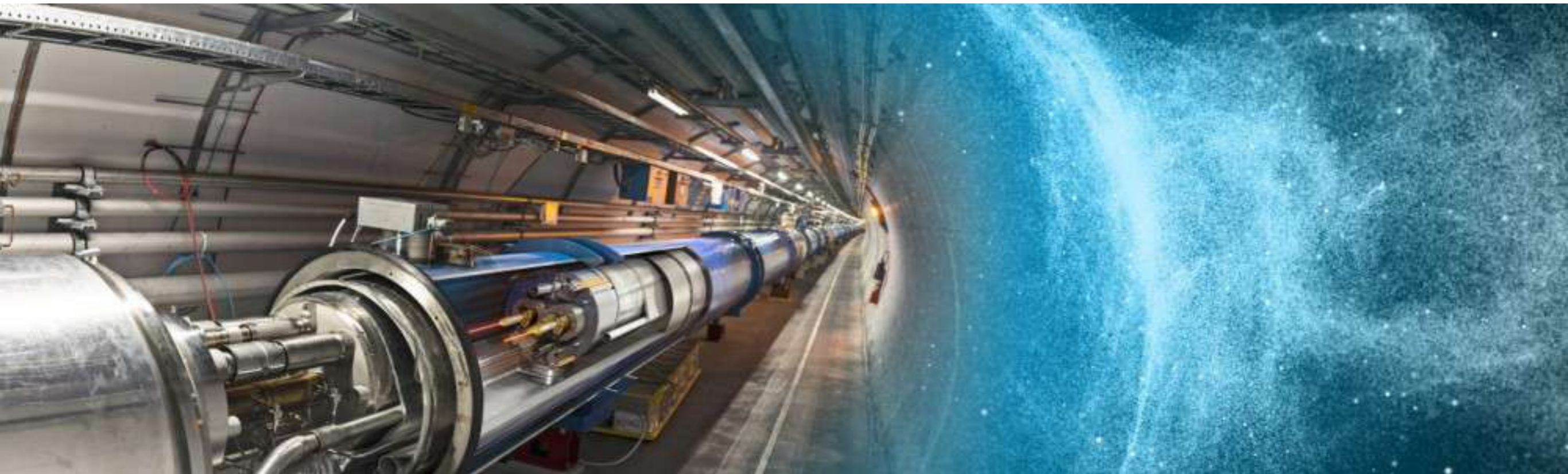


# L'esperimento LHCb

---

Marco Santimaria / Masterclass Internazionale 05.03.2025 - LNF



## 1. La fisica di LHCb

Particelle, antimateria e violazione CP

## 2. LHC e il rivelatore LHCb

Accelerare e rivelare le particelle elementari

## 3. Qualche risultato recente

$D^0$ , pentaquark e decadimenti rari



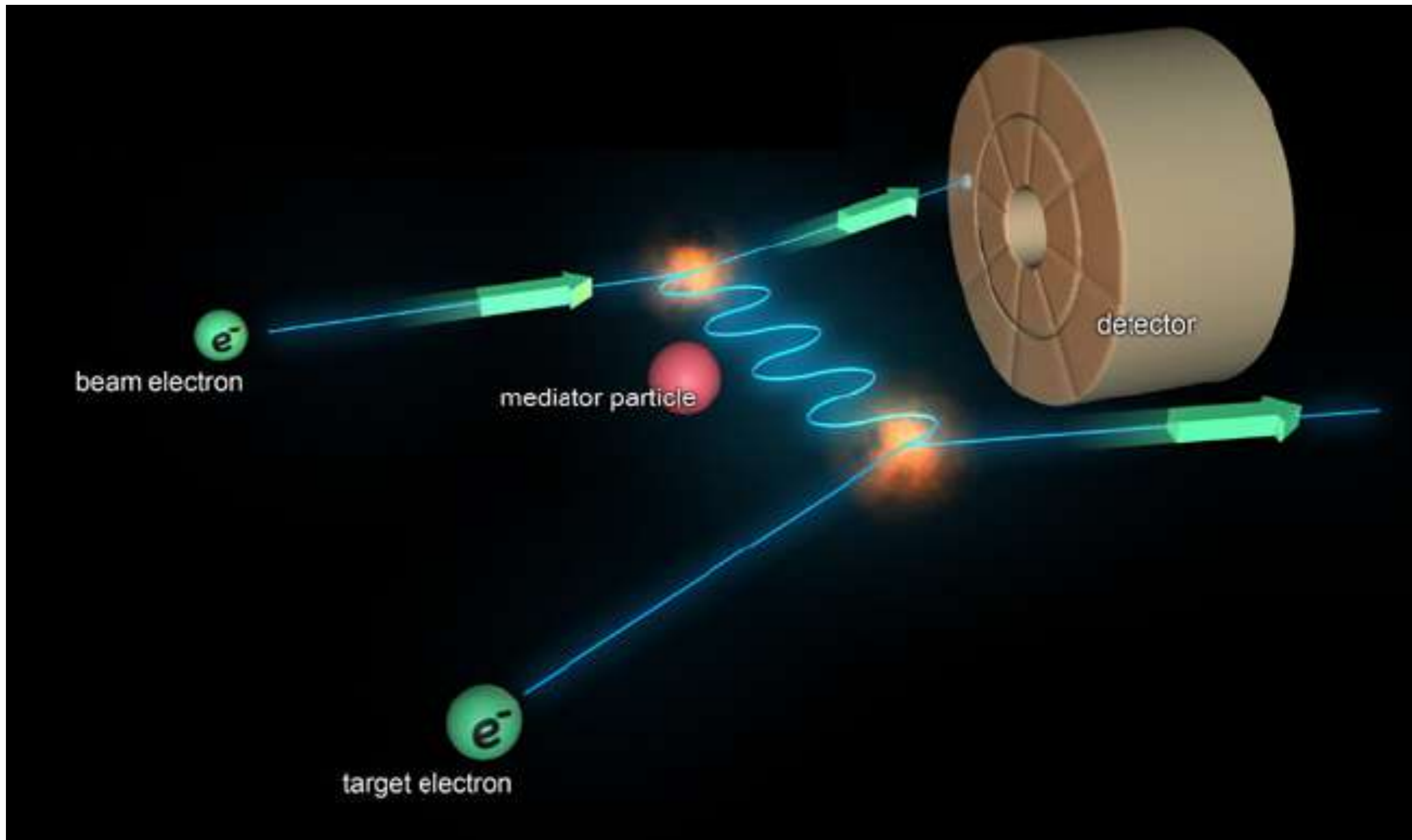
**Pericolo: lezione avanzata**  
Se avete domande alzate la mano!



# 1. La fisica di LHCb

# Interazioni oggi: meccanica quantistica e relativistica

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

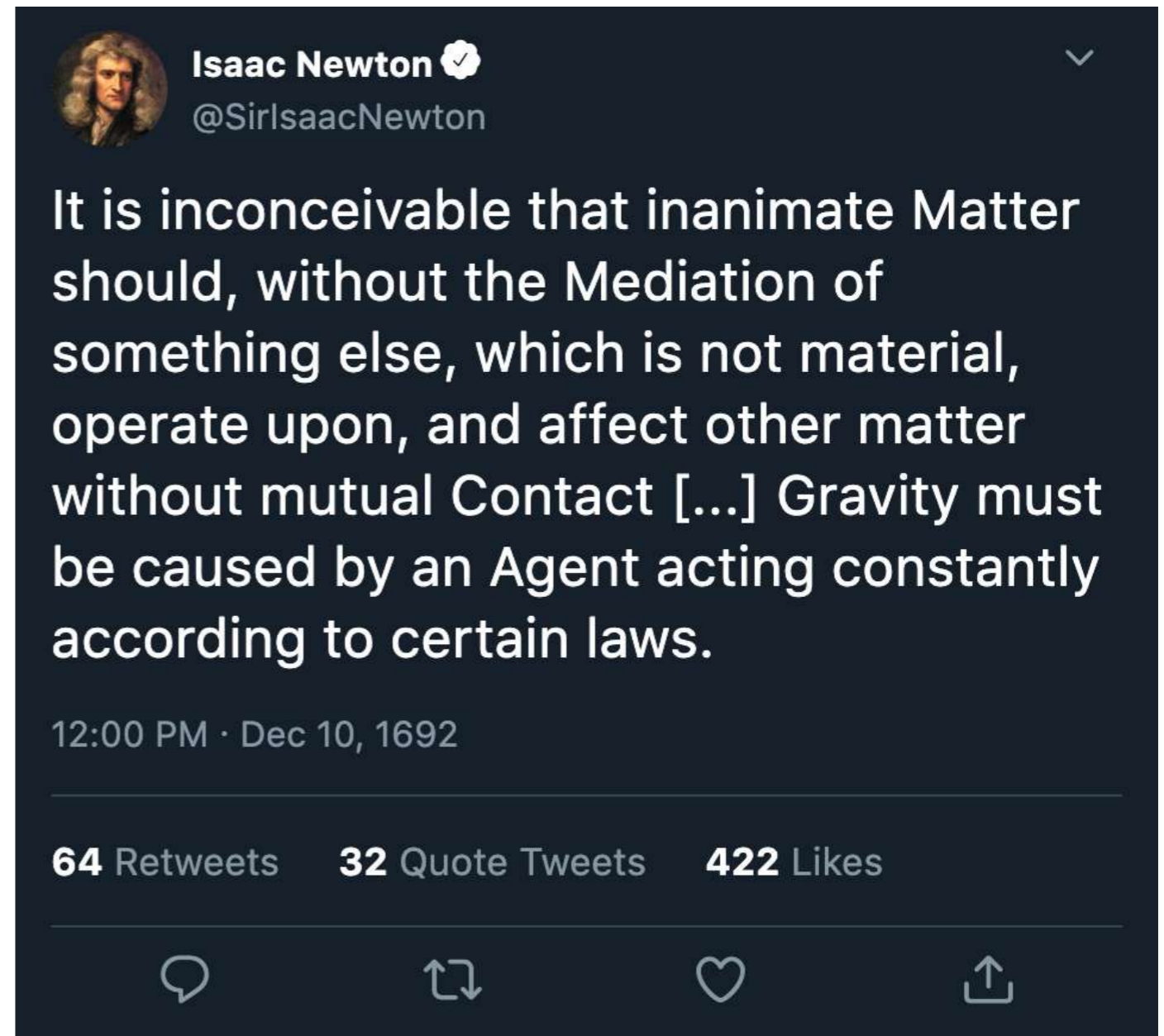


# Cos'è una forza?



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

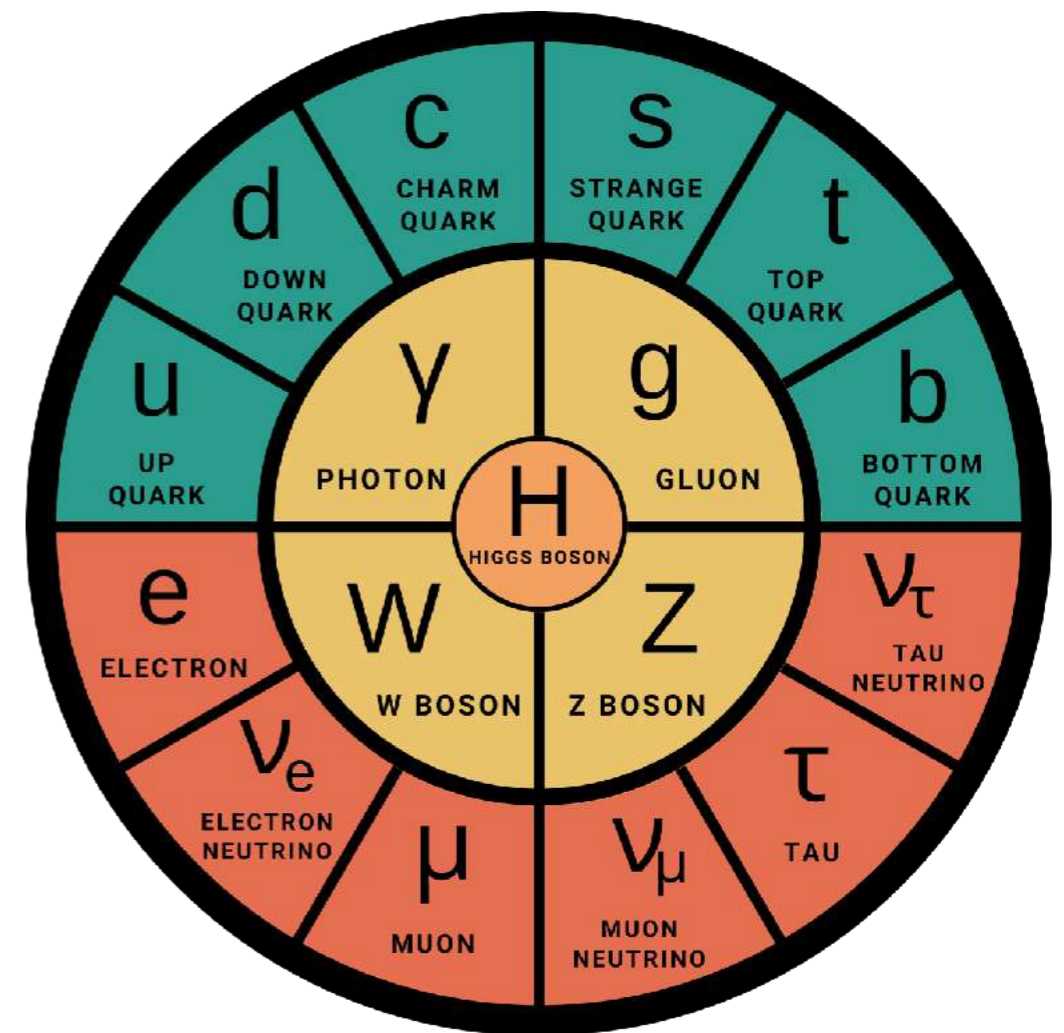
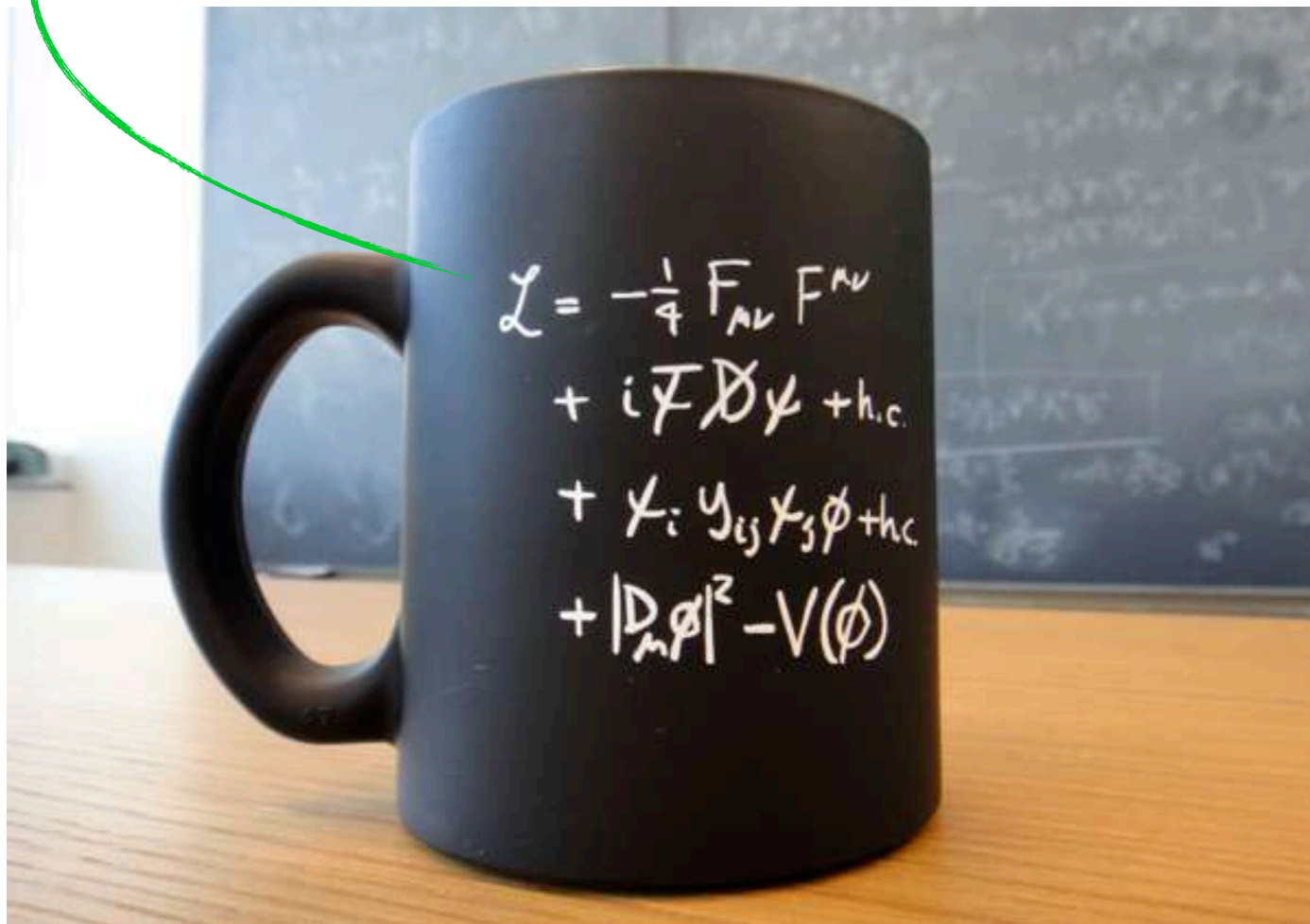
# Interazioni ieri: meccanica classica



# Il Modello Standard

\*tranne quella gravitazionale!

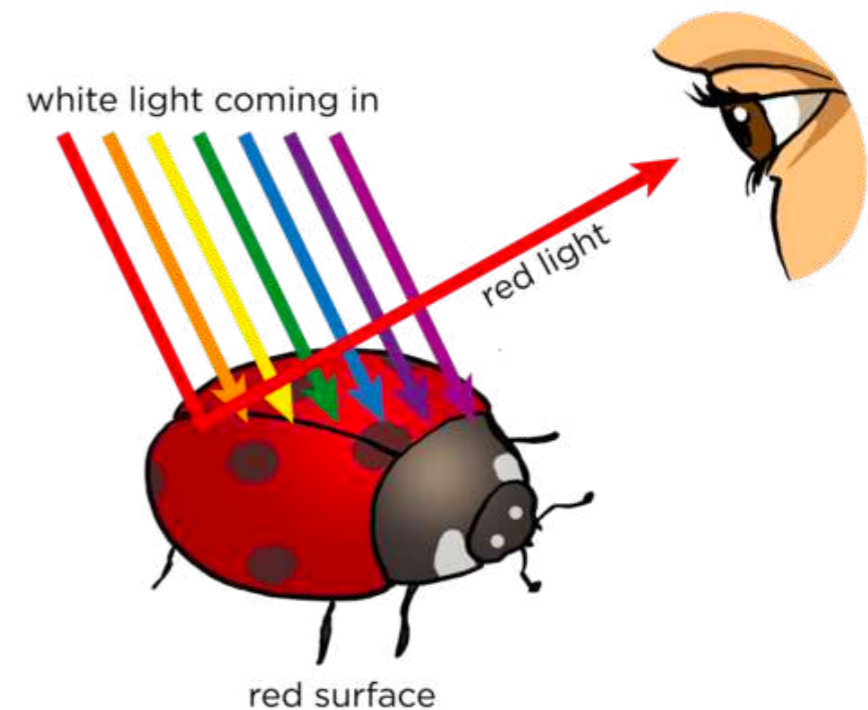
Il Modello Standard è la teoria che descrive le interazioni\* tra **particelle elementari**. La **Lagrangiana dell'universo** rappresenta l'energia di tutte le **particelle mediatrici delle forze (bosoni)** e di tutte le **particelle di materia (fermioni: quark e leptoni)**



Una particella **elementare** (cioè non ha struttura interna) si comporta come puntiforme durante una collisione: questa descrizione cambia ad **energie maggiori!**

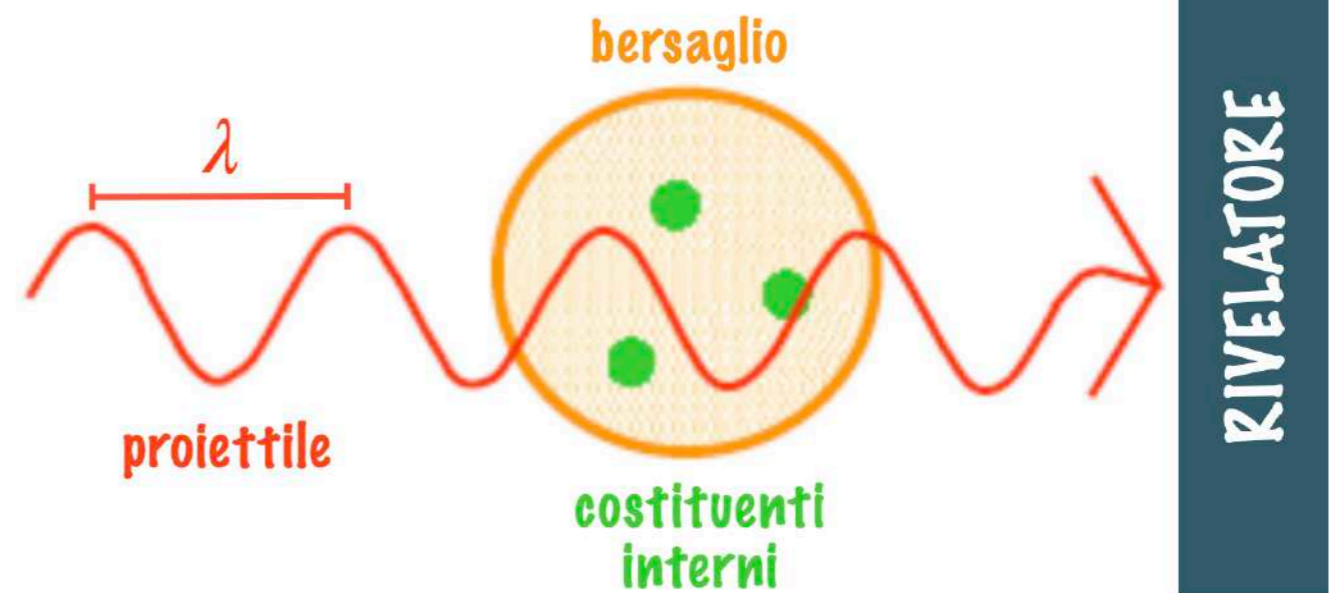
# Queste particelle sono davvero elementari?

Vediamo gli oggetti macroscopici attraverso la luce (fotoni) che li colpisce e viene catturata dall'occhio



Per le particelle è la stessa cosa!  
Più è alta l'energia, più è corta la  
lunghezza d'onda ovvero maggiore  
è la risoluzione (De Broglie)

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

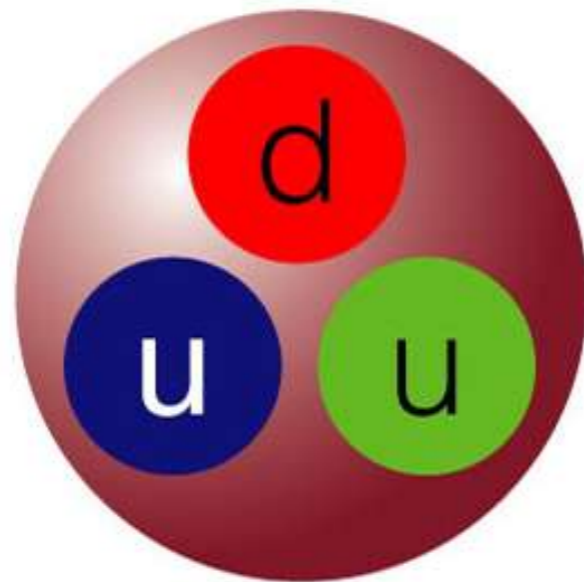


# Ma soprattutto: dove sono tutte queste particelle??

La “**materia ordinaria**” la conosciamo: **protoni** e **neutroni** + **elettroni**

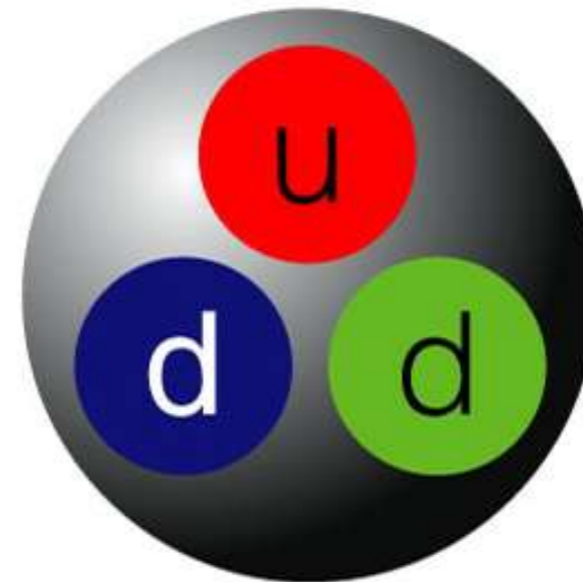
**1968:** attraverso collisioni ad alta energia si scopre che **il protone non è puntiforme!**

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



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

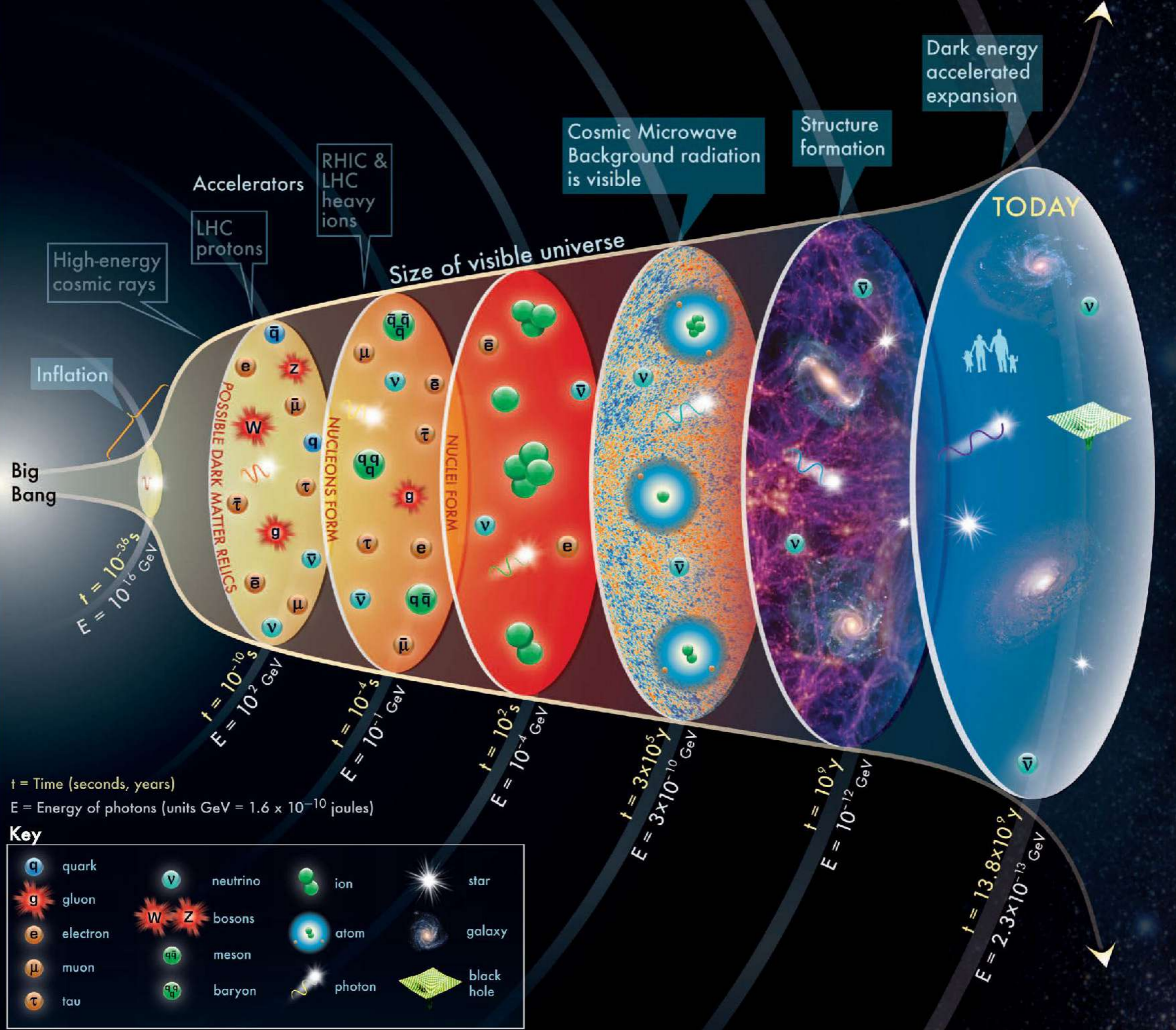
*A neutron is composed of 1 up quark (u) and 2 down quarks (d).*



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

Dove sono tutte le altre particelle?

La situazione era molto diversa agli inizi dell'universo, ovvero ad **alta energia**



# ma c'è di più!

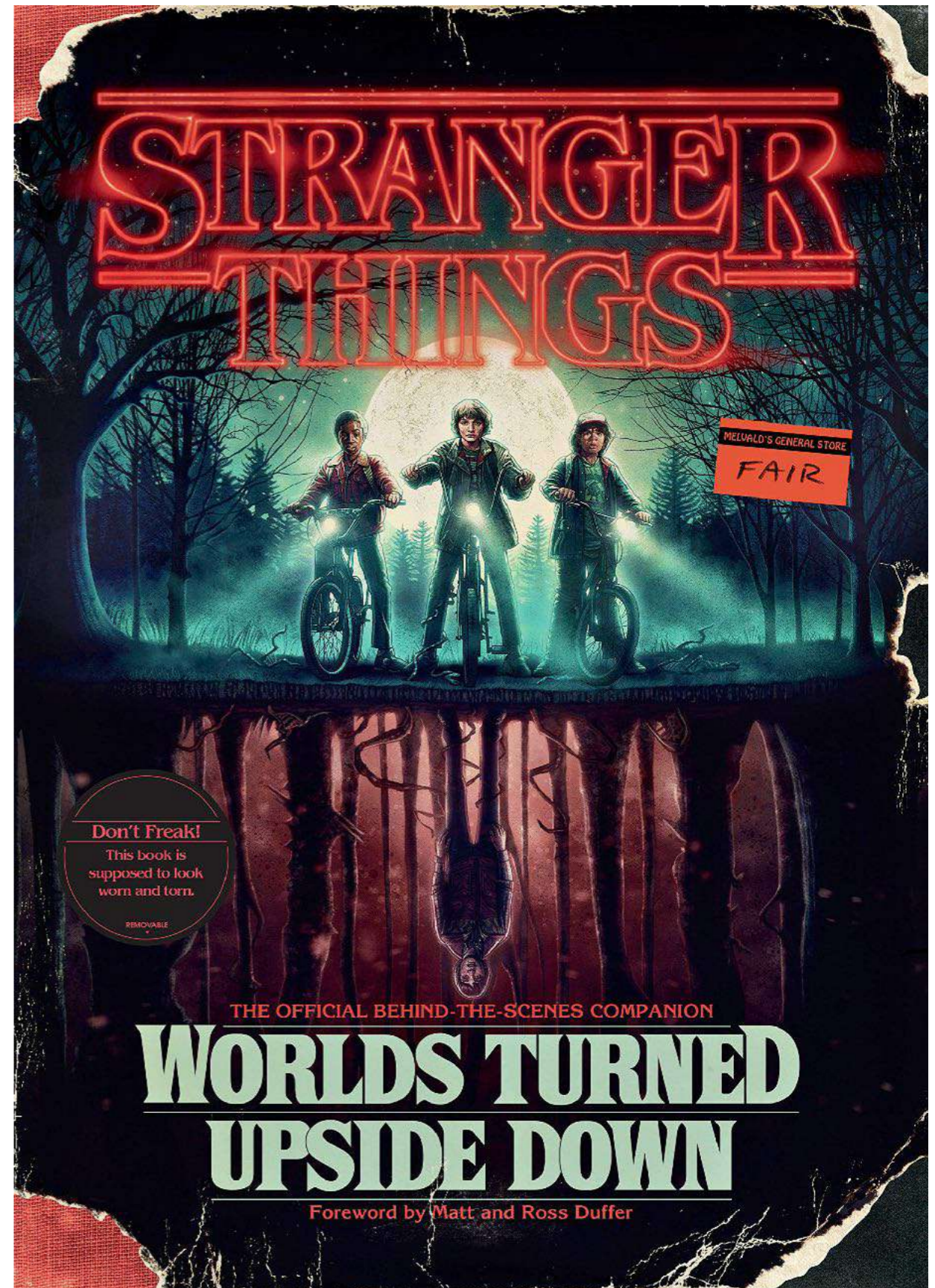
**1928:** Paul Dirac formula l'equazione che descrive le interazioni degli elettroni:

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

e ... **l'equazione ha 2 soluzioni!**  
C'è un' energia negativa, speculare a quella positiva?

