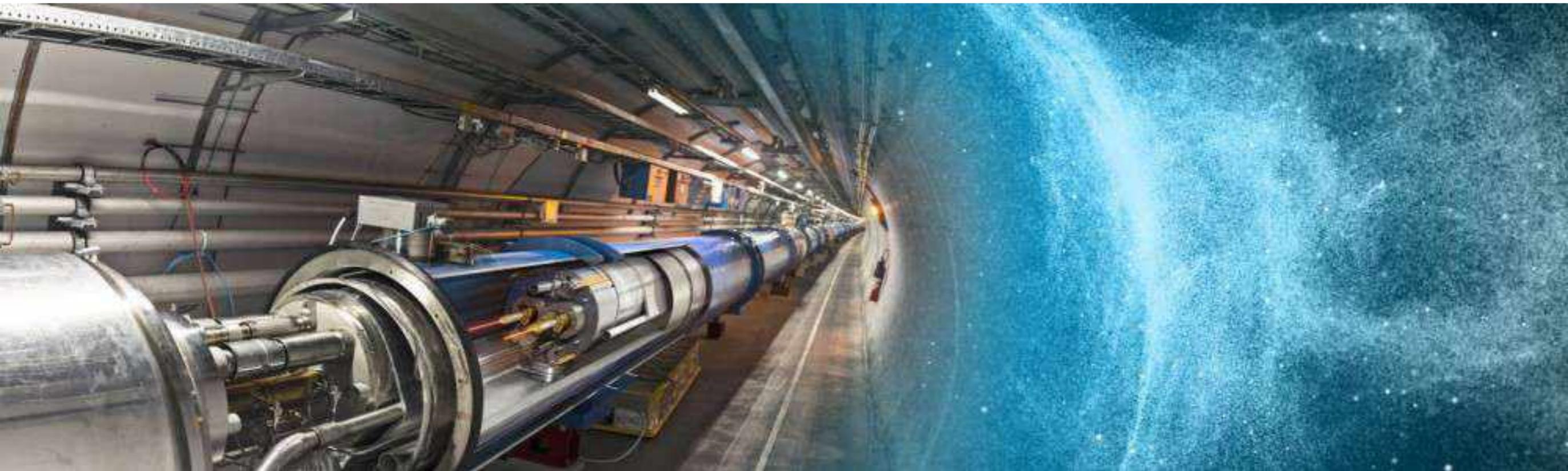




L'esperimento LHCb

Marco Santimaria / Masterclass Internazionale 07/03/2022 - LNF



Introduzione

Indice:

1. La fisica di LHCb

Particelle e interazioni, antimateria e violazione CP

2. LHC e il rivelatore LHCb

Acceleratore di protoni e rivelatori di particelle

3. Misura della vita media del mesone D^0

Anticipo sull'esercitazione di Mercoledì e Giovedì

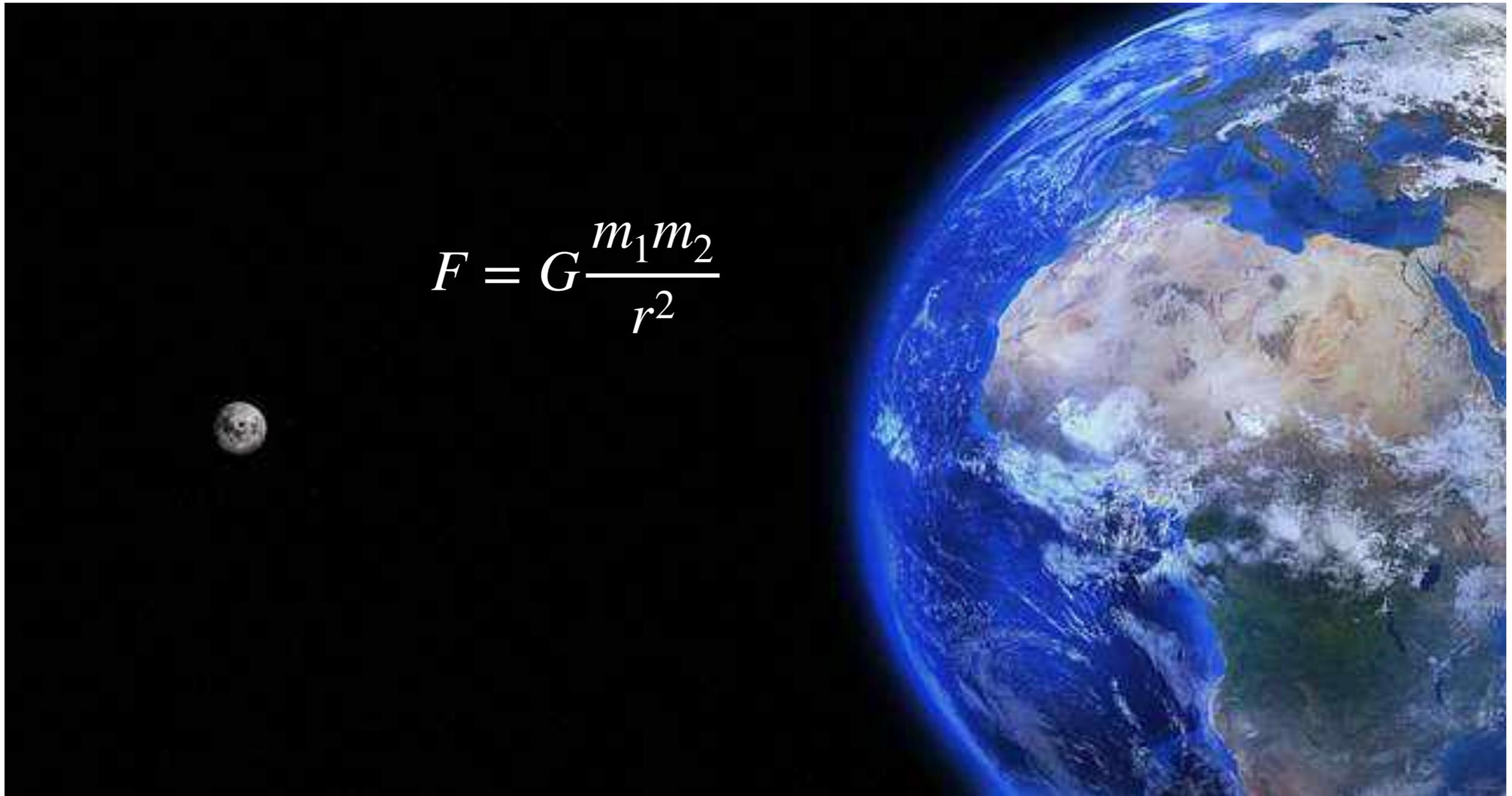


Molti concetti teorici e sperimentali di questa lezione verranno trattati nei prossimi giorni!



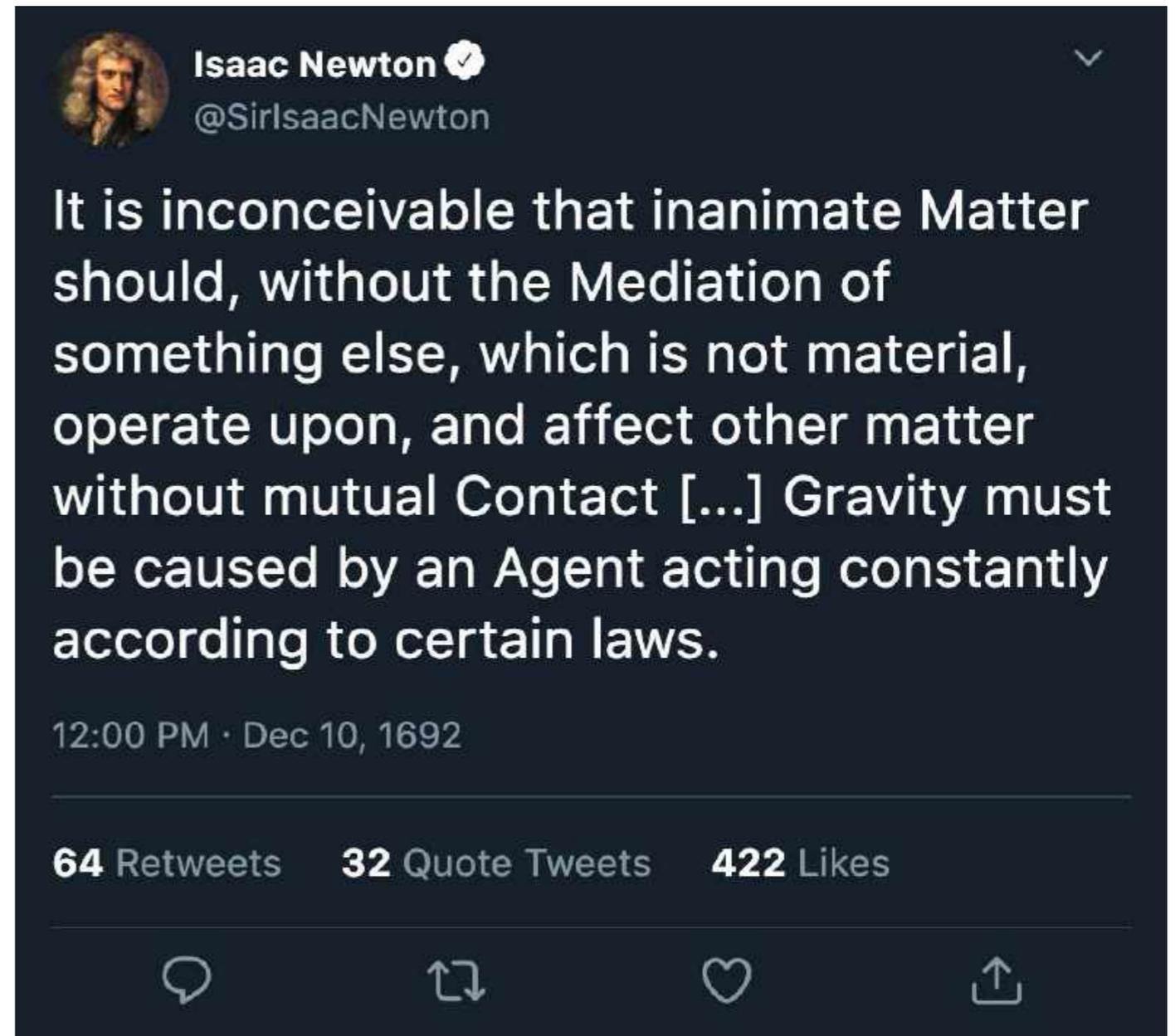
1. La fisica di LHCb

Cos'è una forza?



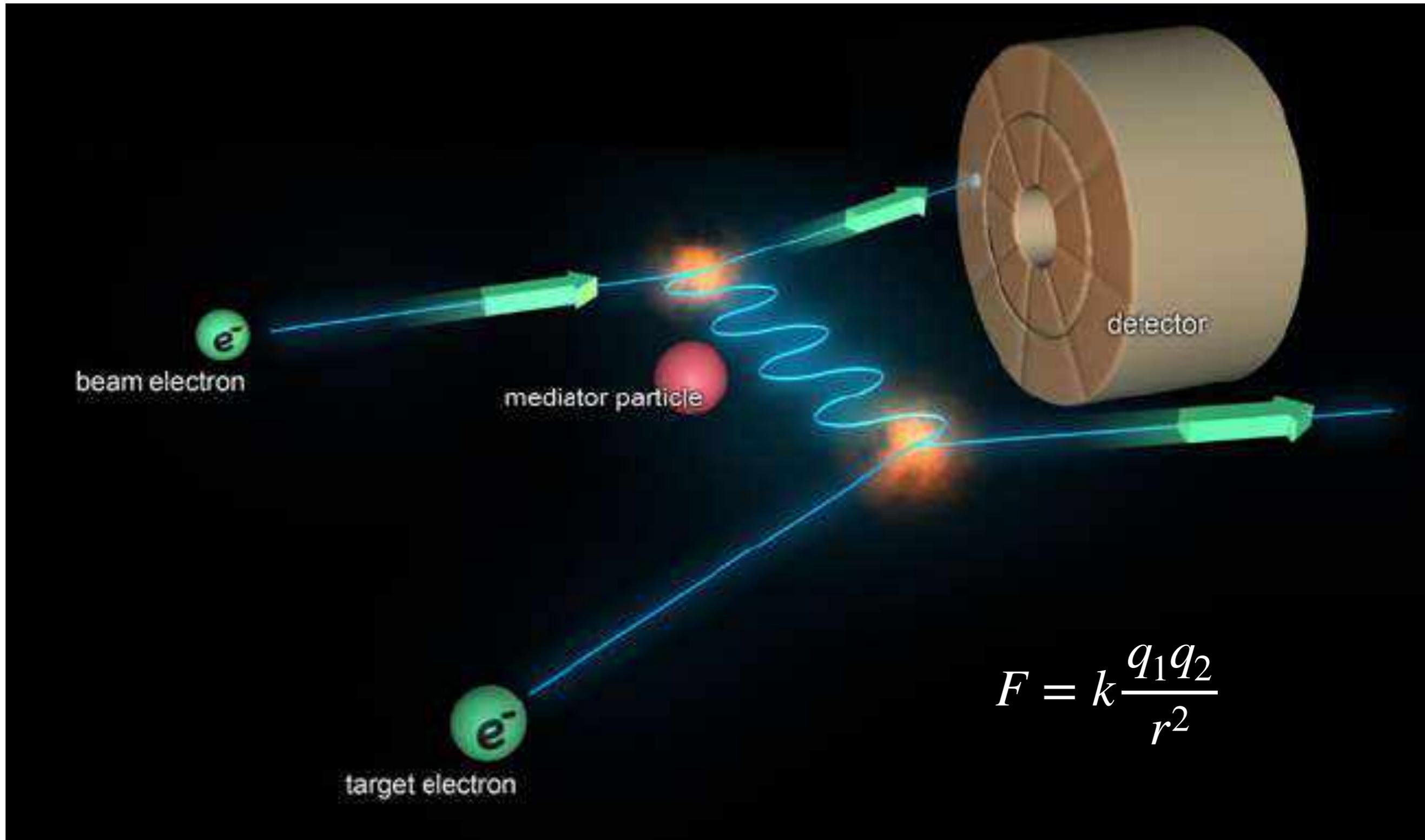
L'interazione gravitazionale è una proprietà innata dei corpi?
Se in un universo vuoto compaiono 2 masse, queste si attraggono immediatamente?

Interazioni ieri: meccanica classica



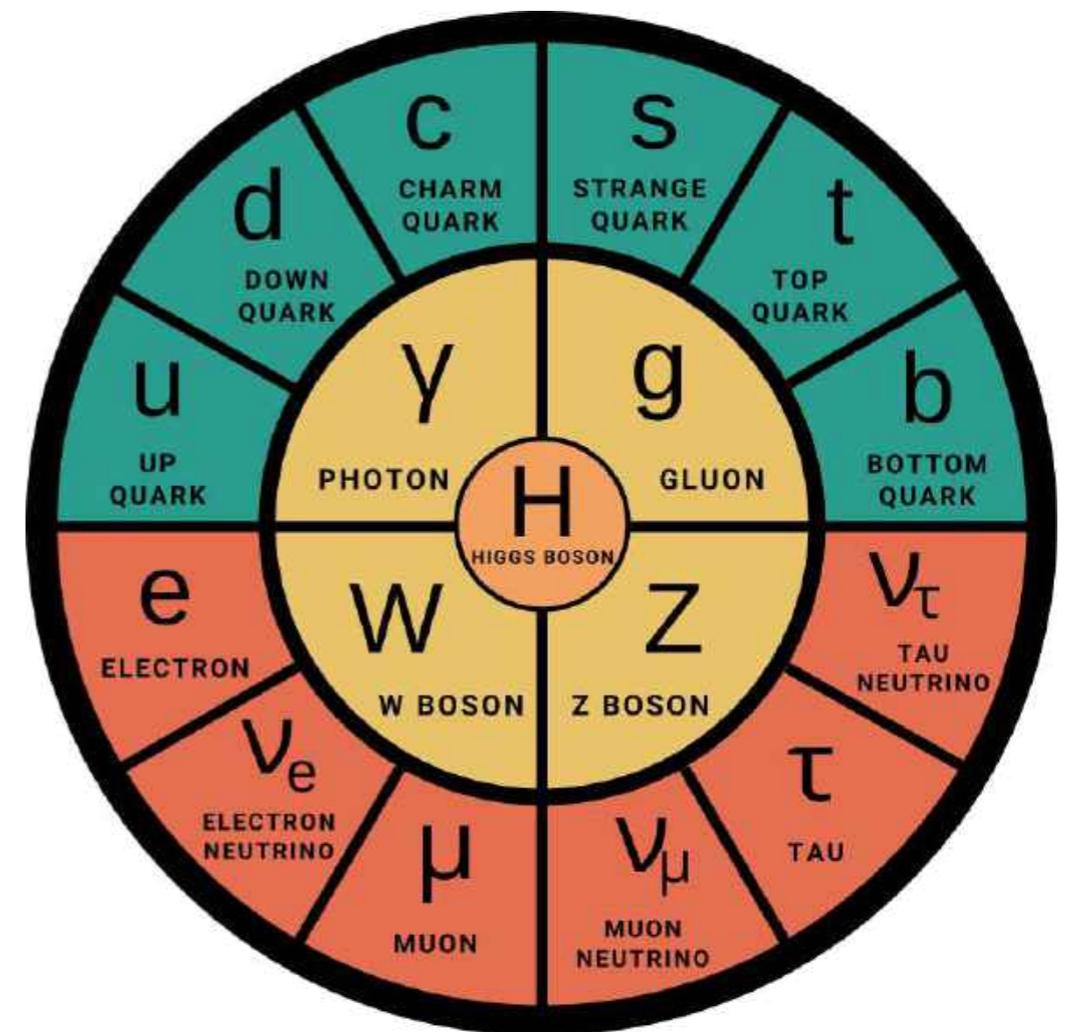
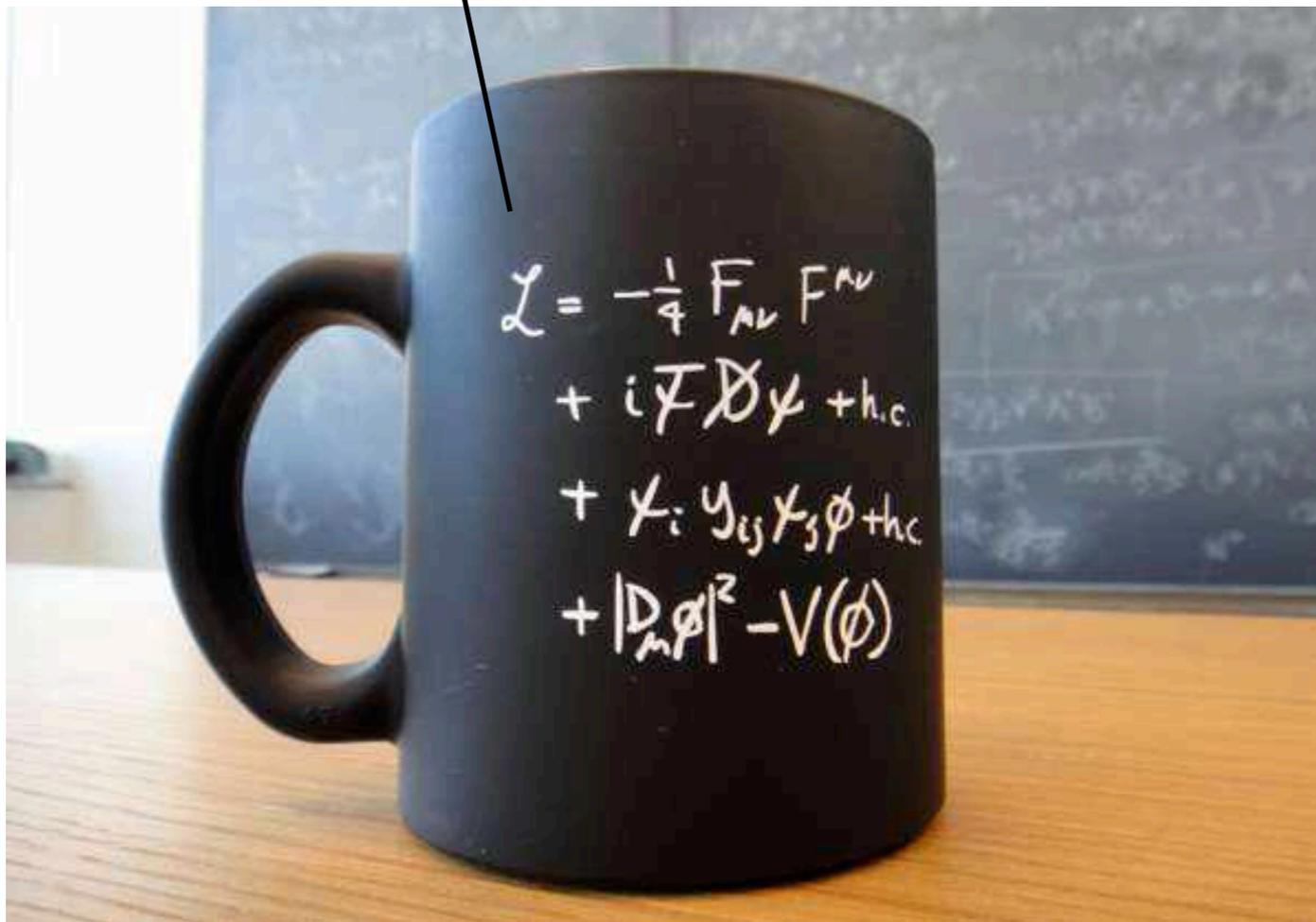
Interazioni oggi: meccanica quantistica e relativistica

Le particelle di materia si scambiano particelle di forza (**mediatori o campi**)



Il Modello Standard

La **Lagrangiana dell'universo** rappresenta l'energia di tutte le **particelle mediatrici delle forze (bosoni)** e di tutte le **particelle di materia (fermioni: quark e leptoni)**



L'interazione gravitazionale (mediata dal gravitone) manca ancora nel modello!

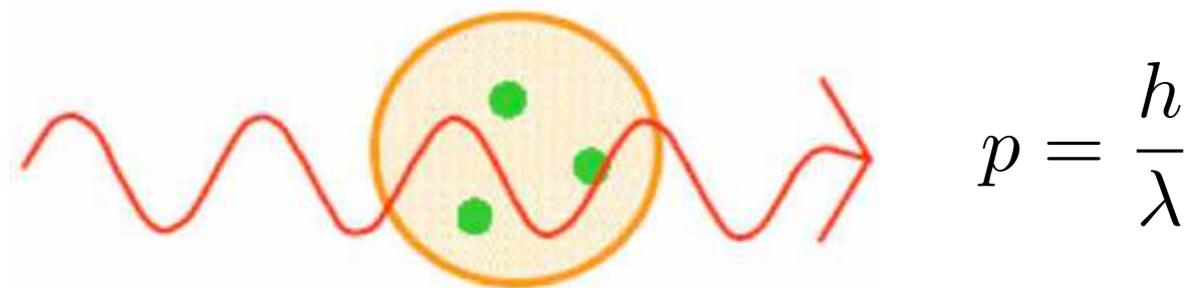
Queste particelle sono davvero elementari?

1968: collisioni ad alta energia tra elettroni e protoni: **il protone non è puntiforme!**



“Una particella è elementare se si comporta come puntiforme durante una collisione”

Più aumenta l'energia della collisione, più cose si scoprono!

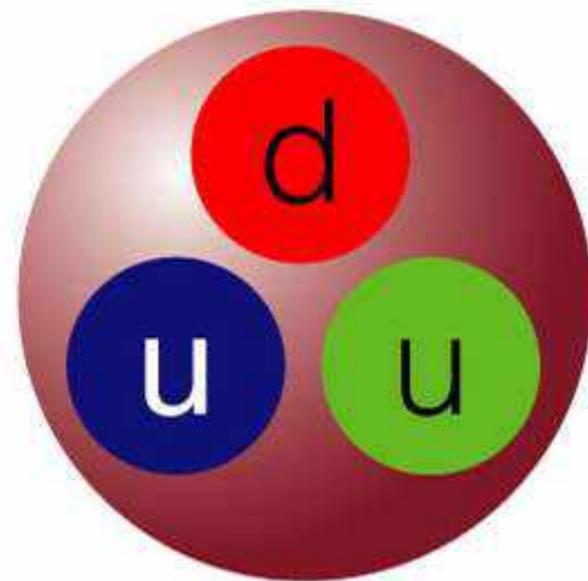


$$p = \frac{h}{\lambda}$$

Ma soprattutto: dove sono tutte queste particelle??

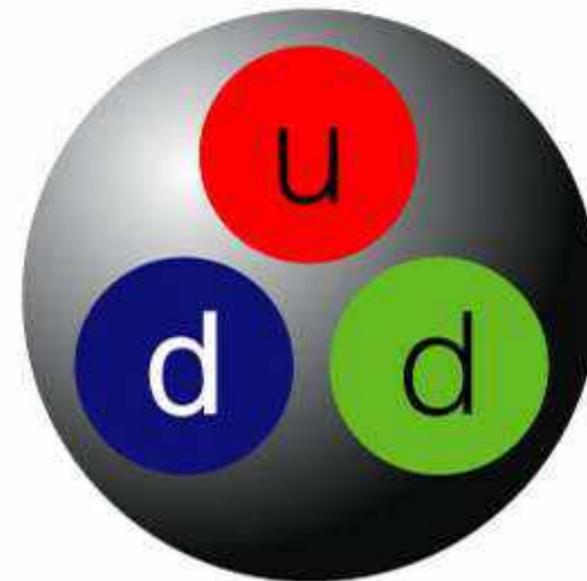
La materia "ordinaria" la conosciamo: **protoni** e **neutroni** (3 quark) + **elettroni** (elementari)

A proton is composed of 2 up quarks (u) and 1 down quark (d).