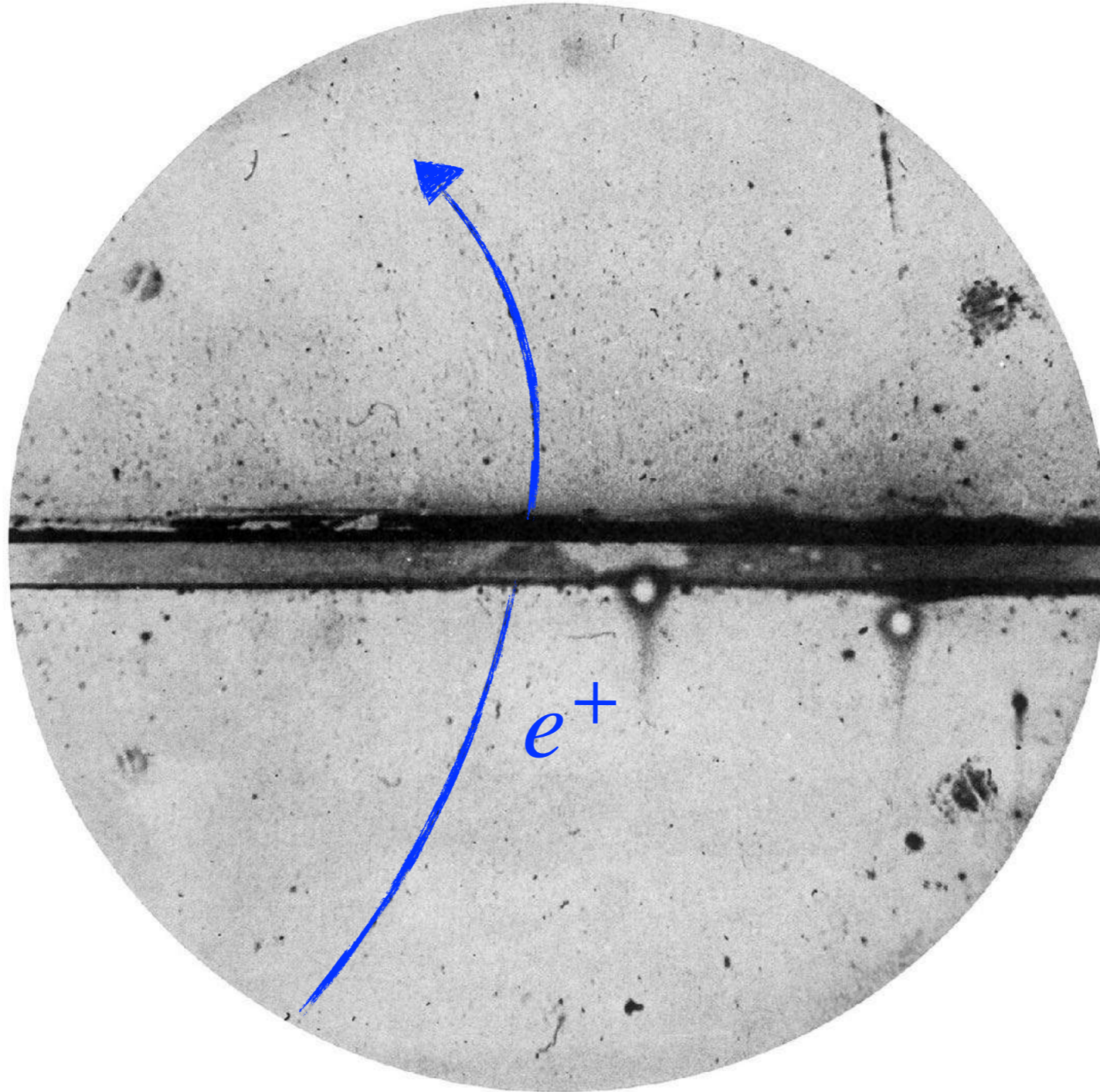
piuttosto:

**Esiste la materia (particelle) e l'antimateria (antiparticelle), entrambe con energia positiva**



# 4 anni dopo: antimateria!

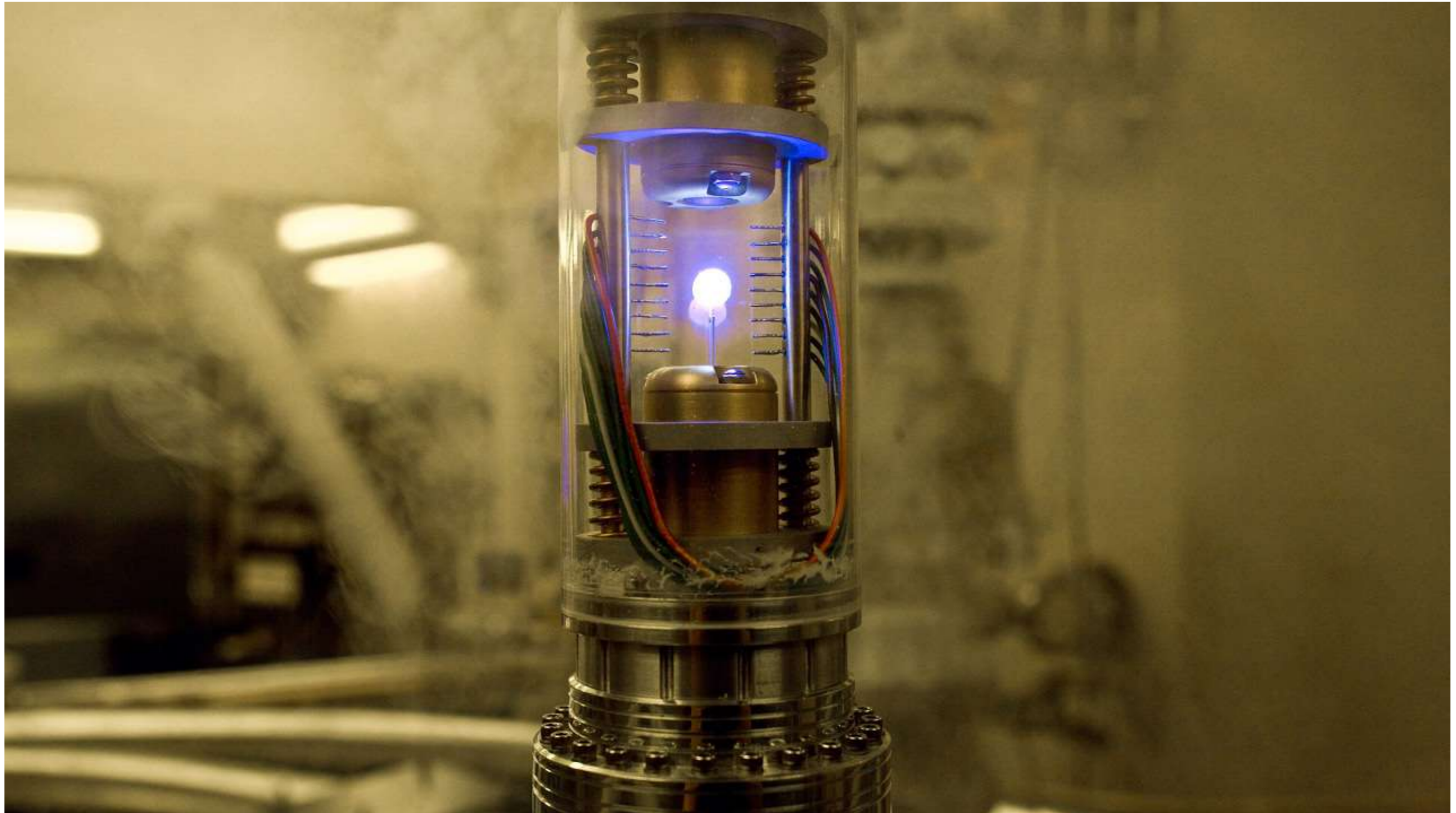
**1932:** Carl Anderson osserva un antielettrone (positrone) in una camera a nebbia



# Dove trovare l'antimateria: film

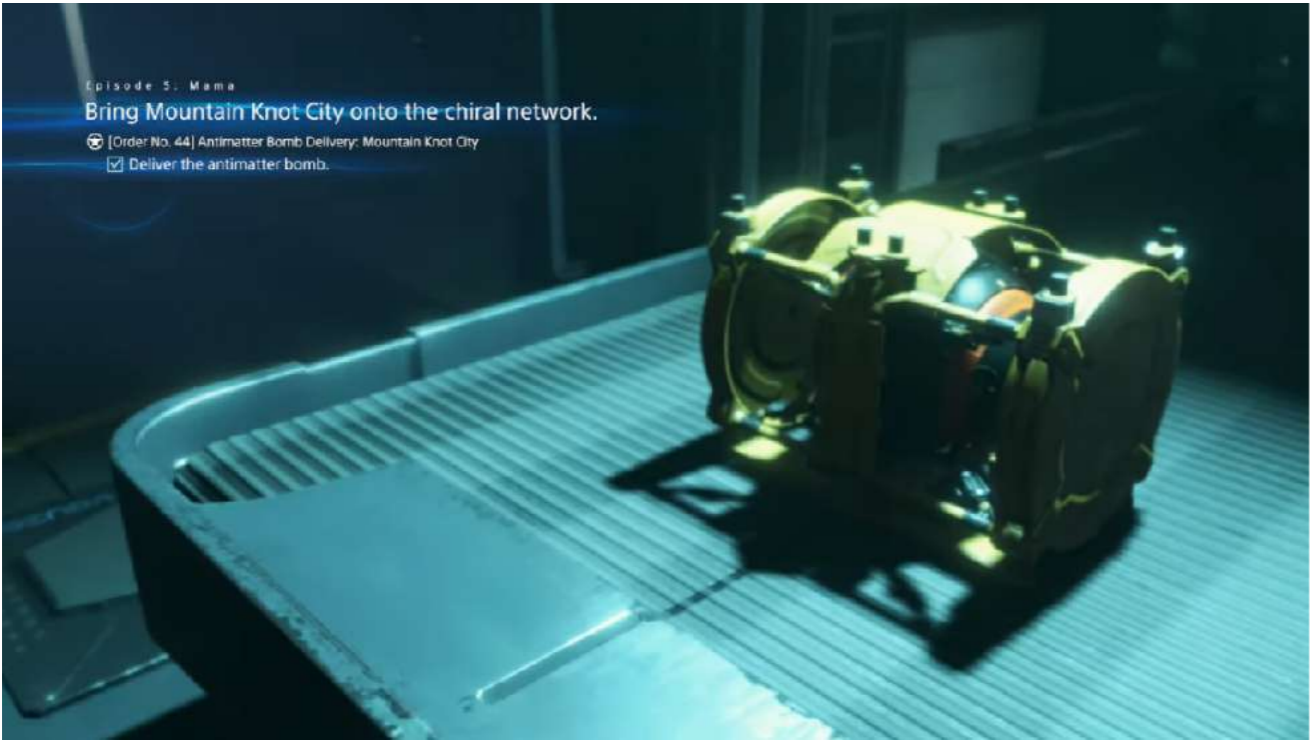
---

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

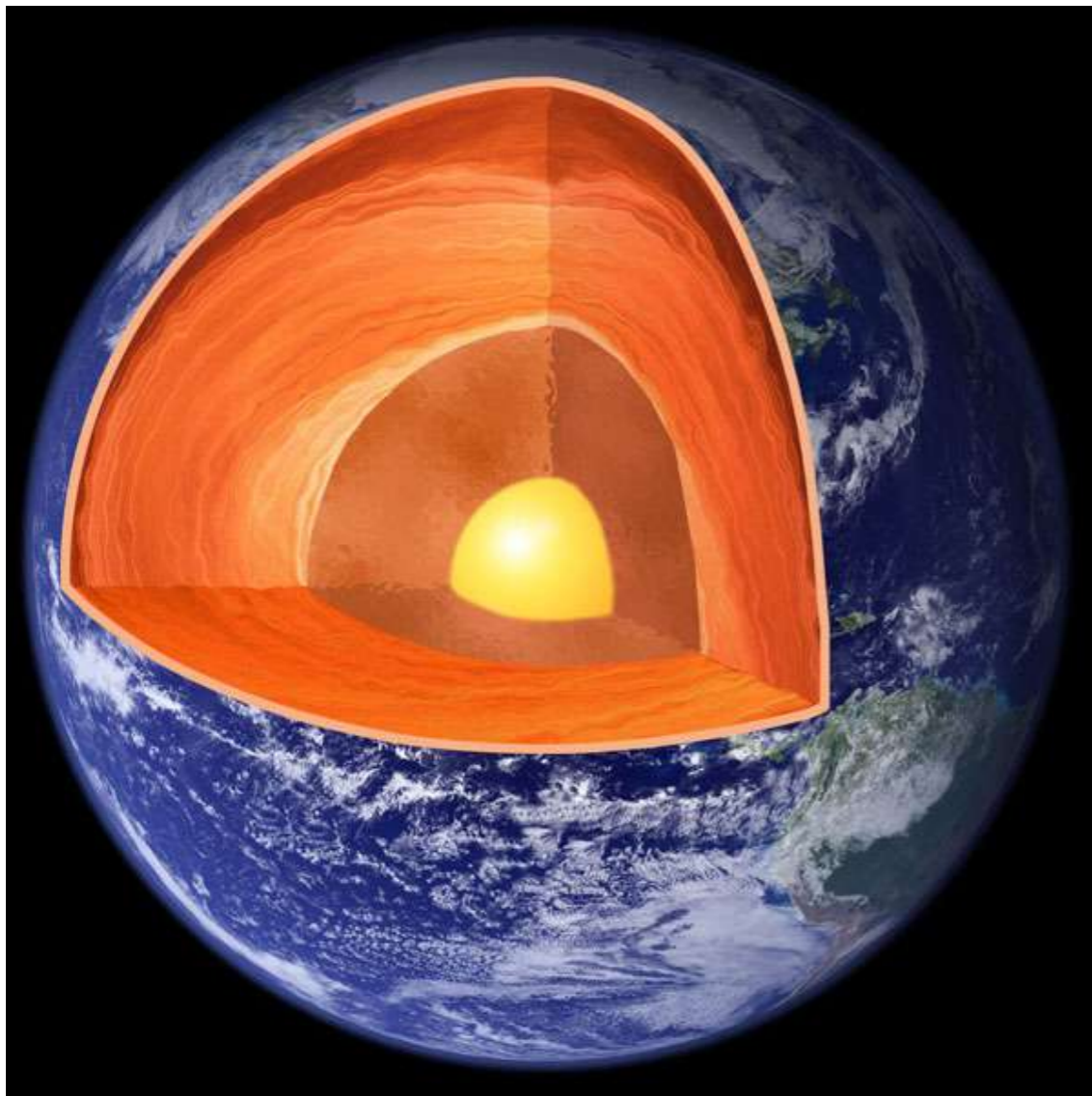
#### Appearances

... o piante in Death Stranding?



# Dove trovare l'antimateria (per davvero)

Decadimenti di nuclei instabili, ad esempio  
all'interno della terra

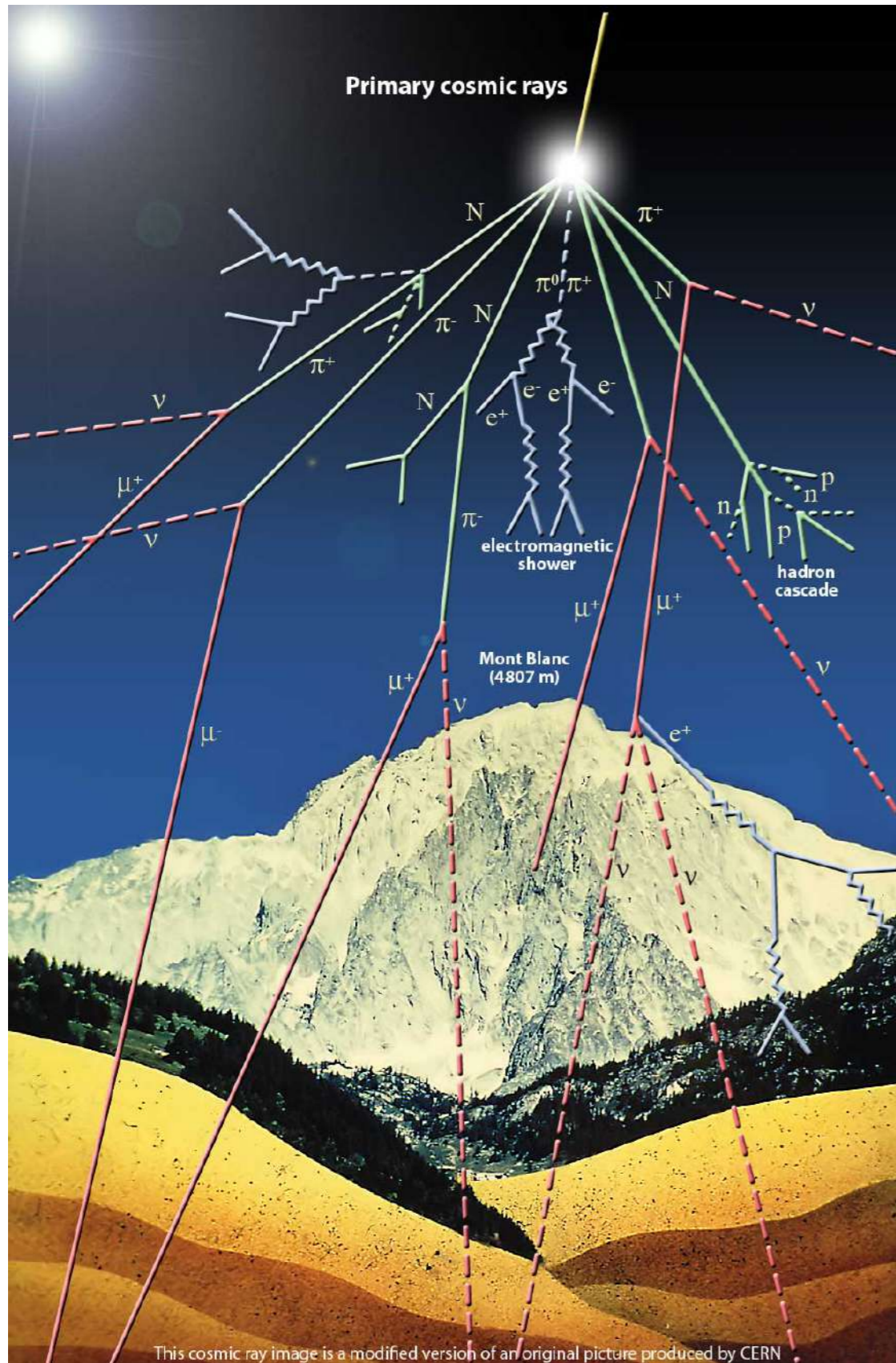


oppure nella radioattività  
residua a Chernobyl...

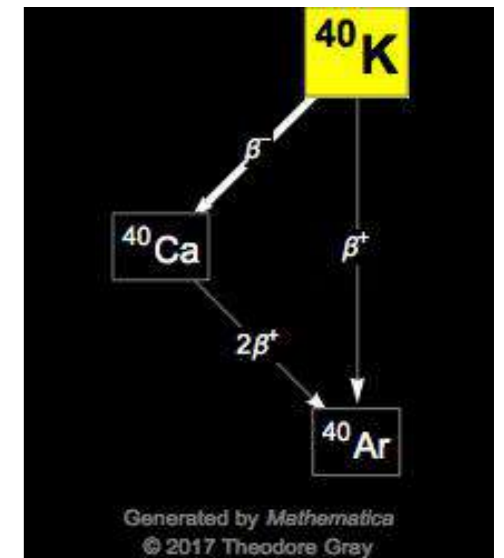


# Dove trovare l'antimateria (per davvero)

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

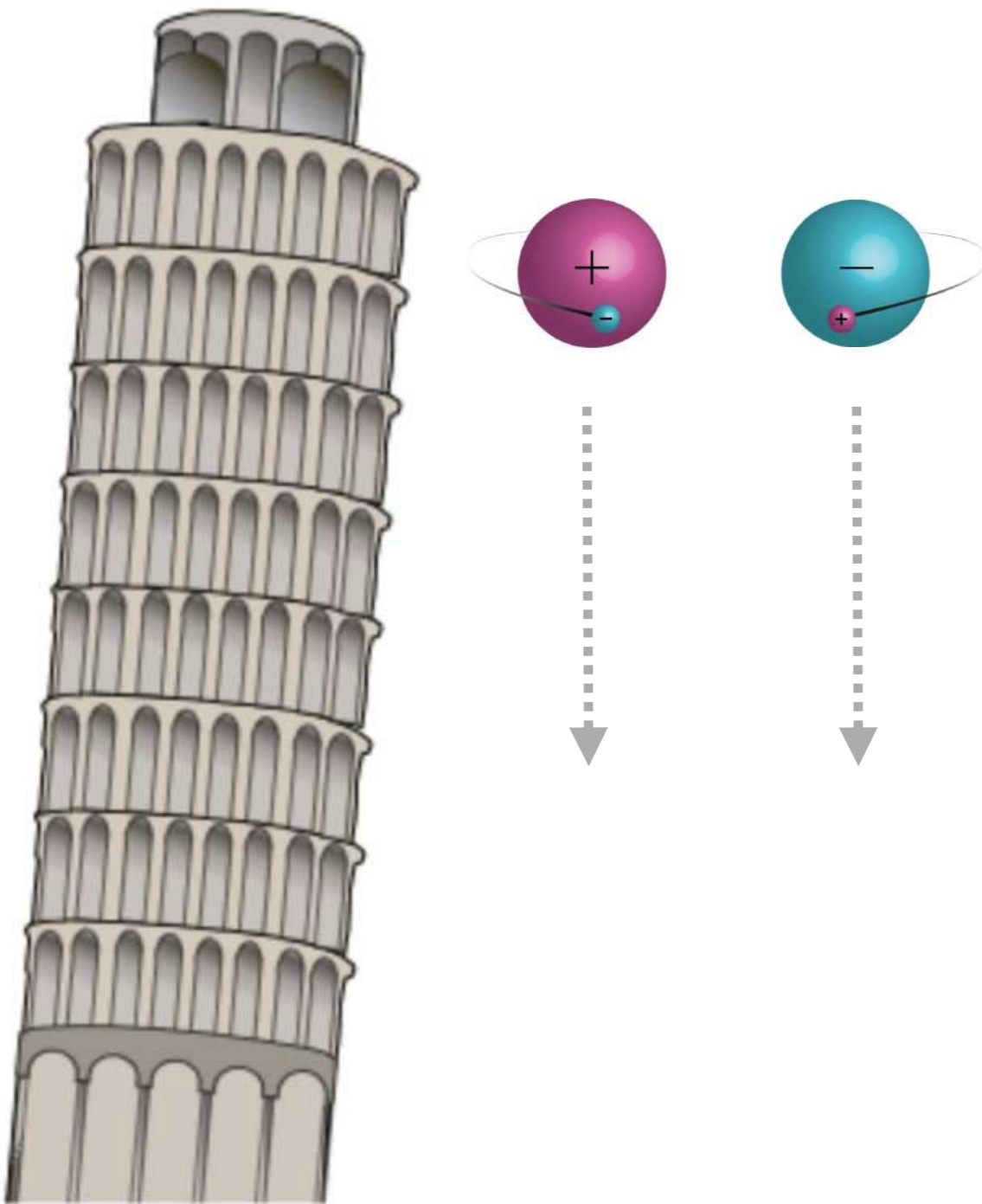


nelle banane



# Come si comporta l'antimateria?

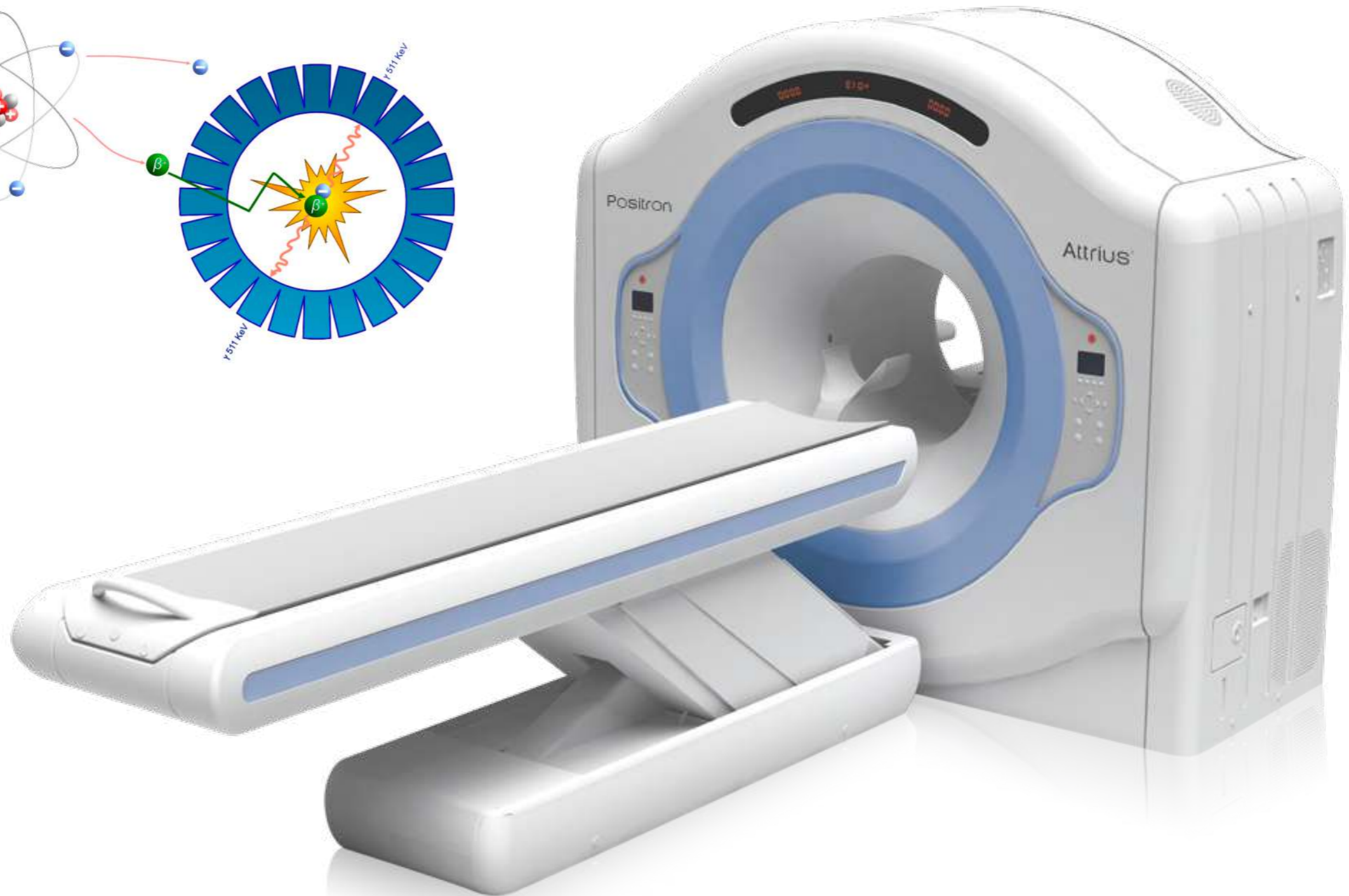
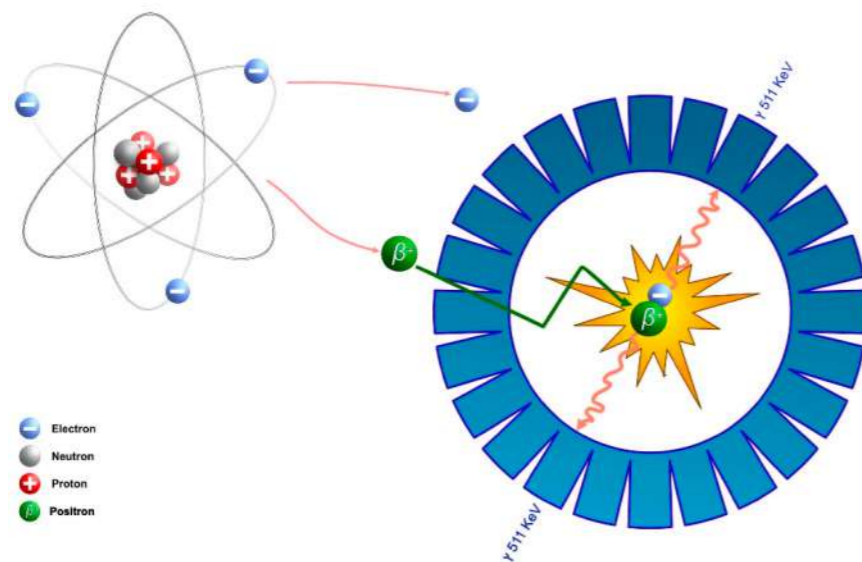
2023: L'esperimento ALPHA al CERN fa cadere atomi di anti-idrogeno come nell'esperimento (mentale) di Galileo!