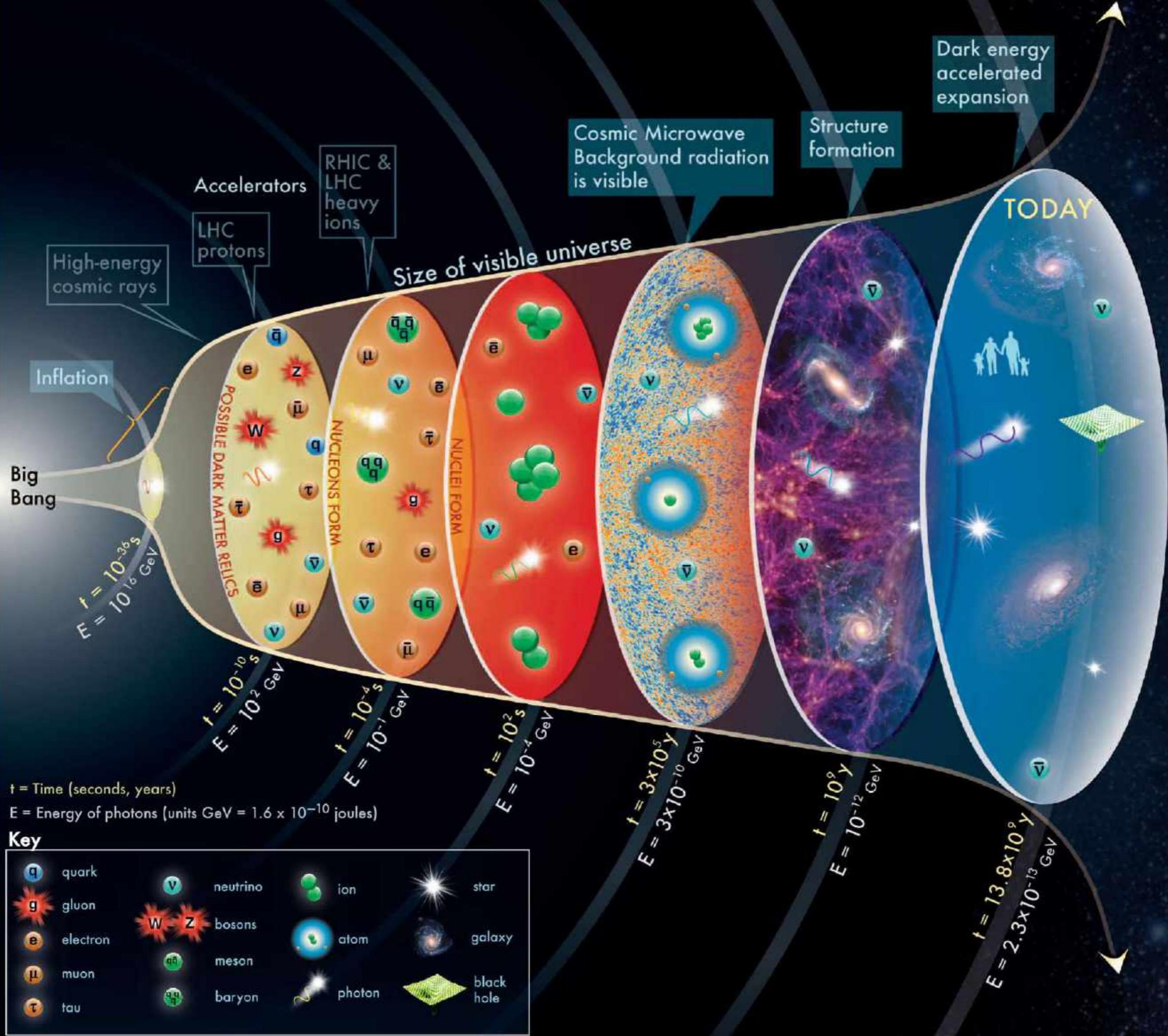
Total charge:
 $+ 2/3 + 2/3 - 1/3 = +1$

A neutron is composed of 1 up quark (u) and 2 down quarks (d).



Total charge:
 $+ 2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$

E tutte le altre? La situazione era molto diversa agli inizi dell'universo...



Key

	quark		neutrino		ion		star
	gluon		bosons		atom		galaxy
	electron		meson		photon		black hole
	muon		baryon				
	tau						

ma c'è di più

1928: Paul Dirac formula l'equazione (quantistica e relativistica) che descrive le interazioni degli elettroni e...

$$(i\partial - m)\psi = 0$$

... l'equazione ha 2 soluzioni!

C'è un' energia negativa, speculare a quella positiva?

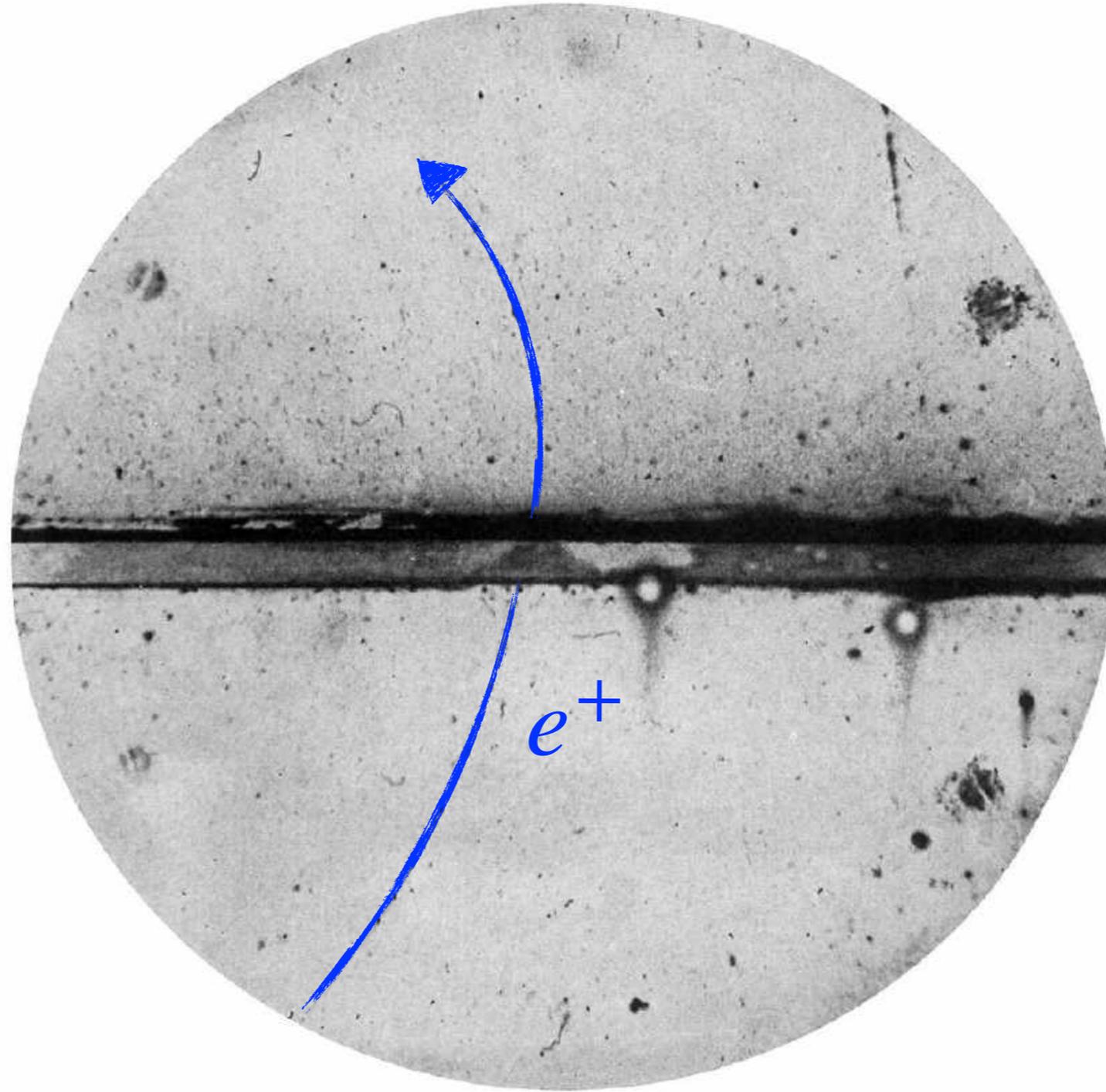
piuttosto:

Come esiste la materia (particelle) esiste l'antimateria (antiparticelle), entrambe con energia positiva



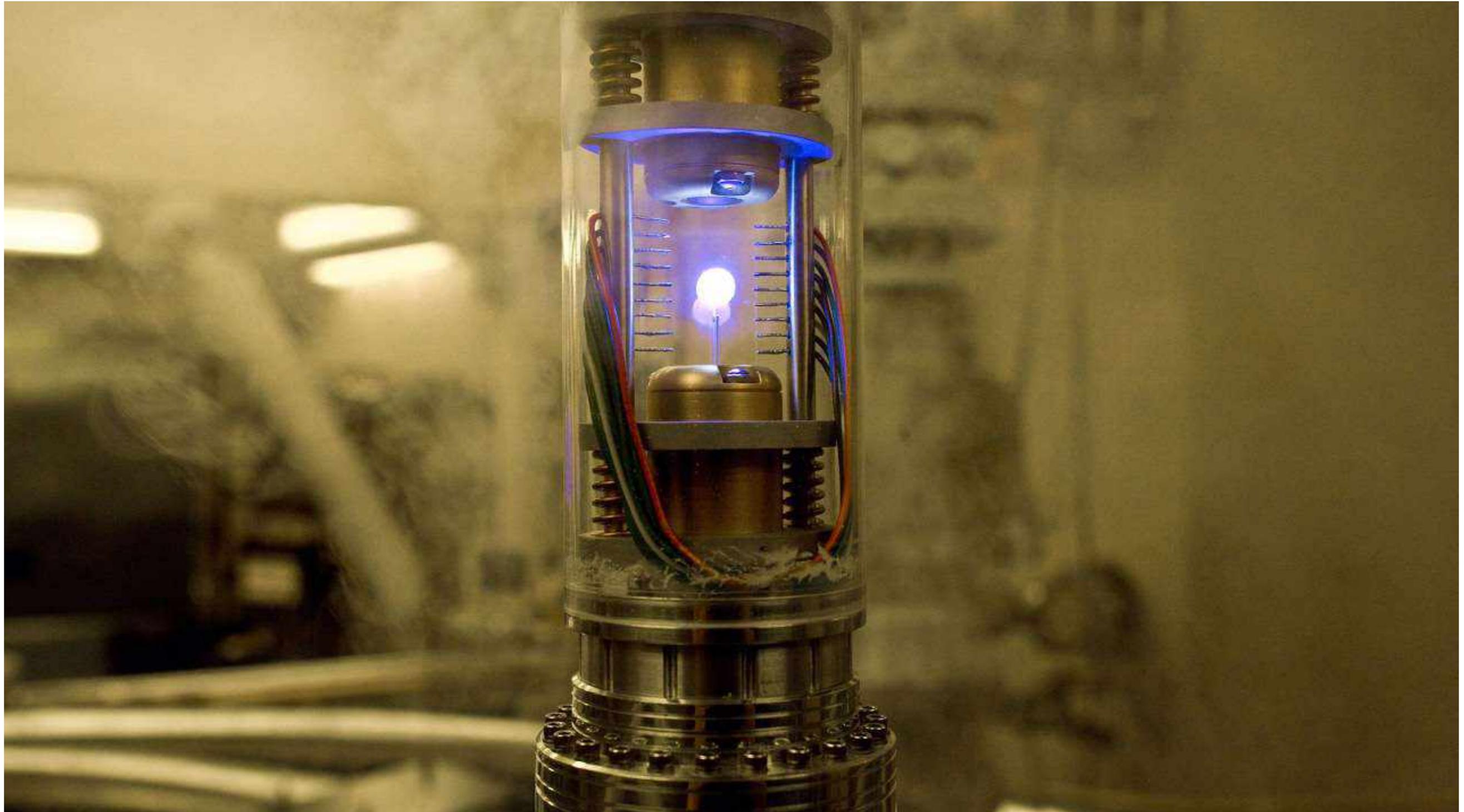
4 anni dopo: antimateria!

1932: Carl Anderson osserva un antielettrone (positrone) in una camera a nebbia



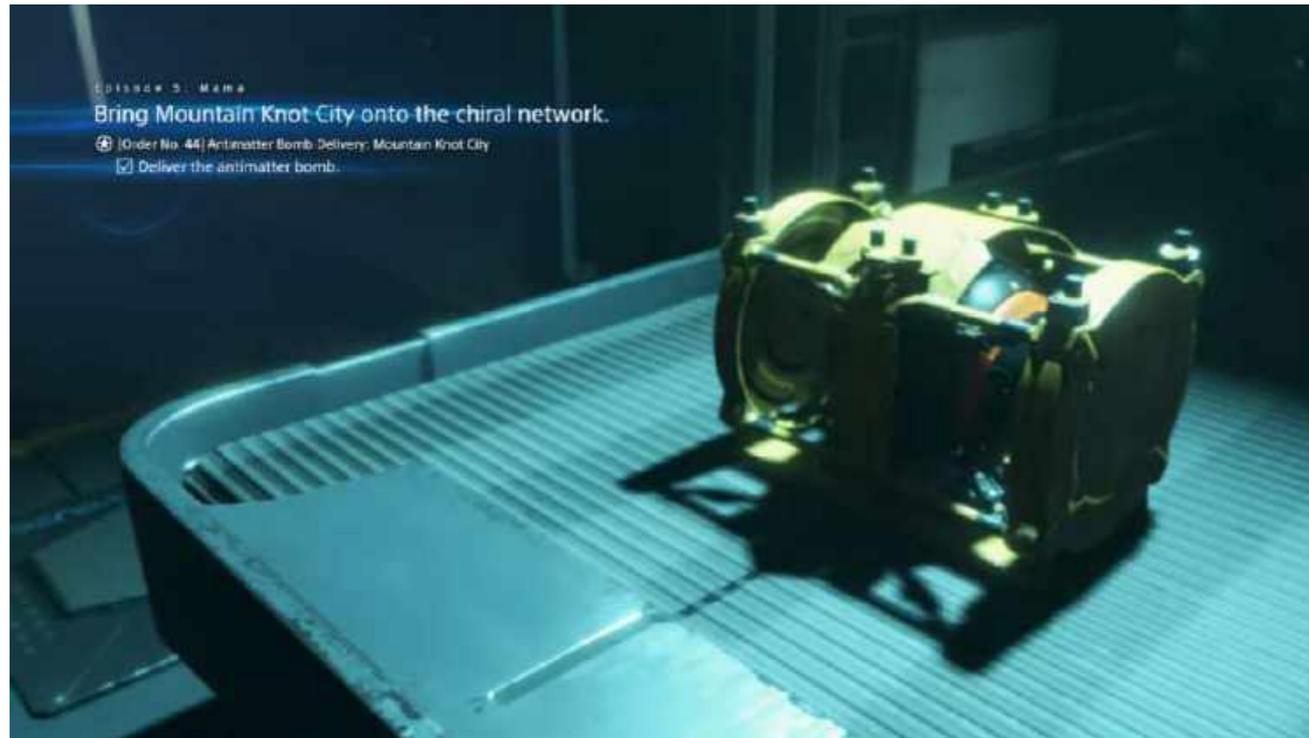
Dove trovare l'antimateria: film

Angeli e demoni: in un barattolo, gelosamente custodito al CERN



Dove trovare l'antimateria: videogiochi

bombe ...



armi in Cyberpunk 2077?

Militech AM-3 "Anti-Matter Rifle"

Information

Manufact.	Militech
Type	Heavy
Conc.	Cannot be Hidden
Avail.	Rare
Cost	6000 eb

Statistics

Acc.	0/+1
Dmg/Amm.	9d10 (30mm)
#Shots	5
Rof.	1
Rel.	Standard
Range	1600mm

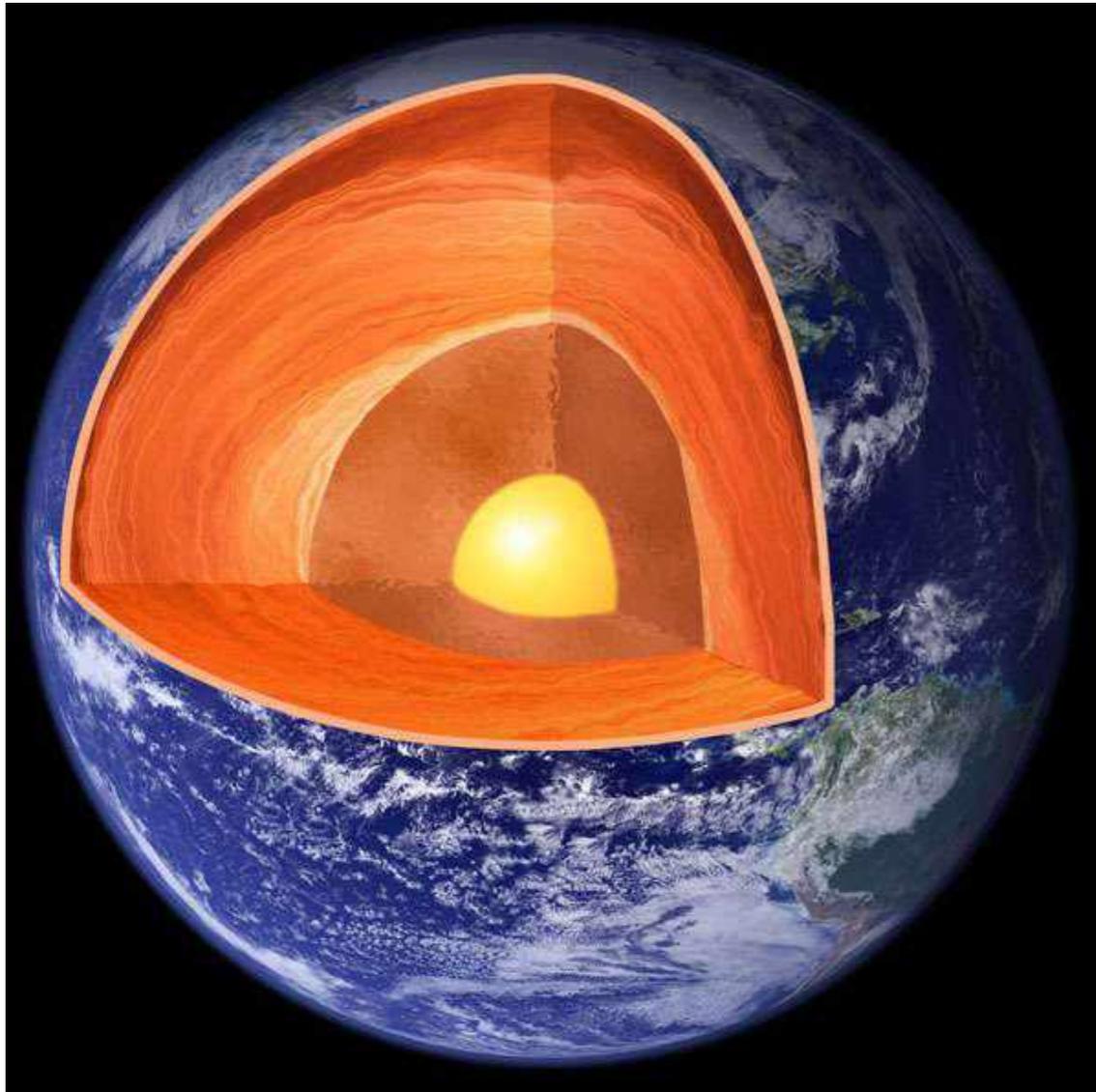
Appearances

... o piante in Death Stranding?



Dove trovare l'antimateria (per davvero)

Decadimenti di nuclei instabili, ad esempio
dentro la terra



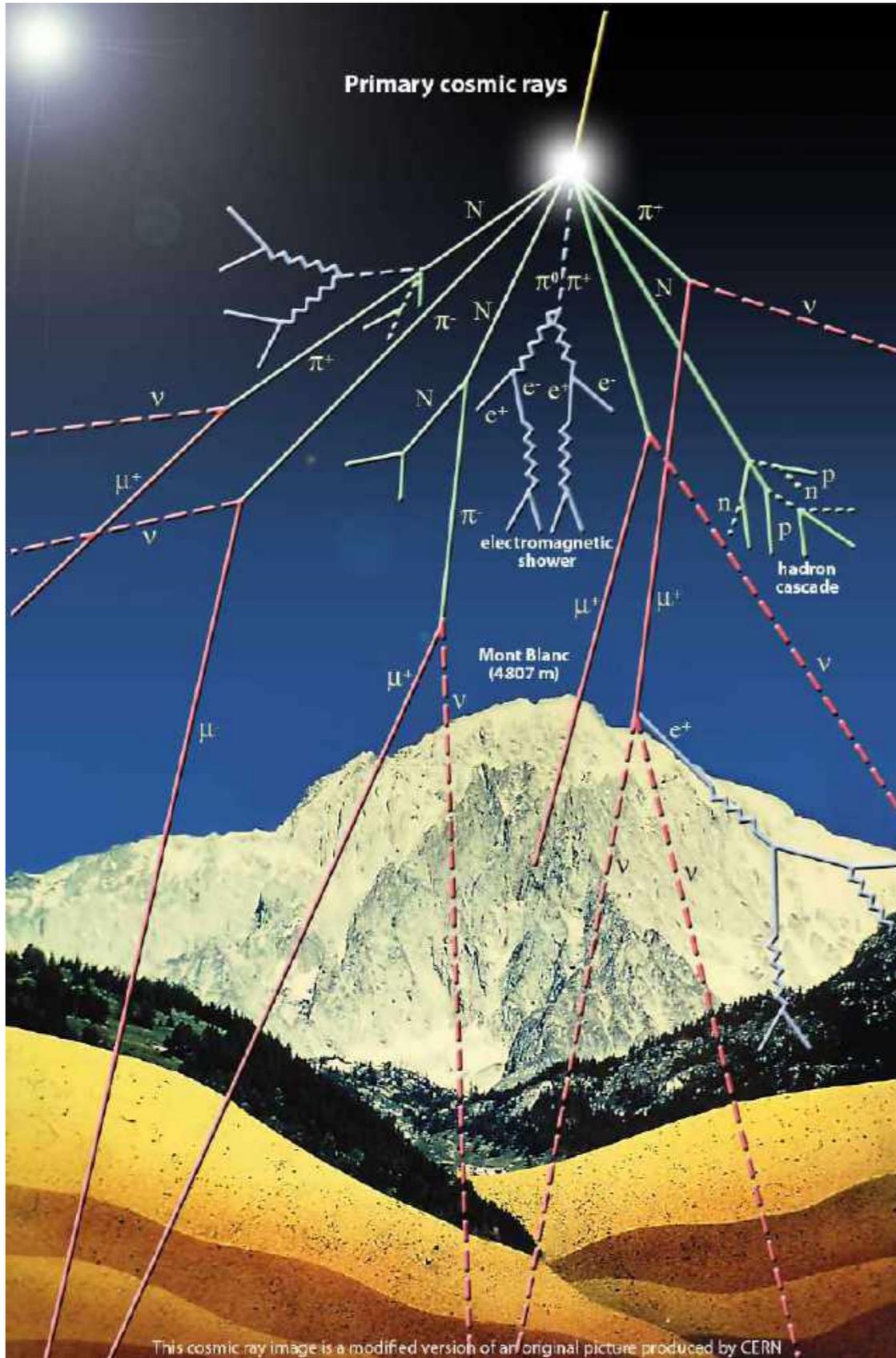
oppure a Chernobyl...



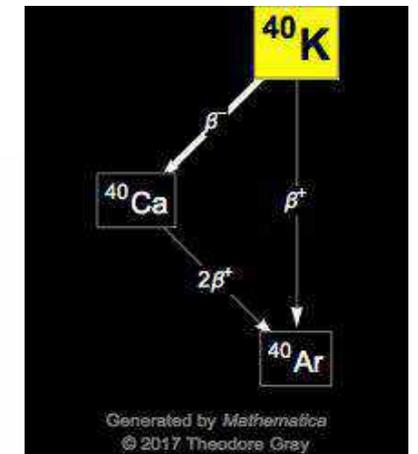
6.97... not great not terrible

Dove trovare l'antimateria (per davvero)

Nei raggi cosmici e nei loro prodotti di interazione con l'atmosfera (scoperta di Anderson)



nelle banane



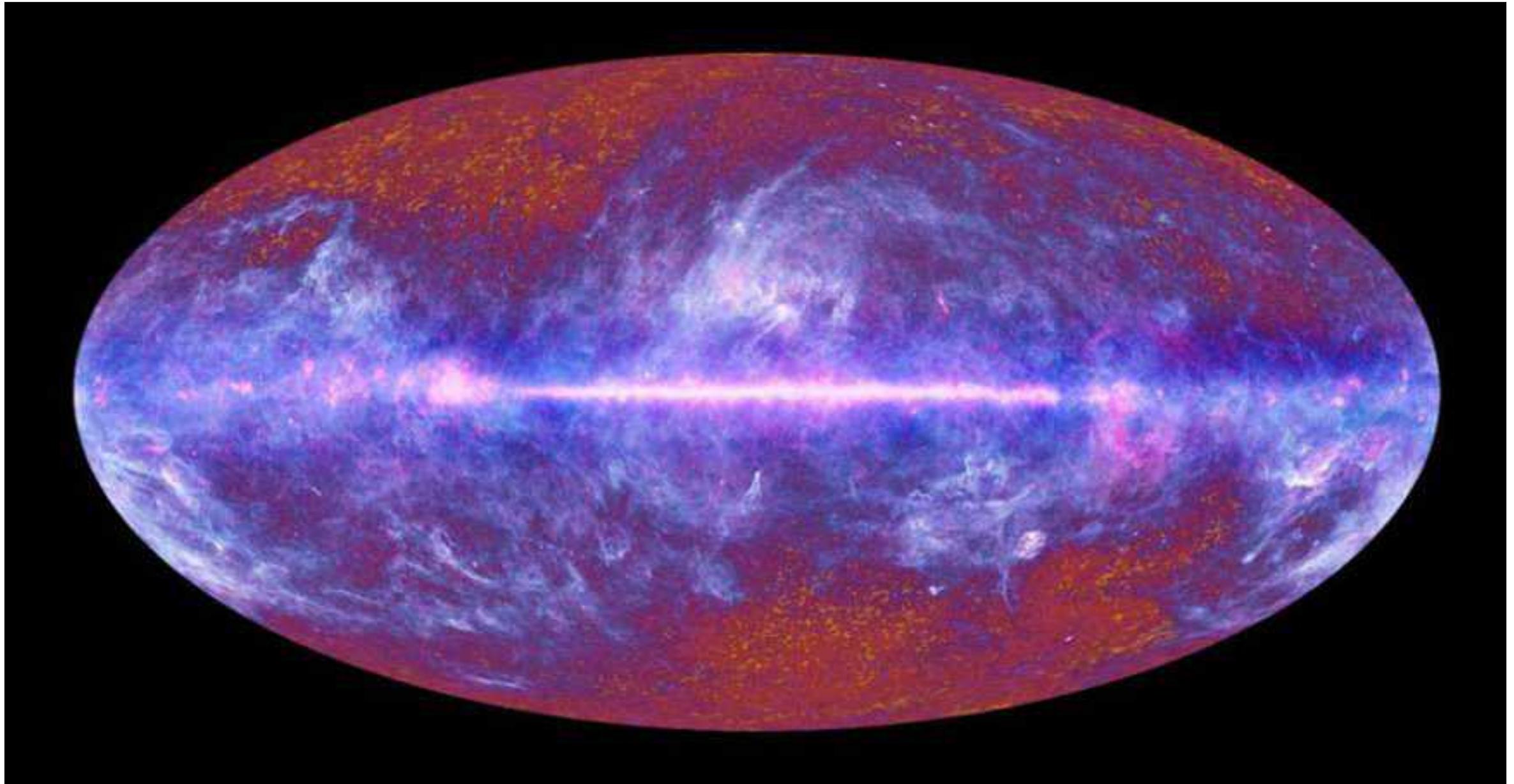
A che serve?