<https://home.cern/news/press-release/physics/physics/alpha-experiment-cern-observes-influence-gravity-antimatter>

# A che serve?

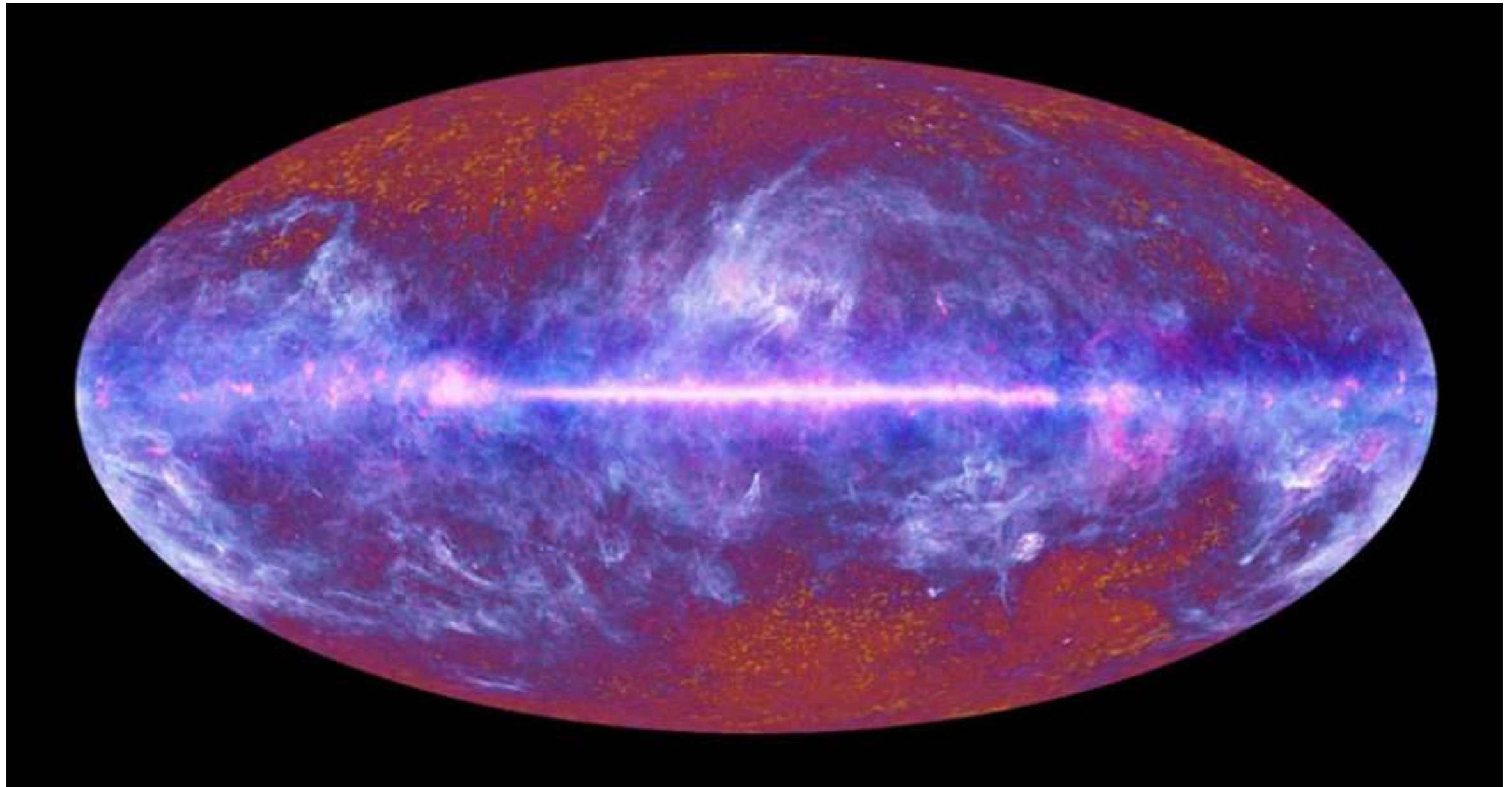
Oltre a conoscerla sappiamo anche usarla: Positron Emission Tomography (PET)



# The Big Bang Theory?

---

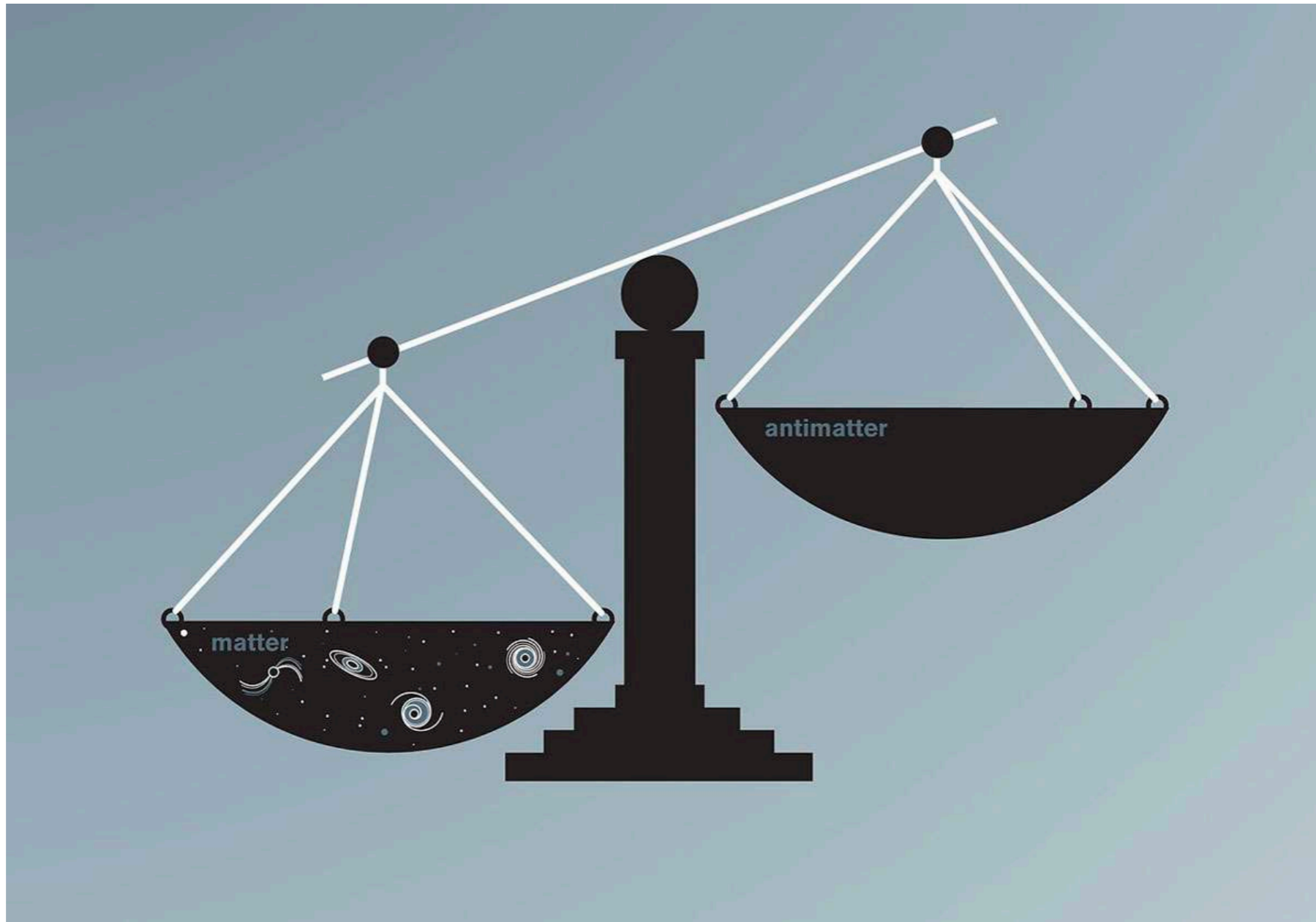
Secondo il modello cosmologico standard, all'inizio nell'universo **c'era tanta materia quanta antimateria**, come possiamo osservare in una foto vecchia 14 miliardi di anni:



La **Cosmic Microwave Background (CMB)**: proviene da circa 380000 anni dopo il big bang. Scoperta per caso (rumore) nel 1964, qui in alta risoluzione grazie al satellite Planck dell'ESA.

# Dov'è finita l'antimateria?

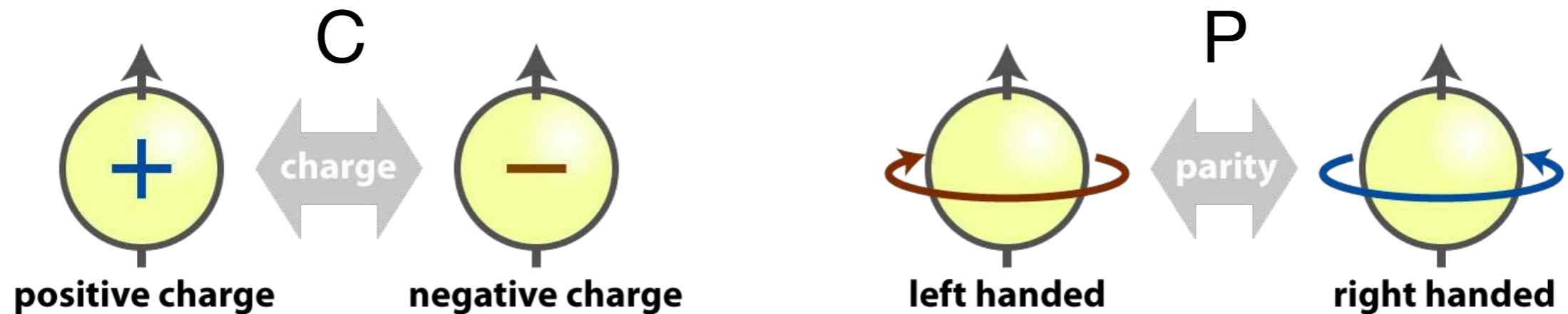
Osservata in raggi cosmici, decadimenti radioattivi e prodotta negli acceleratori di particelle  
ma... **è pochissima!**



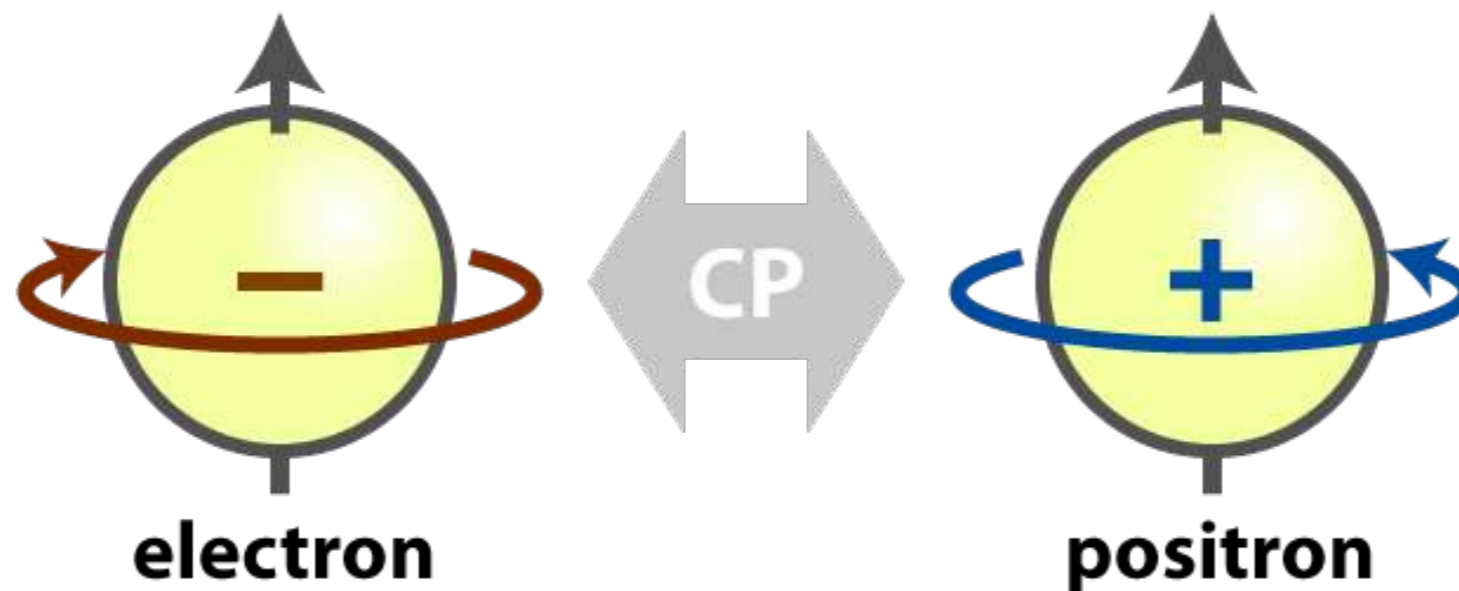
per cercare la risposta dobbiamo analizzare il legame tra materia e antimateria...

# La simmetria CP

Materia e antimateria sono collegate da una simmetria, che agisce attraverso le operazioni:

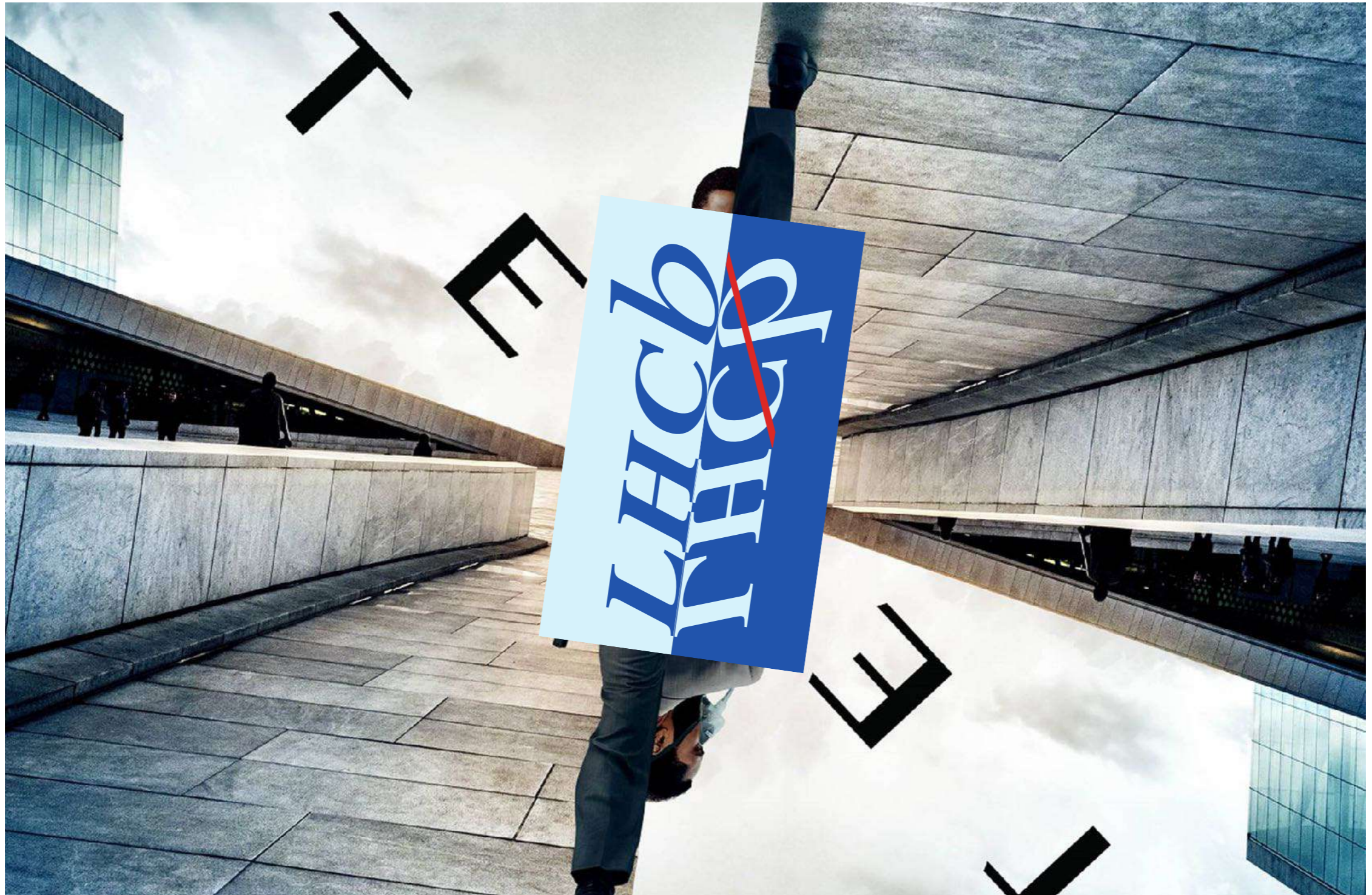


Applicando l'operazione **C+P** si cambia una particella in un'antiparticella, e viceversa



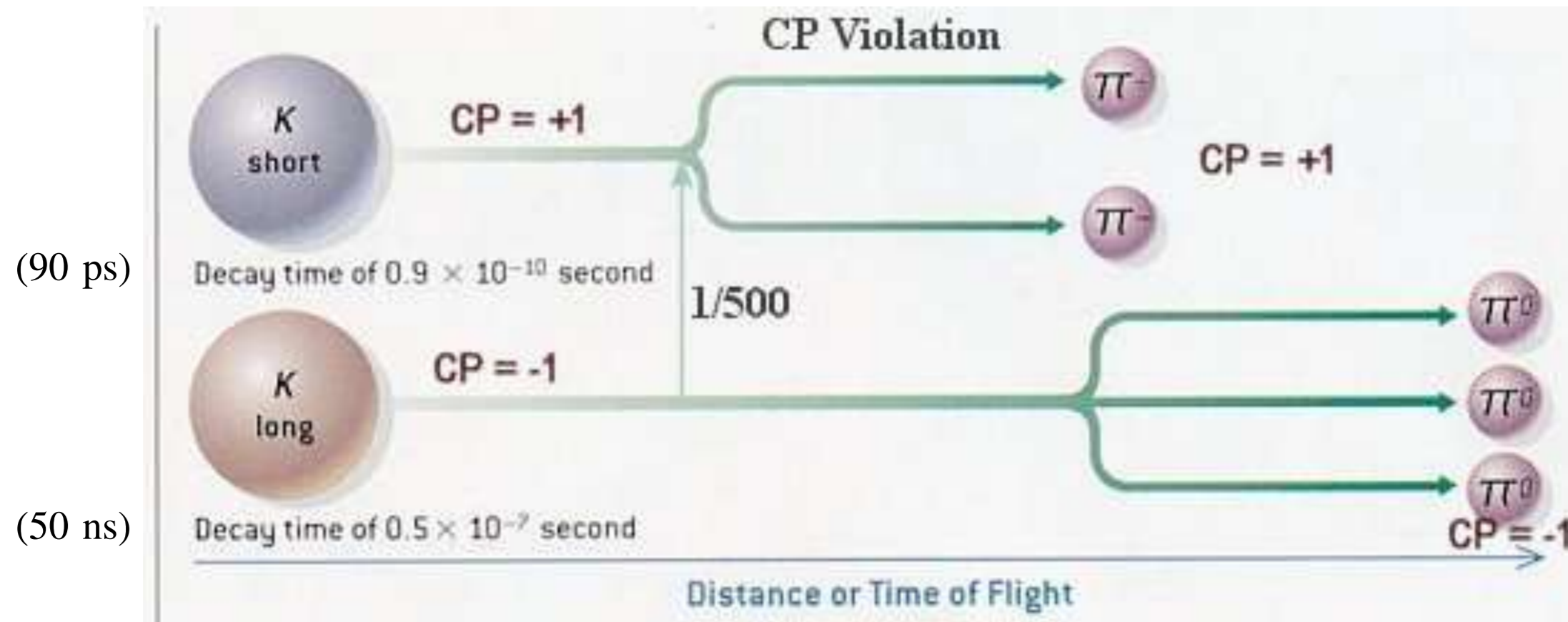
# TENET

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

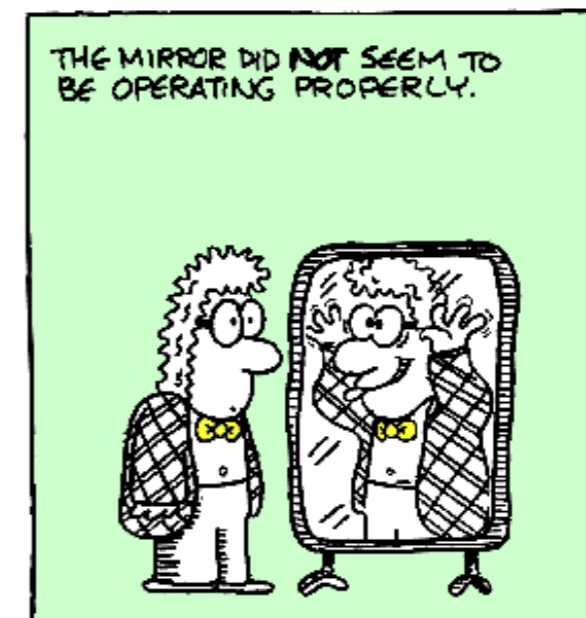


# La simmetria CP non è sempre rispettata

**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

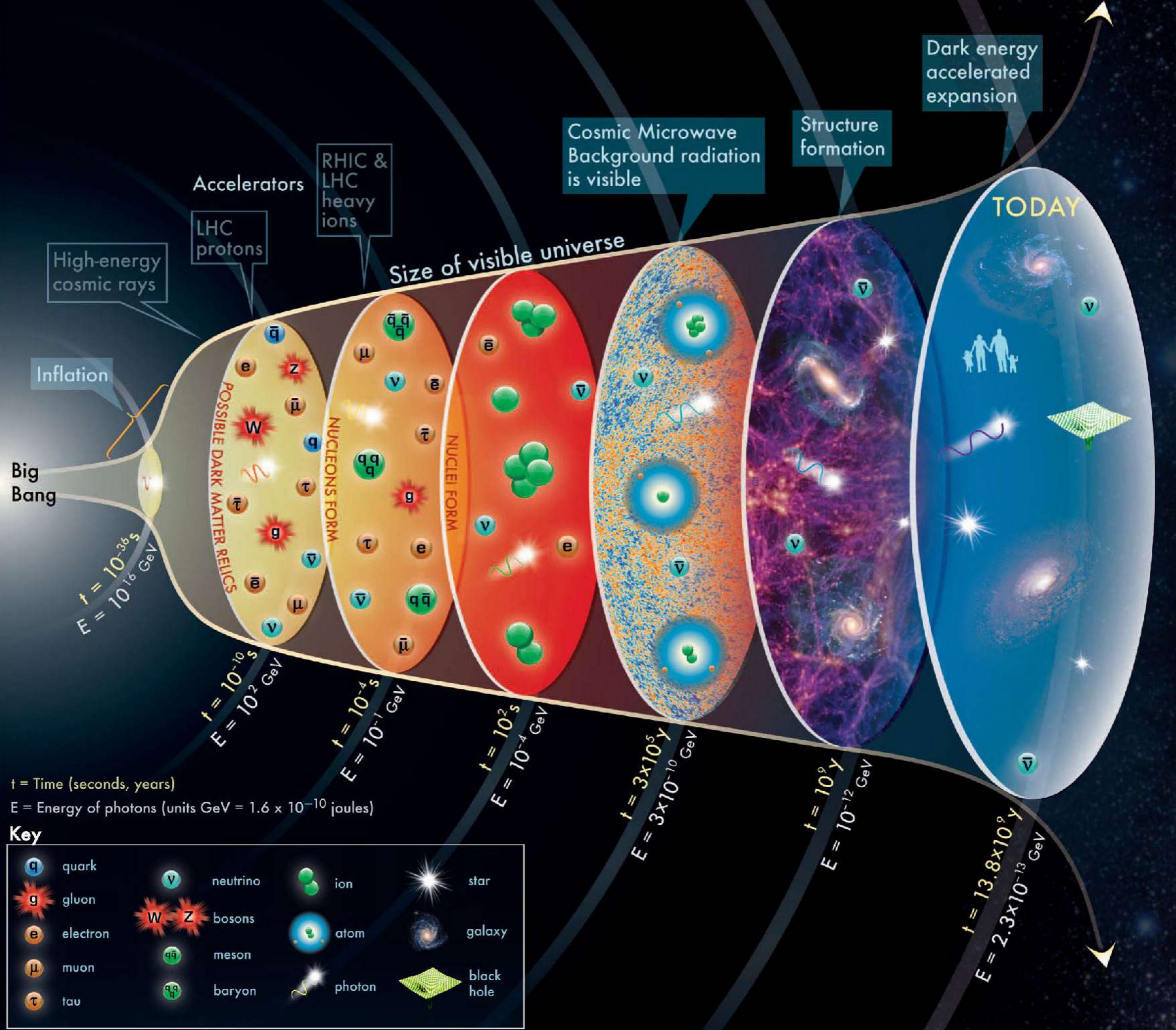
The theory of the expanding Universe, which presupposes a superdense initial state of matter, apparently excludes the possibility of macroscopic separation of matter from anti-matter; it must therefore be assumed that there are no antimatter bodies in nature, i.e., the Universe is asymmetrical with respect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

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

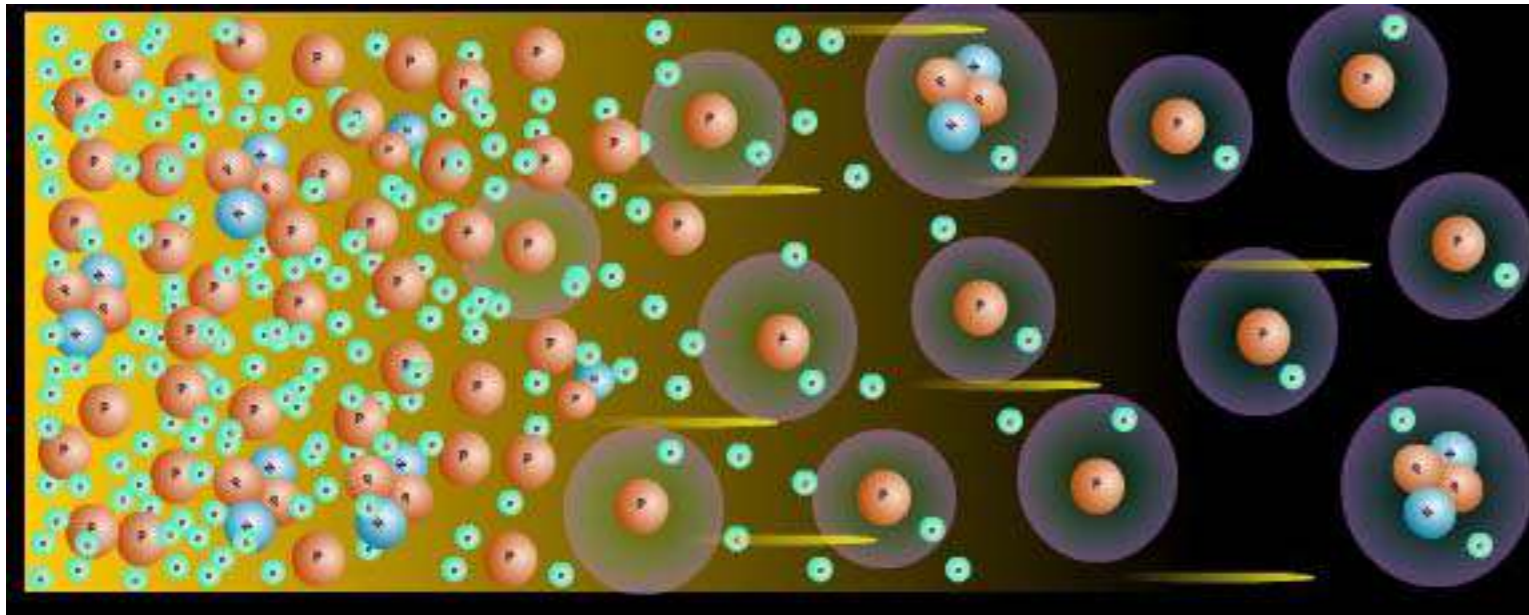
Come si torna indietro nel tempo?

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





# 1. Produrli

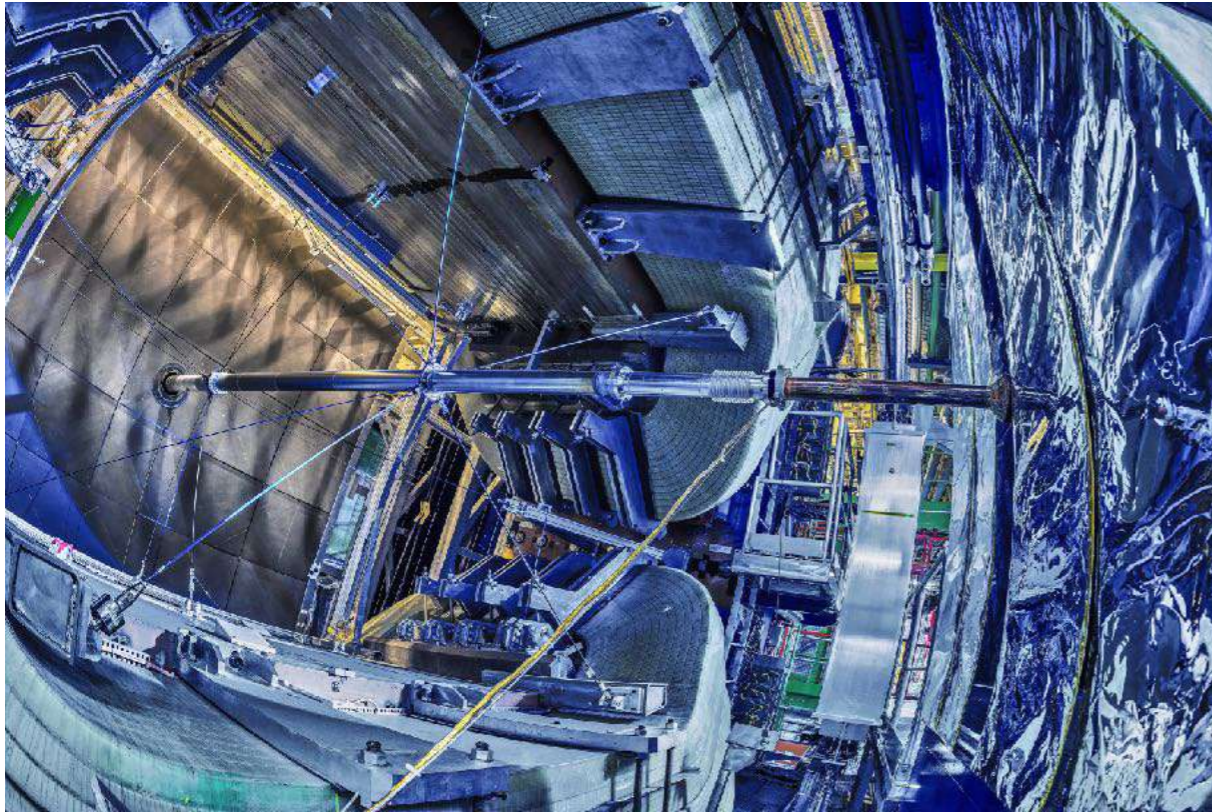


Dobbiamo ricreare l'universo primordiale in laboratorio, ovvero un gas caldissimo di particelle in agitazione...

...un plasma!



## 2. Osservarli



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

...oppure mettere l'universo in una scatola



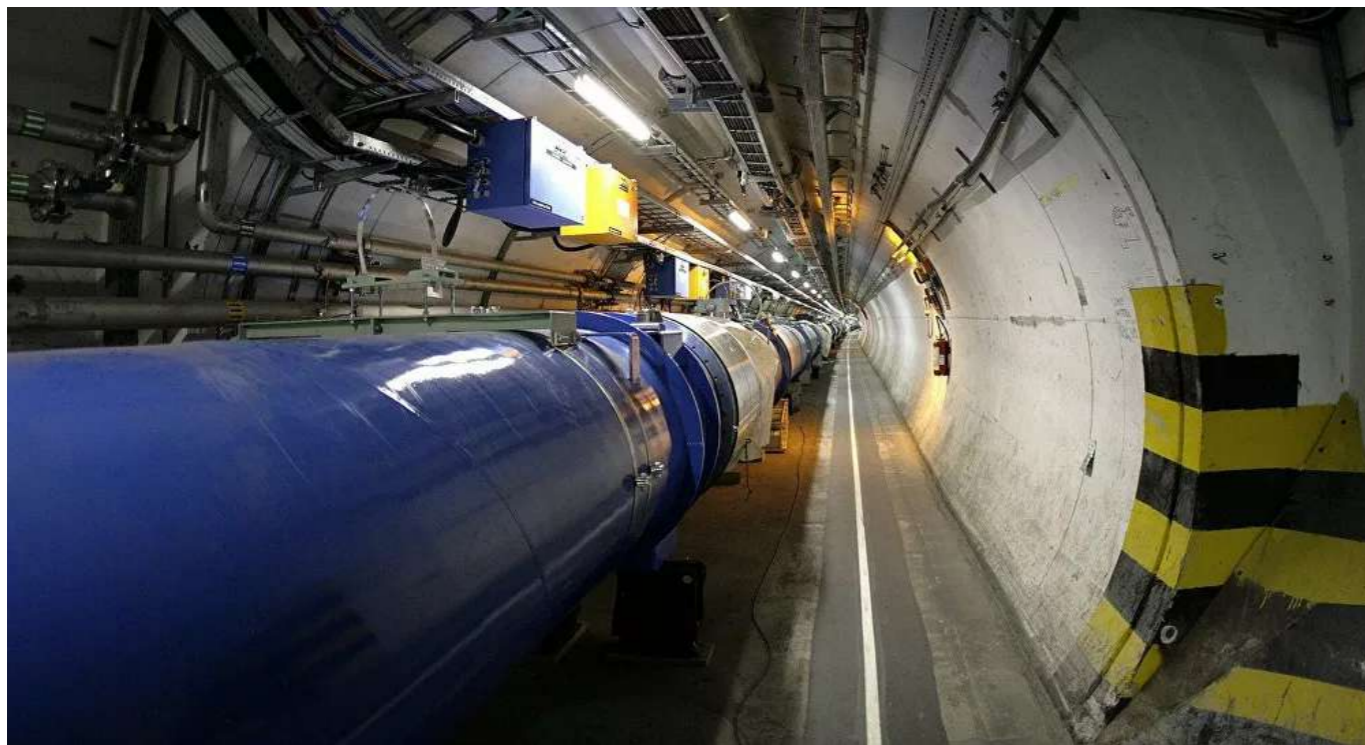
# Fatto!

---

Abbiamo scelto la soluzione difficile, costruendo:

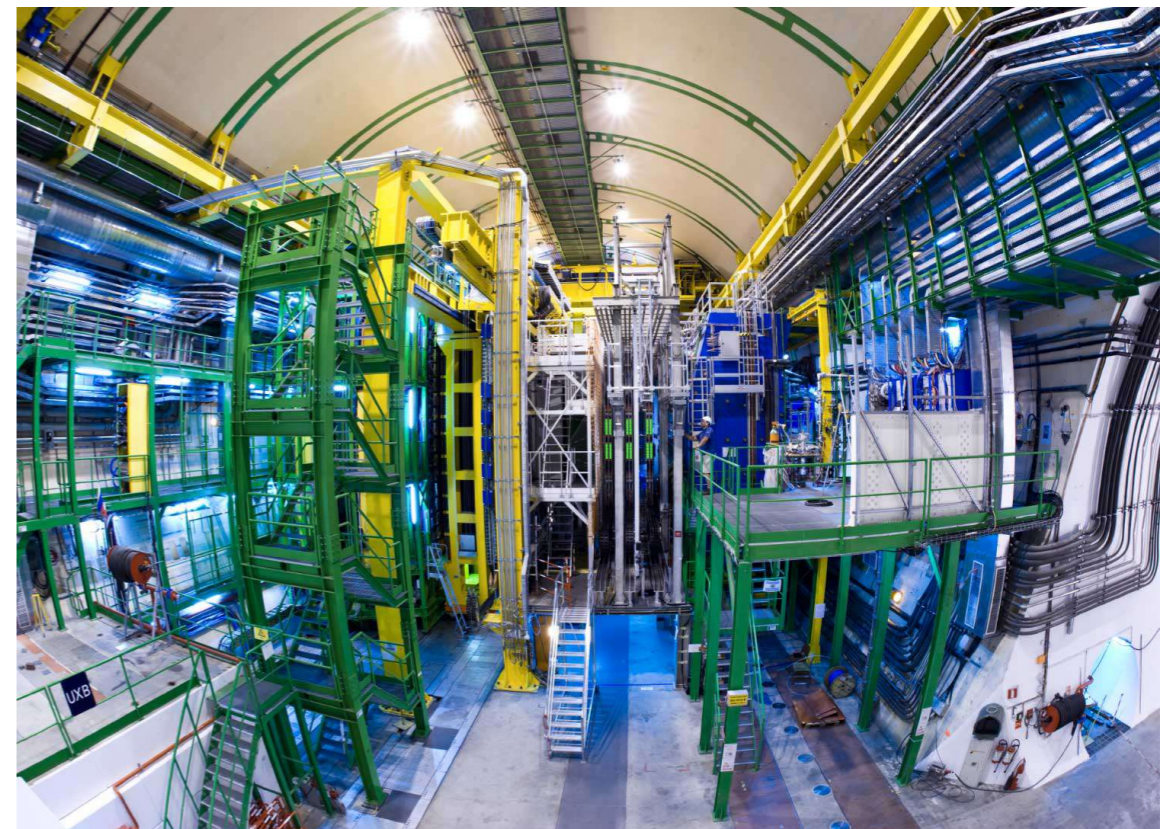
## LHC

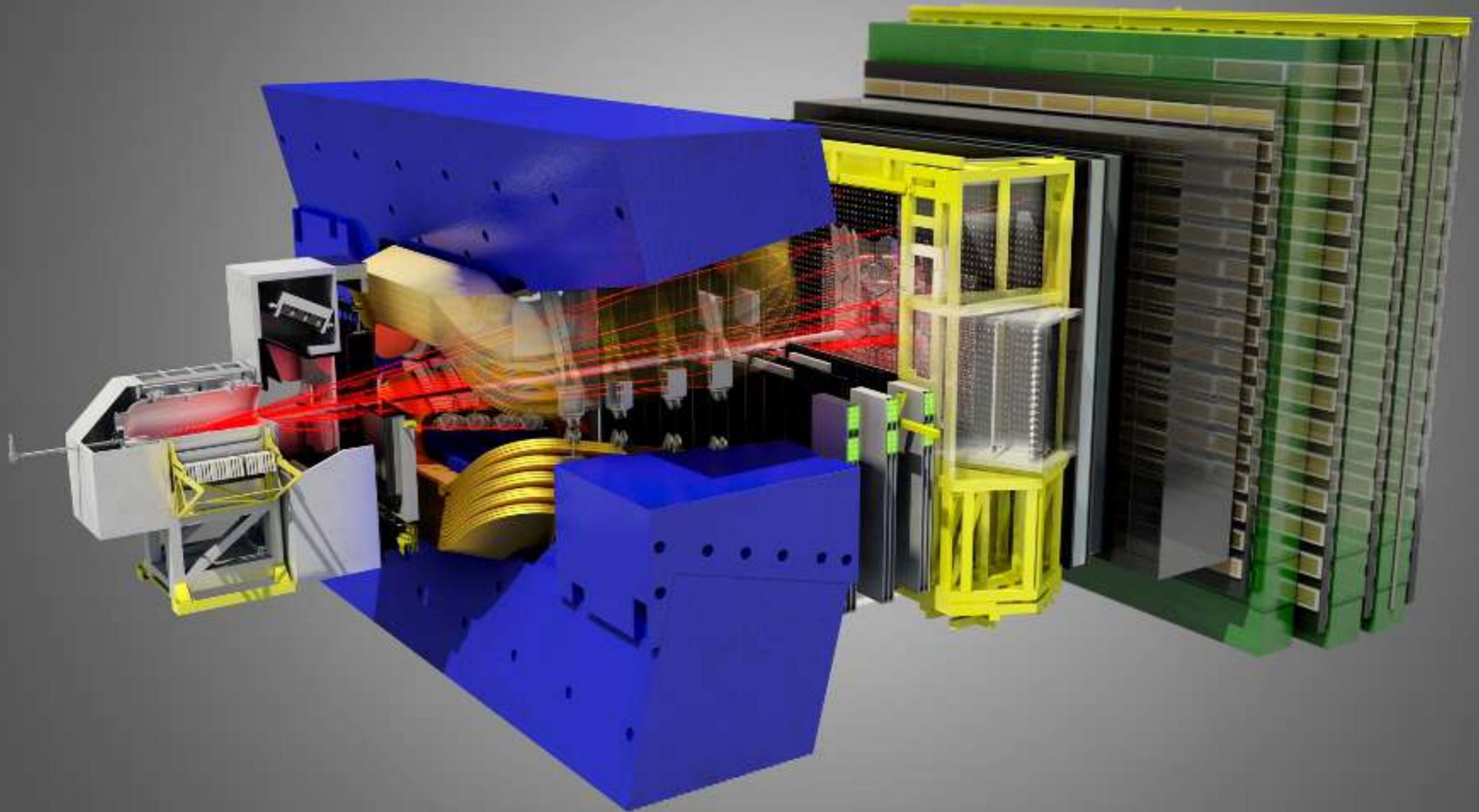
Il più grande e potente acceleratore  
di particelle del mondo



## LHCb

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

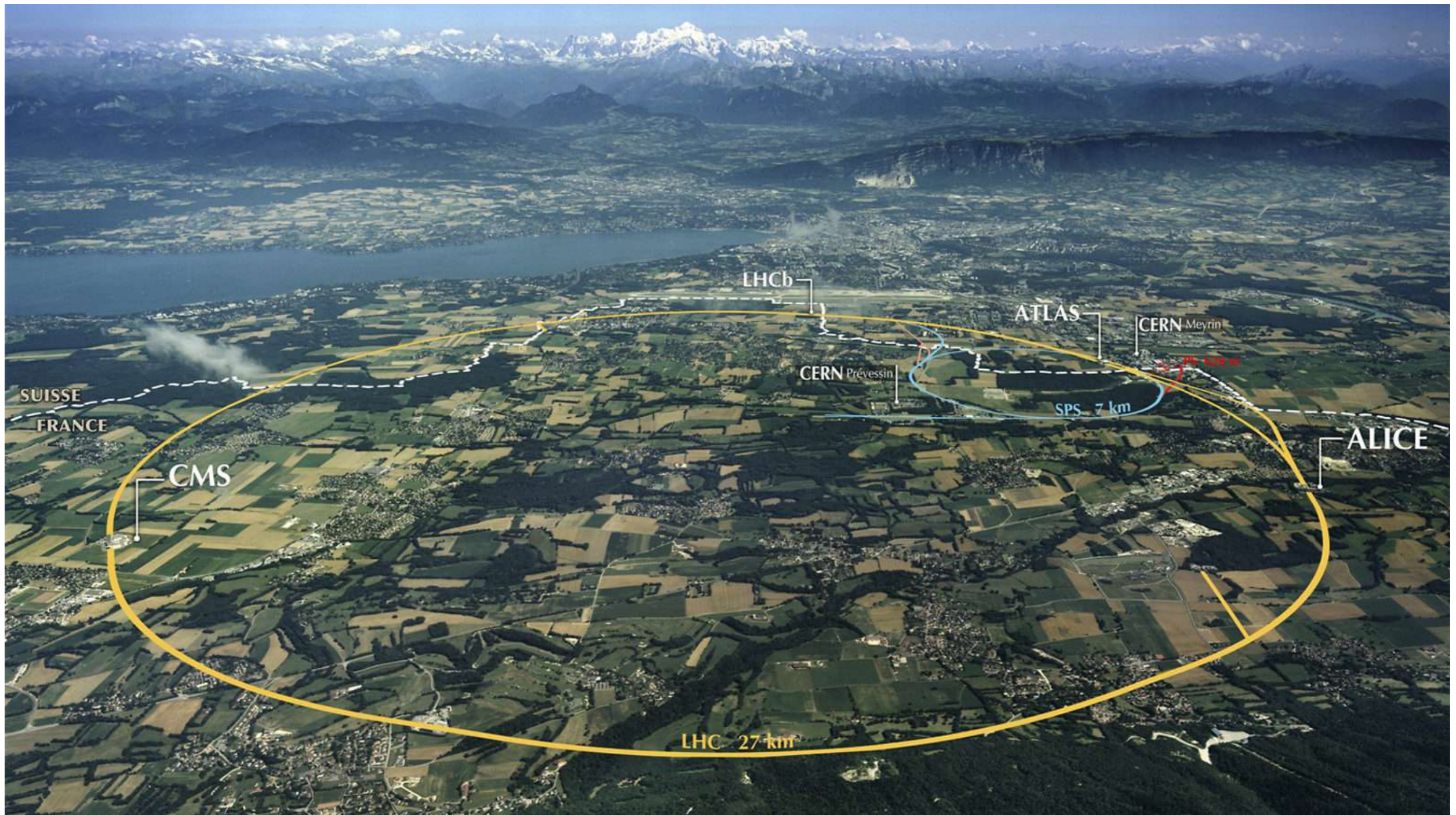




## 2. LHC e il rivelatore LHCb

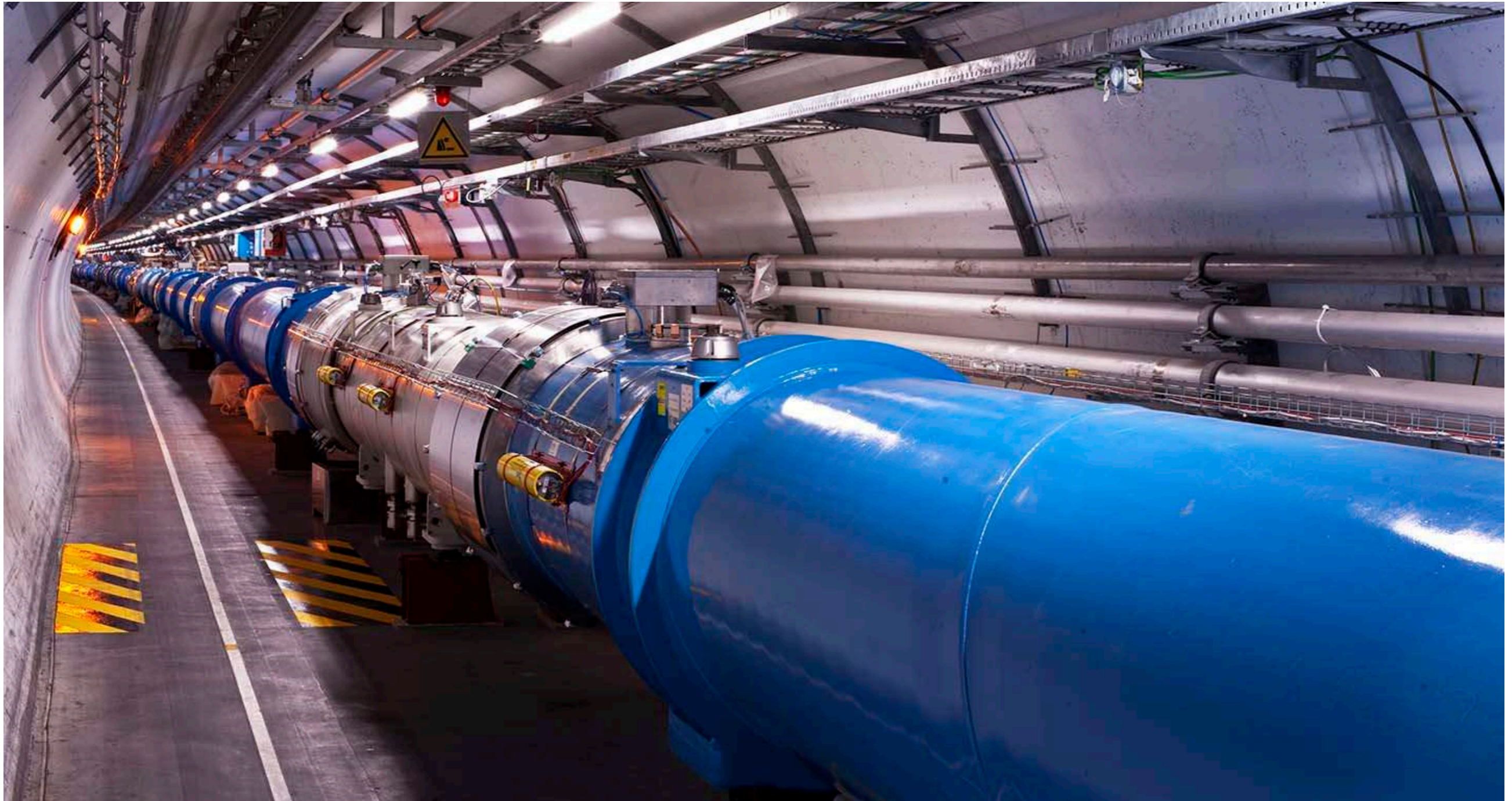
# Il CERN e LHC

LHC si trova in un tunnel lungo 27km, 100 m sotto terra al CERN, tra Francia e Svizzera



# Il Large Hadron Collider (LHC)

Potenti campi elettrici e magneti superconduttori (2° K) accelerano e curvano i protoni



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

L'enorme energia si converte in tante particelle secondo  $E = mc^2$  !

# Un “settore” di LHC

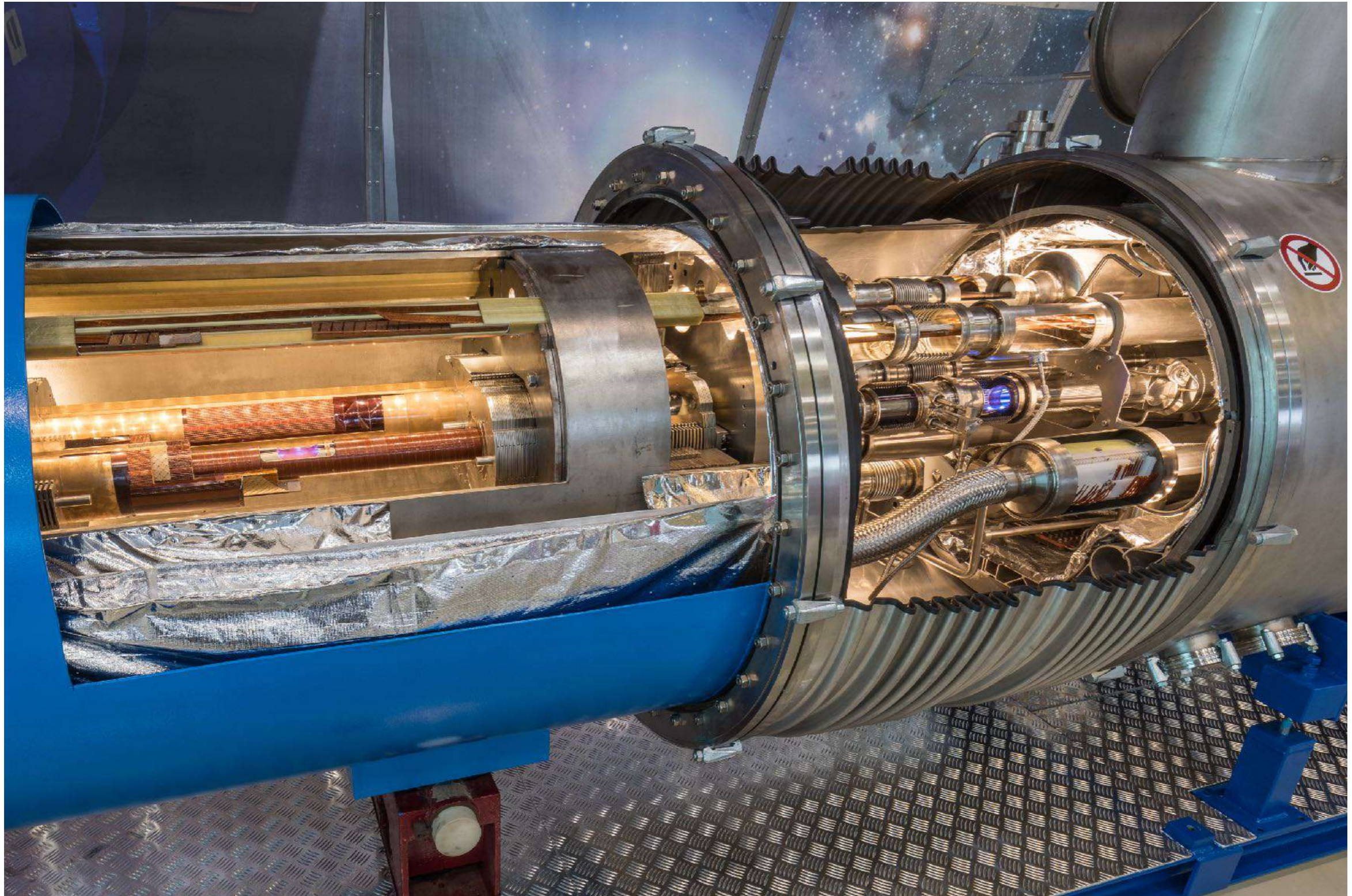
**2005:** 1/1232 settori (circa 20 m ciascuno) viene calato nel tunnel



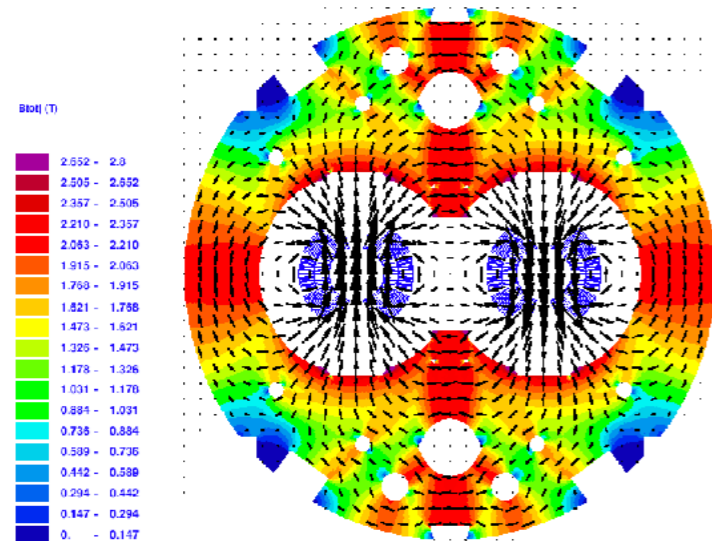
<http://lhc-machine-outreach.web.cern.ch/>

# Una sezione dell'acceleratore

2 fasci di protoni, divisi in pacchetti di  $10^{11}$  protoni ciascuno, circolano in direzioni opposte in due tubi a vuoto a  $10^{-9}$  mbar : più vuoto dell'universo!

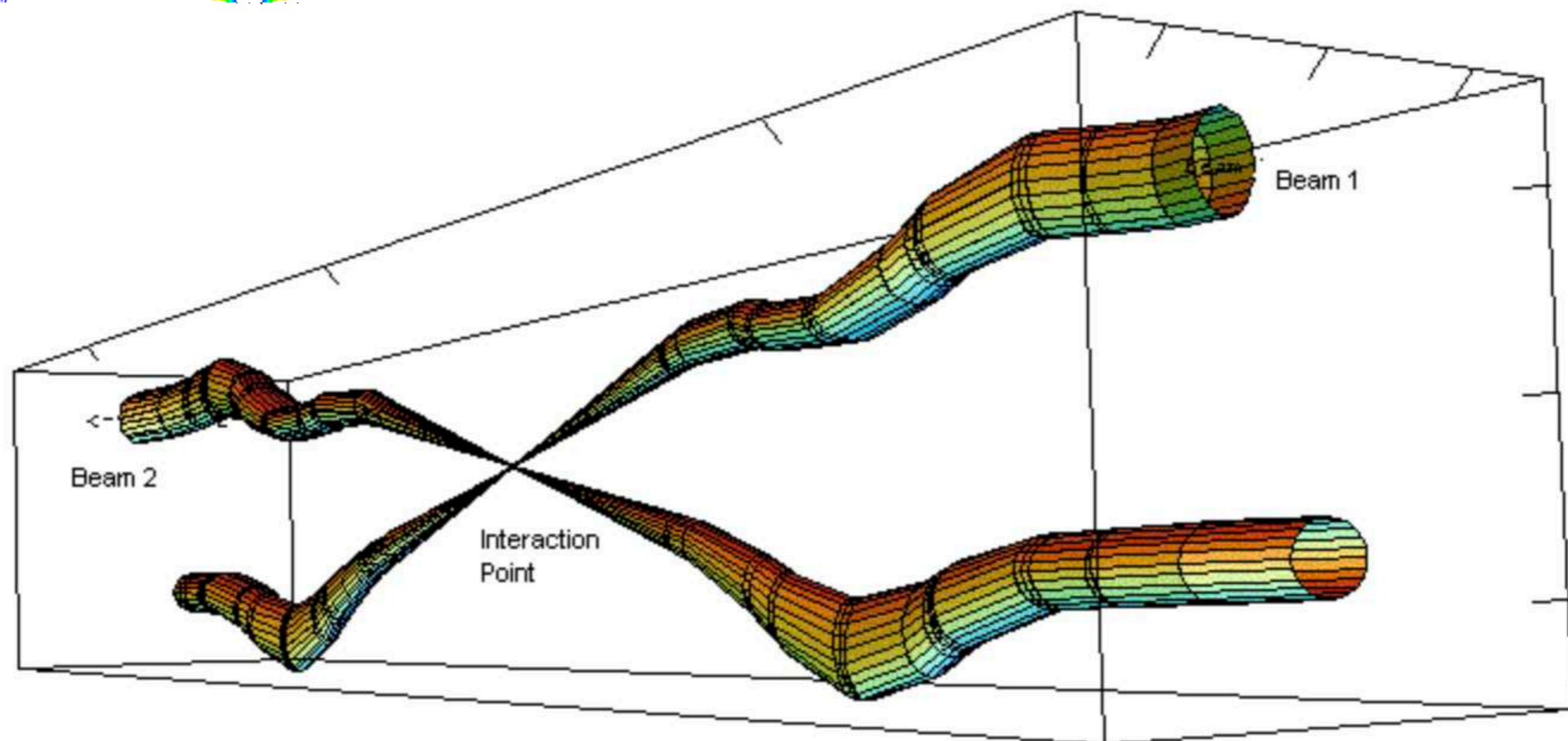


# Collisioni dei fasci di protoni



Elementi base:

- Cavità RF: campo elettrico per l'accelerazione
- Dipoli magnetici (8 Tesla): curvano il fascio
- Quadrupoli magnetici: focalizzano il fascio
- Consumo totale a pieno regime: 200 MW



I due fasci vengono collimati e si incrociano in 4 siti sperimentali, producendo circa **600 milioni di collisioni al secondo**

# Un'opera titanica



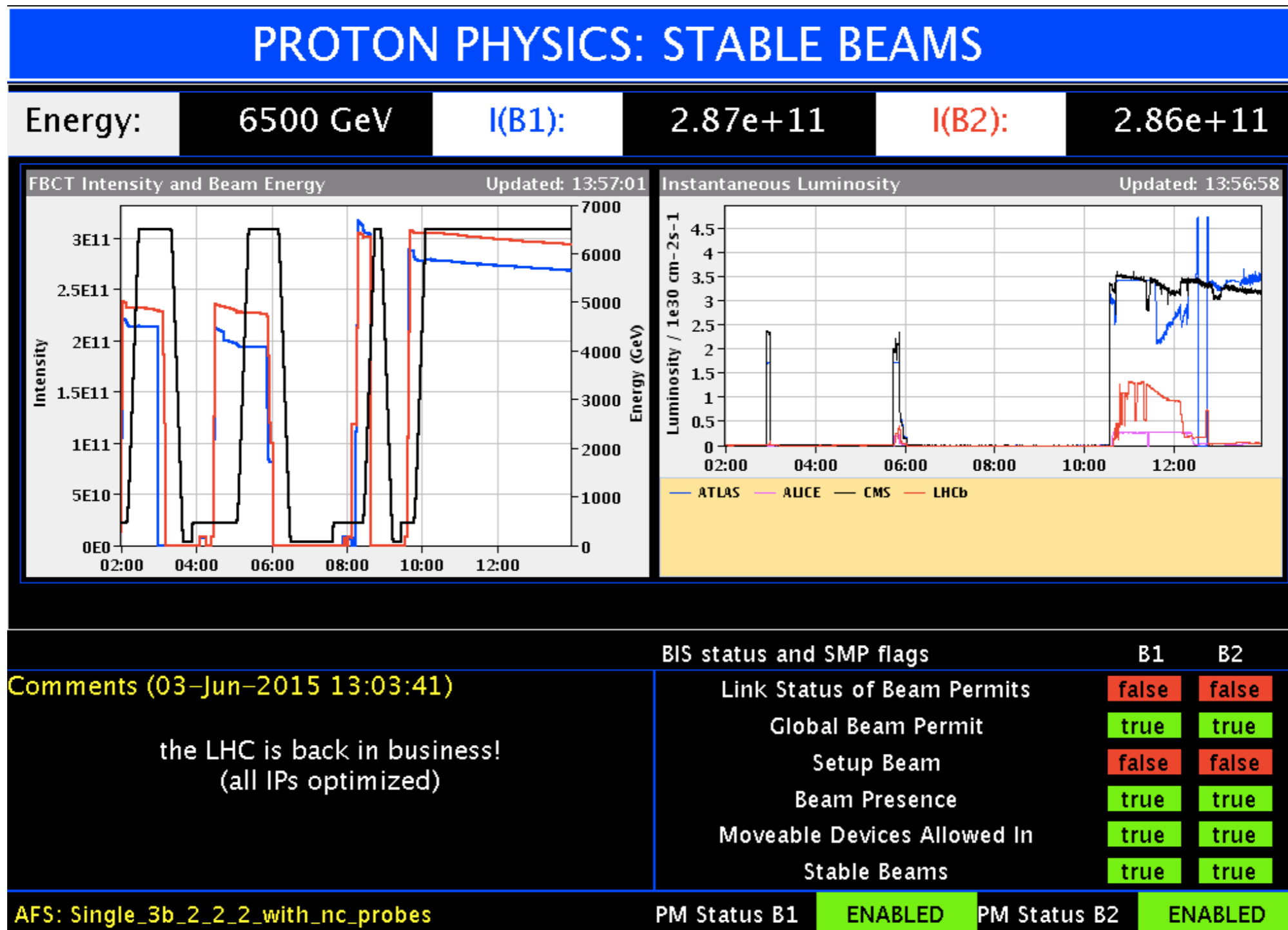
# Una collisione a LHC

---

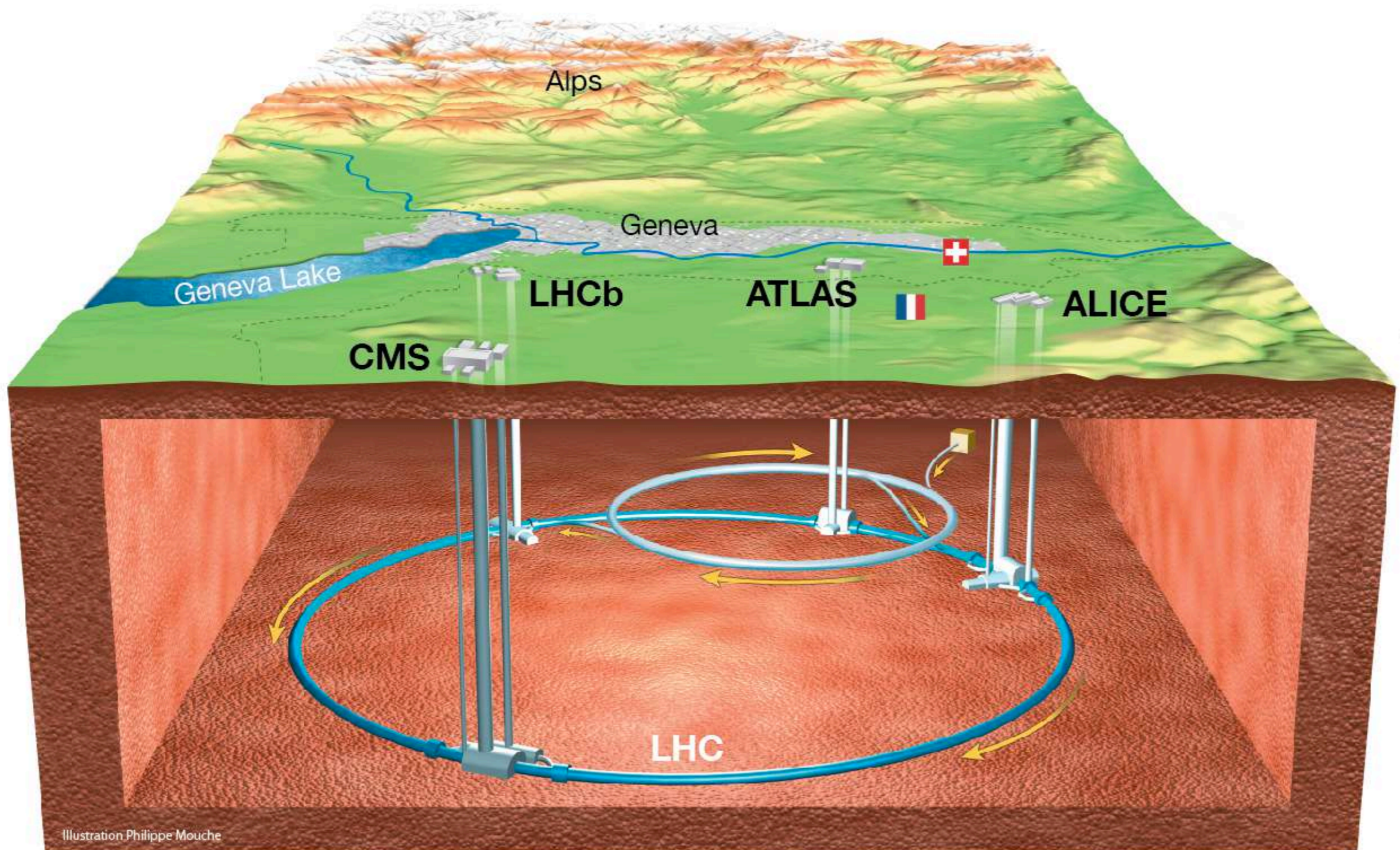
# Cosa succede a LHC?