Oltre a conoscerla sappiamo anche usarla: Positron Emission Tomography (PET)



The Big Bang Theory?

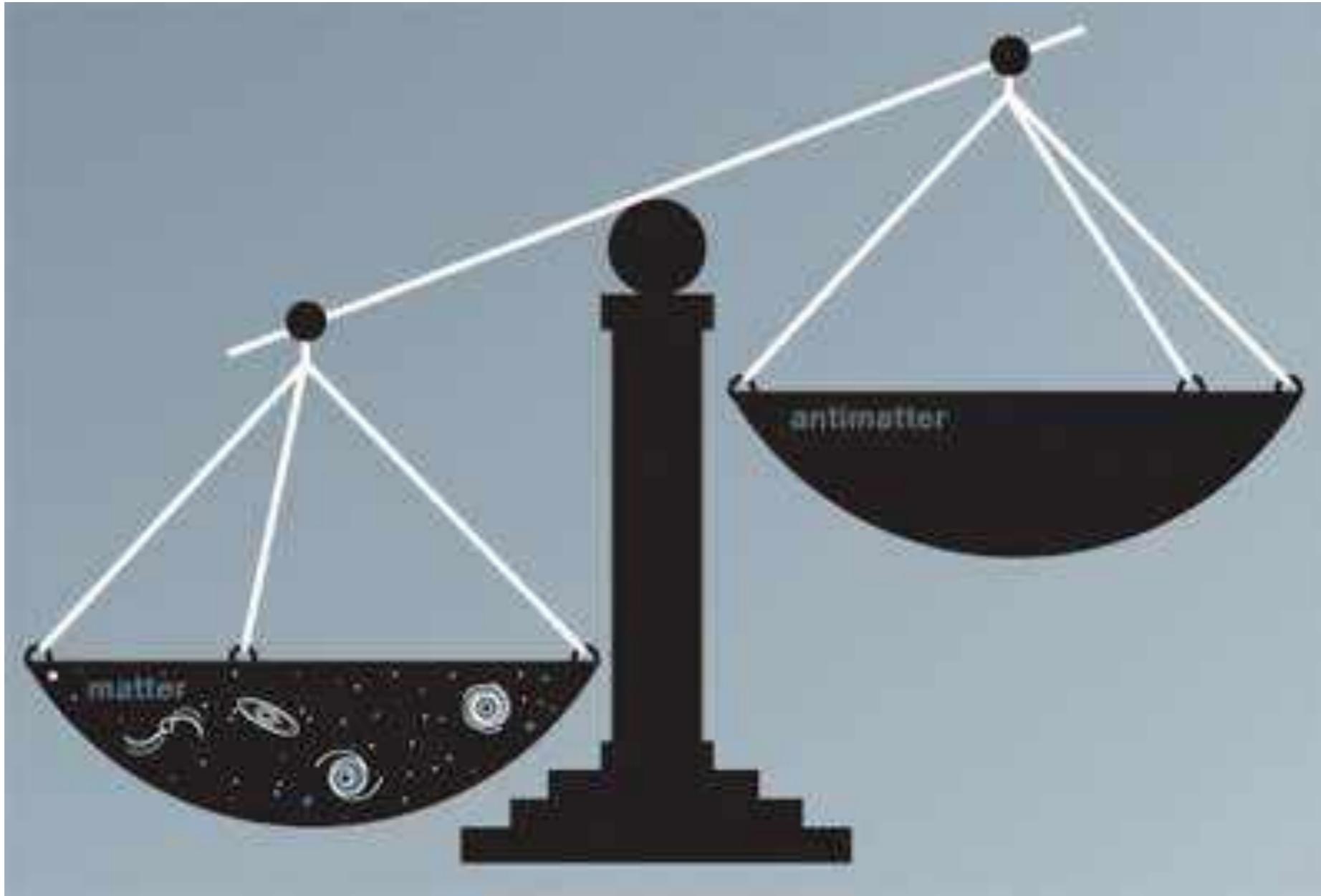
Secondo il modello del big bang, all'inizio nell'universo **c'era tanta materia quanta antimateria**, lo possiamo anche vedere da una foto vecchia 14 miliardi di anni:



La **Cosmic Microwave Background (CMB)**: proviene da 300000 anni dopo il big bang.
Per captarla basta avere un antenna per le microonde

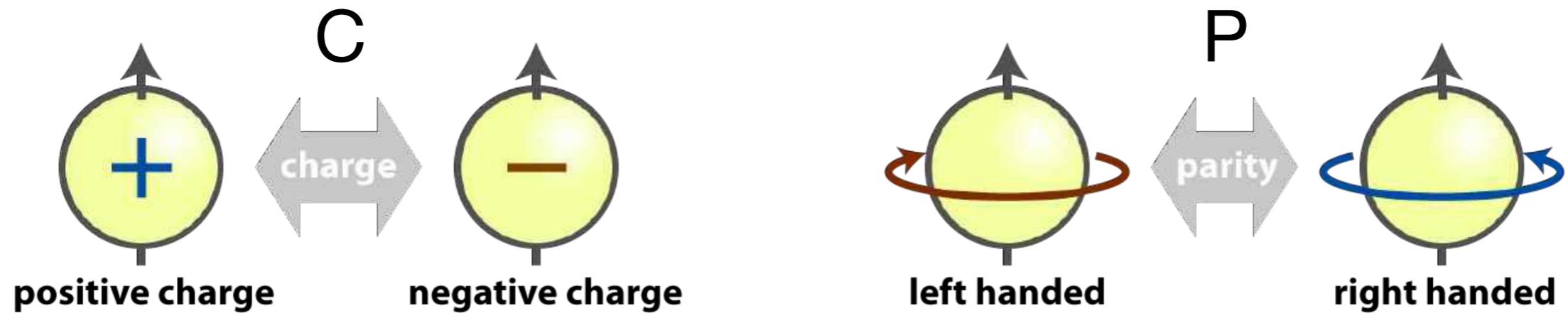
Dov'è finita l'antimateria?

Osservata in raggi cosmici, decadimenti radioattivi e prodotta negli acceleratori di particelle
ma... **è pochissima!**

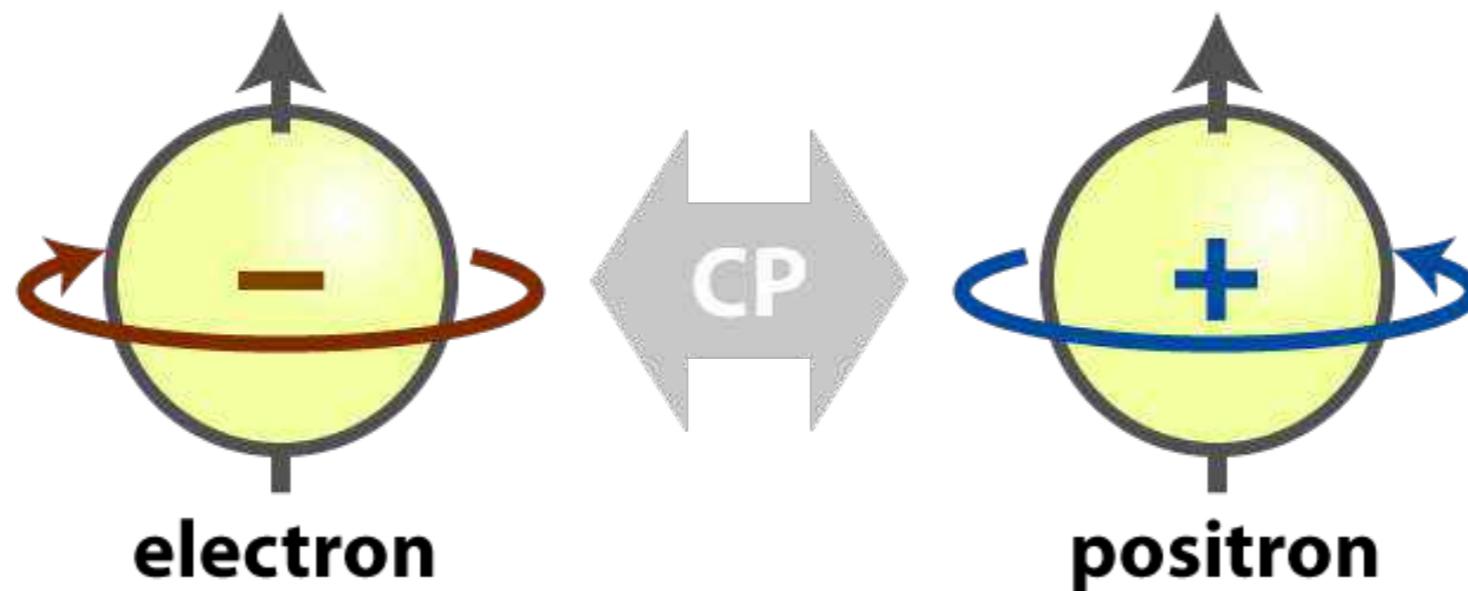


La simmetria CP

Nel Modello Standard le interazioni sono determinate da simmetrie:

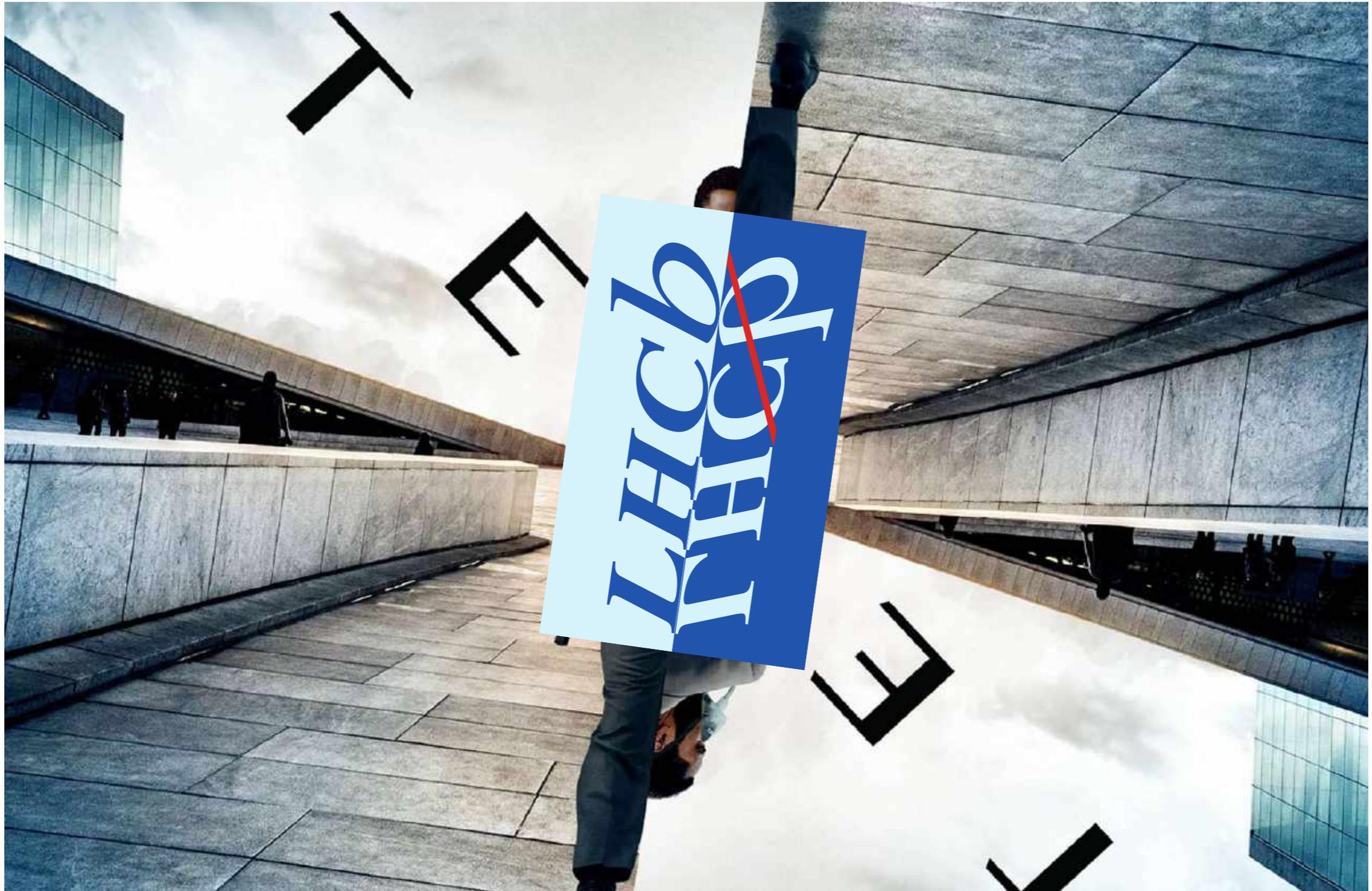


Applicando l'operazione $C + P$ si cambia una particella in un'antiparticella e viceversa



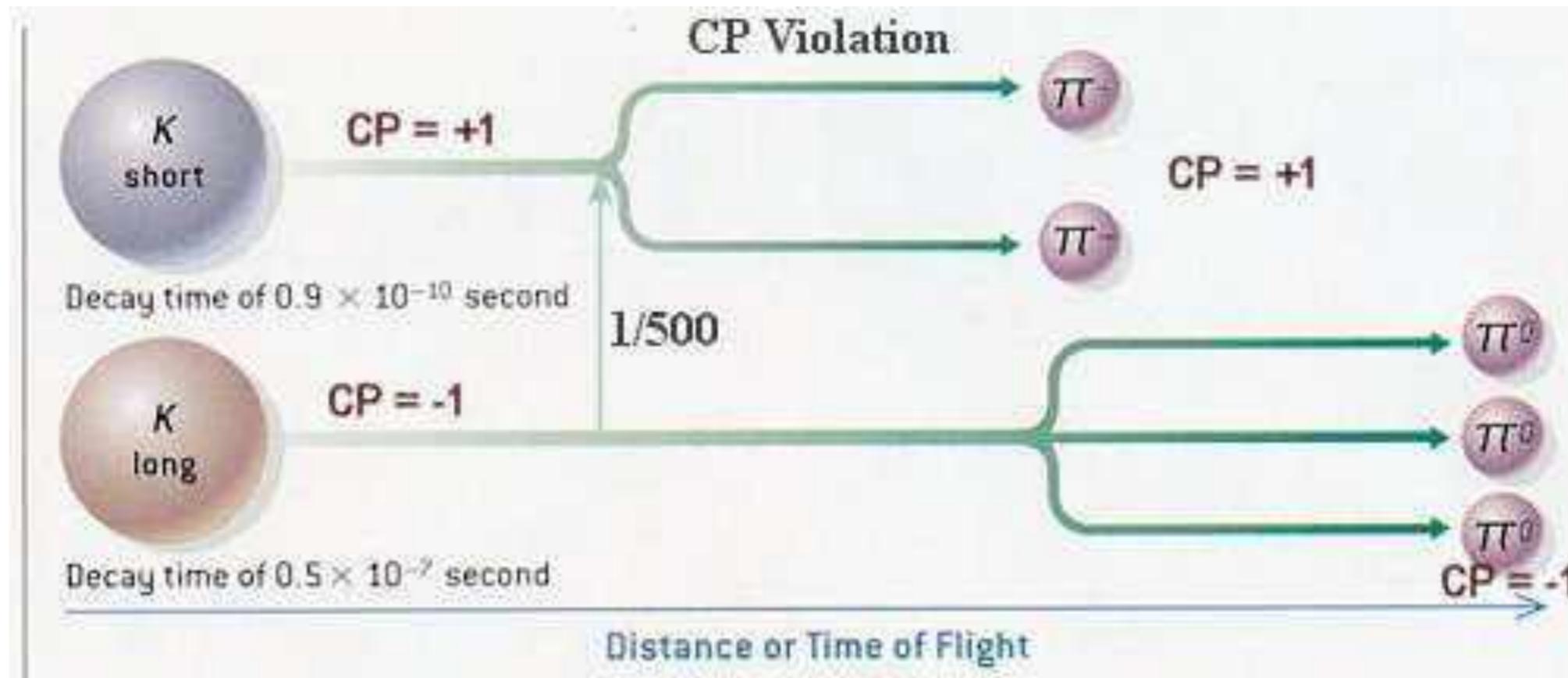
TENET

Particelle e antiparticelle legate da una simmetria speculare, se fossero persone (o automobili)...



La simmetria CP non è sempre rispettata

1964: Un decadimento su 500 dei Kaoni viola la simmetria CP



Alcune particelle si comportano quindi diversamente se guardate allo specchio!



Quindi tornano tutti i conti?

Bene, però la violazione di CP è piccola! **Un problema noto, ma non ancora risolto!**

VIOLATION OF CP INVARIANCE, C ASYMMETRY, AND BARYON ASYMMETRY OF THE UNIVERSE

A. D. Sakharov

Submitted 23 September 1966

ZhETF Pis'ma 5, No. 1, 32-35, 1 January 1967

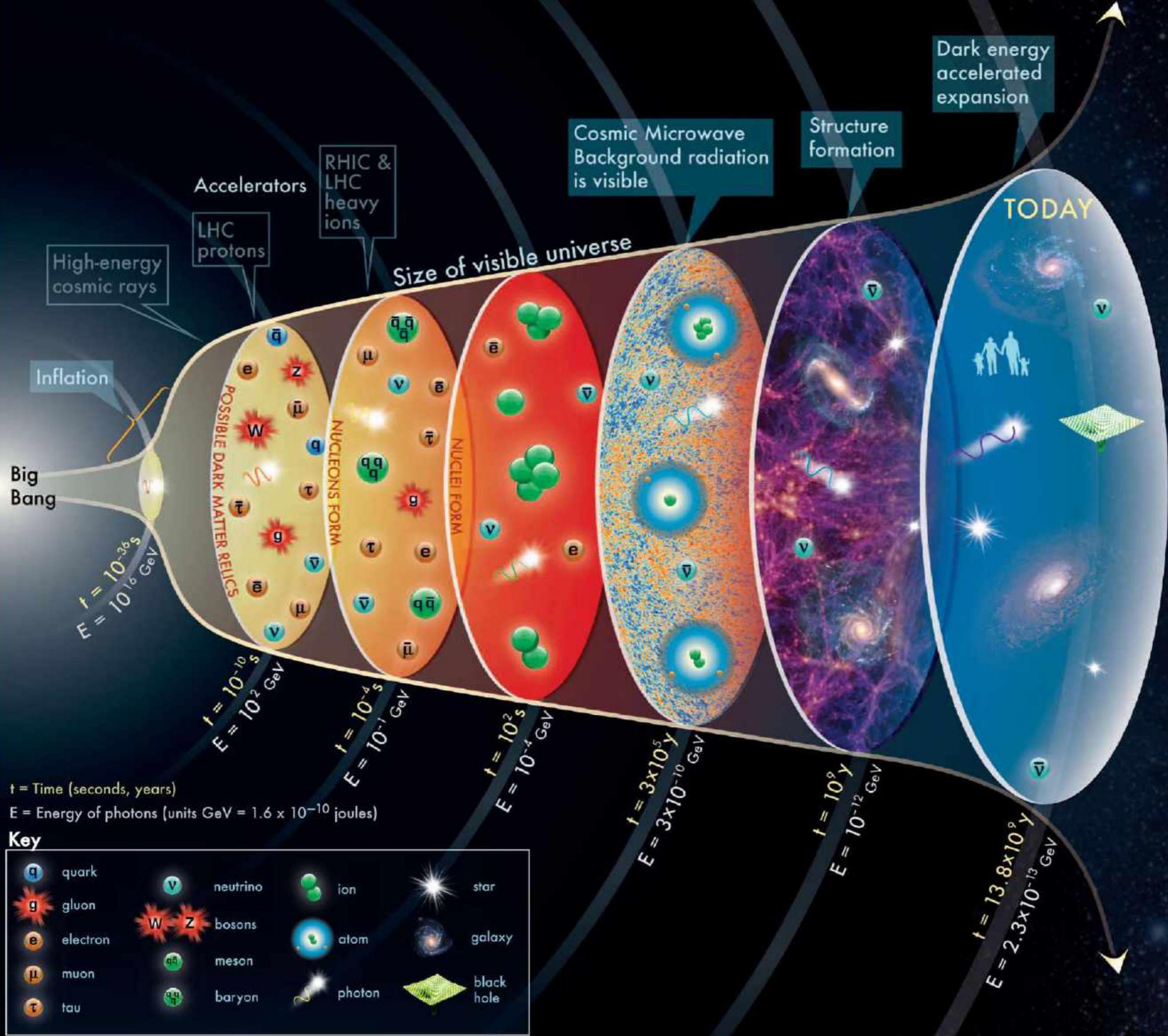
The theory of the expanding Universe, which presupposes a superdense initial state of matter, apparently excludes the possibility of macroscopic separation of matter from anti-matter; it must therefore be assumed that there are no antimatter bodies in nature, i.e., the Universe is asymmetrical with respect to the number of particles and antiparticles

A LHCb investighiamo questo e (tanti) altri fenomeni **studiando i quark charm (c) e beauty (b)**, che esistevano in grande quantità subito dopo il big bang

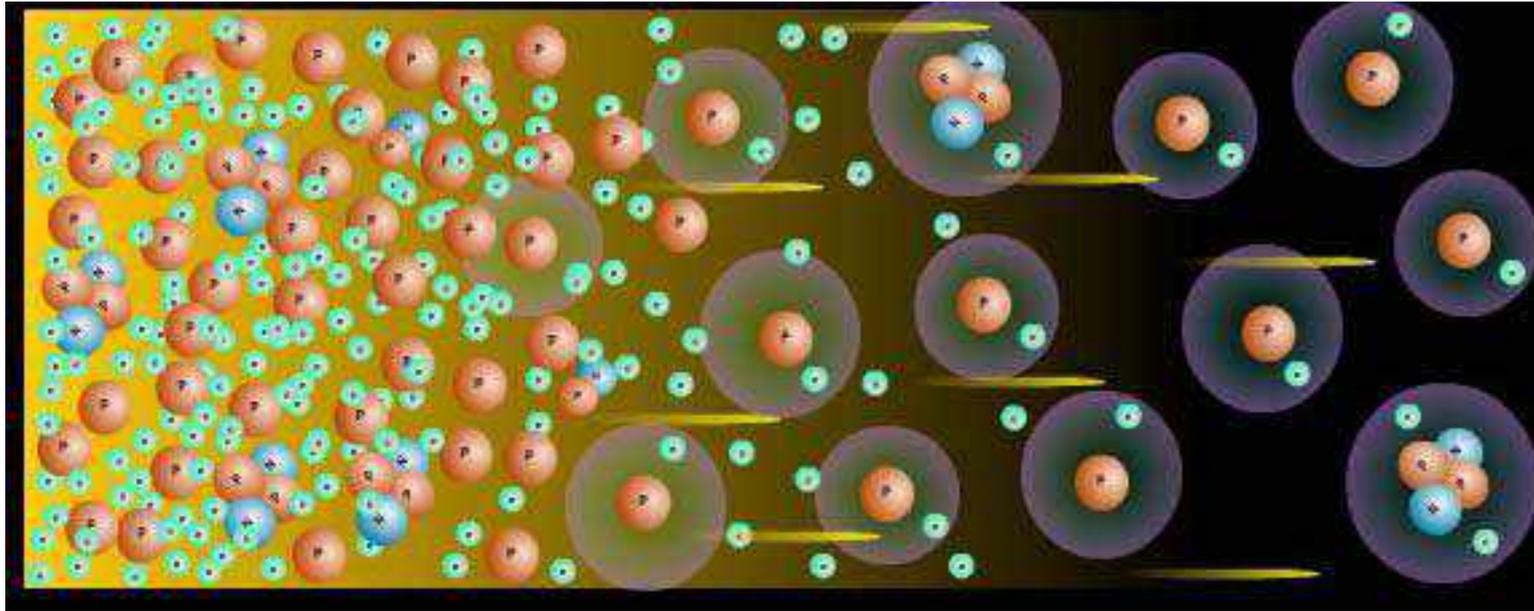
Come si torna indietro nel tempo?