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

Ora: “Technical stop” invernale, ripartenza ad Aprile!

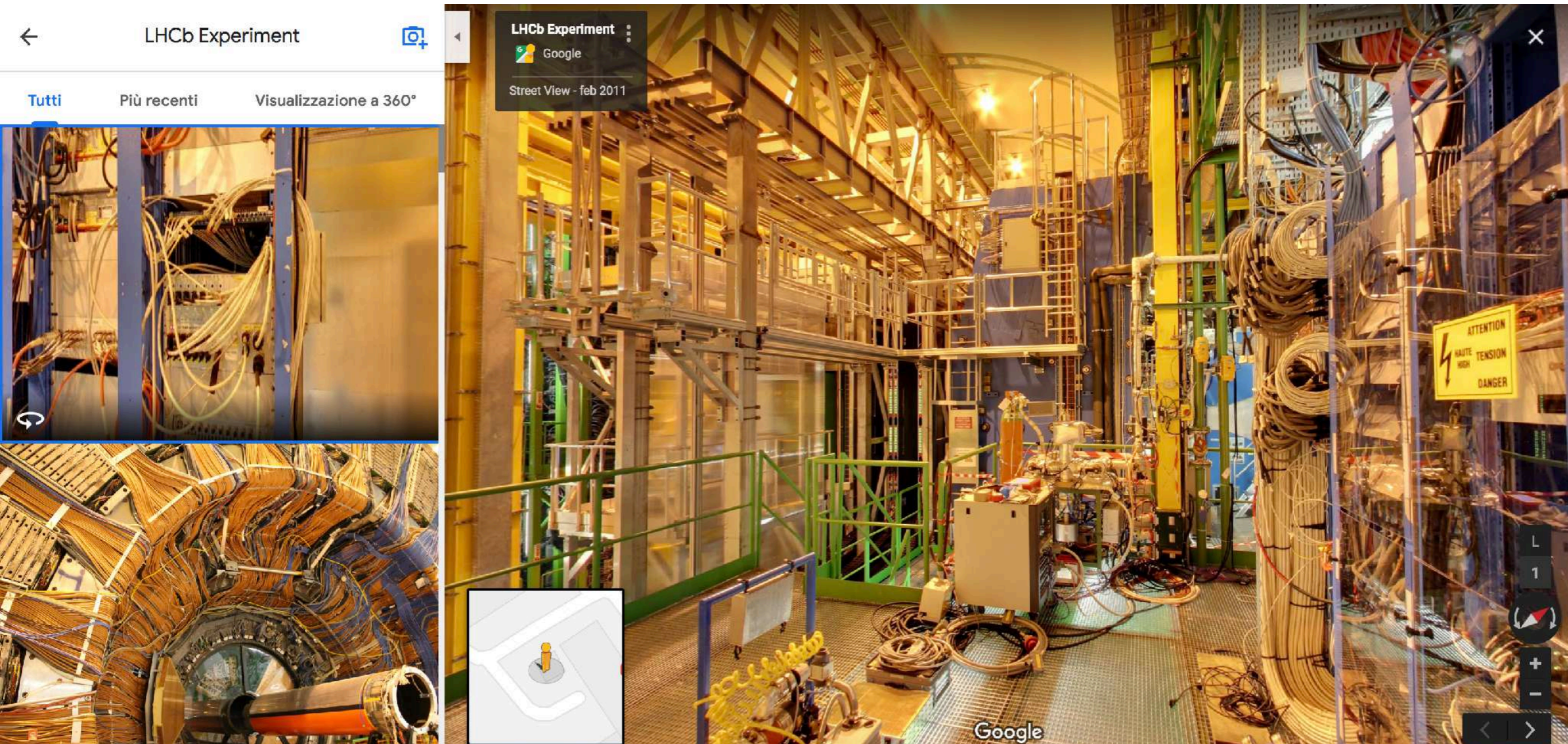


# Large Hadron Collider Beauty (LHCb)

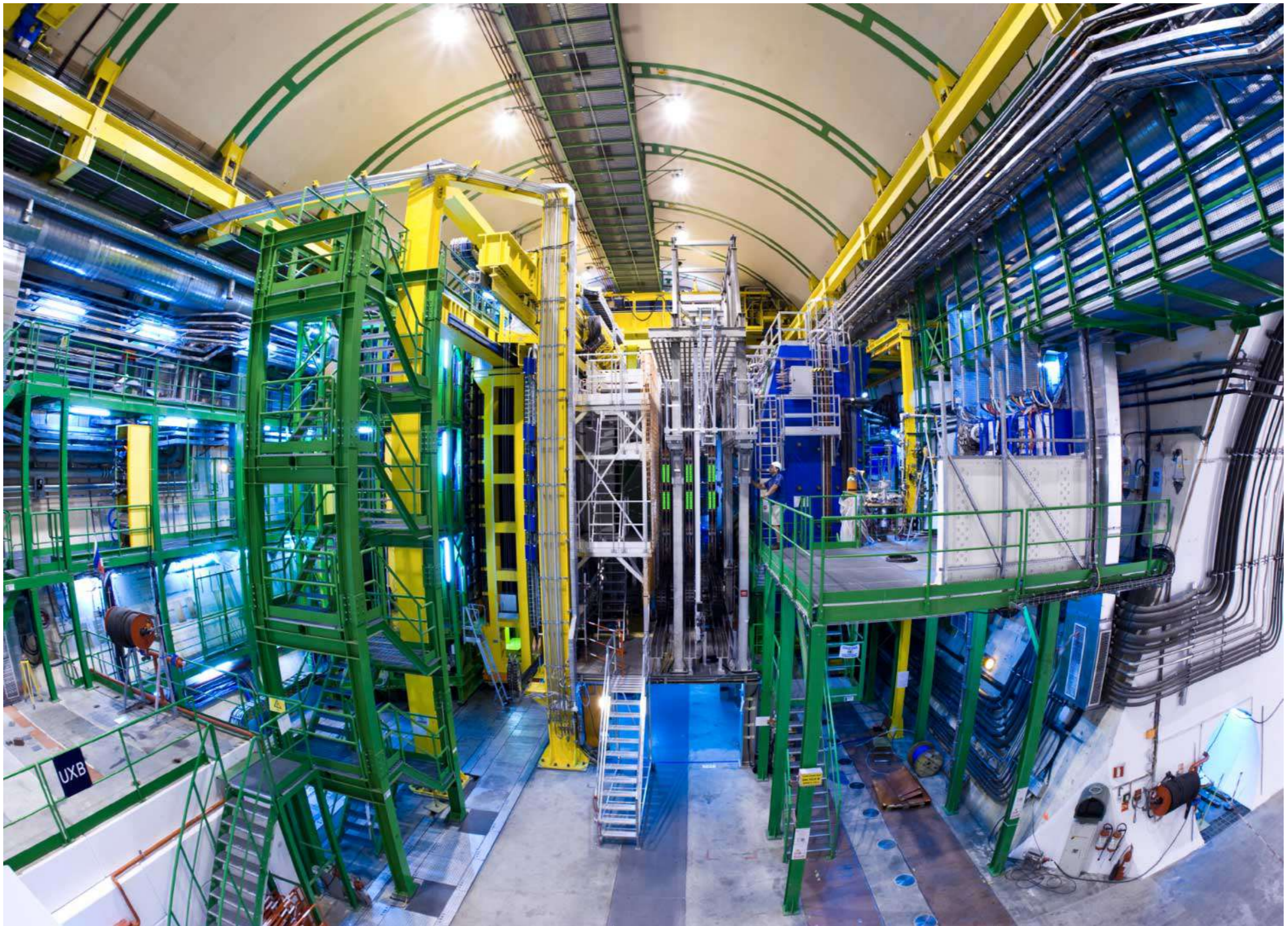


# LHCb: Google Maps

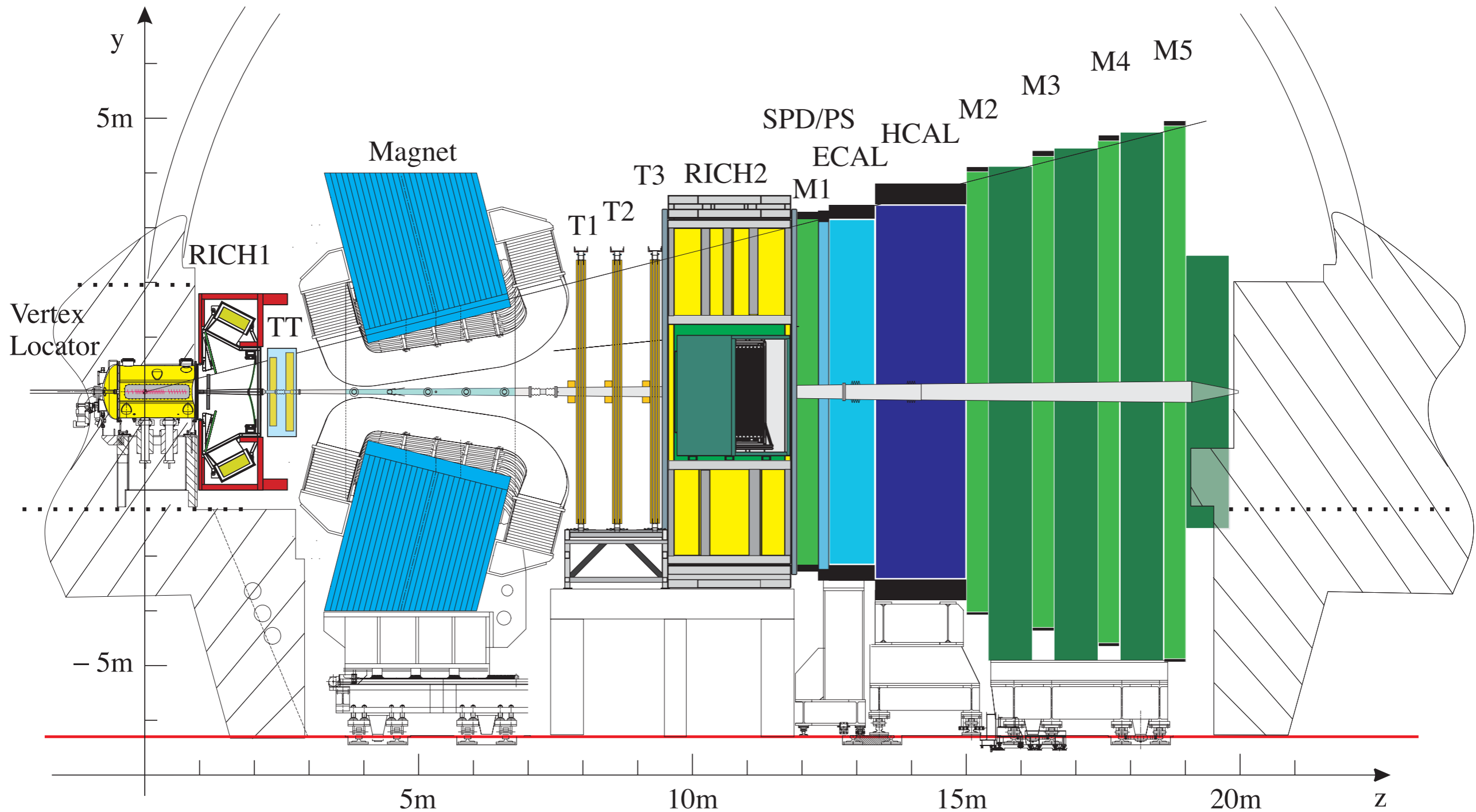
Basta cercare su google maps "LHCb experiment" (oppure "McDonald's Ferney-Voltaire")  
e 100 metri sotto terra...



# Il rivelatore LHCb

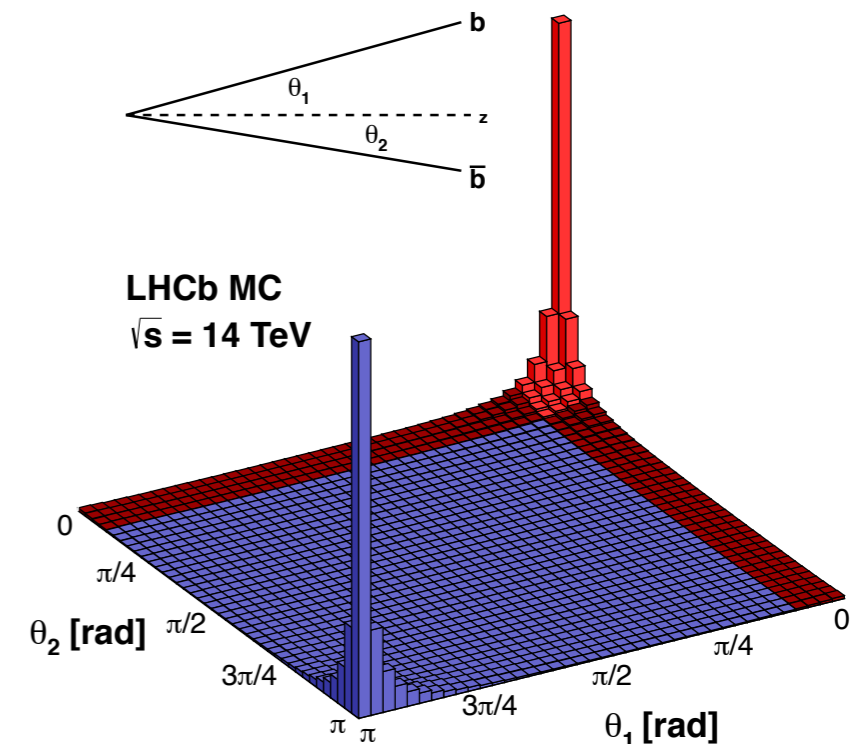
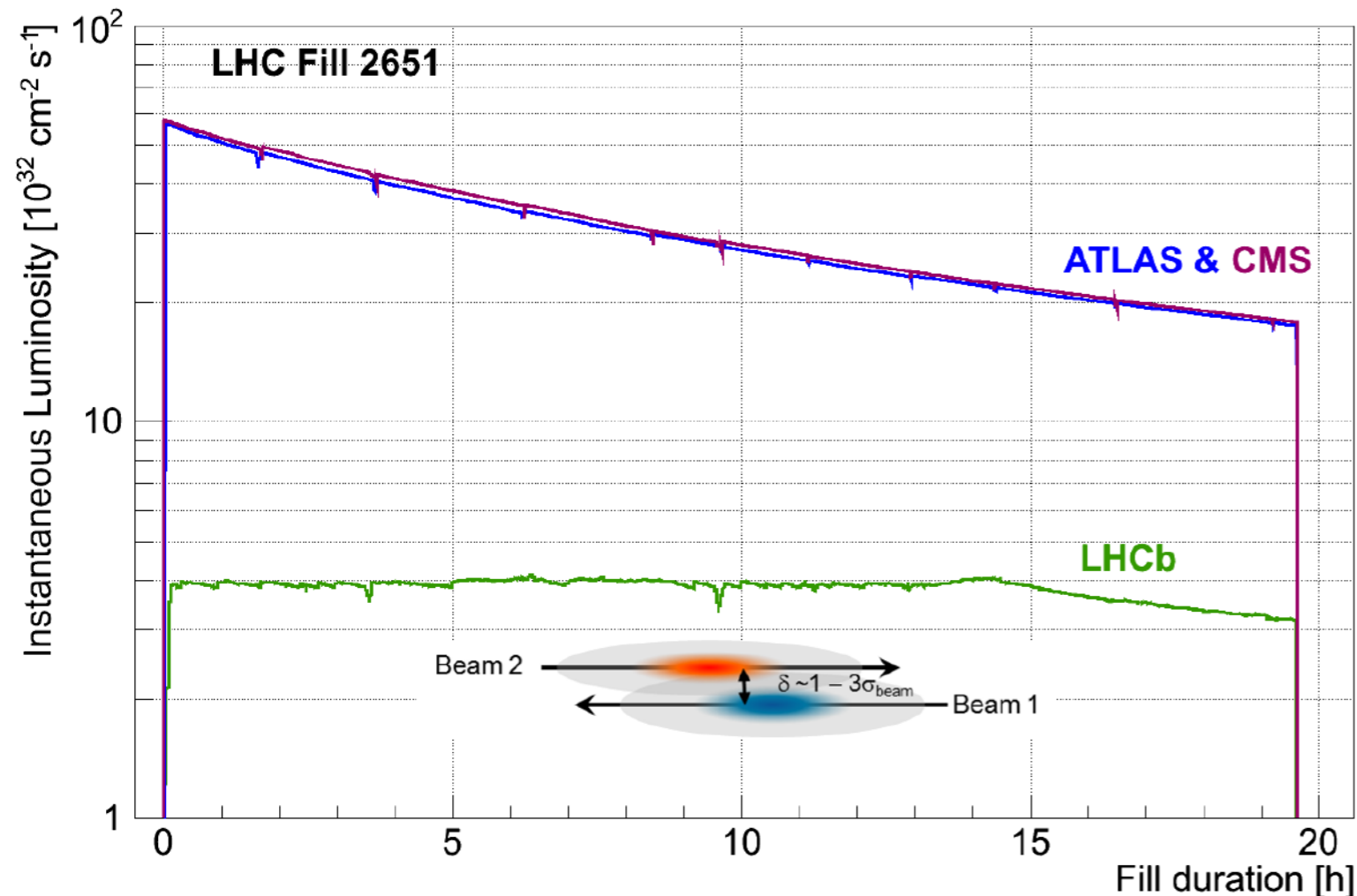


# Schema del rivelatore



# Perché LHCb ha questa forma?

- Mentre ATLAS e CMS hanno forma cilindrica e circondano il fascio, LHCb ci va molto vicino! La luminosità in LHCb è regolata allineando i fasci (“levelling”)

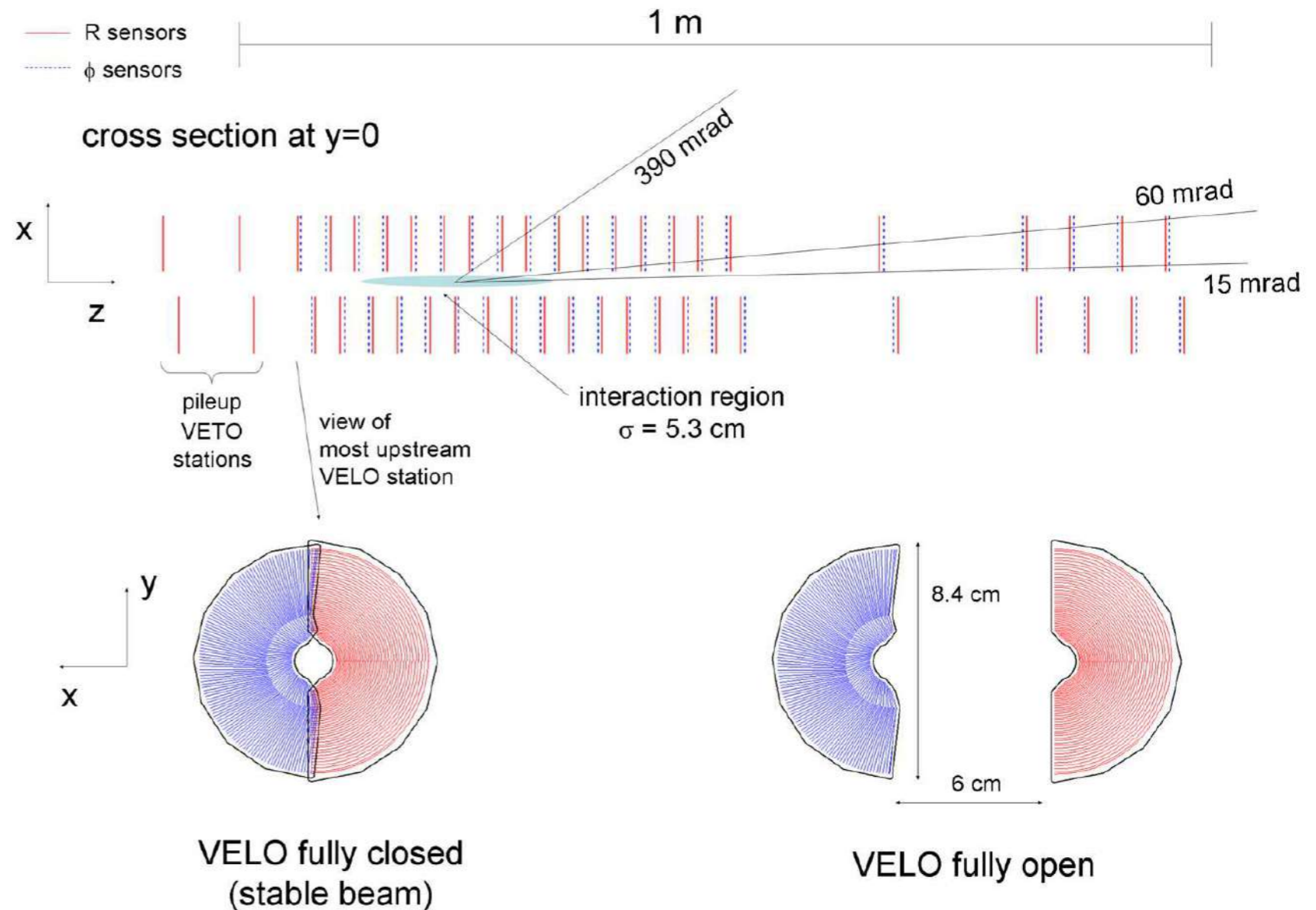
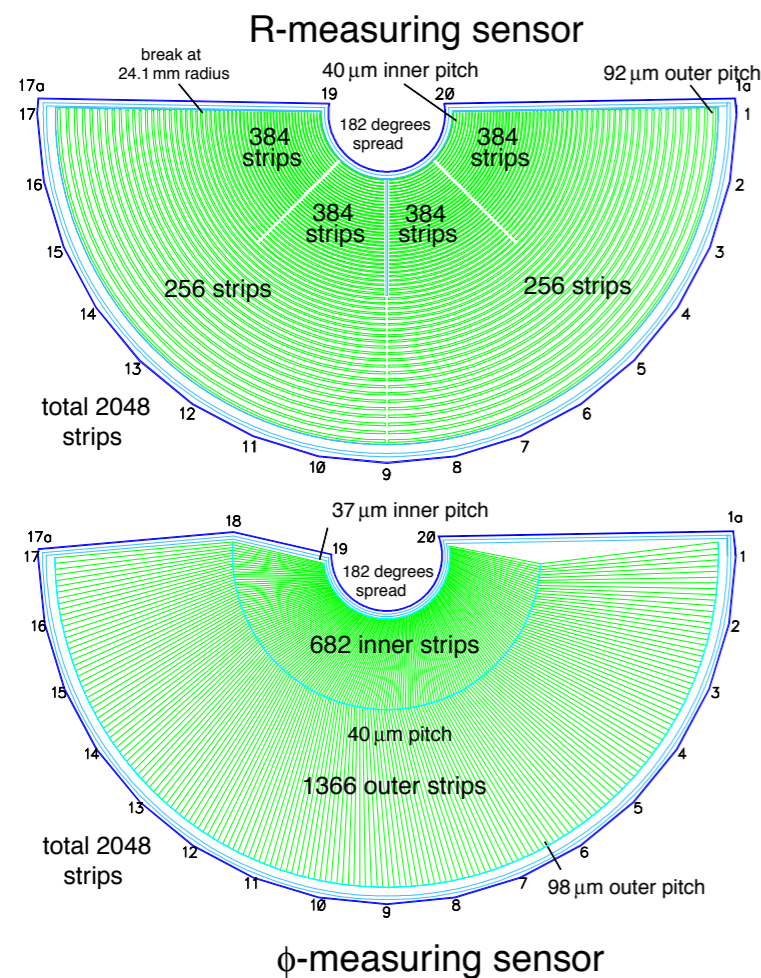
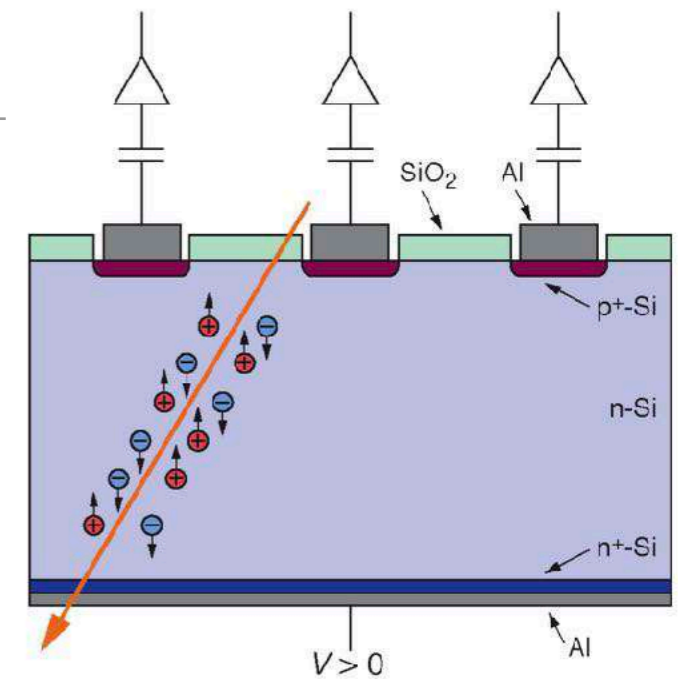


- La **produzione dei quark pesanti** (c e b), che ci interessano, avviene “in avanti” → rivelatori a piccolo angolo

# Il rivelatore di vertice (VELO)

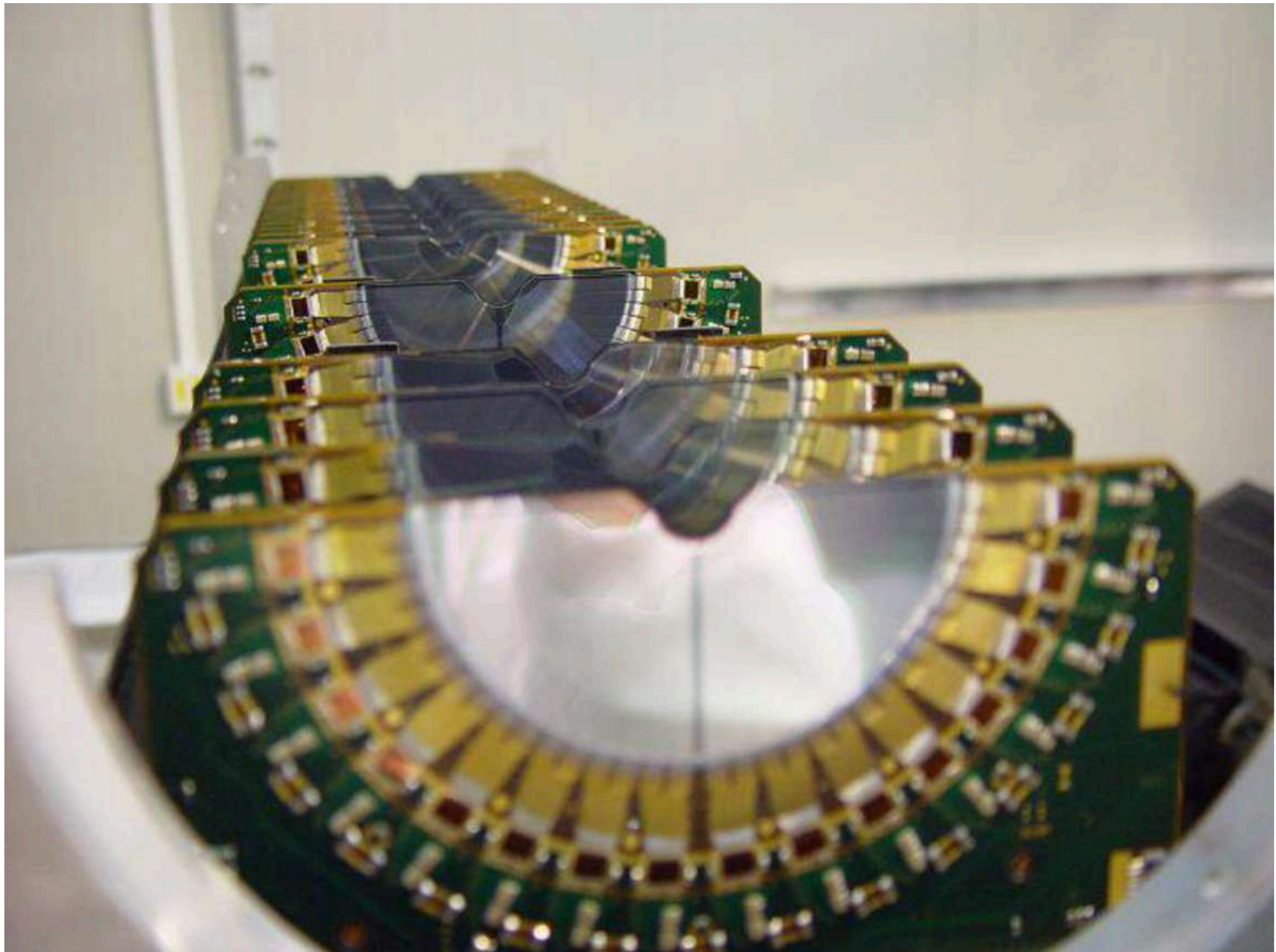
Rivelatore al silicio:

- Le particelle cariche generano un segnale elettrico nel silicio, che viene localizzato con delle strisce (strip) di lettura da  $\sim 50 \mu\text{m}$
- 23 “stazioni” con strip di silicio: misura di  $R$  e  $\phi$



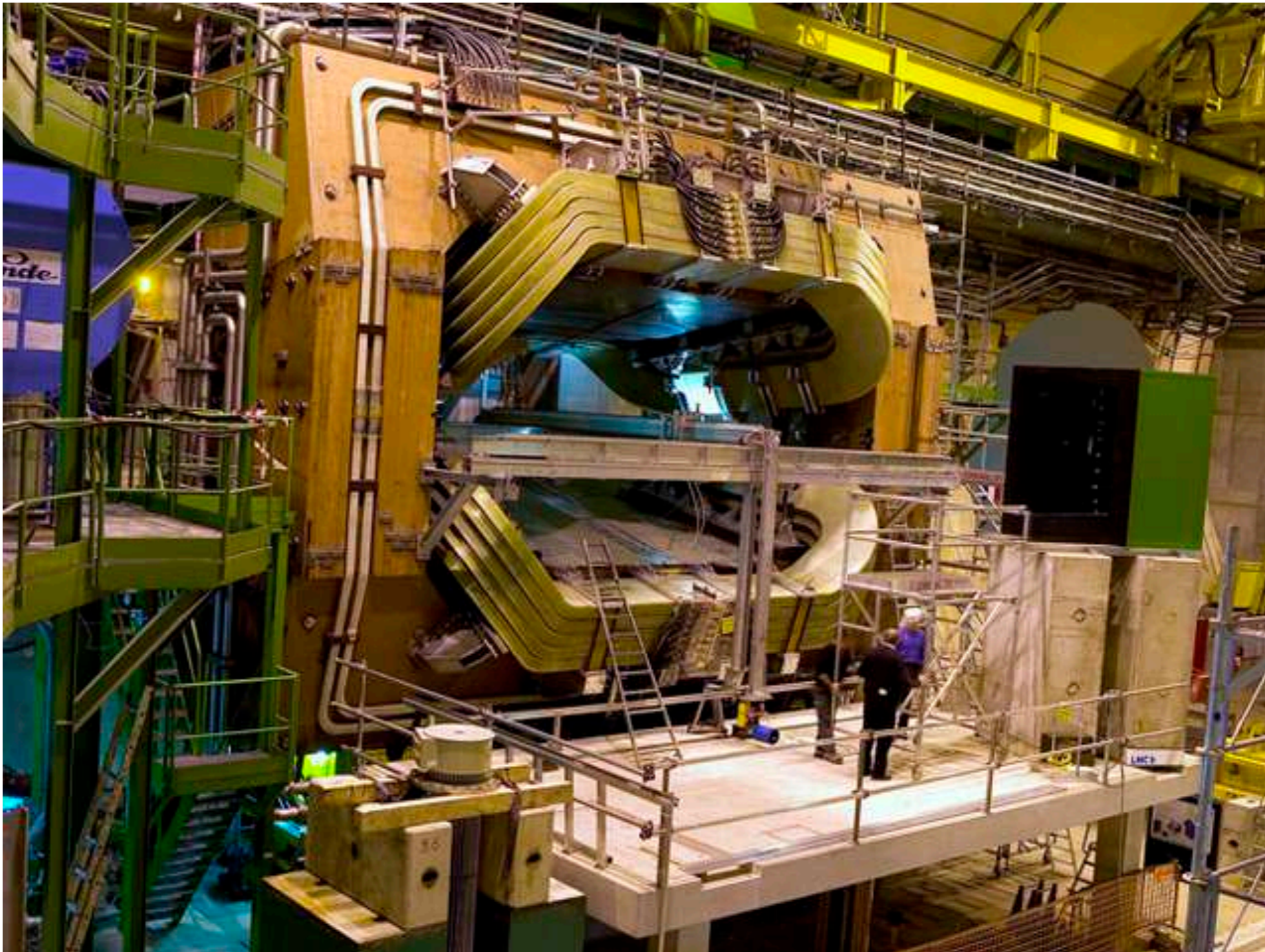
# Il rivelatore di vertice (VELO)

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



# A che serve nella vita la forza di Lorentz?

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

[se  $v$  e  $B$  perpendicolari]

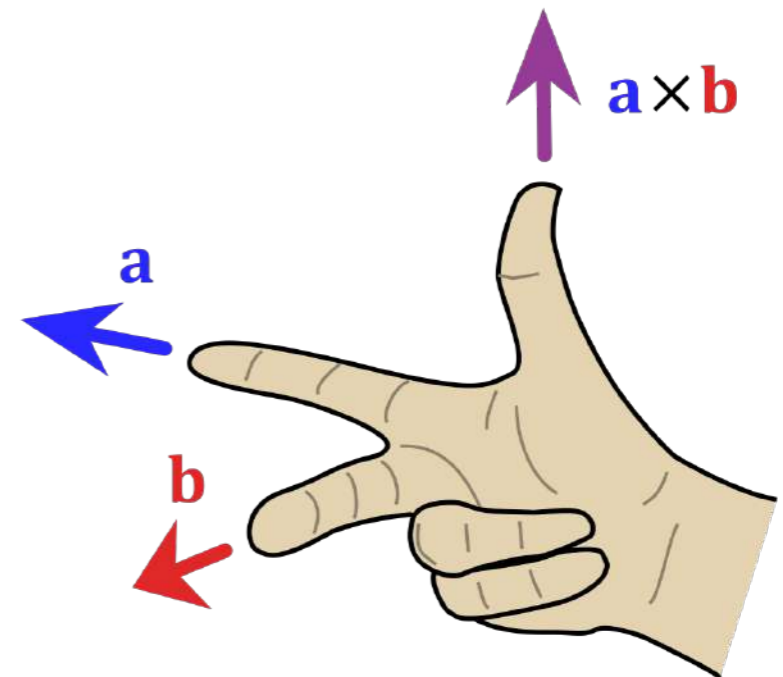
$$F = qvB$$

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

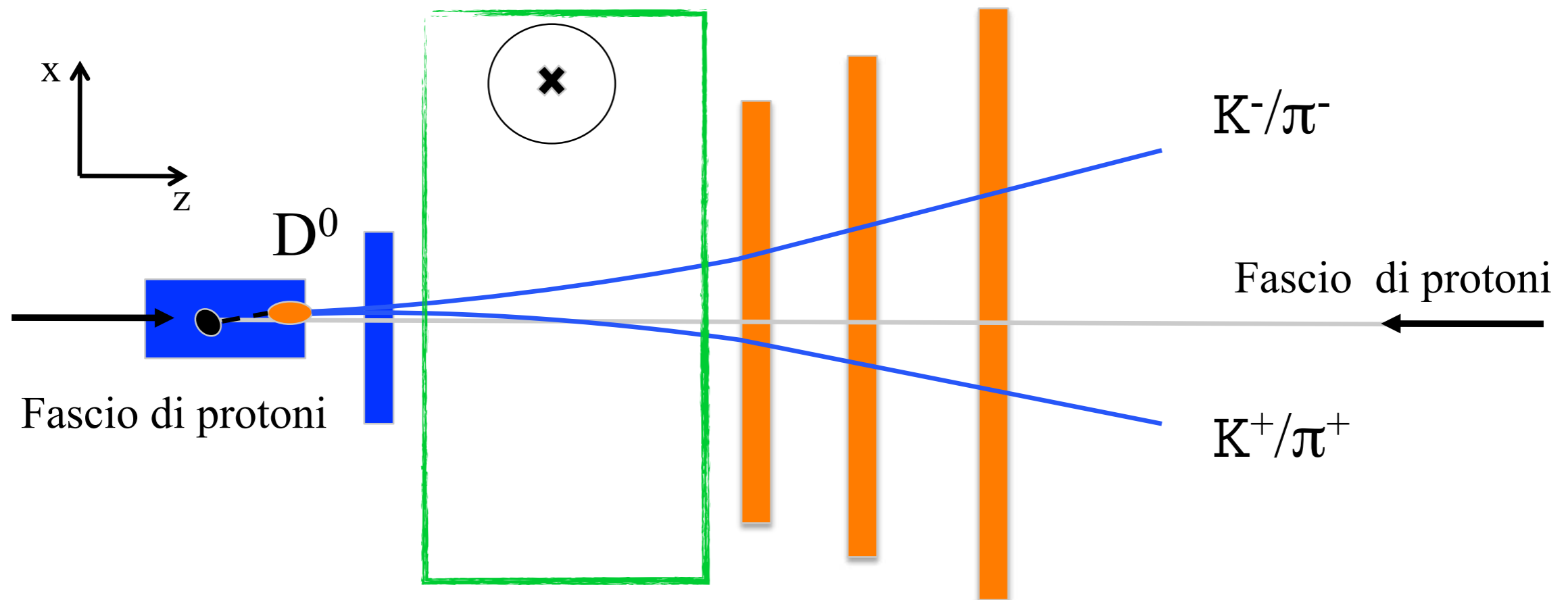
$$qvB = m \frac{v^2}{R} \Rightarrow R = \frac{p}{qB}$$

Forza di Lorentz

Equazione di Newton  
per moto circolare

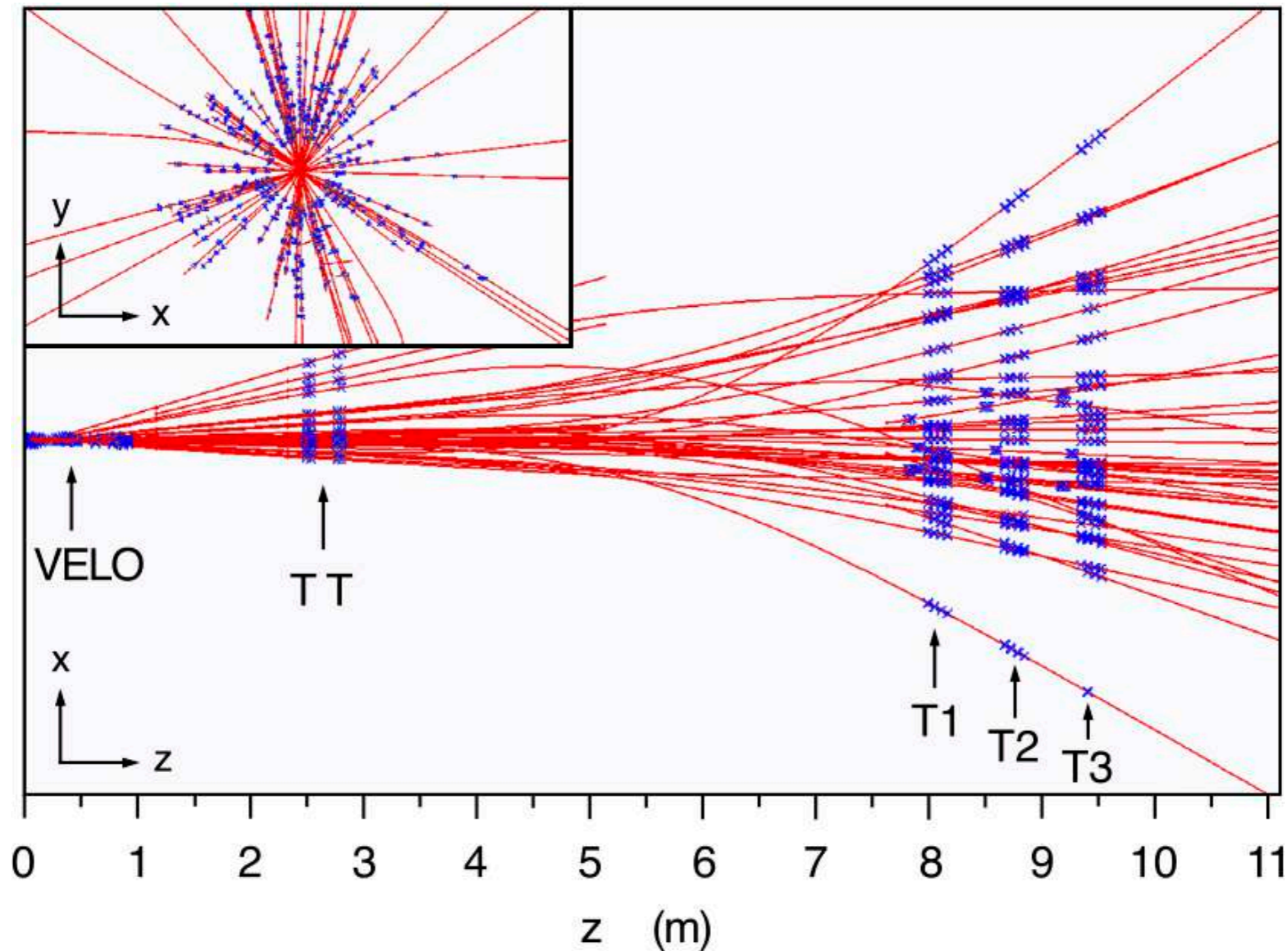


B field

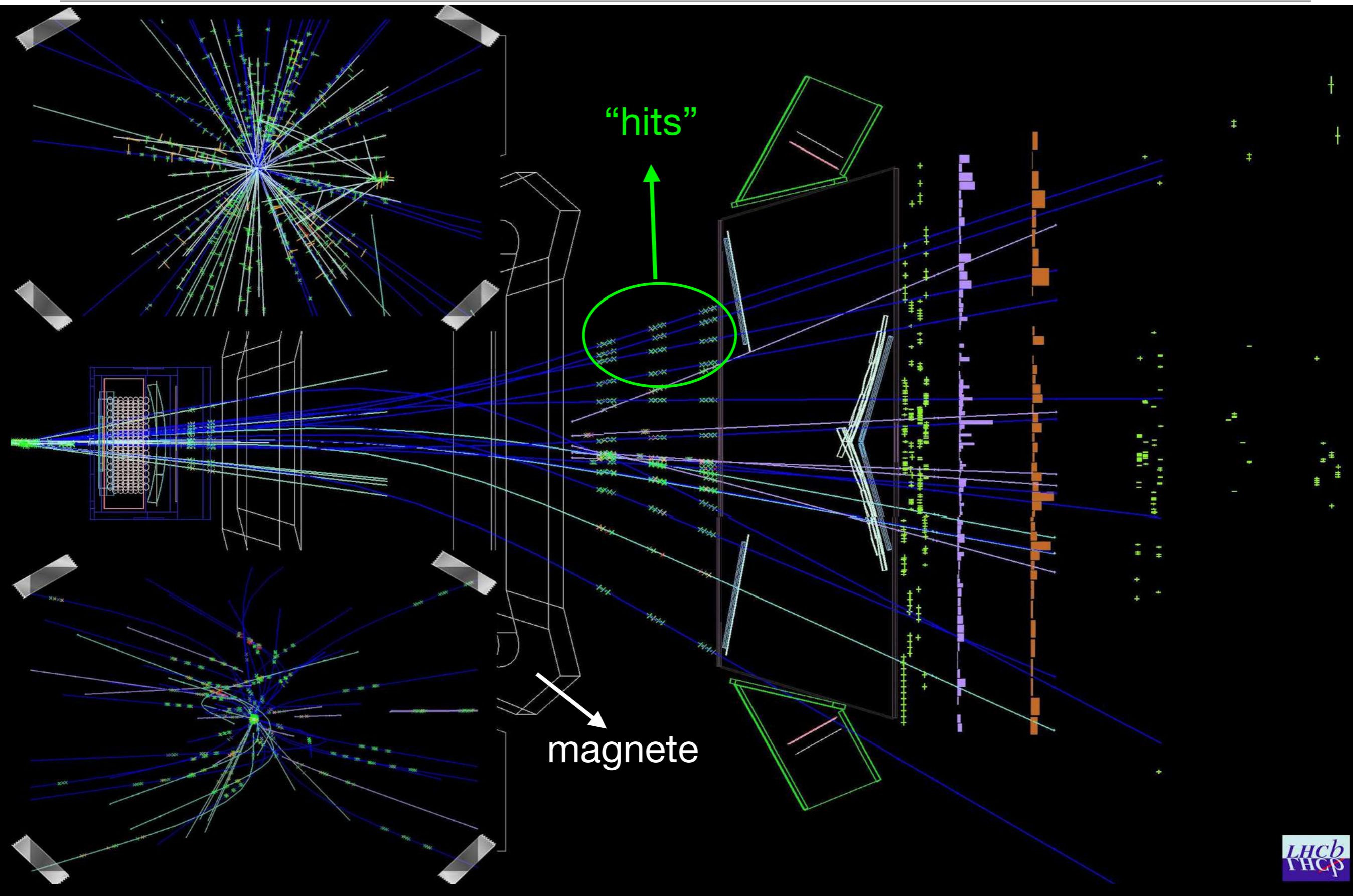


# I tracciatori

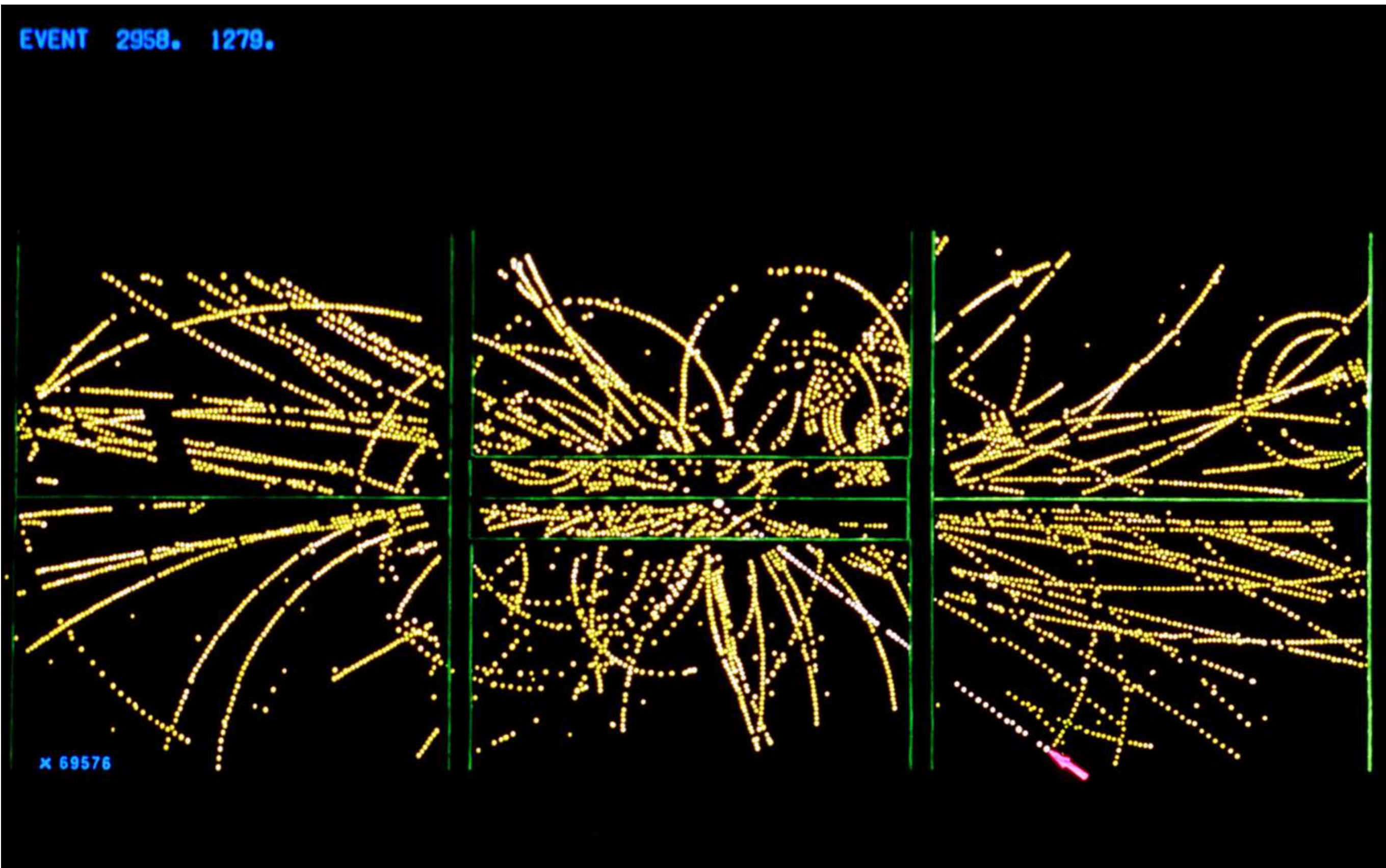
Rivelatori al silicio o a gas registrano i punti di passaggio delle particelle ("**hits**") per ricostruirne la traiettoria



# Ricostruzione delle tracce



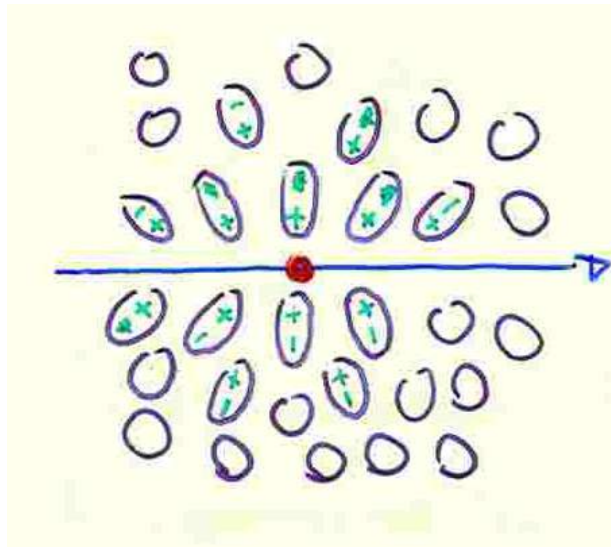
# Tracce di particelle in UA1 (scoperta Nobel 1984!)



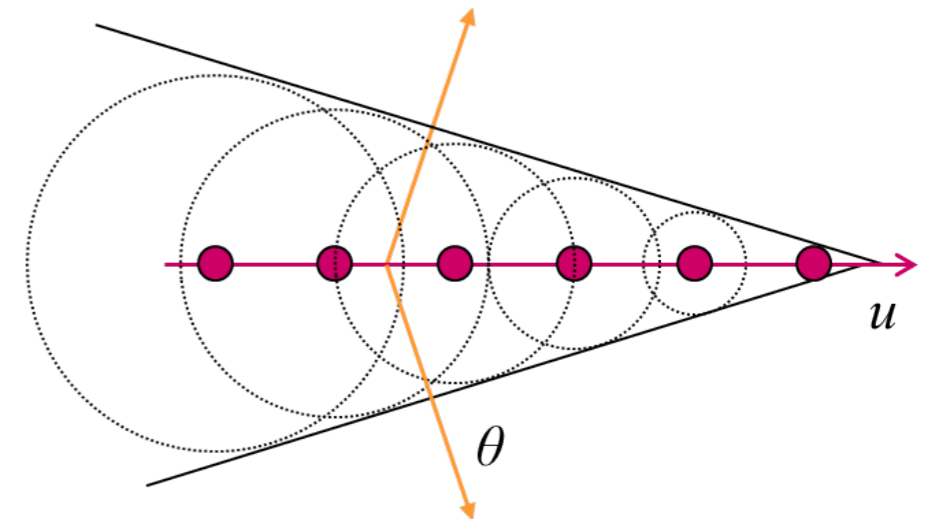
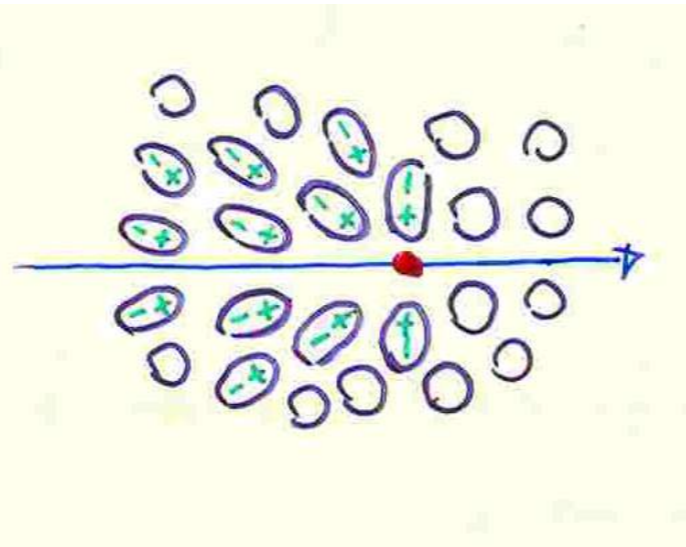
# Luce Cherenkov

Ricostruita la traiettoria, possiamo **identificare** le particelle cariche in base alla loro emissione di luce Cherenkov quando attraversano un mezzo con indice di rifrazione  $n$

$$v < c/n$$



$$v > c/n$$

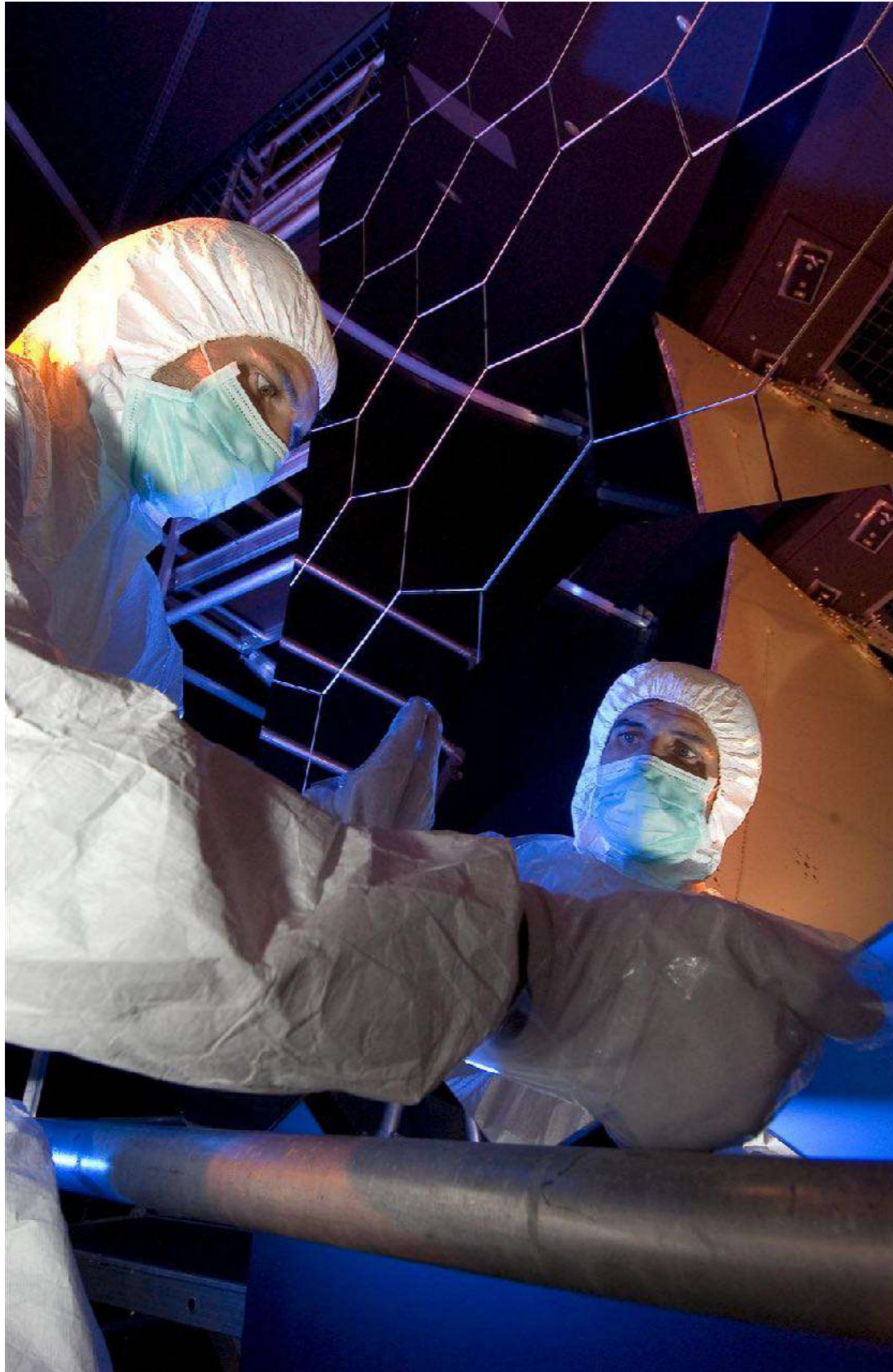


$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta}, \quad \beta = v/c$$

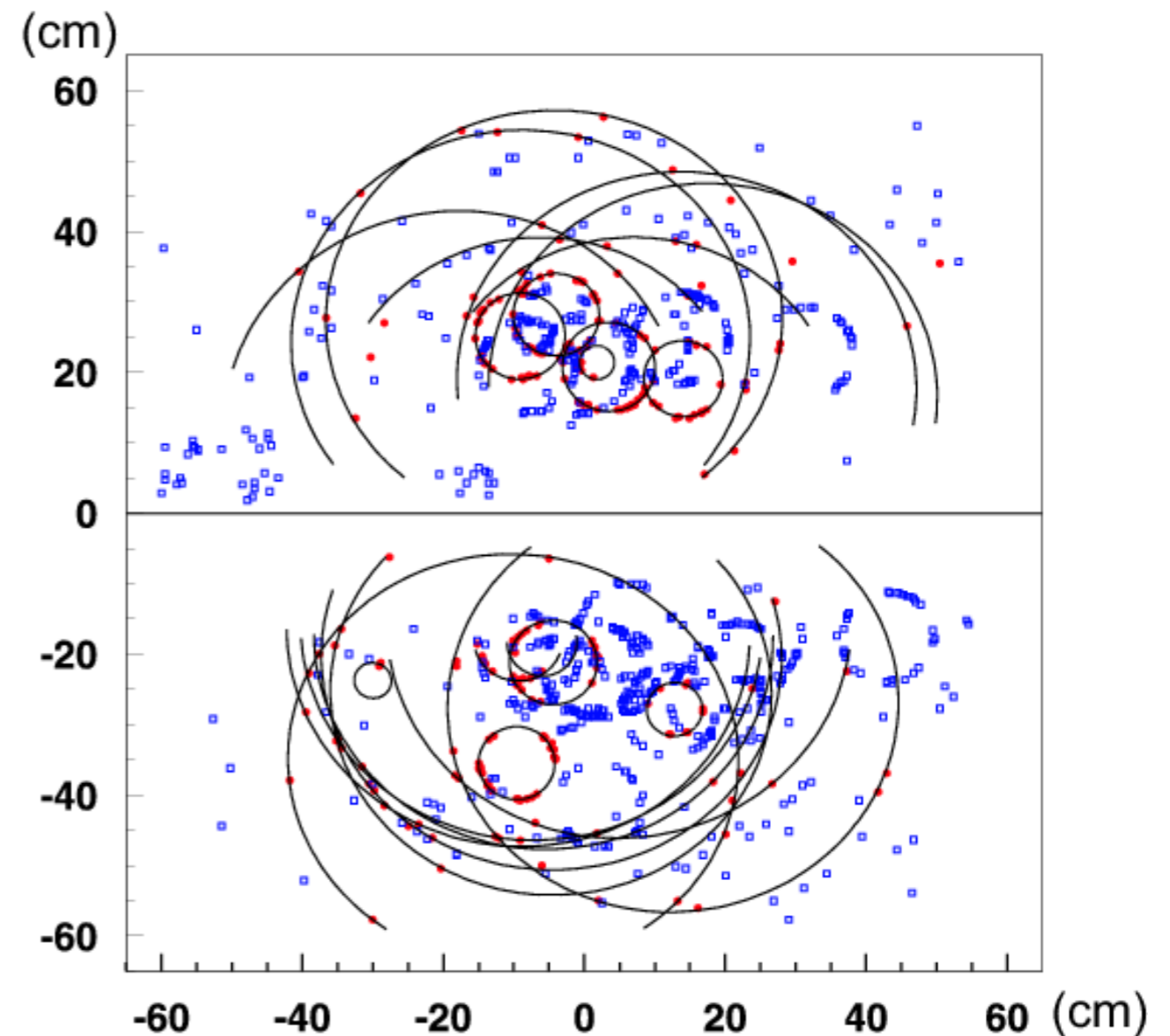
Noto l'impulso  $p = mv$  dal tracciamento, misurando  $v$  si ricava  $m$  ovvero il tipo di particella



# Ring Imaging Cherenkov Detector (RICH)

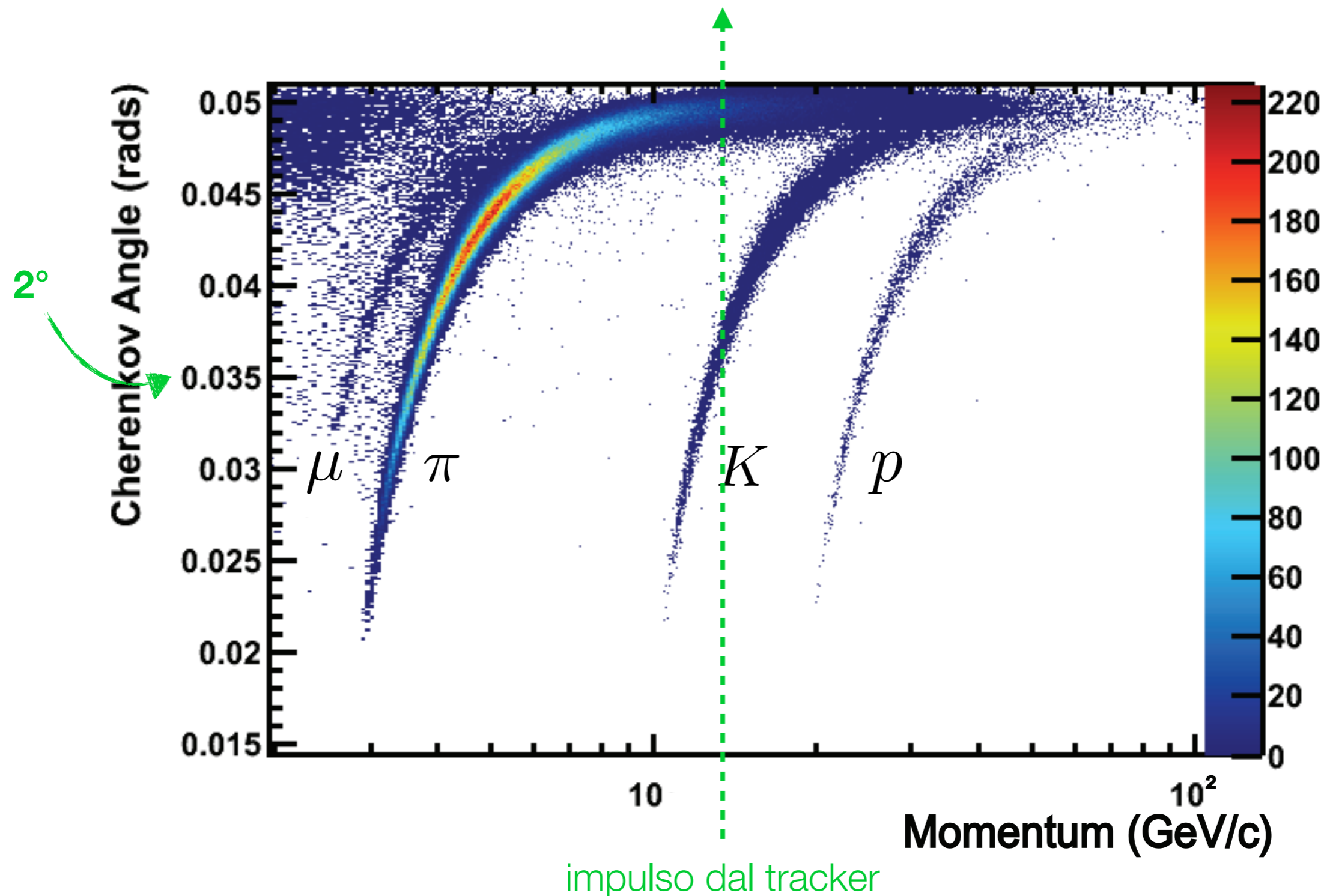


La luce Cherenkov emessa in un gas si riflette sugli specchi e viene convertita in segnale elettrico da fotomoltiplicatori (PMT)



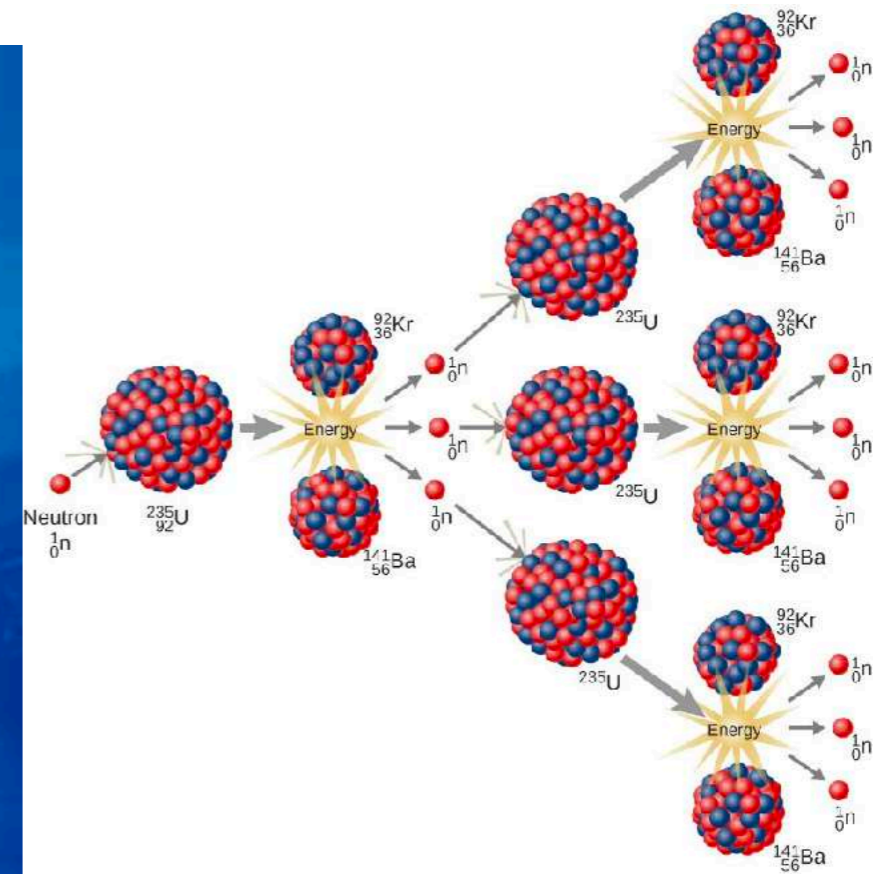
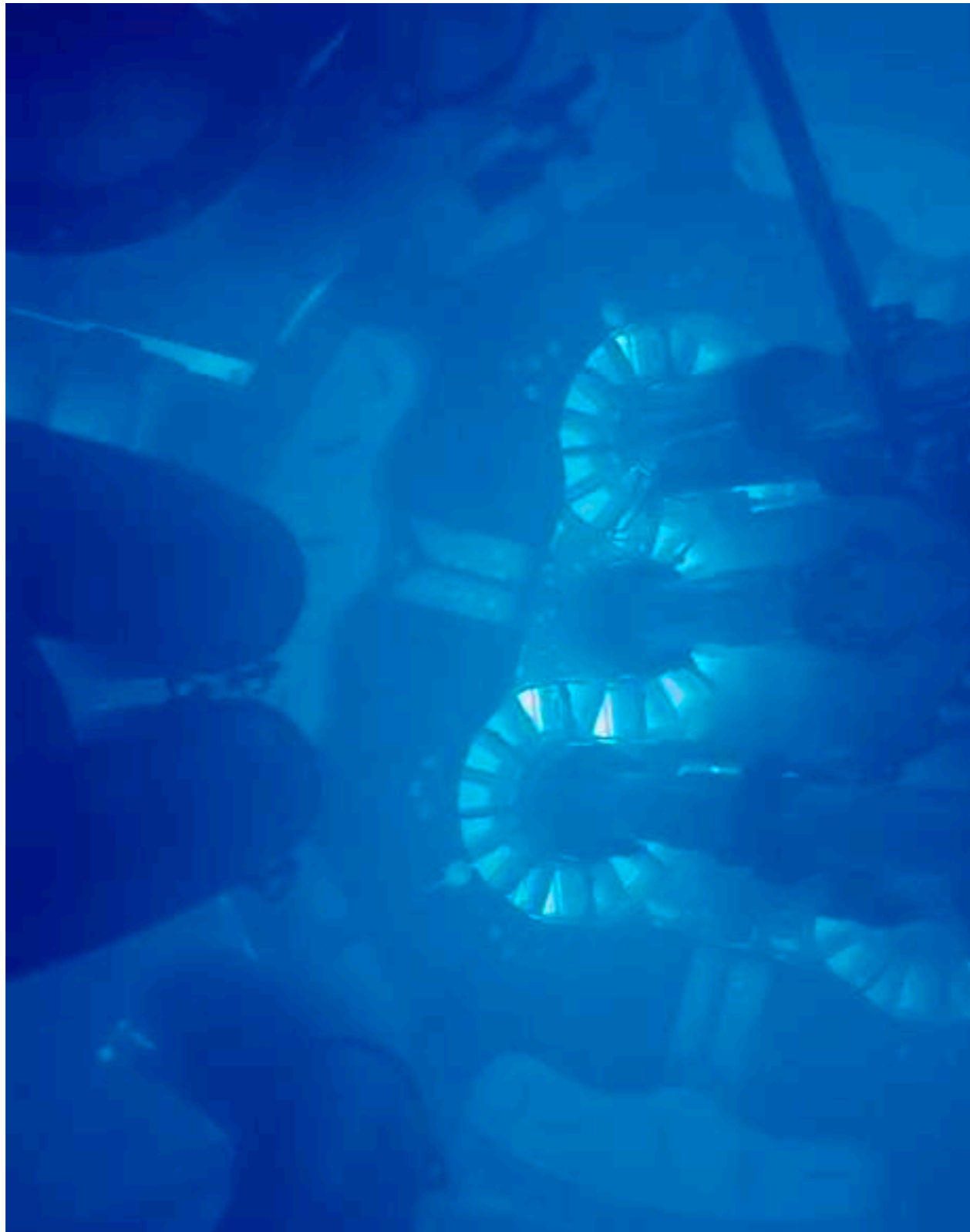
# Performance del RICH

$\pi, K, p$  diverse popolano regioni ben distinte



# Luce Cherenkov a occhio nudo

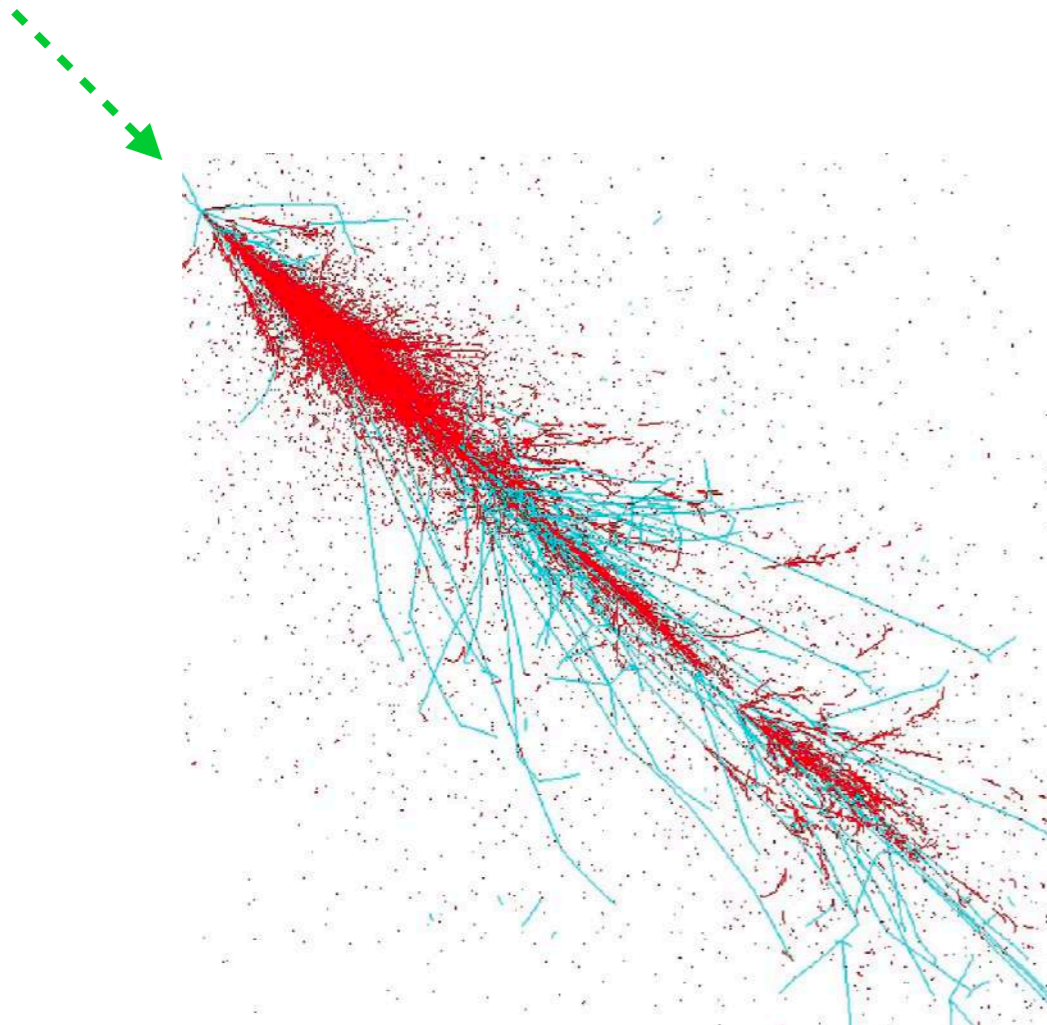
elettroni/positroni emessi dai frammenti nucleari nell'acqua di un reattore



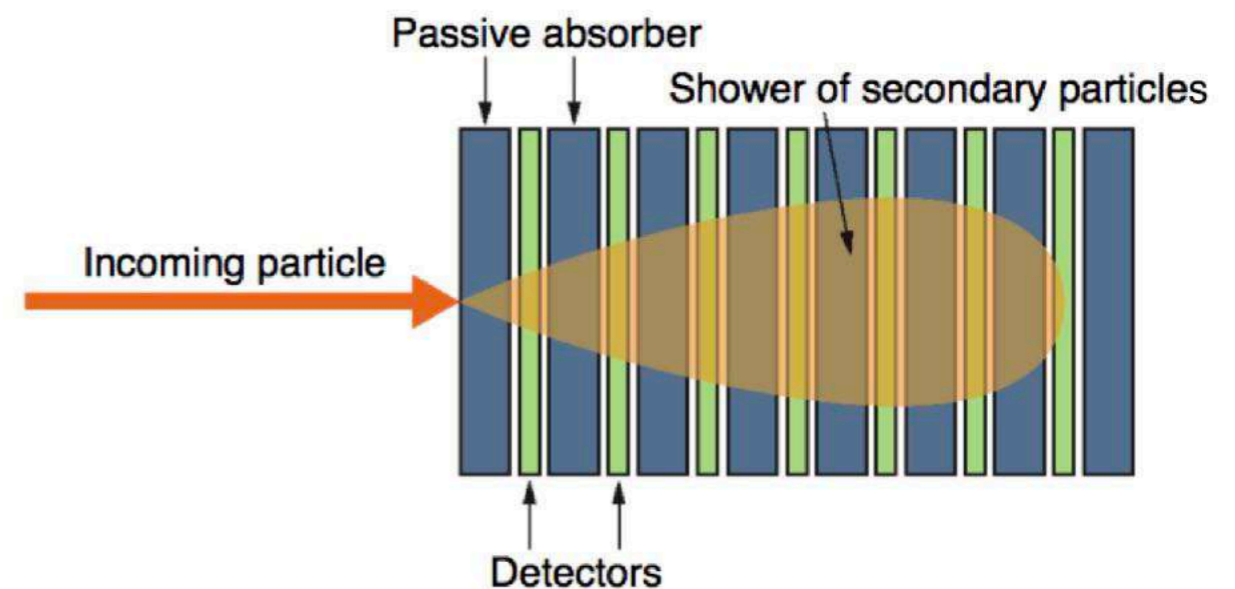
[https://en.wikipedia.org/wiki/Advanced\\_Test\\_Reactor](https://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_Test_Reactor)

# I calorimetri: misura dell'energia

- Interagendo con la materia, le particelle di alta energia generano uno **sciame** di particelle secondarie
- Queste eccitano il materiale attivo del calorimetro, emettendo luce di scintillazione/Cherenkov che viene rivelata tramite fotomoltiplicatori
- Questo processo è sfruttato per l'identificazione di  $e^-$ ,  $\gamma$  e particelle neutre

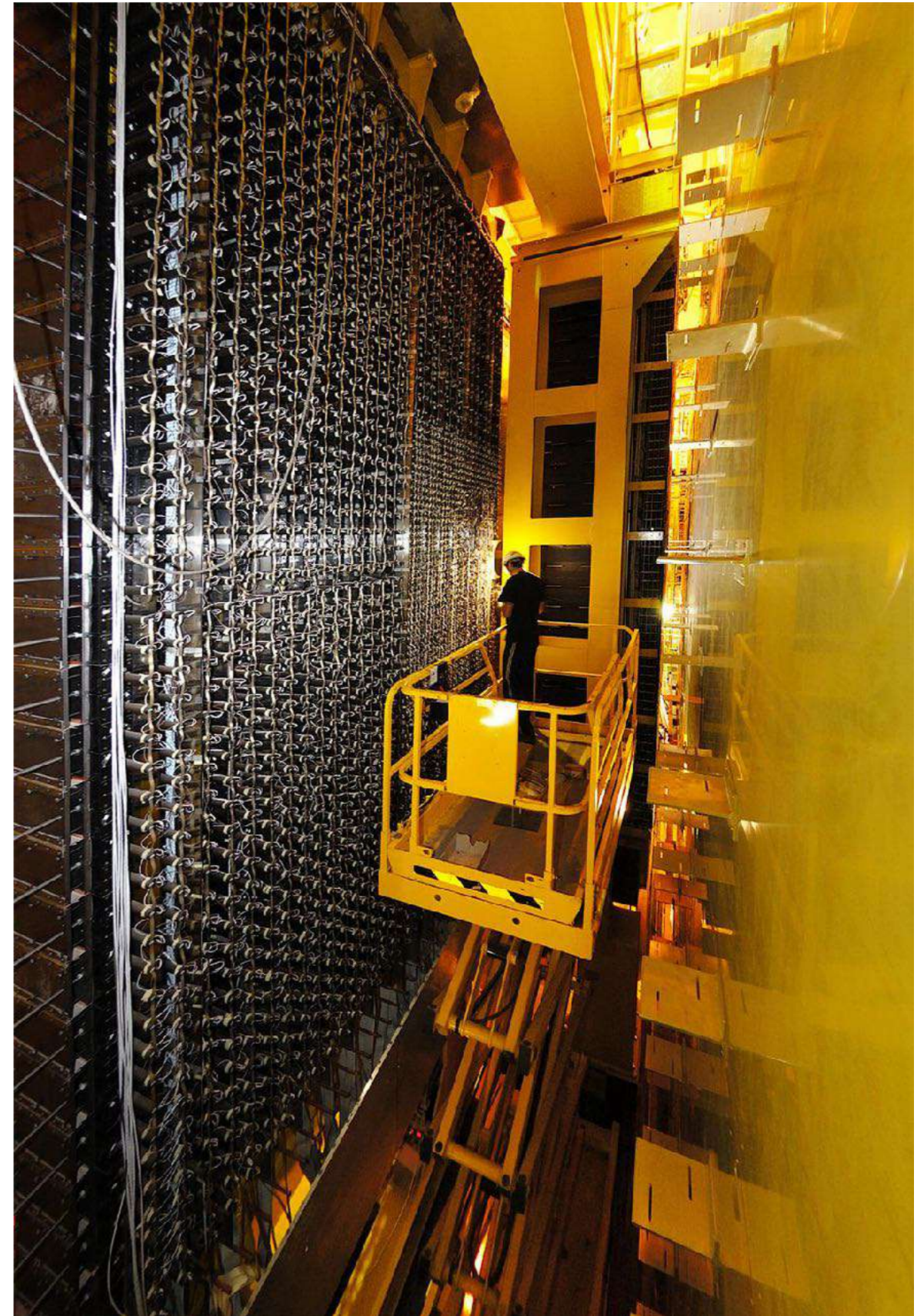
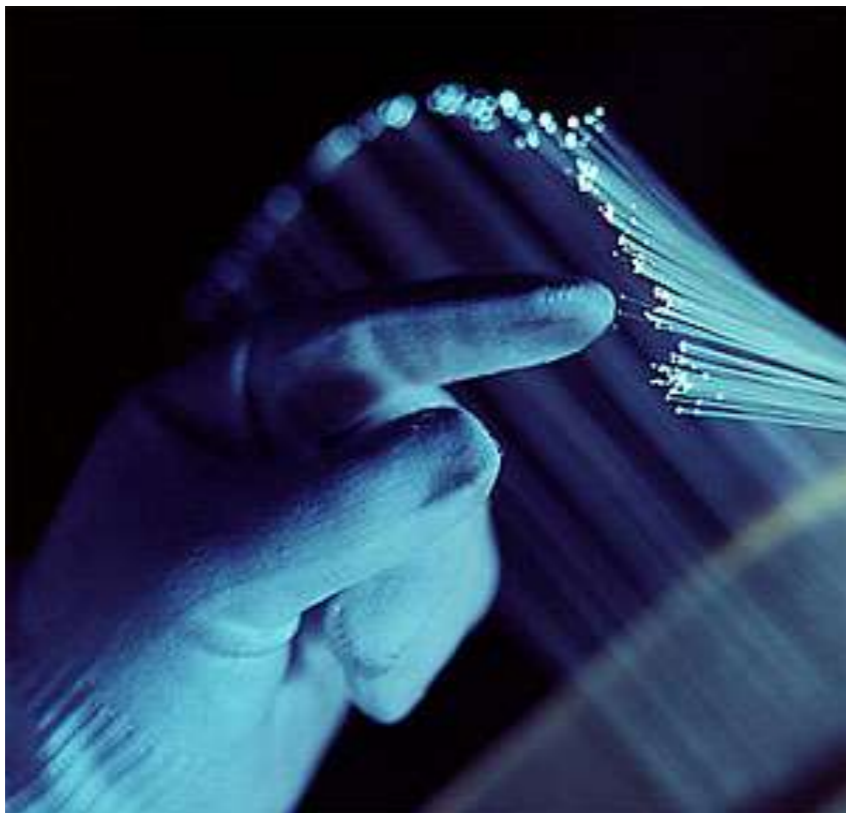


Materiale attivo + passivo: calorimetro a campionamento



# I calorimetri di LHCb

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

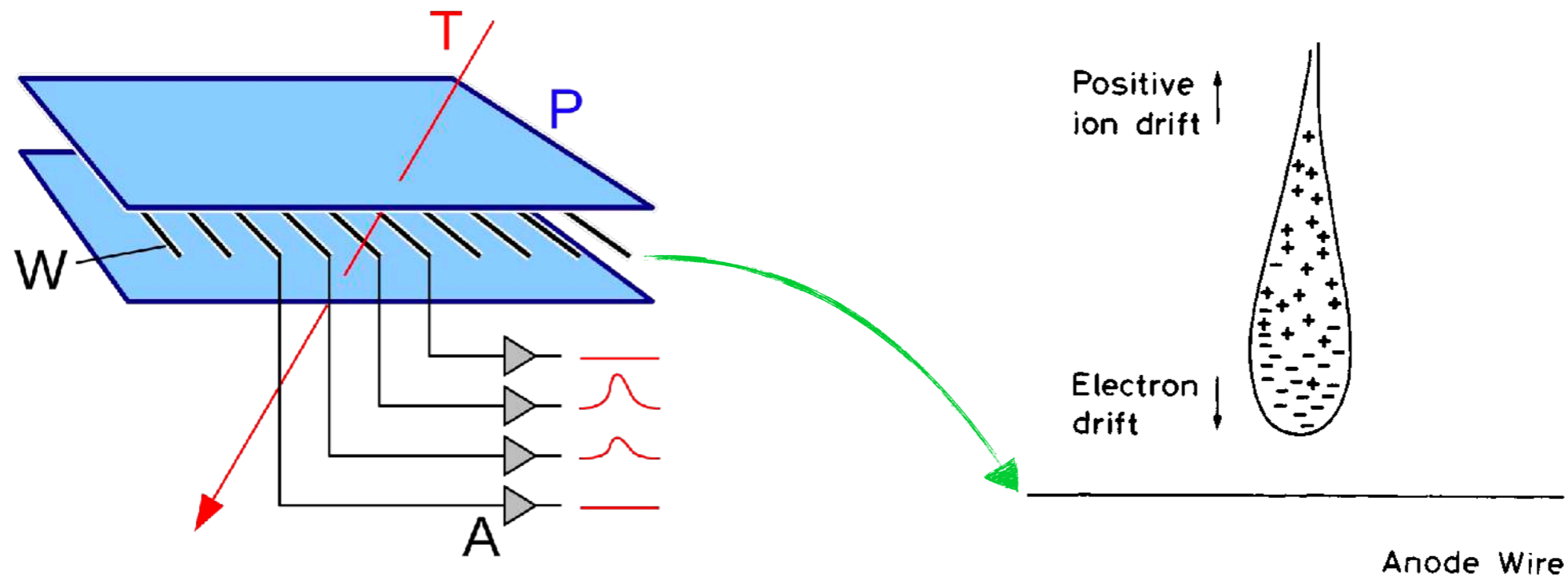


# Il rivelatore di muoni

I muoni attraversano tutto LHCb e vengono identificati, con camere a fili, in base al loro potere di attraversare dei muri in ferro



# Le camere a fili



2 piani racchiudono fili conduttori che rivelano la ionizzazione prodotta dai muoni in un gas

1500 camere MWPC (435 m<sup>2</sup>),  
molte costruite a Frascati!



# Allineamento e calibrazione

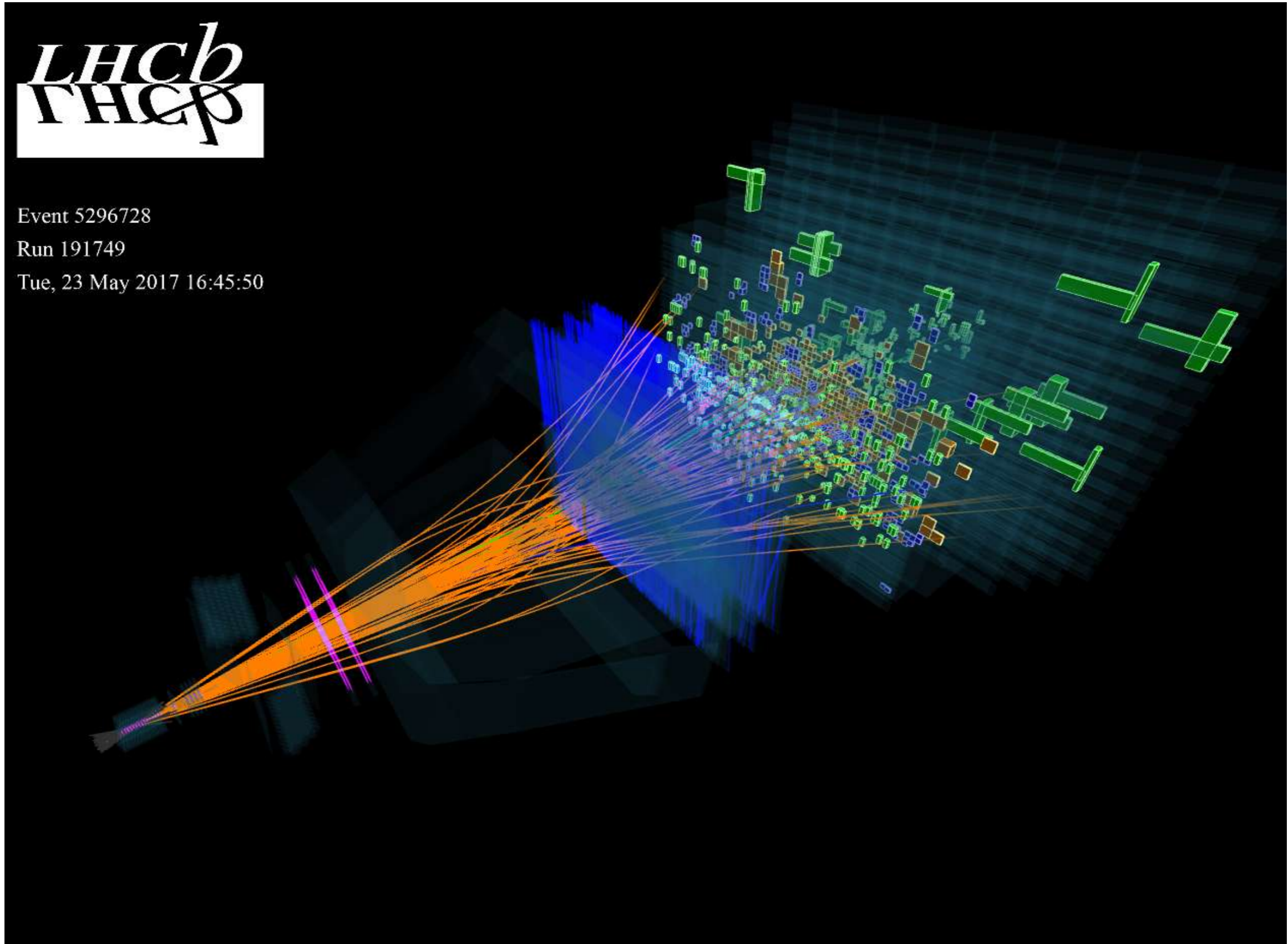
---

Per ottenere la precisione estrema che ci serve per studiare CP effettuiamo un preciso allineamento e la calibrazione di tutti i rivelatori.