1. **Produrne tanti** in collisioni ad altissima energia
2. **Osservarli** con un rivelatore estremamente preciso





1. Produrli

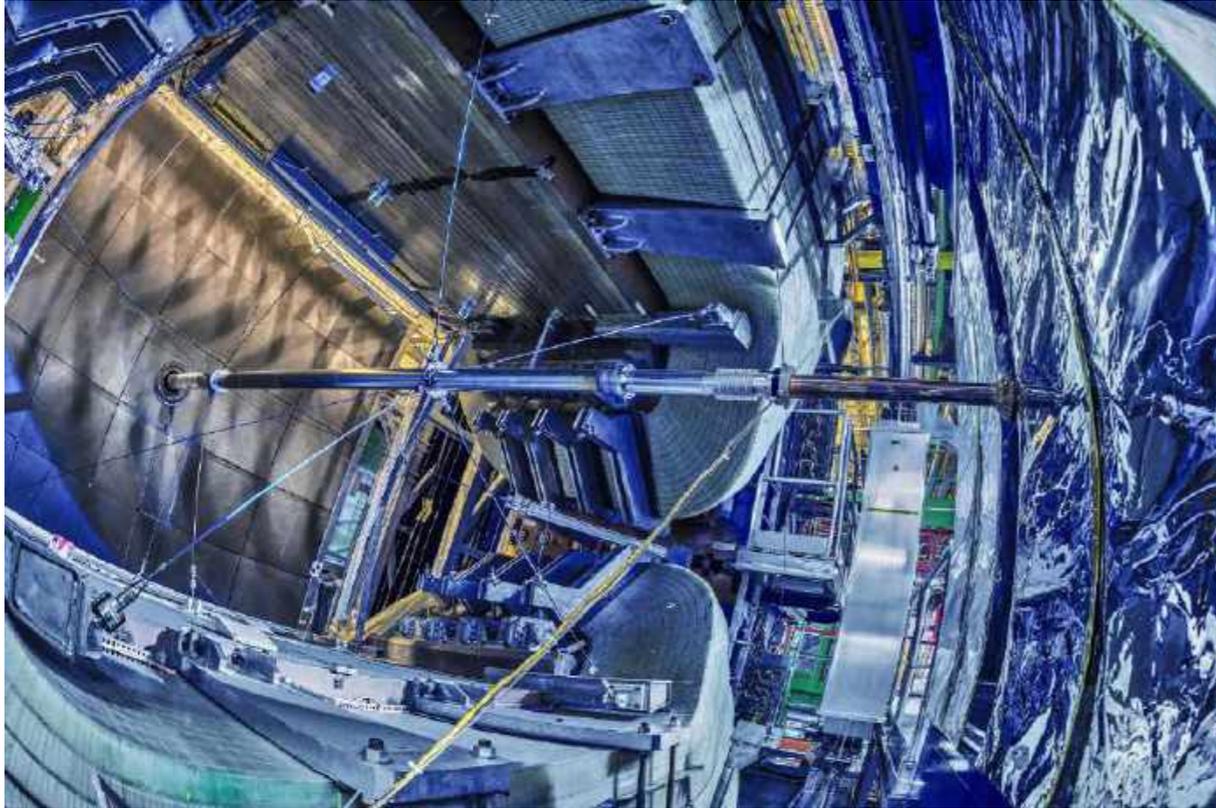


Dobbiamo ricreare l'universo primordiale in laboratorio, ovvero un gas caldissimo di particelle in agitazione...

...un plasma!



2. Osservarli



Dobbiamo costruire un rivelatore di particelle che unisca tutte le tecnologie più avanzate...

...oppure mettere l'universo in una scatola, alla Rick Sanchez

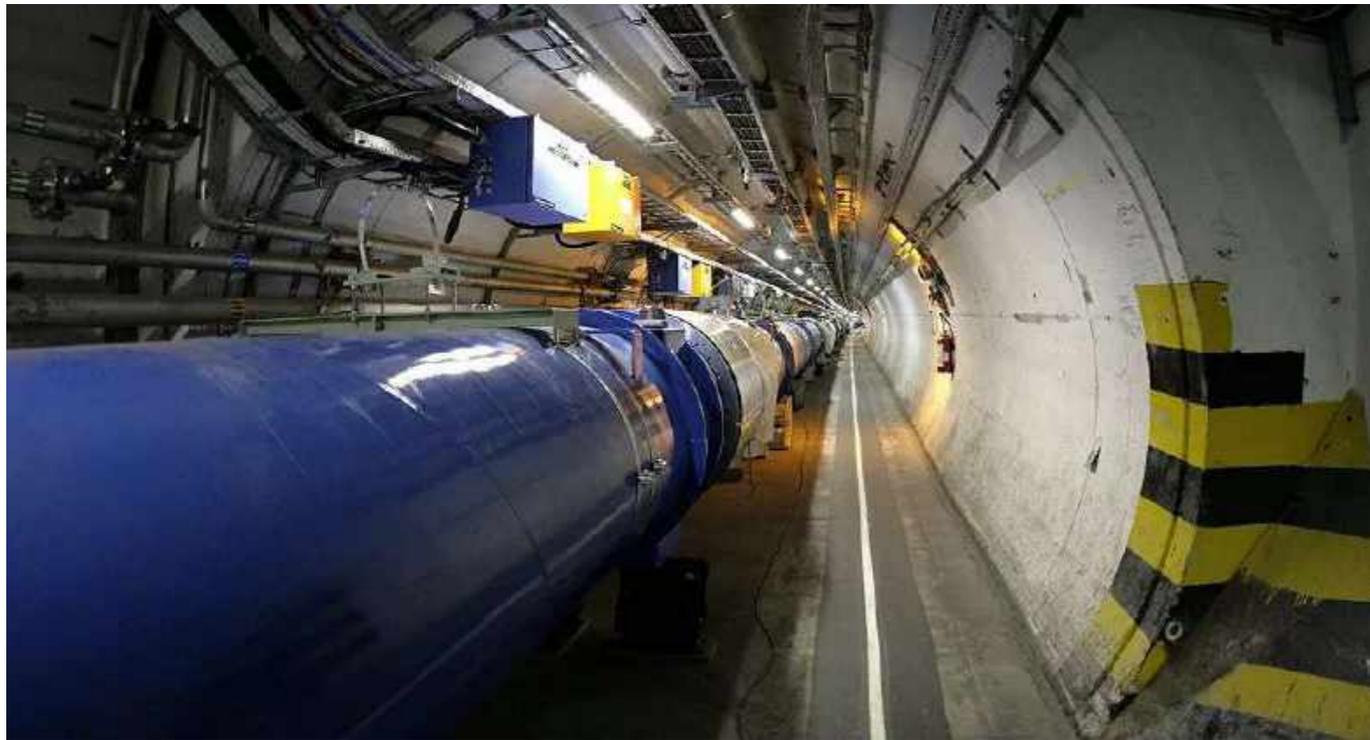


Fatto!

Abbiamo scelto la soluzione difficile, costruendo:

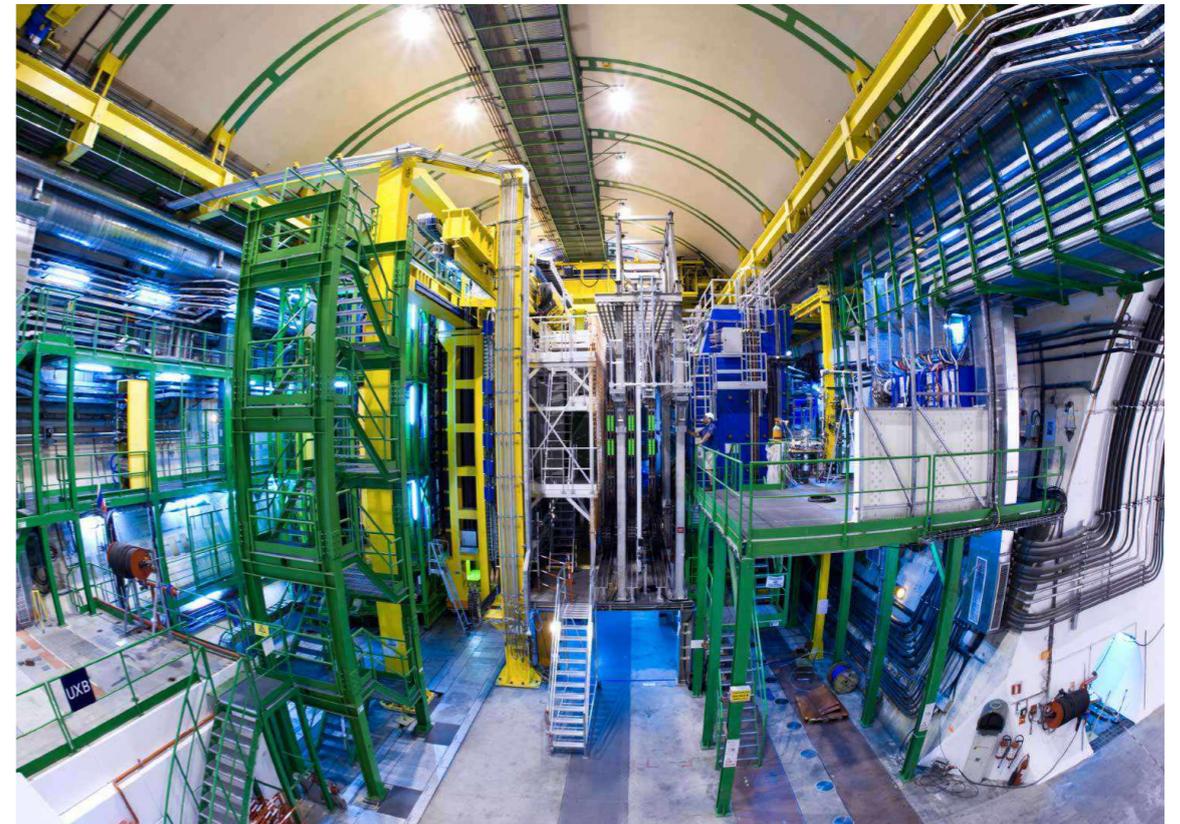
LHC

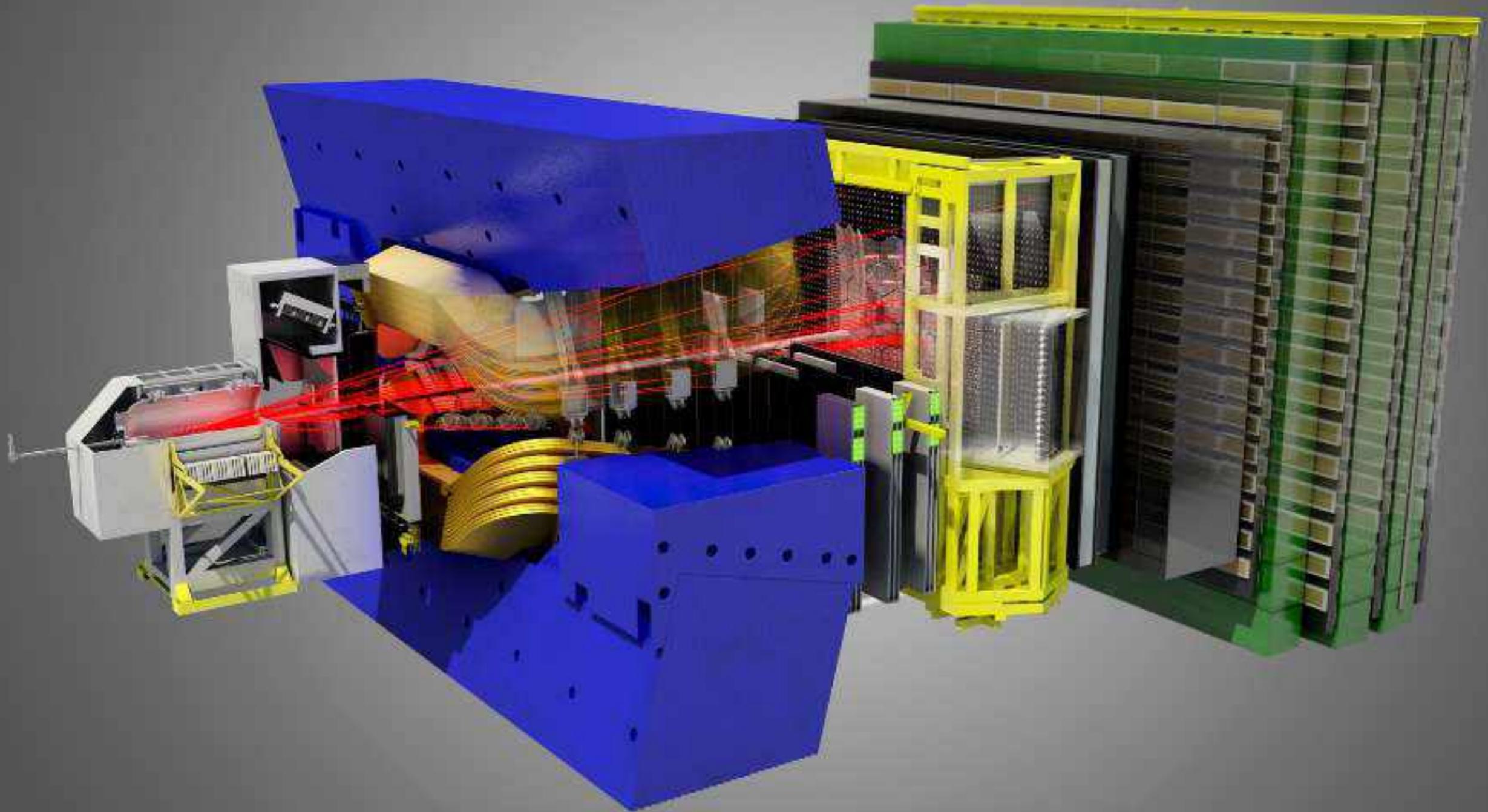
Il più grande e potente acceleratore di particelle del mondo



LHCb

Il rivelatore in grado di vedere più quark c e b di chiunque altro

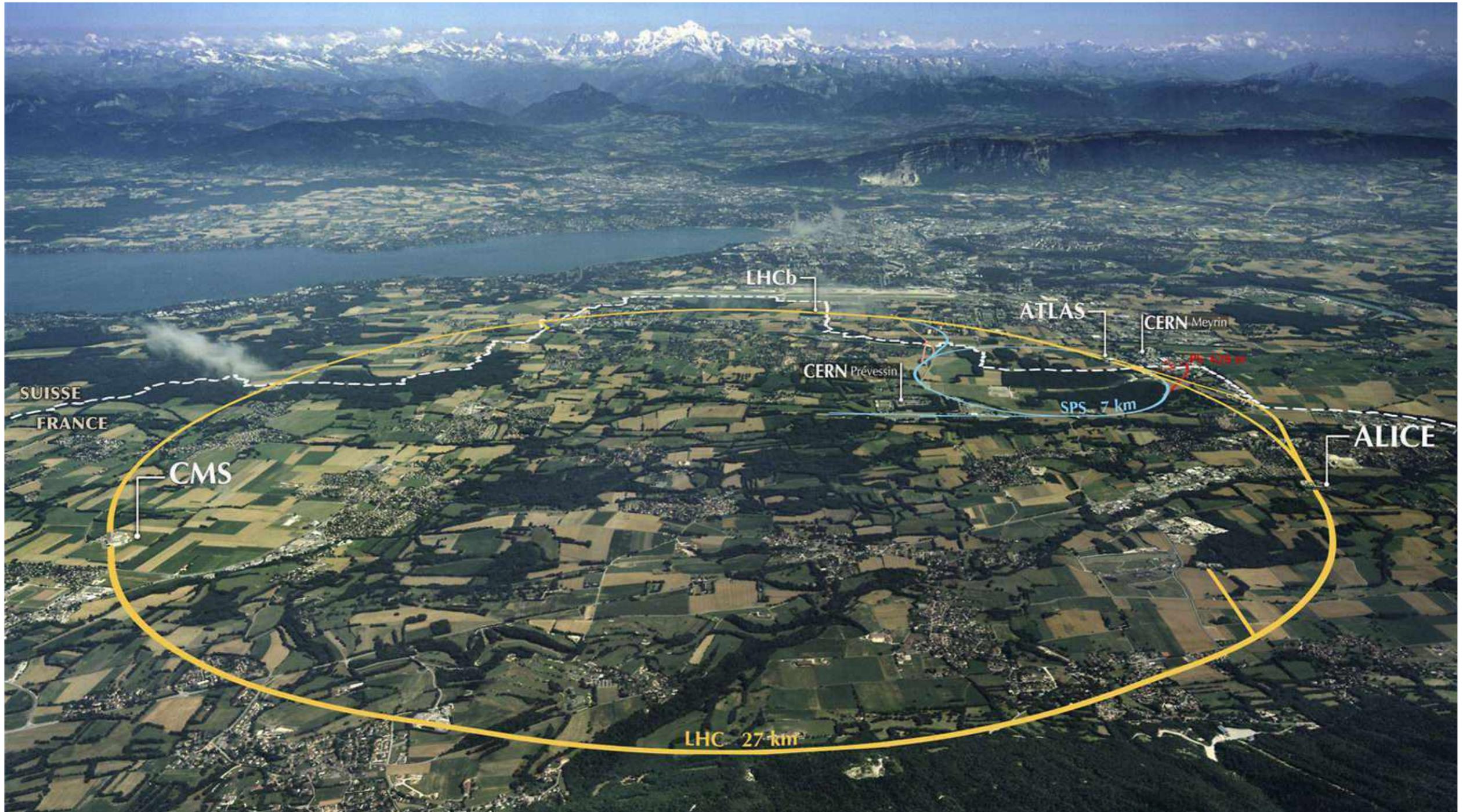




2. LHC e il rivelatore LHCb

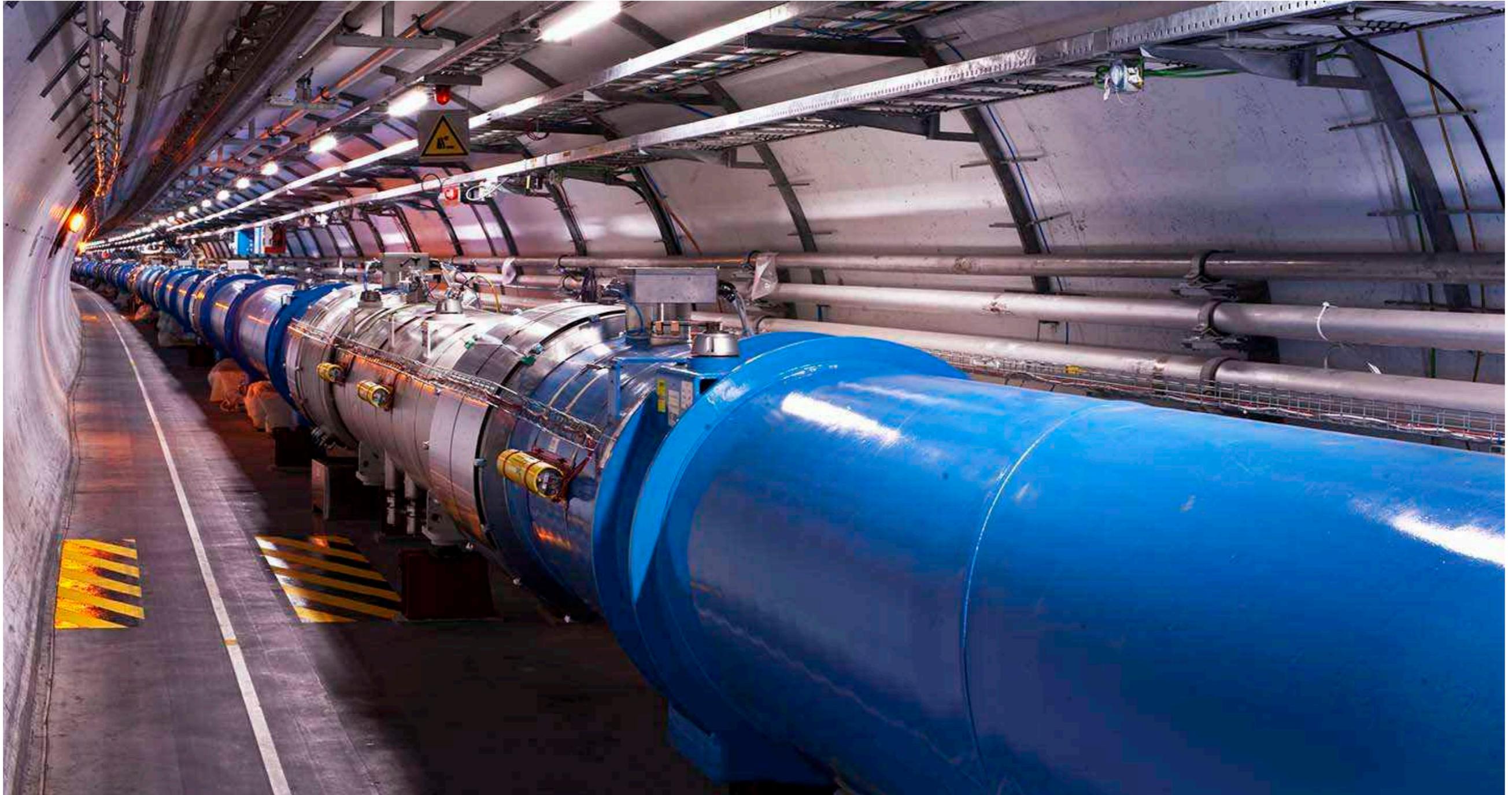
Il CERN e LHC

LHC si trova in un tunnel, 100 m sotto terra al CERN, tra Francia e Svizzera



Il Large Hadron Collider (LHC)

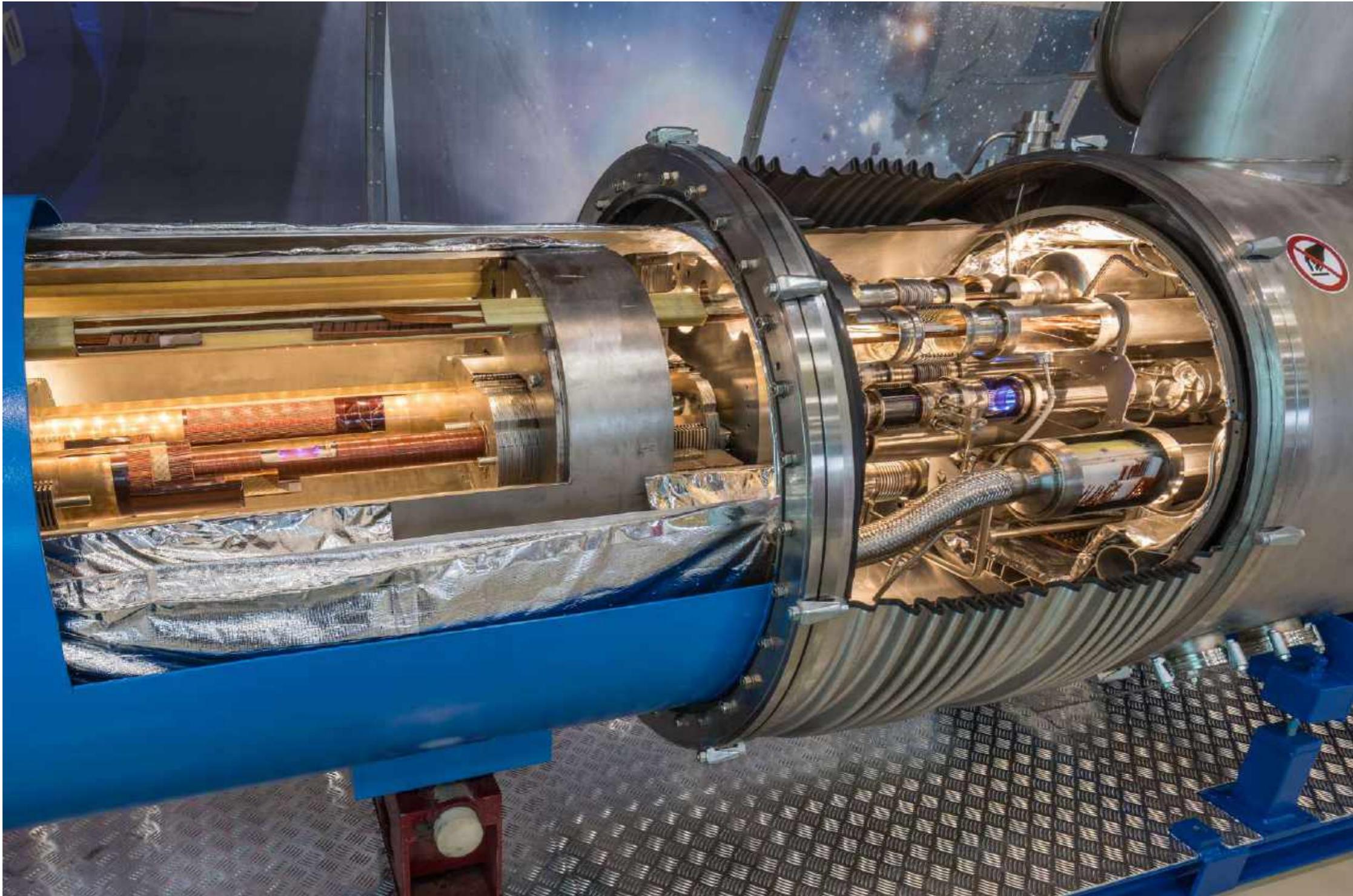
Potenti campi elettrici e magneti superconduttori (**8 Tesla**) accelerano e curvano i protoni



facendoli collidere ad un'energia di **13 TeV** ($1 \text{ TeV} = 10^{12}$ ElettronVolt)

Una sezione dell'acceleratore

2 fasci di protoni, divisi in pacchetti ($\sim 10^{11}$ protoni ciascuno), circolano in direzioni opposte



Genera **600 milioni di collisioni al secondo.**

Una collisione a LHC: $E = mc^2$!

Un'opera titanica



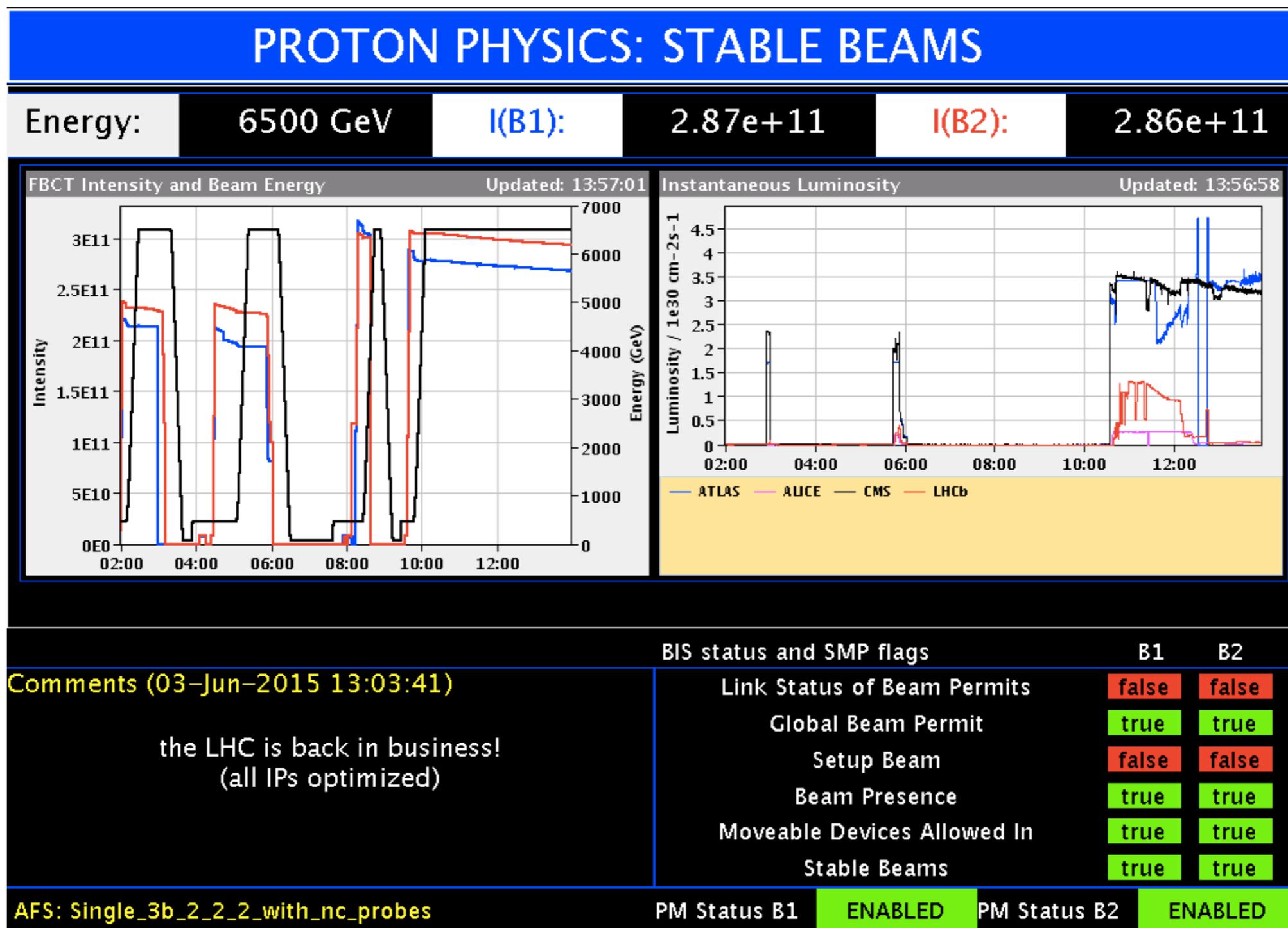
THE LHC IS

- THE LARGEST MACHINE IN THE WORLD
- THE EMPTIEST SPACE IN THE SOLAR SYSTEM
- AT TIMES, 100,000 TIMES HOTTER THAN THE SUN, OR COLDER THAN OUTER SPACE
- THE MOST POWERFUL SUPERCOMPUTER SYSTEM EVER BUILT

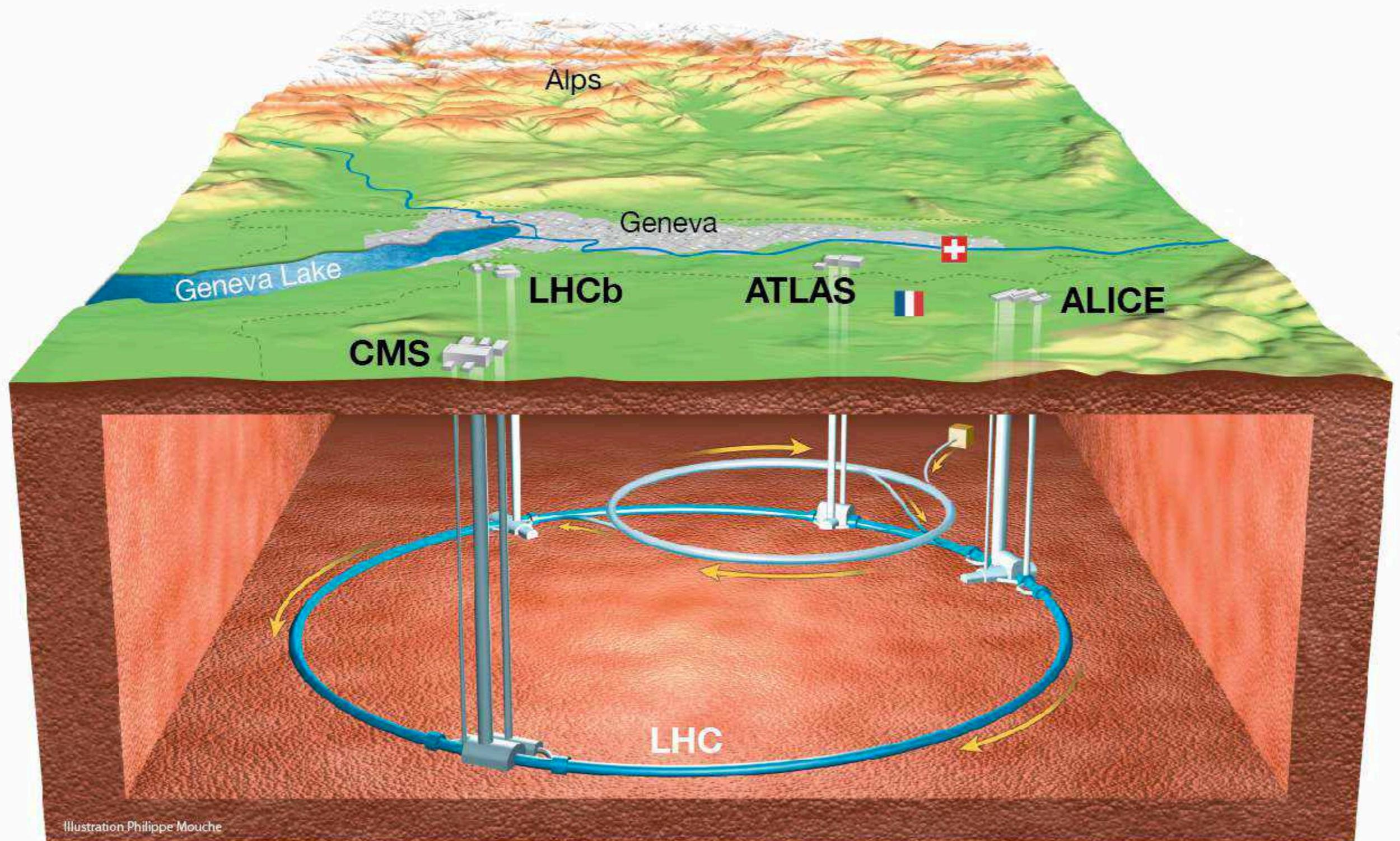
Cosa succede a LHC?

Cercate “LHC vistars” su google: <https://op-webtools.web.cern.ch/vistar/vistars.php>

2018-2021: fase di shutdown di LHC per migliorare i rivelatori, ripartenza questo mese!

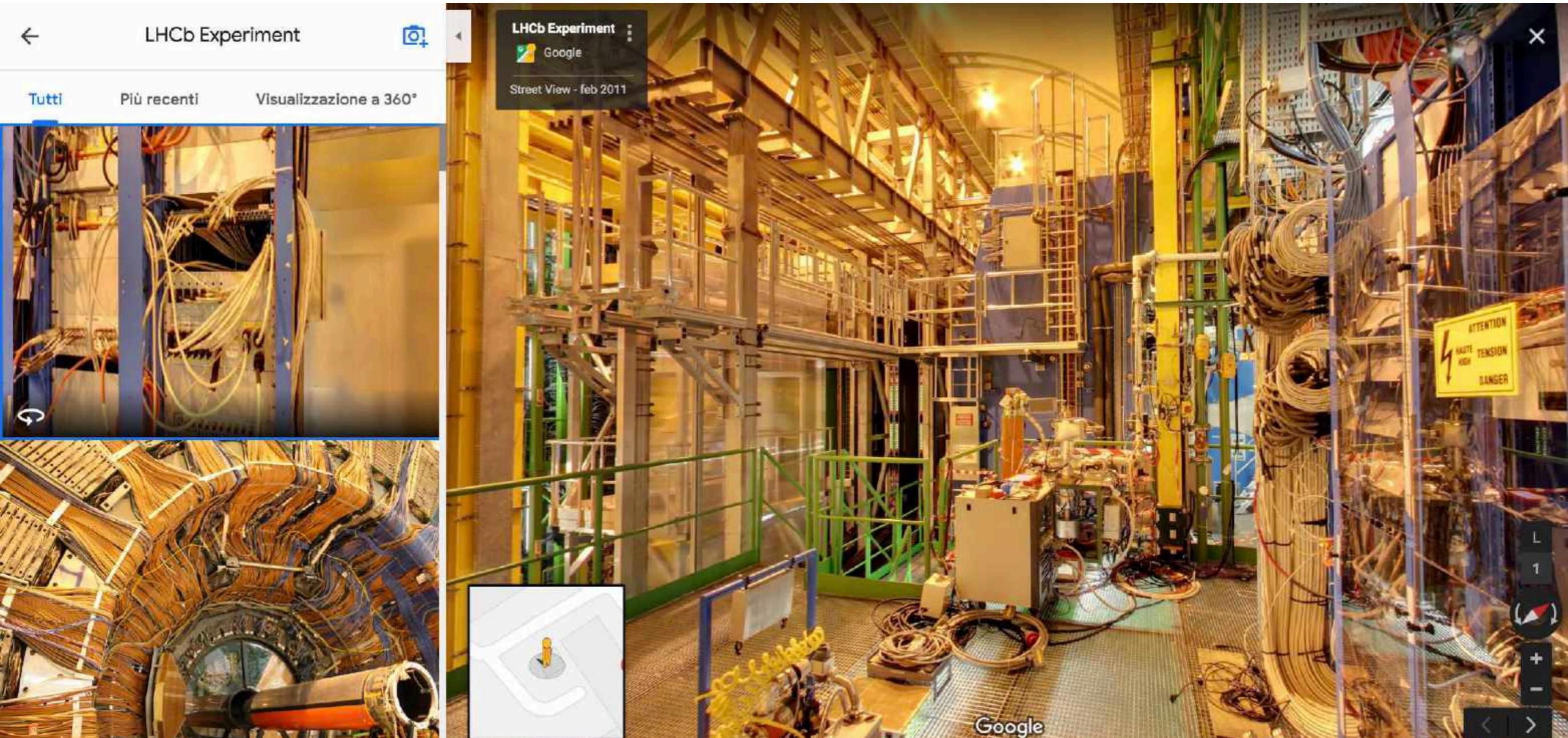


Large Hadron Collider Beauty (LHCb)

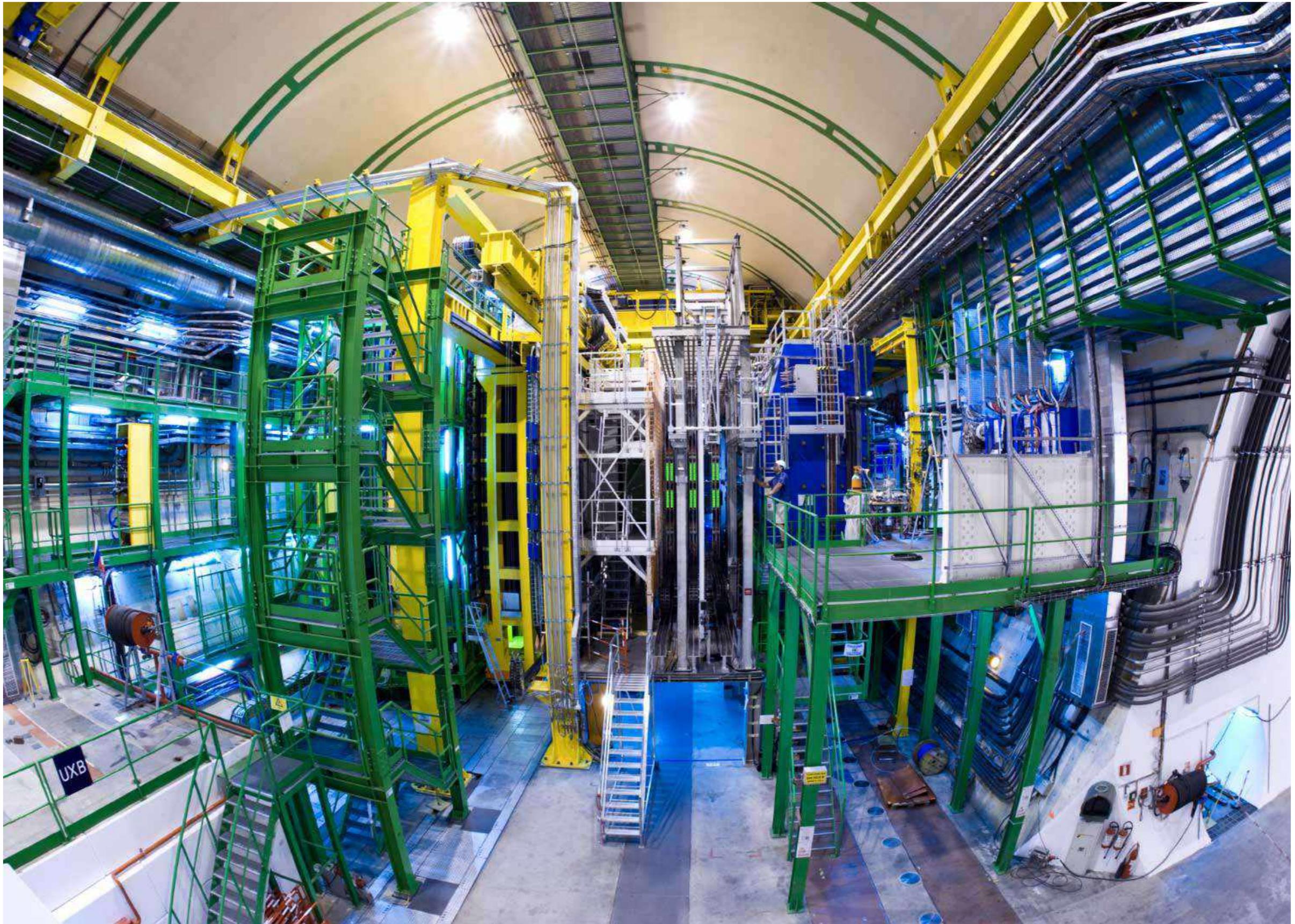


LHCb: Google Maps

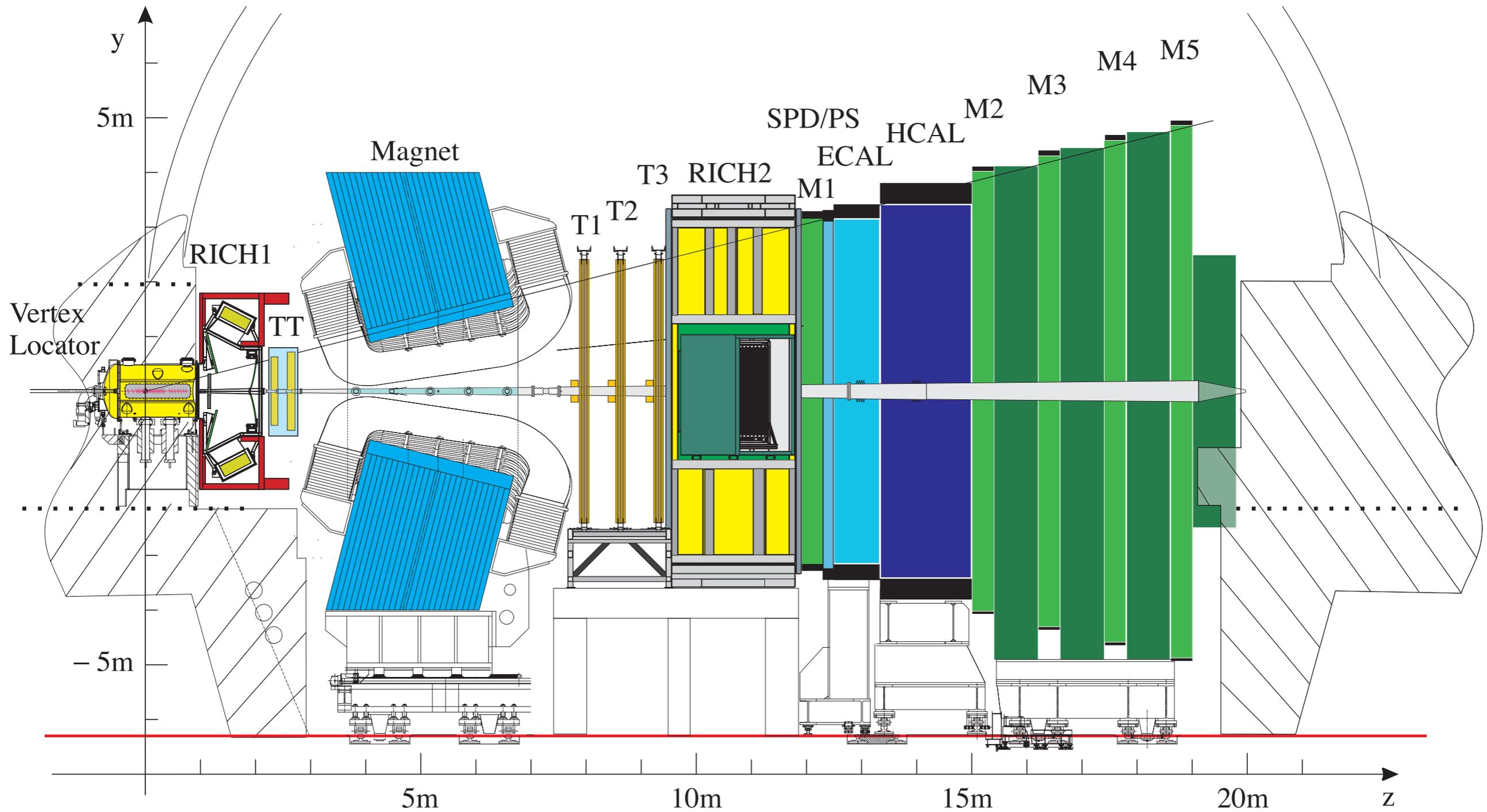
Basta cercare su google maps "LHCb experiment" (oppure "McDonald's Ferney-Voltaire")
e 100 metri sotto terra...



Il rivelatore LHCb

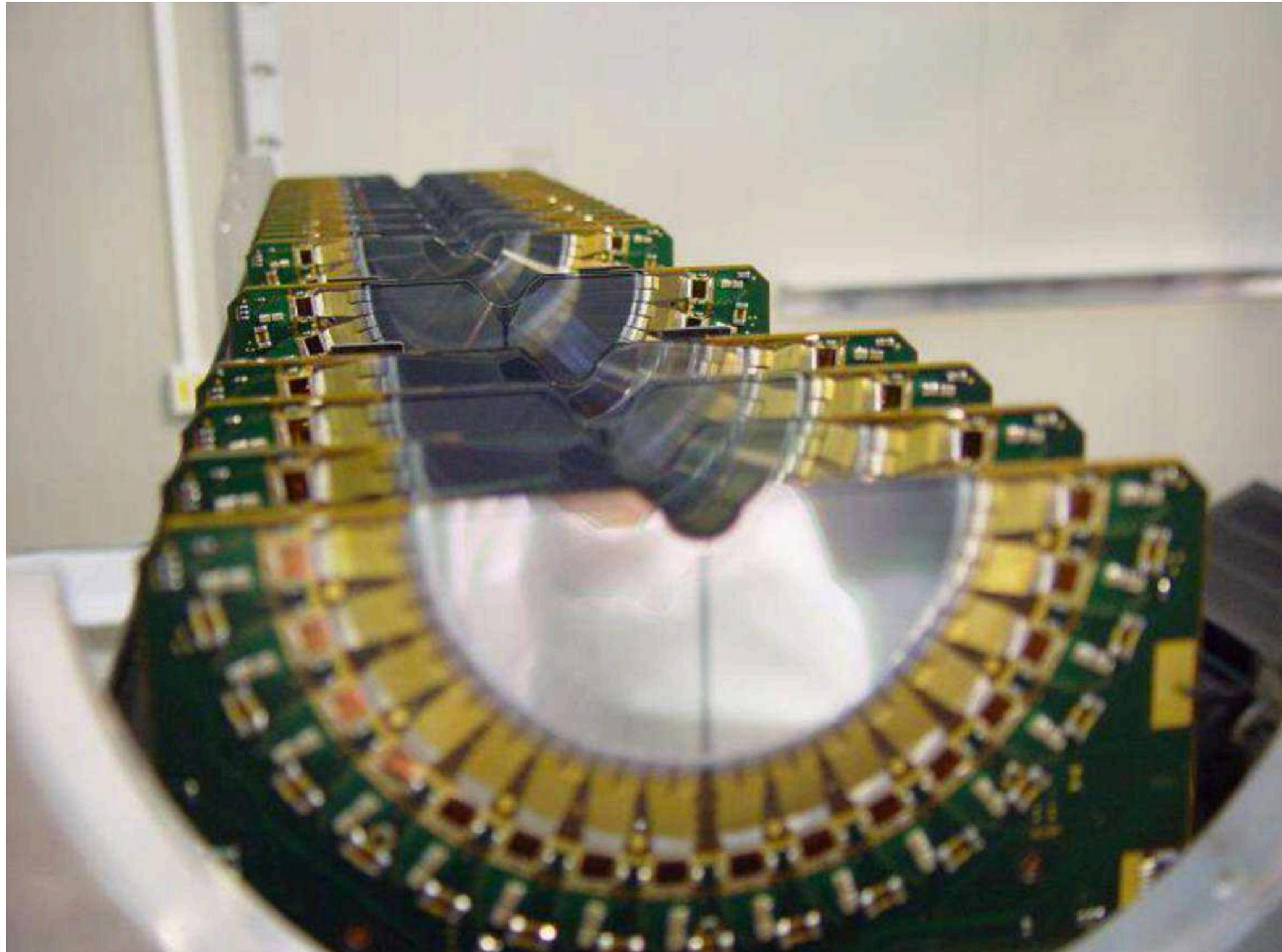


Schema del rivelatore



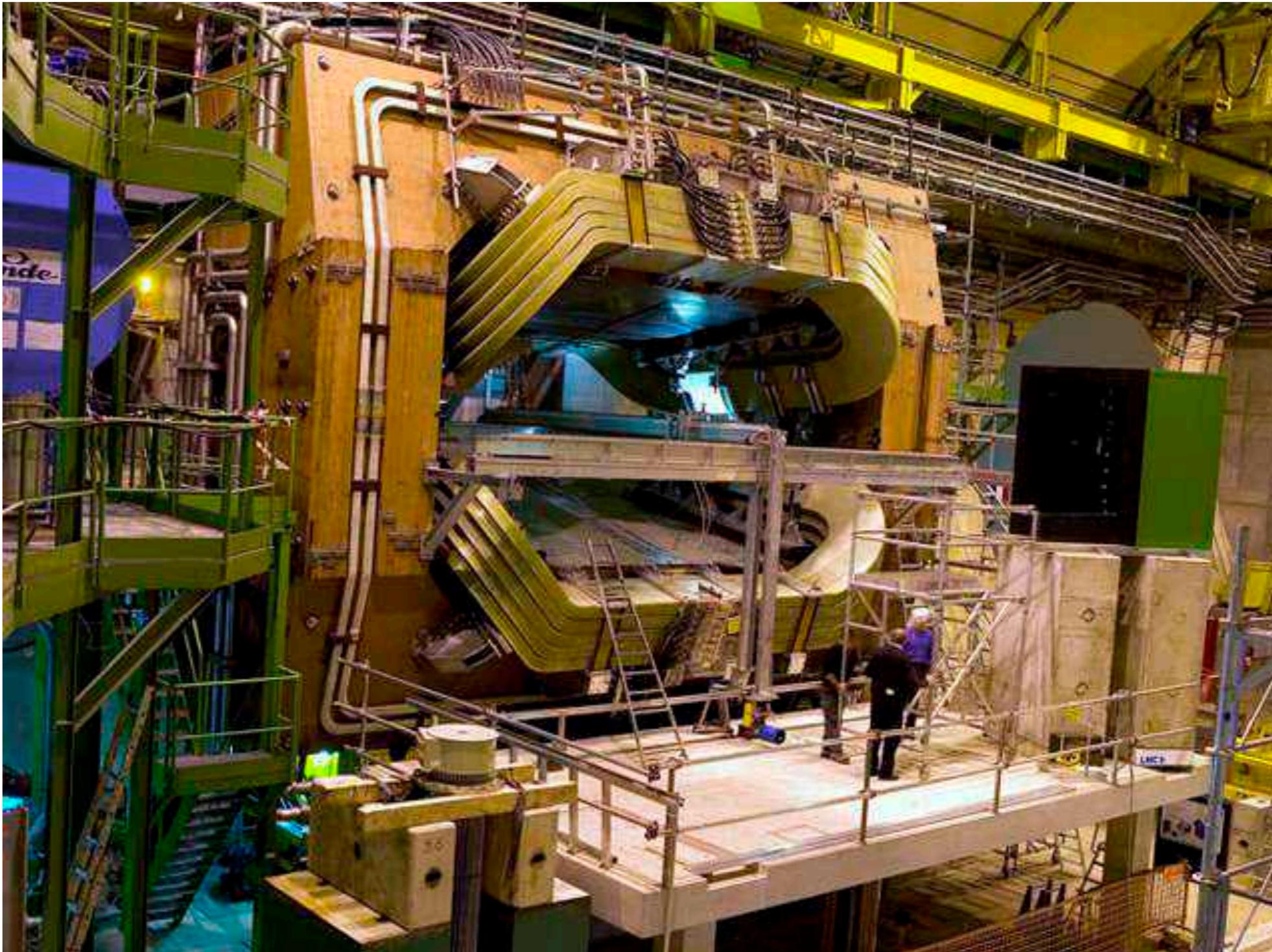
Il rivelatore di vertice (VELO)

Durante le collisioni il VELO dista solo 8 mm dal fascio di protoni!



Il magnete

Fa curvare le particelle cariche per poterne misurare l'impulso (massa x velocità).
peso = 1400 t, potenza = 4200 kW, 150000 l/h di acqua di raffreddamento



Ma a che serve nella vita la forza di Lorentz?

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

[se v e B perpendicolari]

$$F = qvB$$

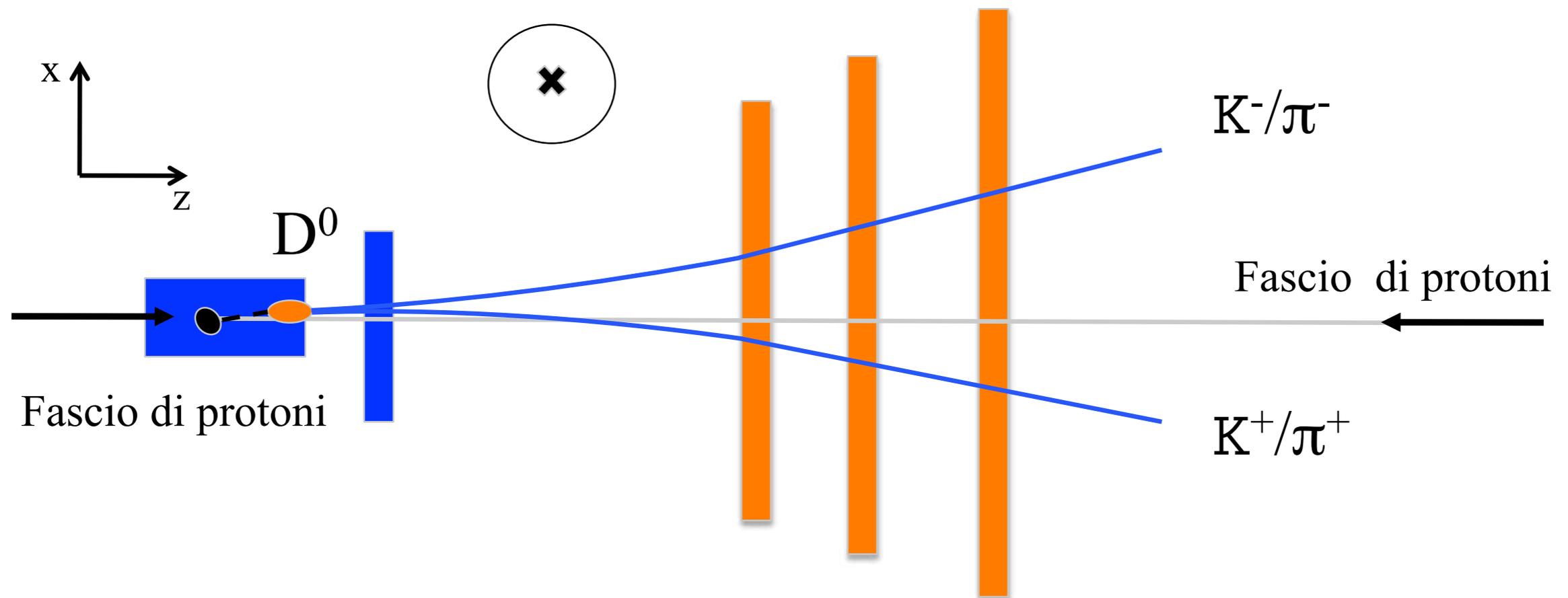
$$F = ma \Rightarrow a = \frac{v^2}{R}$$

$$qvB = m \frac{v^2}{R} \Rightarrow R = \frac{p}{qB}$$

Forza di Lorentz

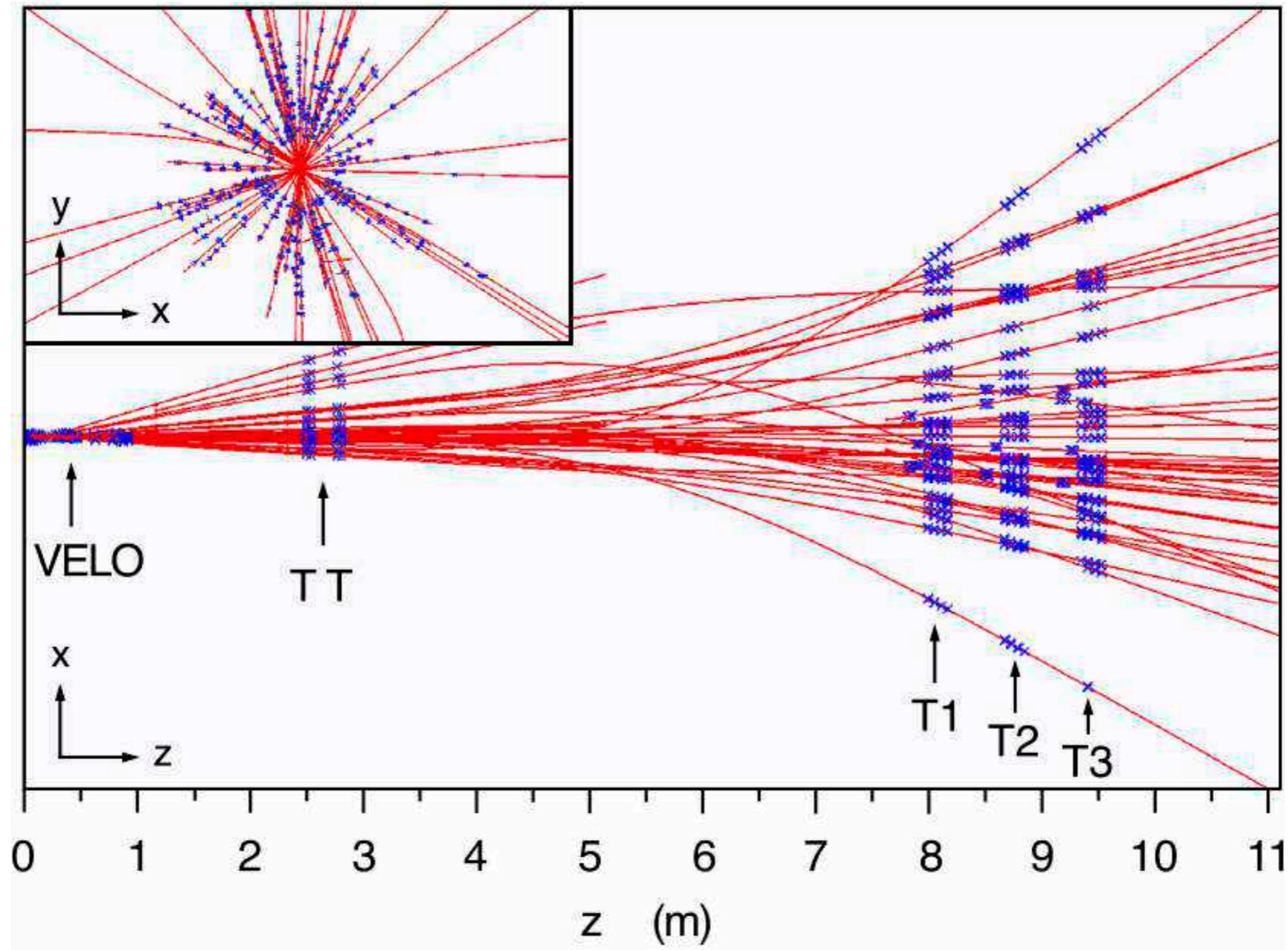
Equazione di Newton, moto circolare

B field

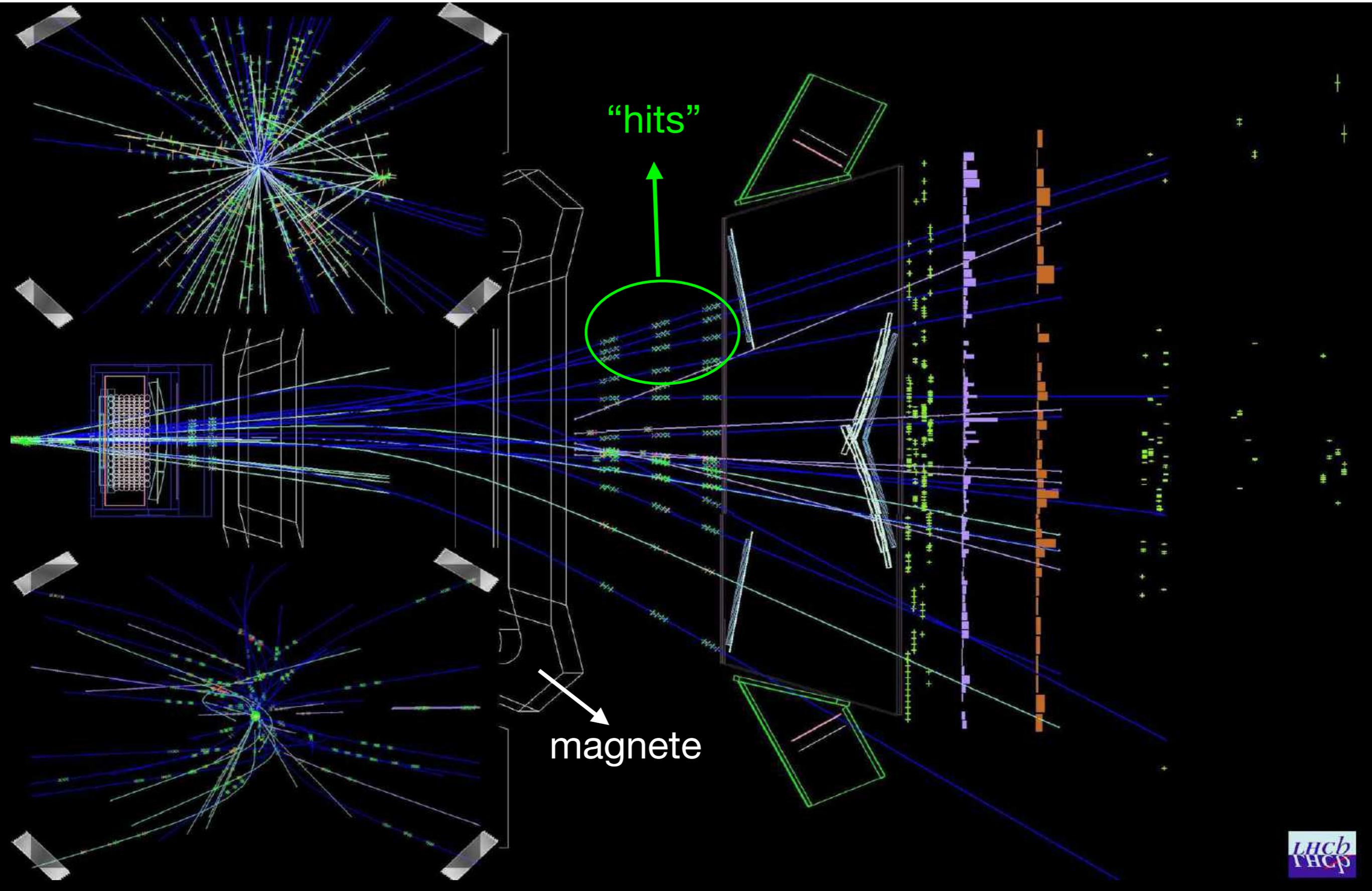


I tracciatori

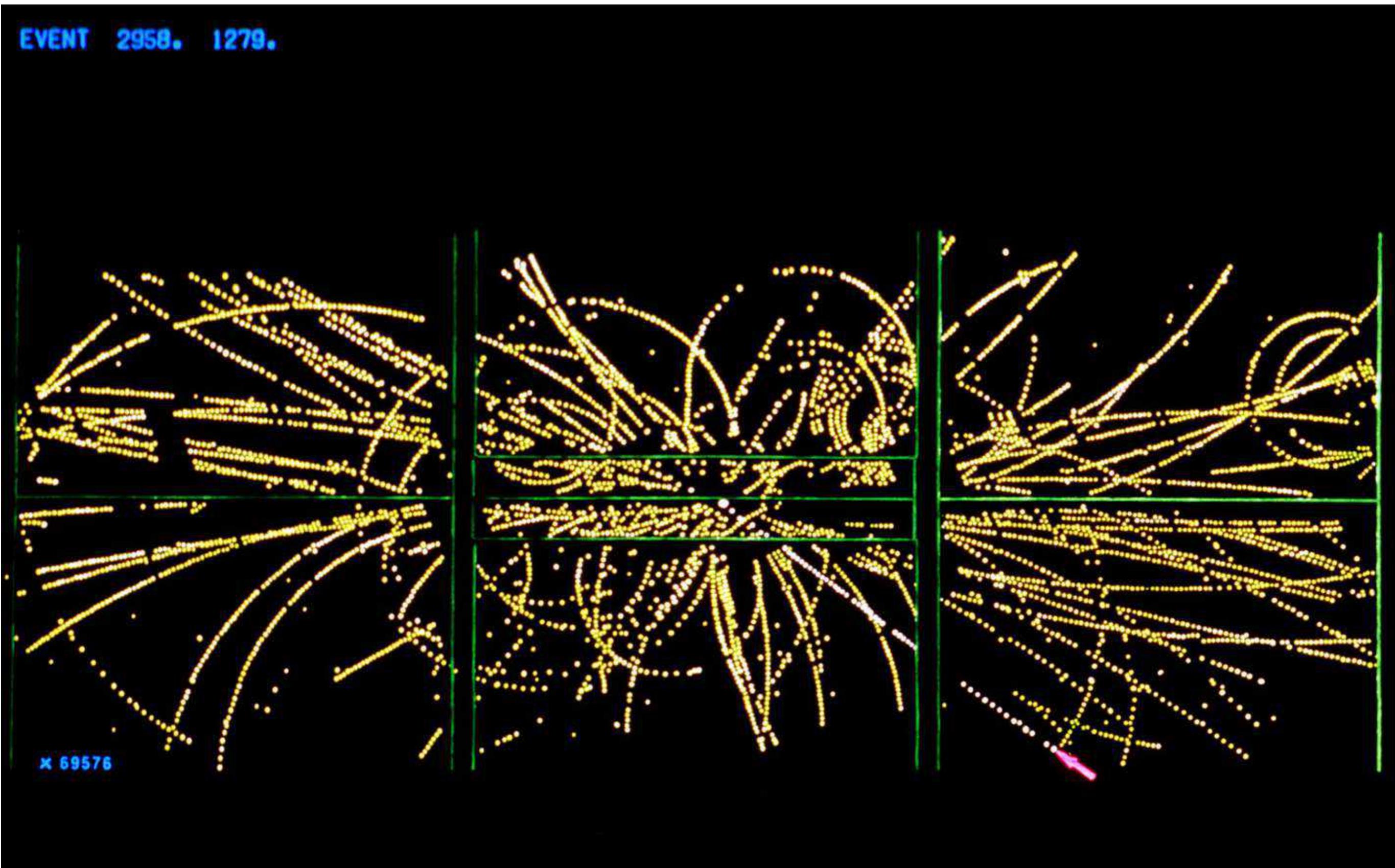
Rivelatori al silicio che registrano i punti di passaggio delle particelle ("hits") per ricostruirne la traiettoria



Tracce di particelle in LHCb

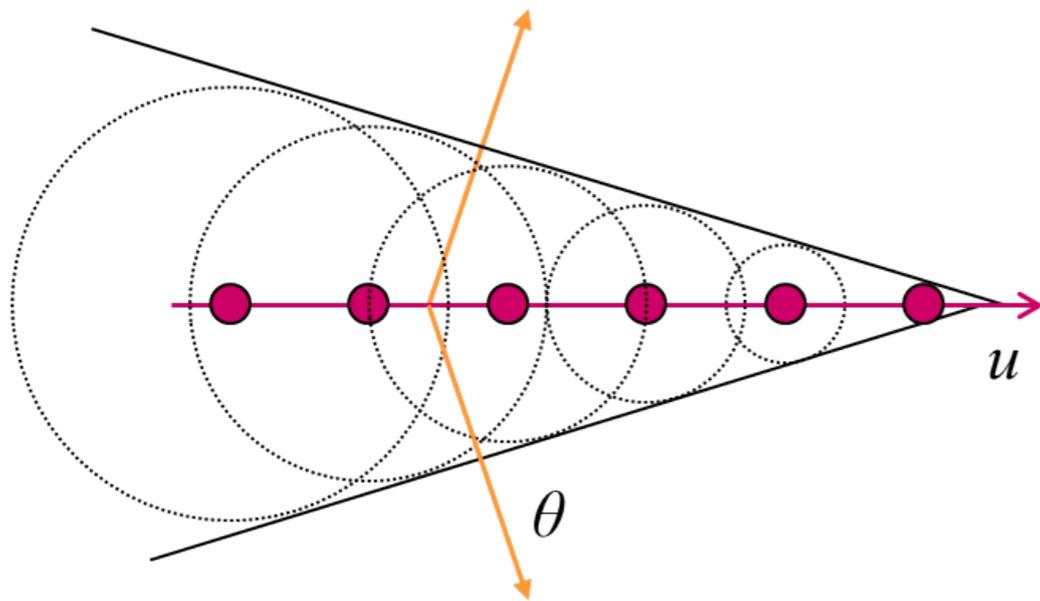


Tracce di particelle in UA1 (scoperta Nobel 1984!)

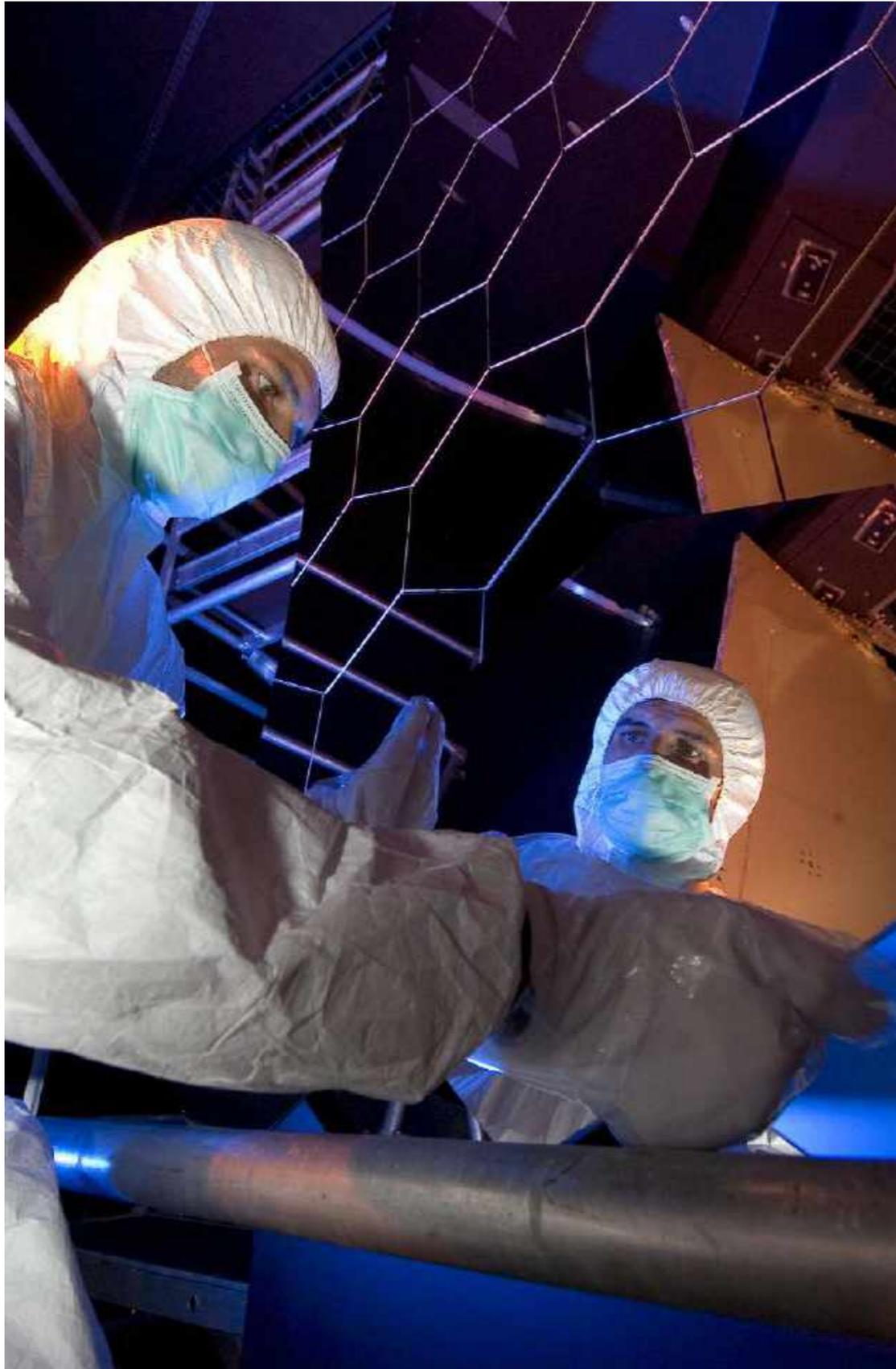


Luce Cherenkov

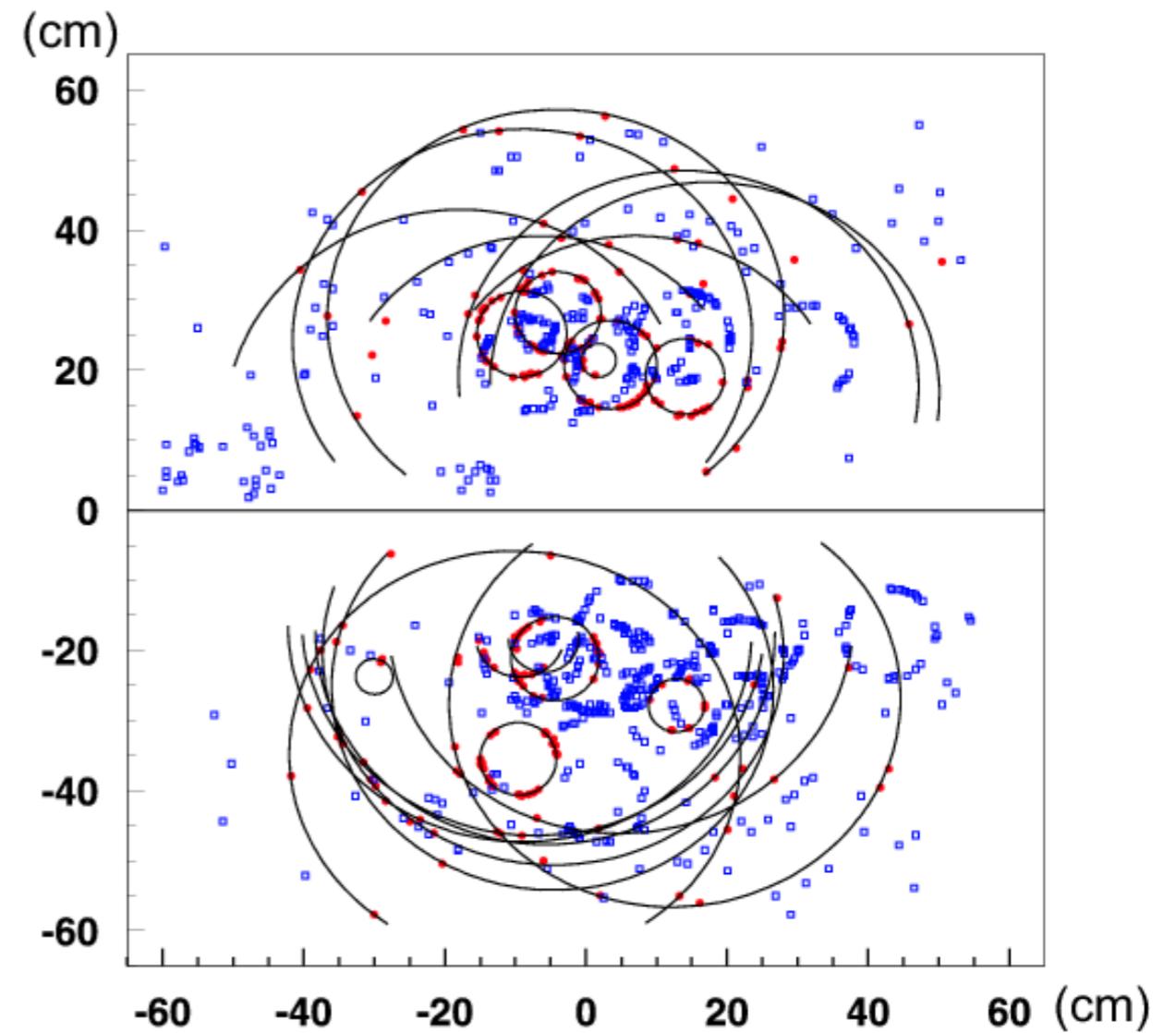
Possiamo **identificare** le particelle cariche in base alla loro emissione di luce Cherenkov



Ring Imaging Cherenkov Detector (RICH)

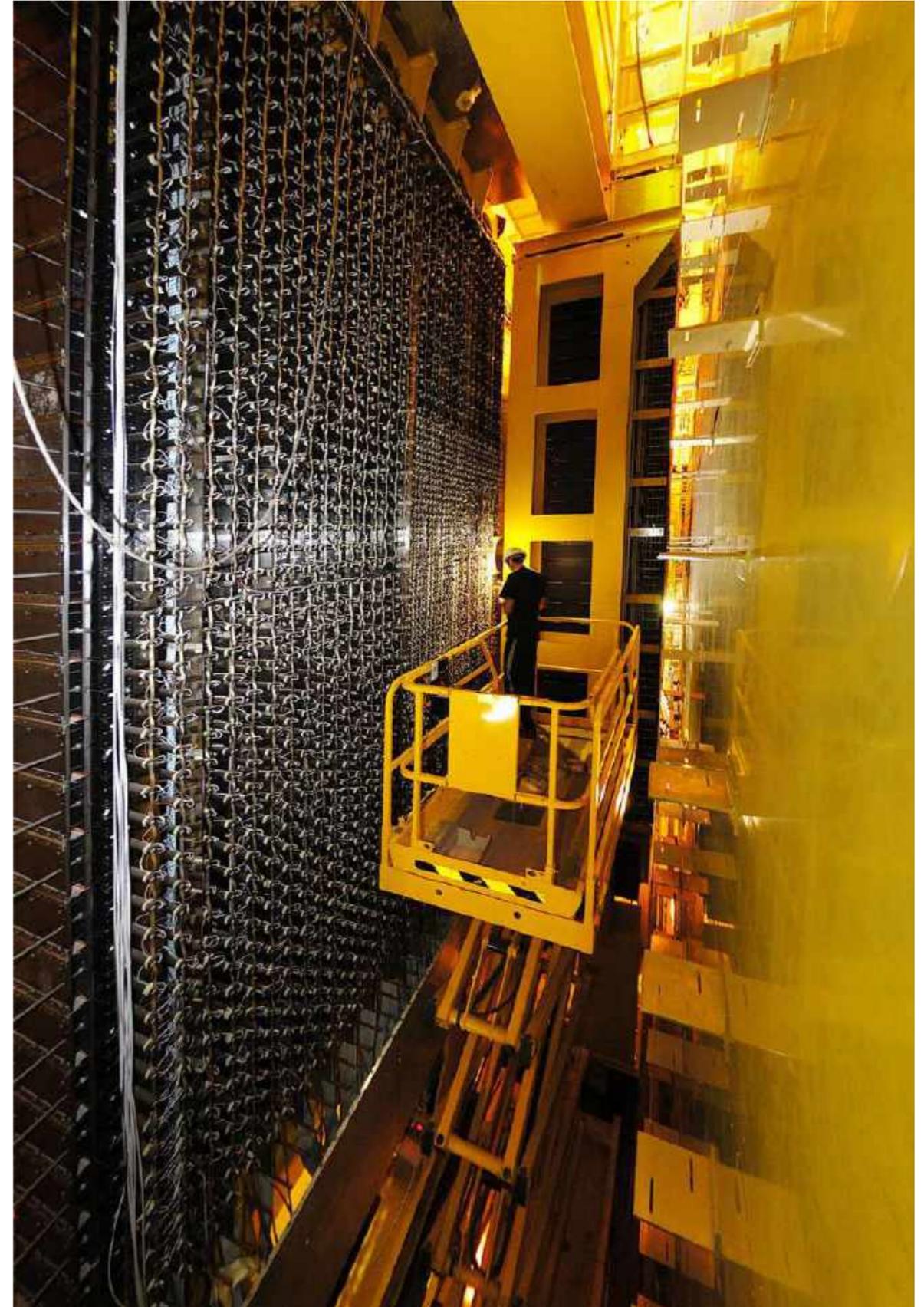
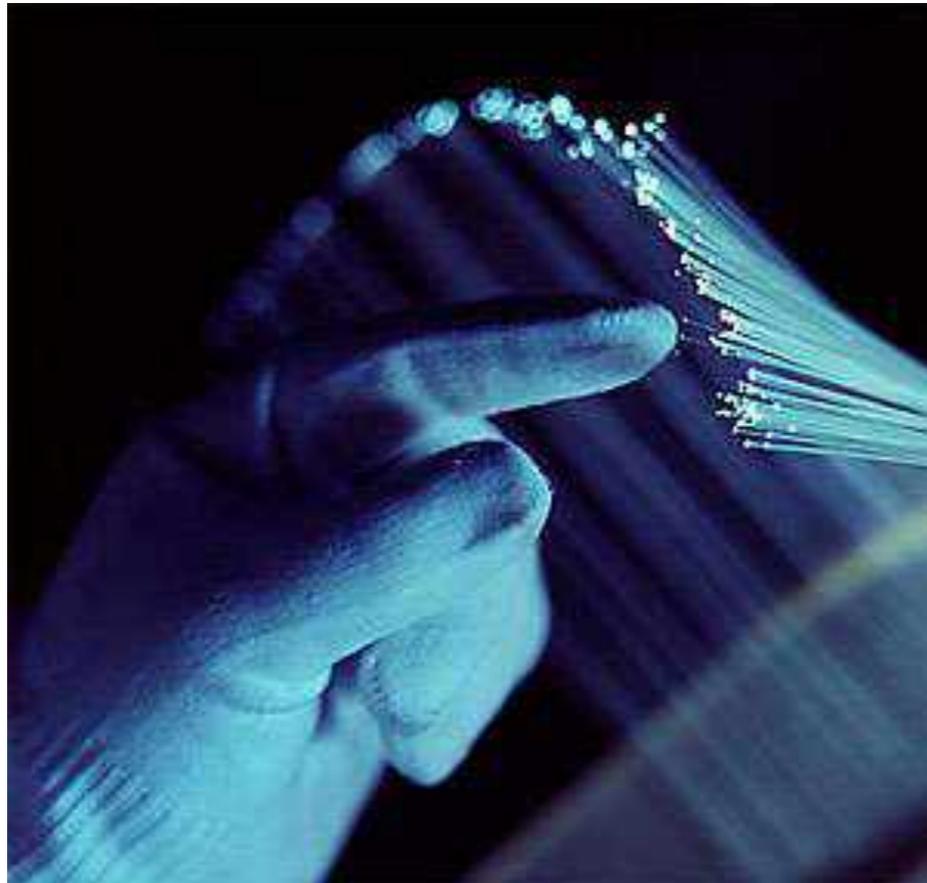


La luce Cherenkov si riflette sugli specchi e viene rivelata da fotomoltiplicatori



I calorimetri: misura dell'energia

Riconosce le particelle in base alle interazioni elettromagnetiche (ECAL) e forti (HCAL)



Il rivelatore di muoni

Per gli elusivi muoni è necessario un rivelatore specifico e degli enormi muri di ferro



Il rivelatore di muoni

1500 camere MWPC (435 m²)
molte costruite a Frascati!

Un sistema enorme e complicatissimo,
e se qualcosa non funziona?

Spegni e riaccendi (seriamente)



altrimenti chiami Nikolai

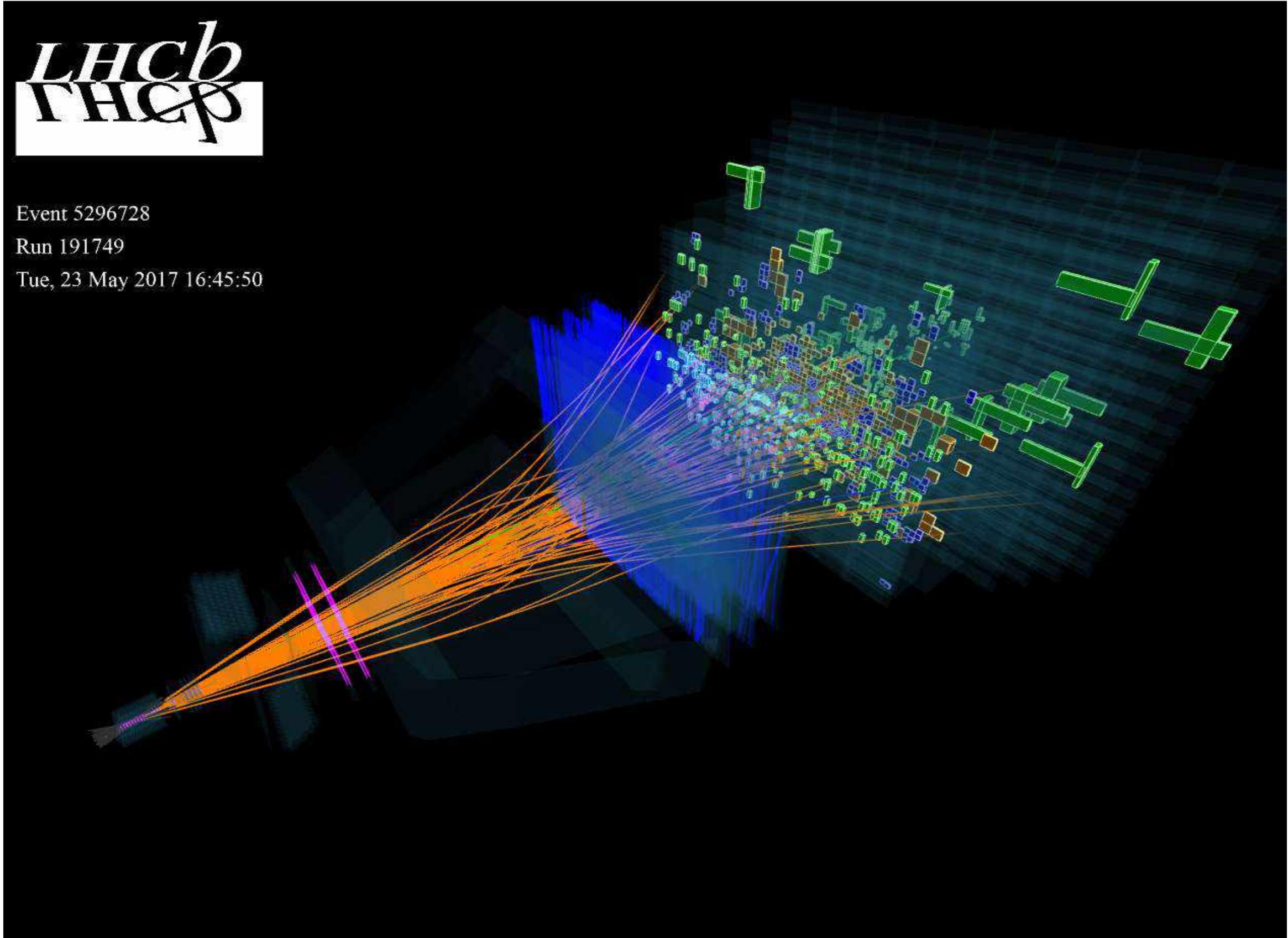


Allineamento e calibrazione

Per ottenere la precisione estrema che ci serve per studiare CP effettuiamo un preciso allineamento e la calibrazione di tutti i sottorivelatori
I sensori del VELO ad esempio devono essere allineati entro pochi micron (10^{-6} m)!



Ecco il risultato: event display



Acquisizione dati a LHCb: il trigger

40 Tb di dati al secondo!



Selezione eventi interessanti: Trigger



80 Gb al secondo



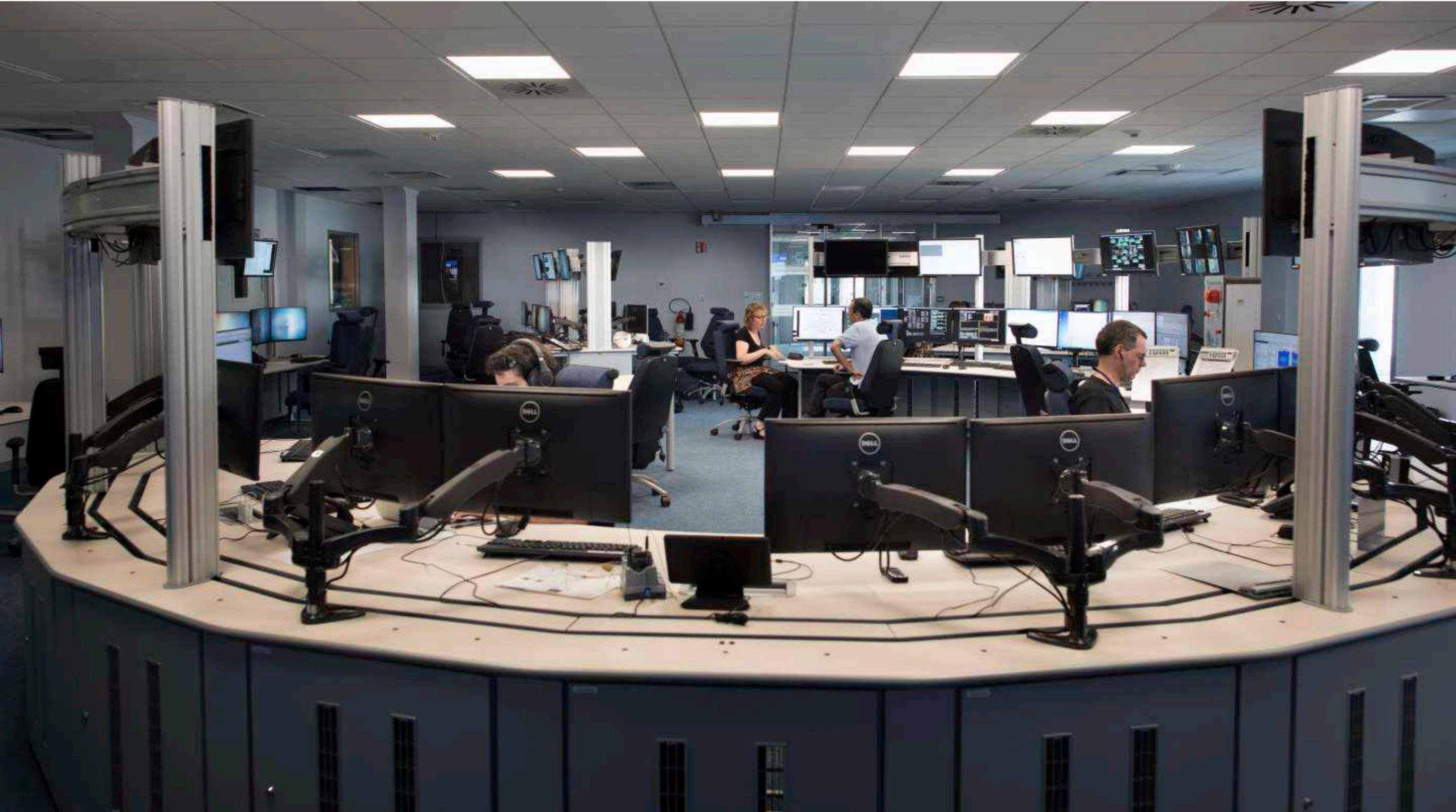
Gestito da una server farm, dal 2022 con GPU:



... but can it run Crysis?

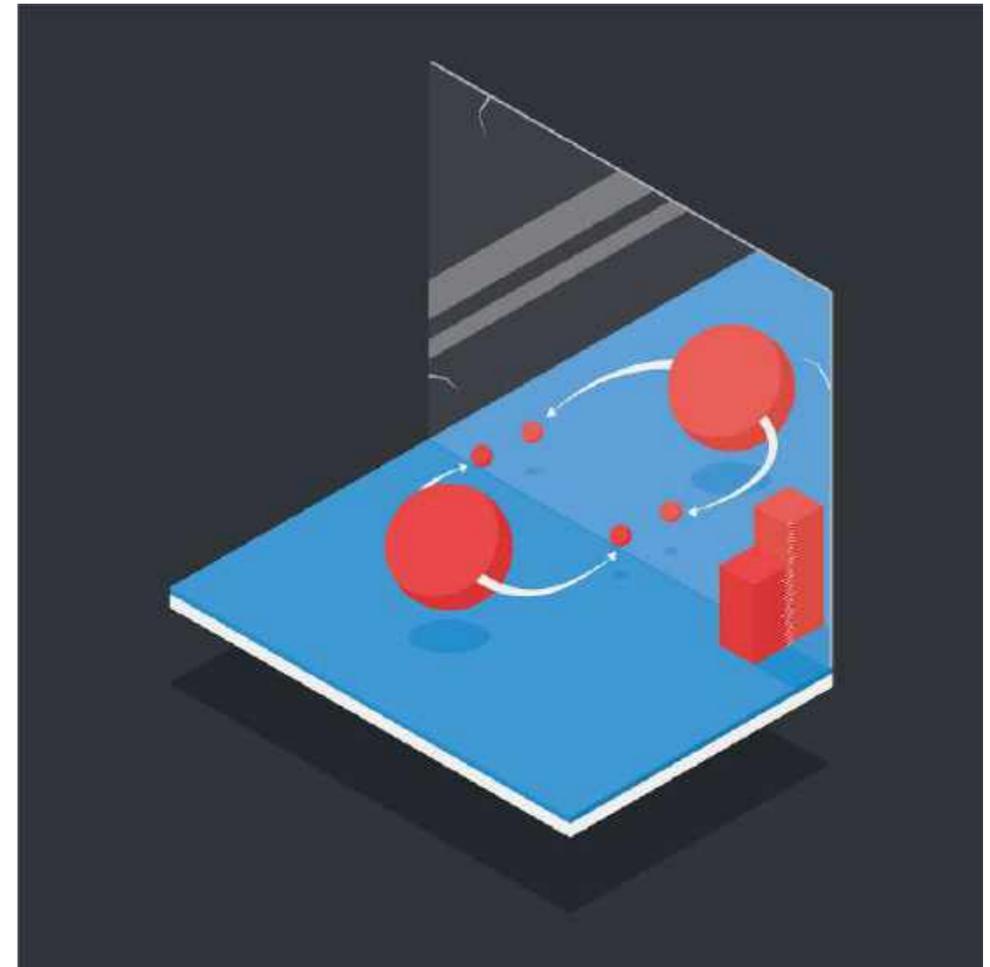
La sala di controllo

Il miglior rivelatore di particelle è l'occhio umano! Anche mentre si dorme...

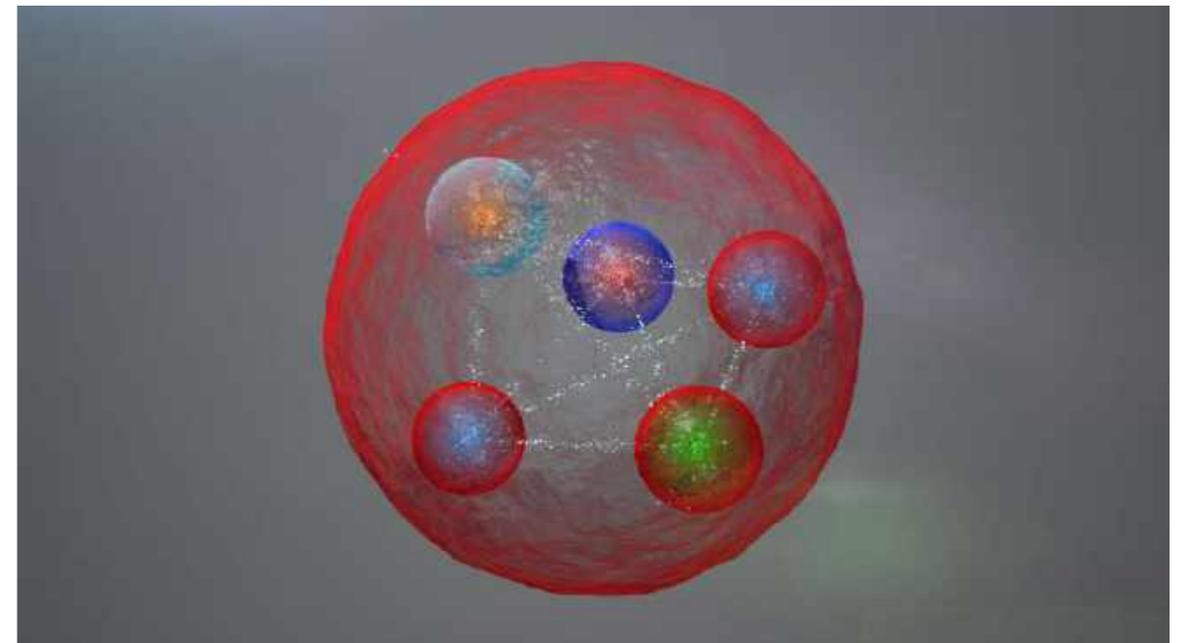


Qualche misura famosa di LHCb

Scoperta della violazione CP nei mesoni D^0
Un altro passo per risolvere l'enigma
dell'antimateria!

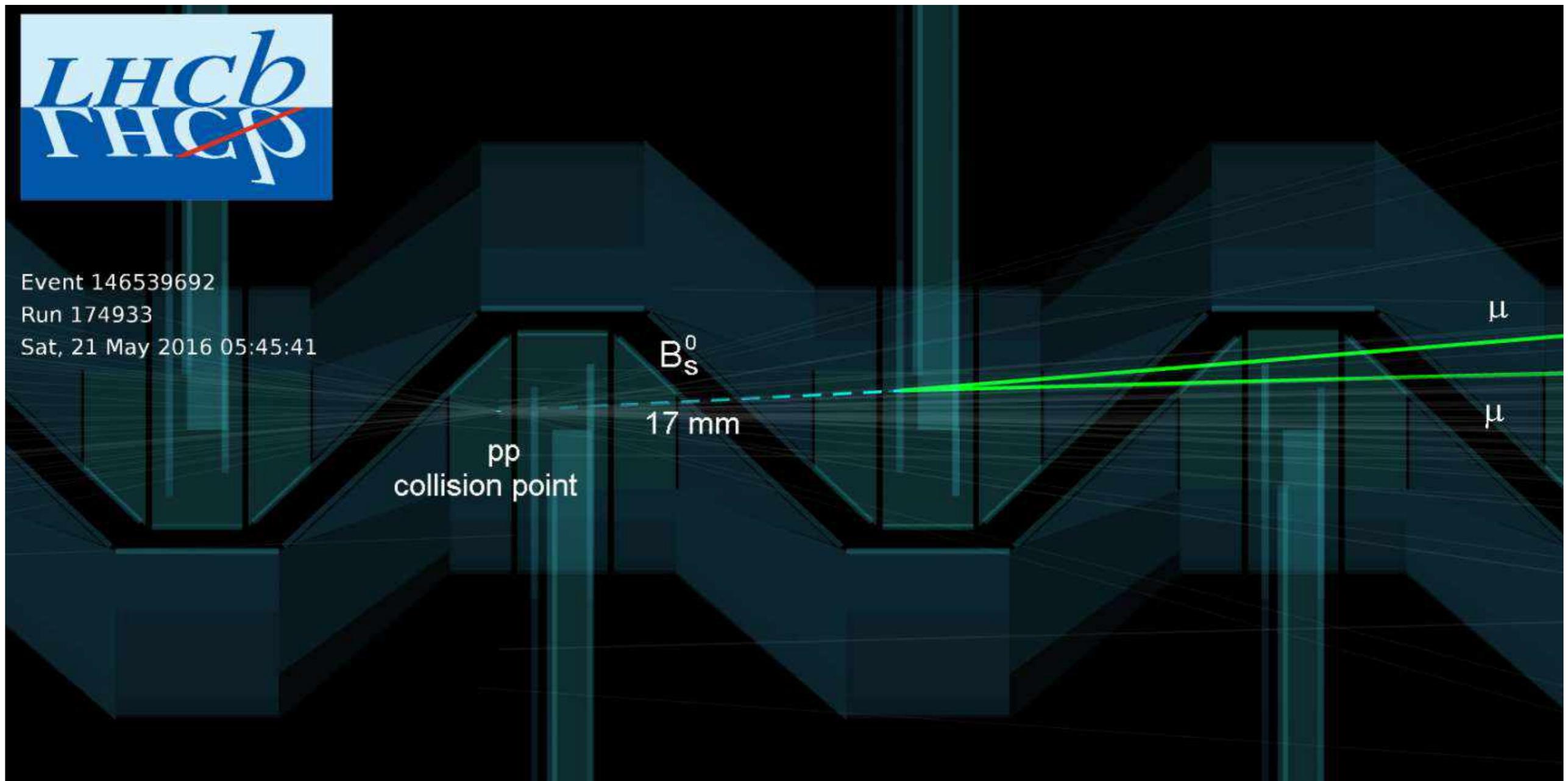


Scoperta dei pentaquark
I quark non si uniscono solo a gruppi di
2 (mesoni) o di 3 (barioni)!



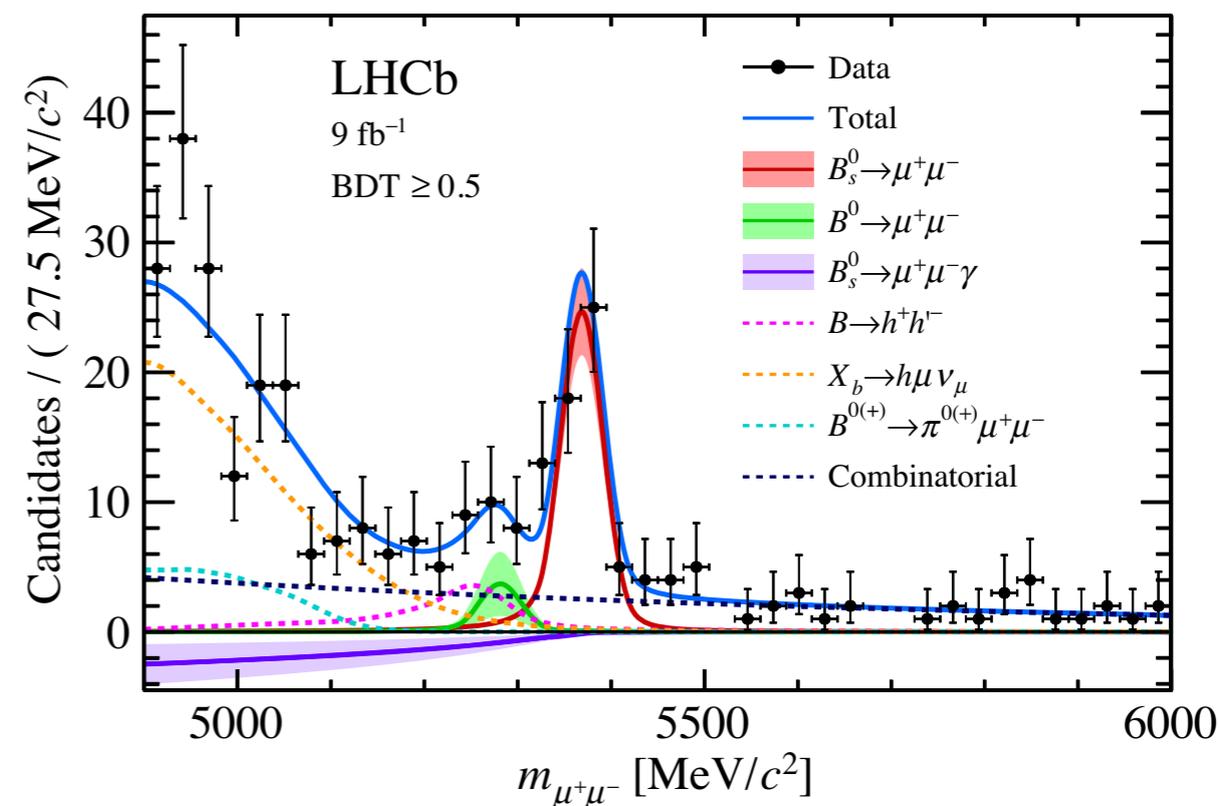
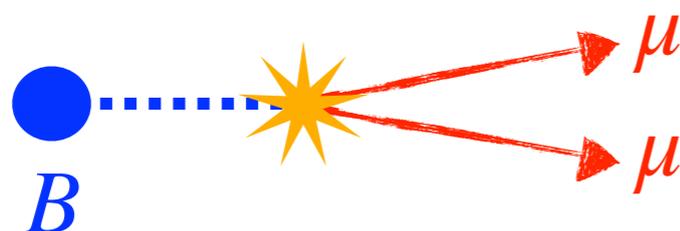
Qualche misura famosa di LHCb

Processi rari, ad esempio $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ avviene circa 3 volte su 1 miliardo di decadimenti!

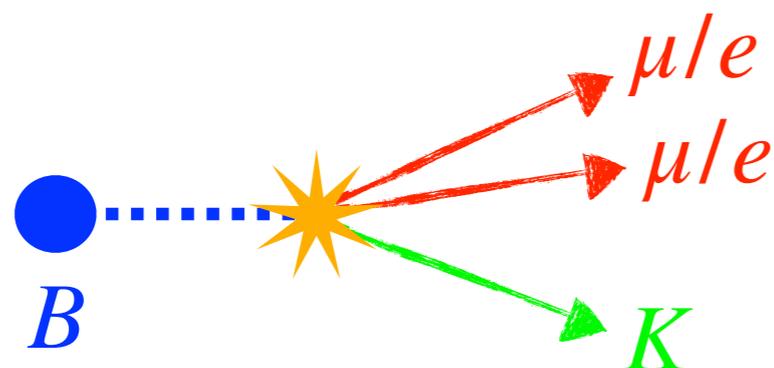


Anomalie nei decadimenti rari!

$B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ (curva rossa nel grafico)
avviene con la frequenza che ci aspettiamo nel Modello Standard



$B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-$ sembra comportarsi in un modo che non sappiamo spiegare!



LASTAMPA.IT

Scoperta al Cern una quinta forza della Natura che può spiegarci l'Universo

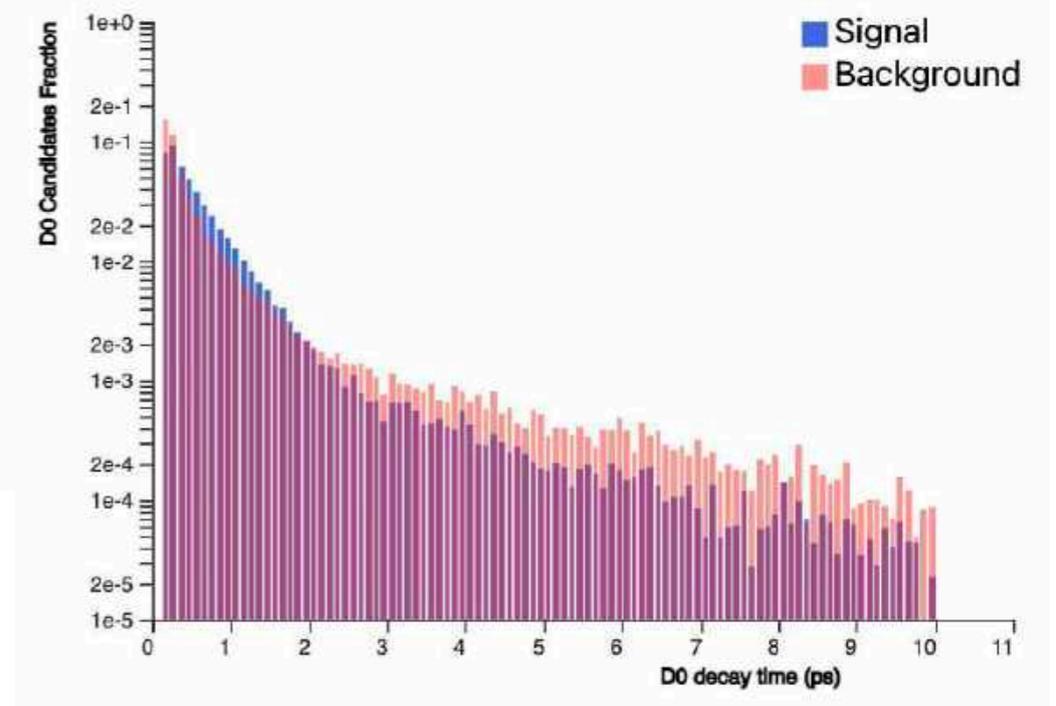
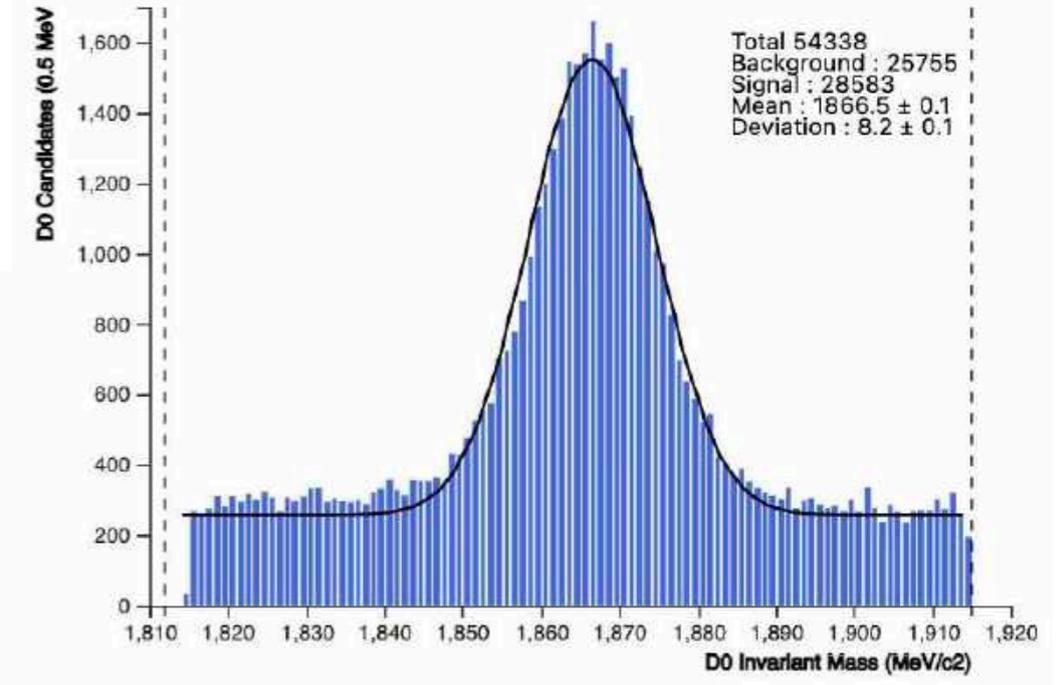
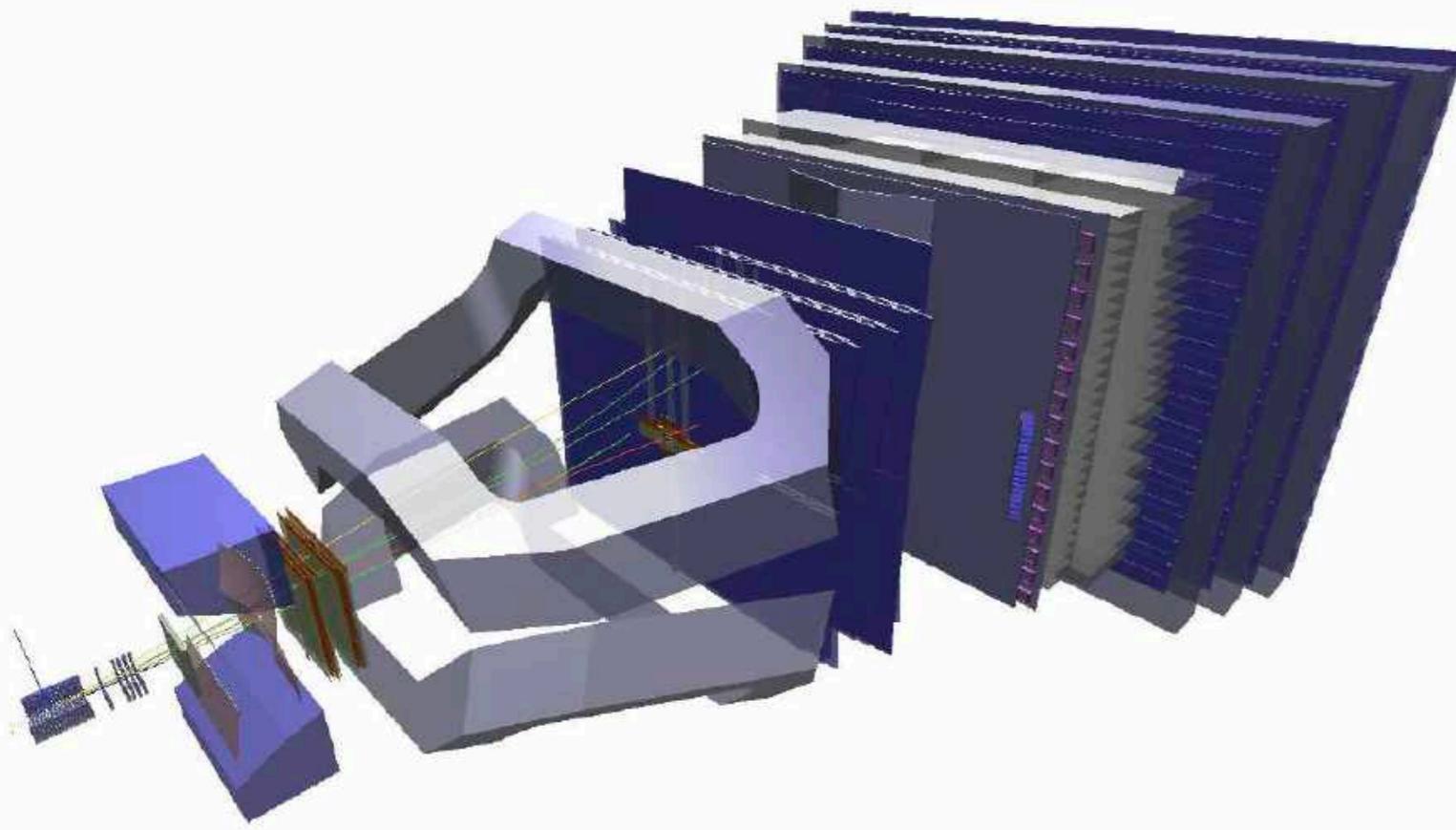
Ricerca di Nuova Fisica

Ogni piccola deviazione nei decadimenti rari può indicare la presenza di **Nuova Fisica**

Ad esempio? Nuovi bosoni di Higgs, particelle supersimmetriche, materia oscura...

... altre dimensioni!





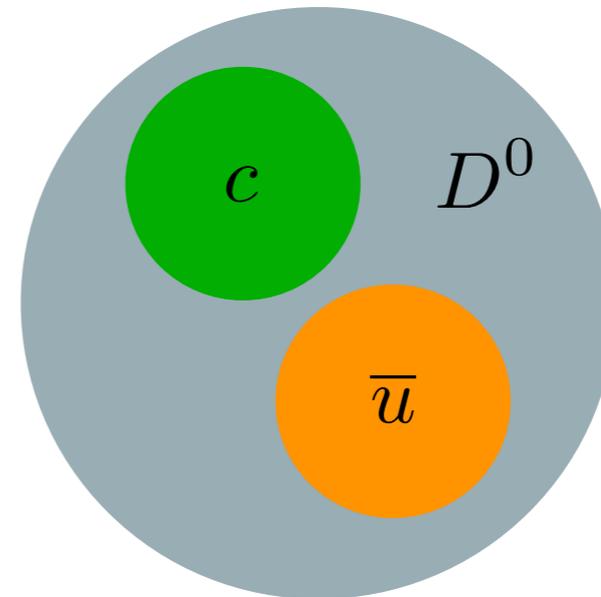
3. Misura della vita media del mesone D^0

Il mesone D^0

Ora che siete esperti... tocca a voi!

Nell'esercizio misurerete la vita media del D^0 con veri dati di LHCb!

Un mesone D^0 è formato da un quark charm (c) e un quark anti-up (\bar{u})



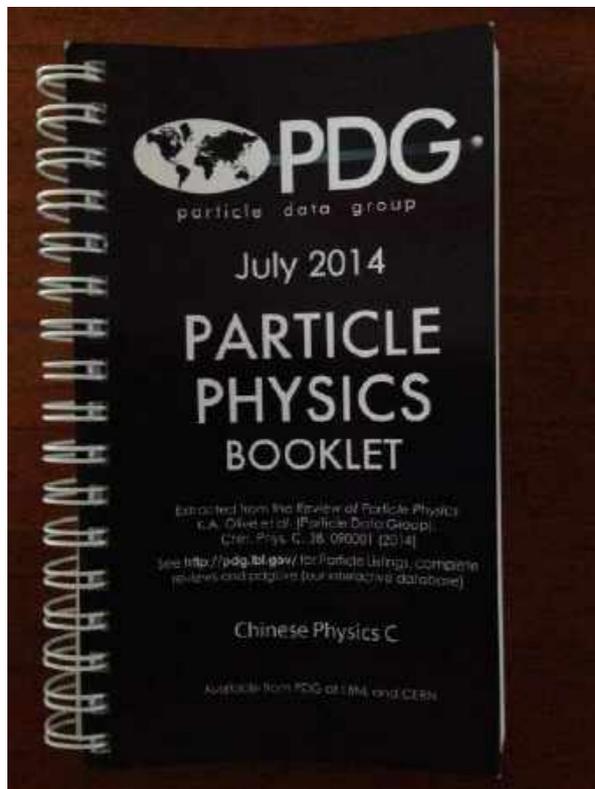
Dal PDG:

Massa = $1865 \text{ MeV} / c^2$ ($3.3 \times 10^{-27} \text{ Kg}$, circa il doppio di un protone)

Vita media = 0.4 ps ($4 \times 10^{-13} \text{ s}$), piccola ma misurabile!

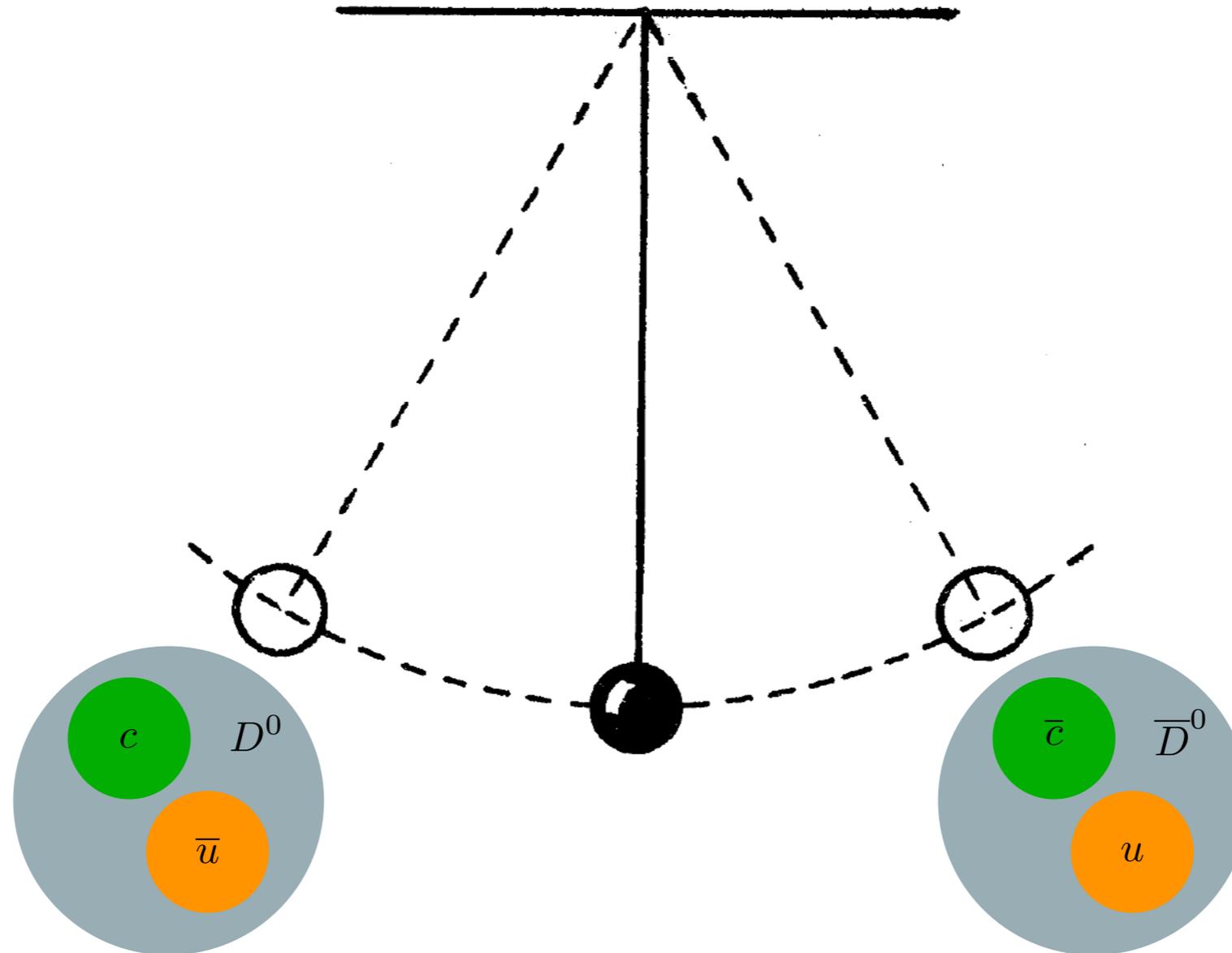
Velocità $\sim c$

Carica elettrica = 0



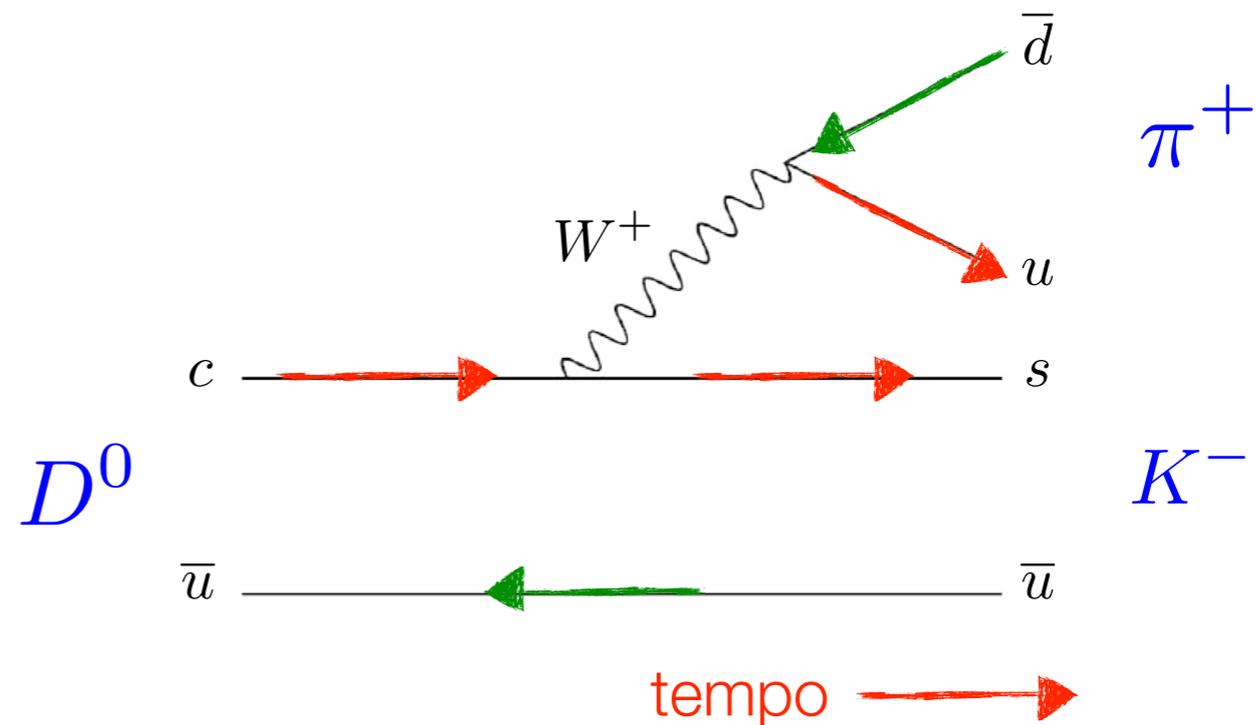
Perché il D^0 è speciale?

Durante la sua (breve) vita oscilla tra materia e antimateria!



Il diagramma di Feynman del decadimento

Il D^0 è instabile, e decade secondo il processo:

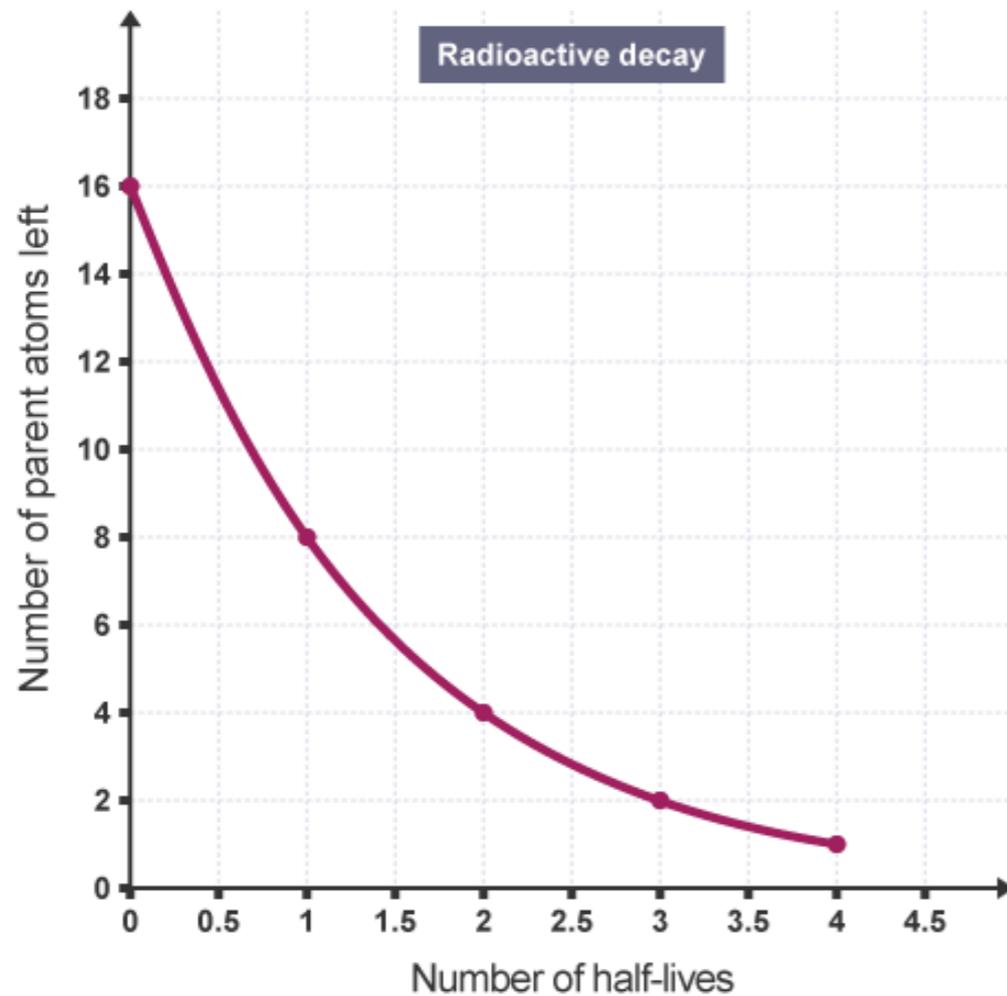


1948: Richard Feynman inventa una **rappresentazione** grafica dei processi di interazione tra particelle

1965: vince il Nobel per il suo lavoro fondamentale per il Modello Standard

2020: Nolan applica le idee un po' troppo alla lettera nel film "Tenet"

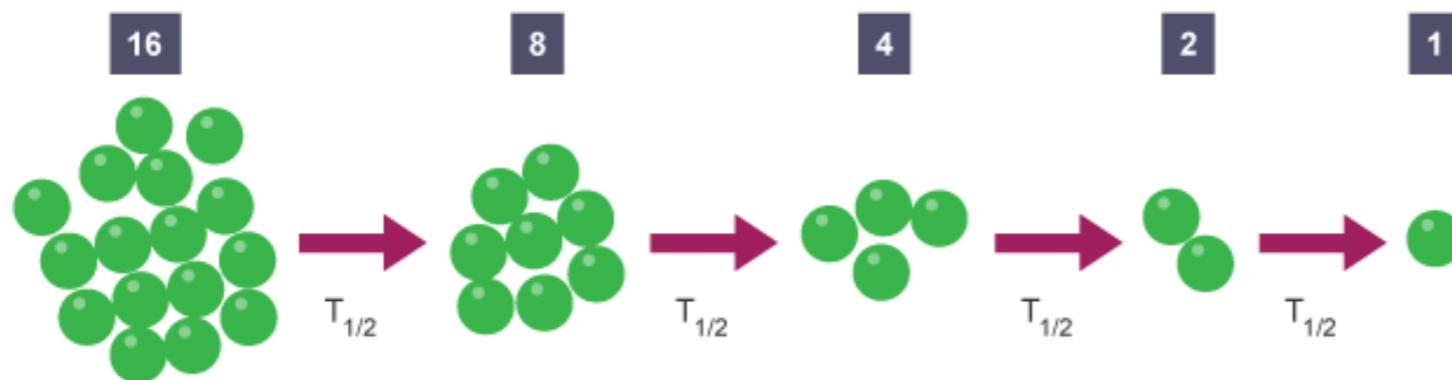
Legge di decadimento delle particelle instabili



$$N = N_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \Rightarrow \tau = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} = \frac{T_{1/2}}{0.693}$$

A che servono gli studi di funzione?

1. Ad interpretare le leggi della natura
2. A passare l'esame di maturità (true story)



Traccia #2 della colonna sonora:

"CP violation" → [YouTube](#)

Fine della lezione!

Fine dello spoiler sul D^0 : il resto lo vedrete direttamente sul campo!

A questo punto dovrete aver capito come spieghiamo i complicati fenomeni della natura...



Gruppo WhatsApp



Il mio avatar su WA:



per domande esistenziali:



marco.santimaria@Inf.infn.it