I sensori del VELO ad esempio devono essere allineati entro pochi micron ( $10^{-6}$  m)!



# Ecco il risultato: event display



<http://clangenb.web.cern.ch/clangenb/>

# Acquisizione dati a LHCb: il trigger

40 Tb di dati al secondo!



Selezione eventi interessanti: Trigger



80 Gb al secondo



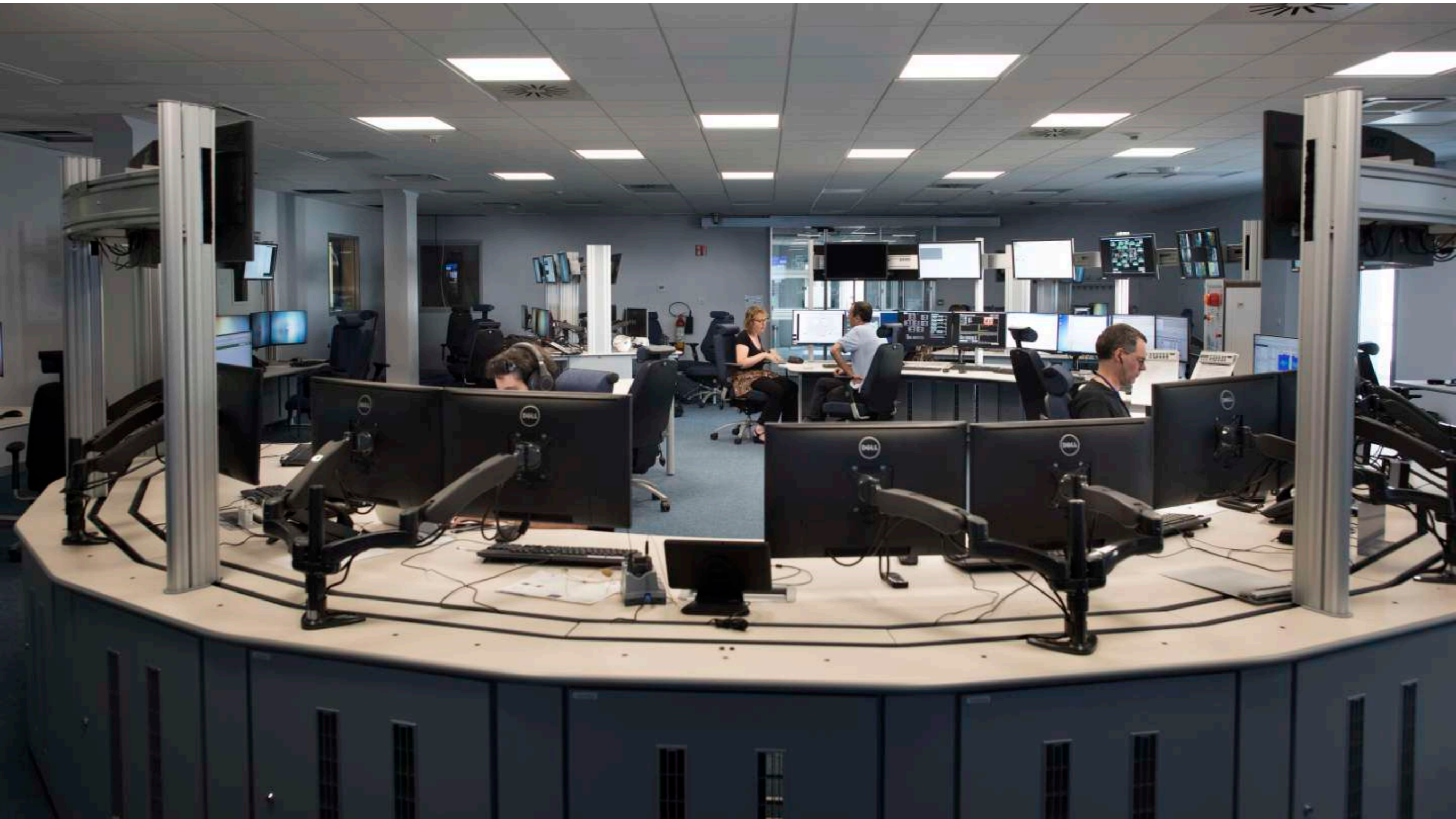
Gestito da una server farm, dal 2022 con GPU:



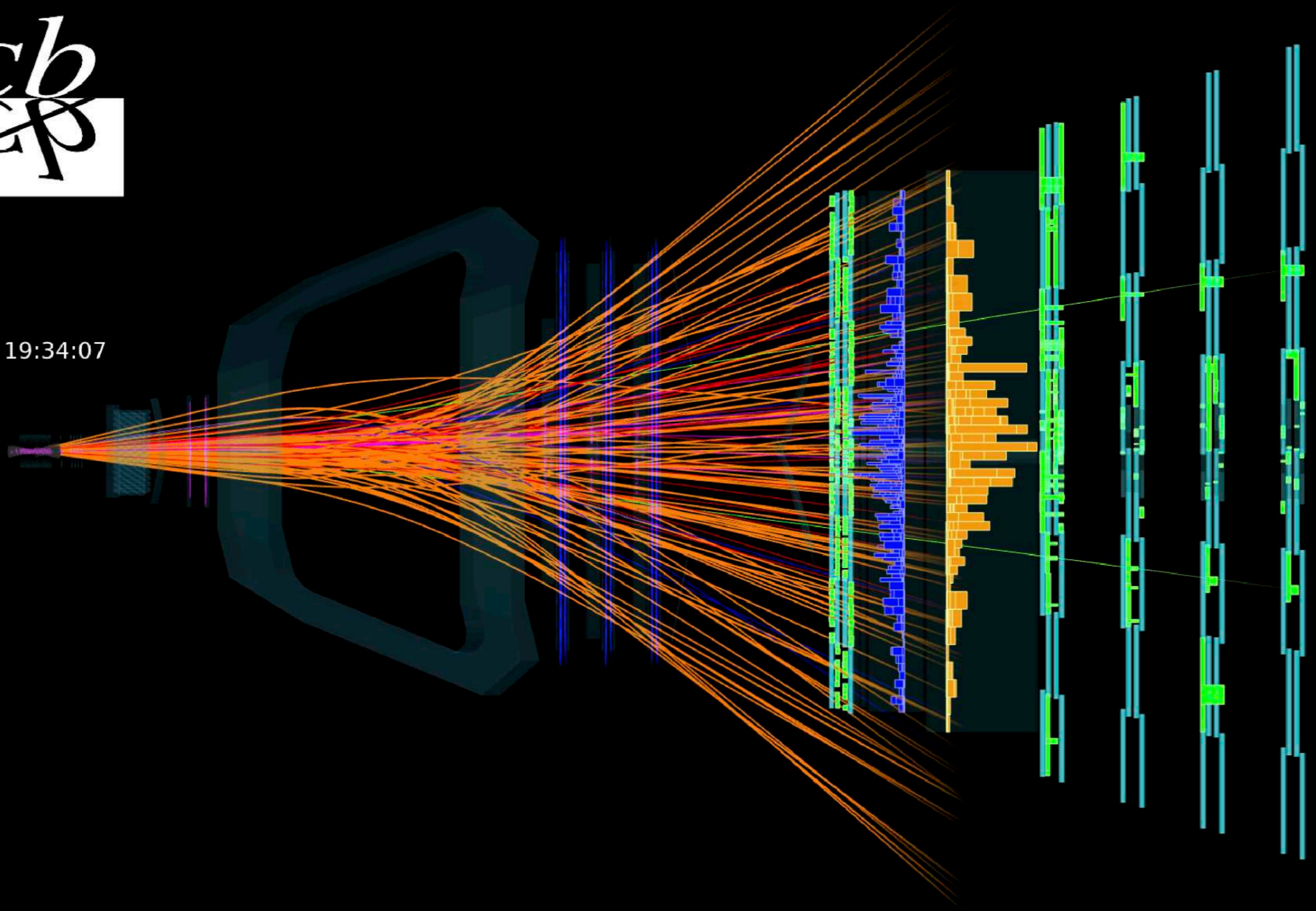
... but can it run Crysis?

# La sala di controllo

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



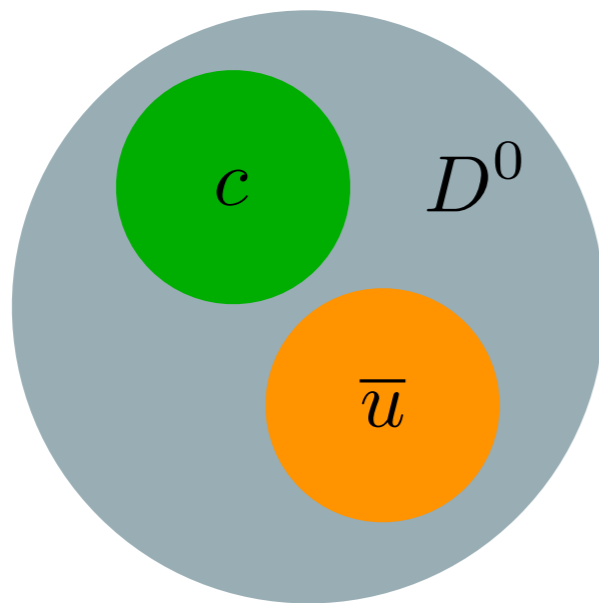
Event 924938  
Run 168926  
Tue, 01 Dec 2015 19:34:07



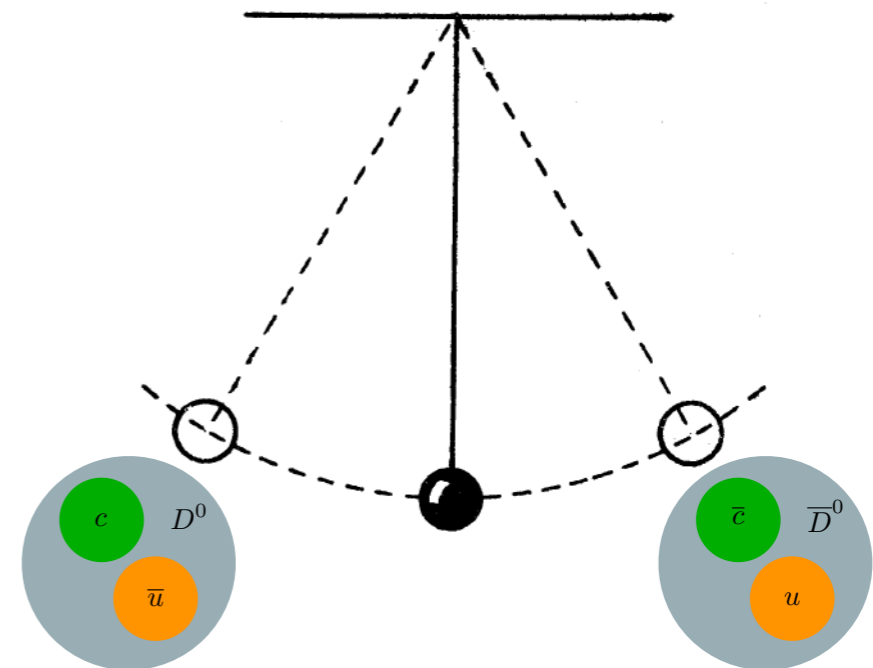
### 3. Qualche risultato recente

# Violazione CP nei mesoni $D^0$

Il  $D^0$  è un mesone costituito da un quark charm e un quark anti-up



Durante la sua breve vita (0.4 ps) oscilla tra materia e antimateria



**2019:** La probabilità di decadimento di  $D^0$  e  $\bar{D}^0$  è diversa: CP è violata!

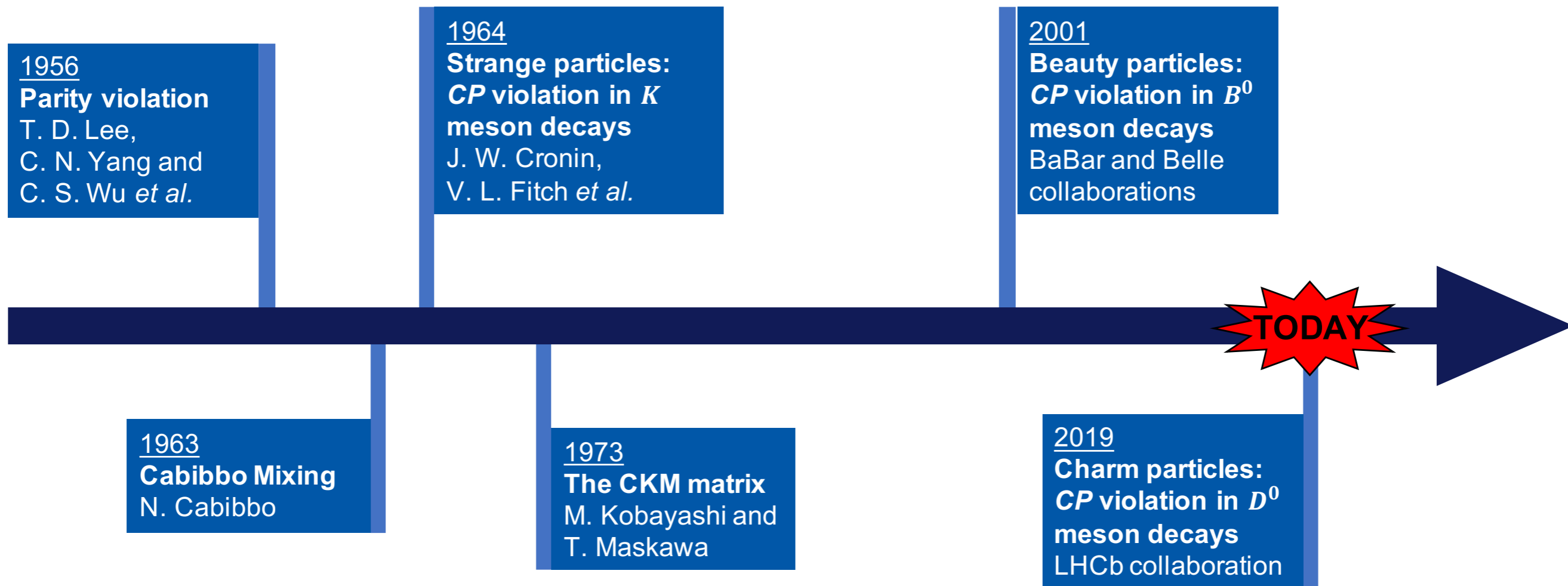
$$\Delta A_{CP} = (-15.4 \pm 2.9) \times 10^{-4}$$

$$\left| \text{Diagram of } D^0 \text{ decaying to } f \right|^2 \neq \left| \text{Diagram of } \bar{D}^0 \text{ decaying to } \bar{f} \right|^2$$

The diagram shows two decay processes. On the left, a blue line labeled  $D^0$  enters a red vertex, from which two red lines labeled  $f$  emerge. On the right, a green line labeled  $\bar{D}^0$  enters an orange vertex, from which two orange lines labeled  $\bar{f}$  emerge. The two diagrams are separated by a not-equal sign, and the entire expression is enclosed in large vertical bars with a superscript 2.

# Violazione CP nei mesoni $D^0$

Una scoperta fondamentale di LHCb per risolvere l'enigma dell'antimateria!



# Il modello a quark

I quark si uniscono a **coppie (mesoni, es: pione, kaone)** oppure in **triplette (barioni, es: protone e neutrone)**

Ma nell'articolo di Gell-Mann che teorizza i quark come costituenti della materia, non si escludono **combinazioni con più di 3 quark**

Volume 8, number 3

PHYSICS LETTERS

1 February 1964

## A SCHEMATIC MODEL OF BARYONS AND MESONS \*

M. GELL-MANN

*California Institute of Technology, Pasadena, California*

Received 4 January 1964

If we assume that the strong interactions of baryons and mesons are correctly described in terms of the broken "eightfold way" <sup>1-3</sup>), we are tempted to look for some fundamental explanation of the situation. A highly promised approach is the purely dynamical "bootstrap" model for all the strongly interacting particles within which one may try to derive isotopic spin and strangeness conservation and broken eightfold symmetry from self-consistency alone <sup>4</sup>). Of course, with only strong interactions, the orientation of the asymmetry in the unitary space cannot be specified; one hopes that in some way the selection of specific components of the F-spin by electromagnetism and the weak interactions determines the choice of isotopic spin and hypercharge directions.

ber  $n_t - n_{\bar{t}}$  would be zero for all known baryons and mesons. The most interesting example of such a model is one in which the triplet has spin  $\frac{1}{2}$  and  $z = -1$ , so that the four particles  $d^-$ ,  $s^-$ ,  $u^0$  and  $b^0$  exhibit a parallel with the leptons.

A simpler and more elegant scheme can be constructed if we allow non-integral values for the charges. We can dispense entirely with the basic baryon  $b$  if we assign to the triplet  $t$  the following properties: spin  $\frac{1}{2}$ ,  $z = -\frac{1}{3}$ , and baryon number  $\frac{1}{3}$ . We then refer to the members  $u^{\frac{2}{3}}$ ,  $d^{-\frac{1}{3}}$ , and  $s^{-\frac{1}{3}}$  of the triplet as "quarks" <sup>6</sup>)  $q$  and the members of the anti-triplet as anti-quarks  $\bar{q}$ . Baryons can now be constructed from quarks by using the combinations  $(qqq)$ ,  $(qqq\bar{q})$ , etc., while mesons are made out of  $(q\bar{q})$ ,  $(q\bar{q}\bar{q})$ , etc. It is assuming that the lowest

# Pentaquark e tetraquark

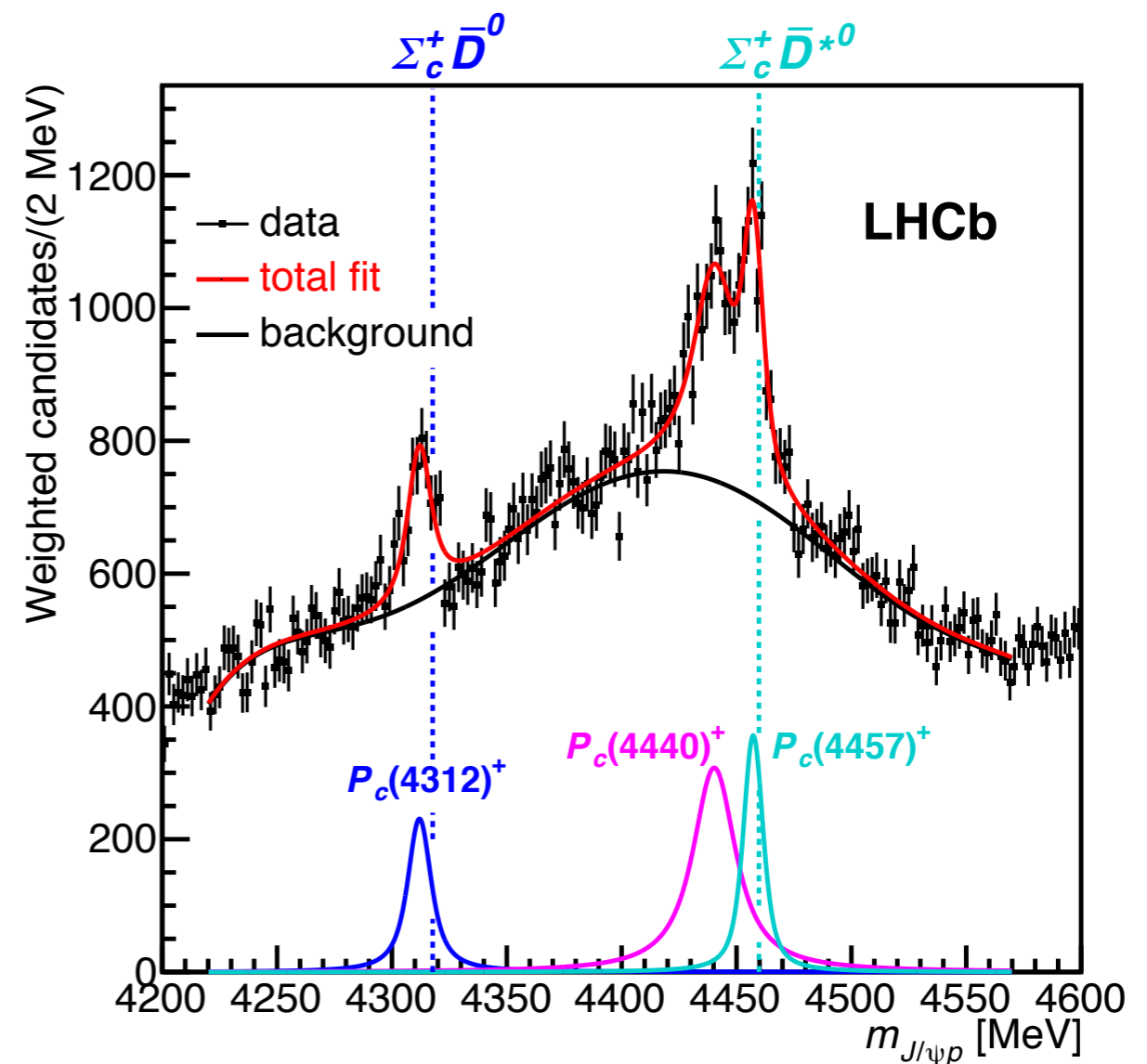
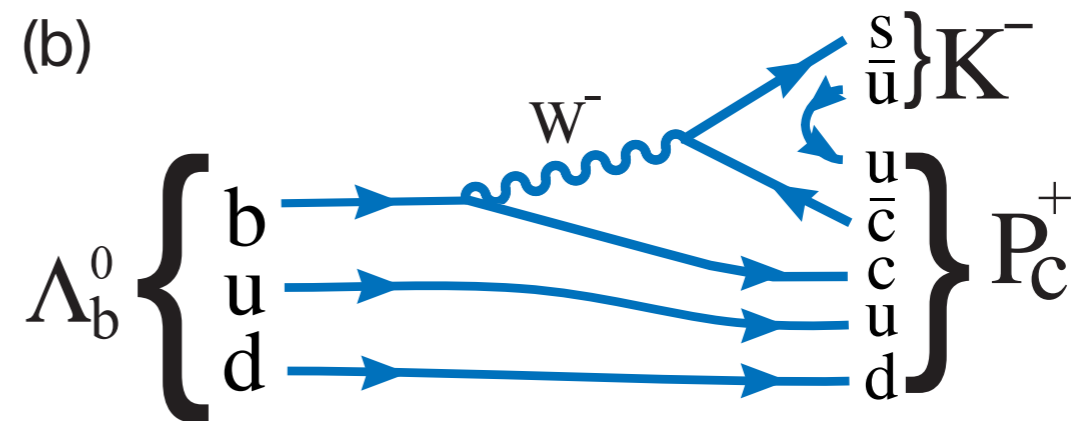
**2015:** LHCb scopre i pentaquark!

**2019:** un altro pentaquark nascosto!

**2021:** scoperta dello stato  $T_{cc}^+$  ( $cc\bar{u}\bar{d}$ )

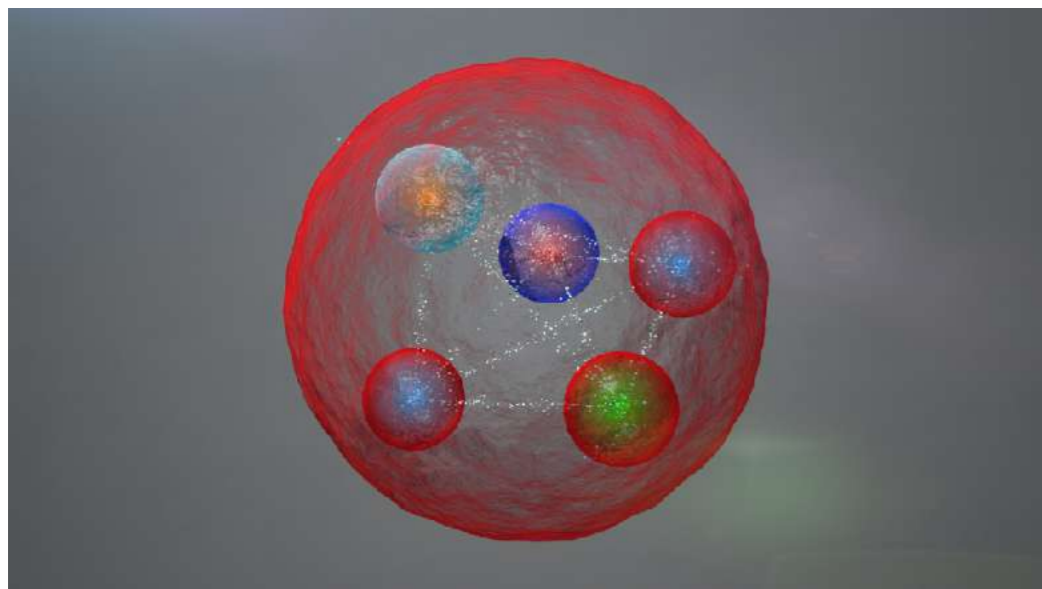
...scoperta di molti stati "esotici" mai osservati!

<https://www.koppenburg.ch/particles.html>

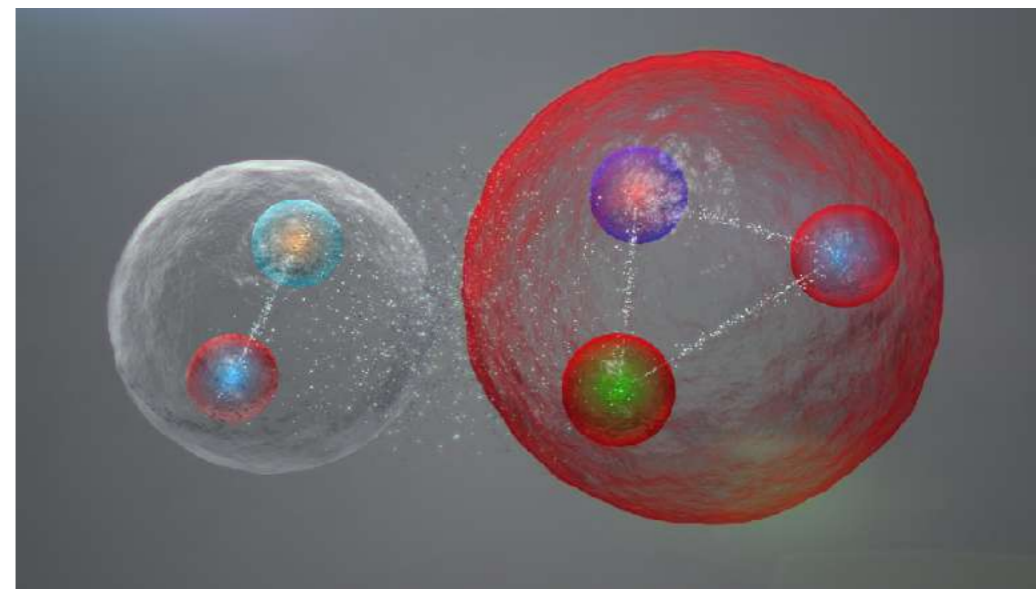


# Come si legano i quark?

Queste nuove scoperte sono cruciali per capire la natura dell'**interazione forte** che tiene insieme i quark



5 quark fortemente legati?



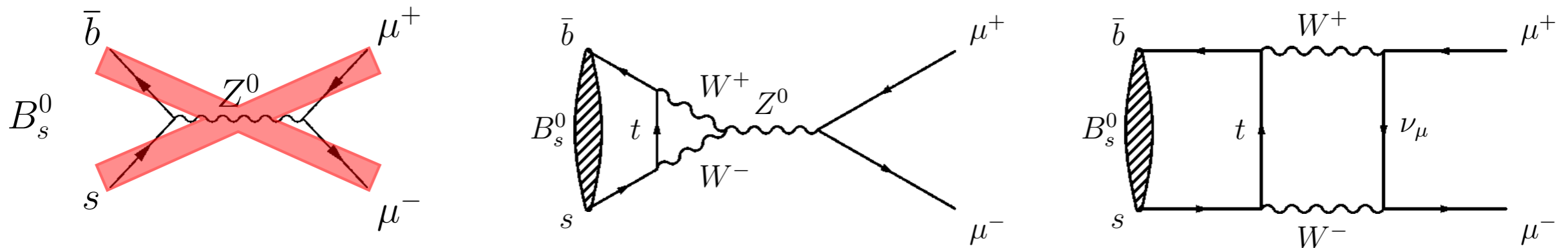
Una “molecola” mesone + barione?

Altre ricerche e una quantità maggiore di dati sono fondamentali per comprendere queste interazioni.

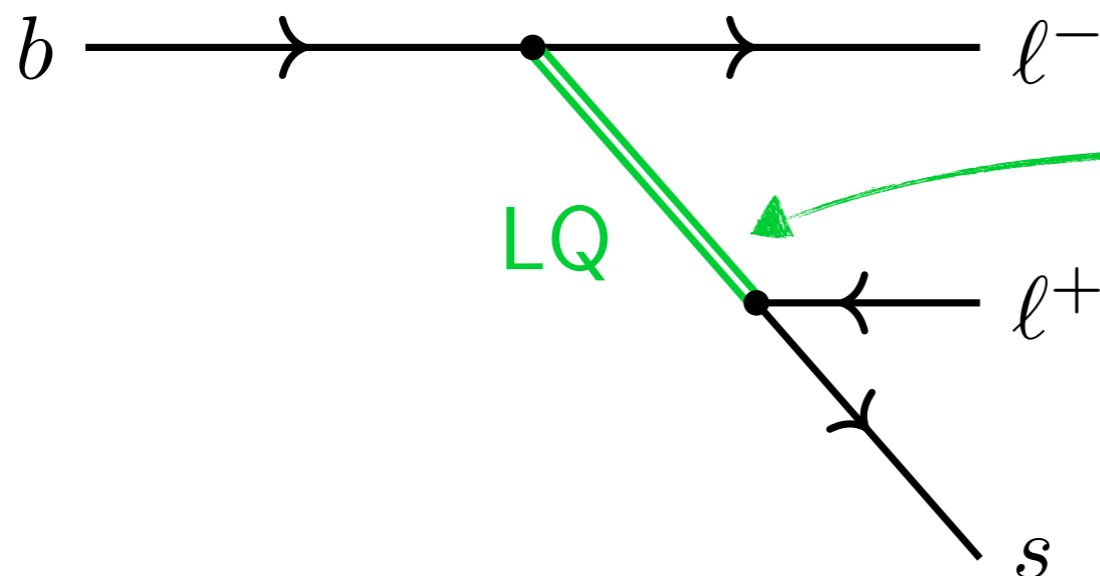
**Nota: >99% della nostra massa è data proprio dall'interazione forte!**

# Decadimenti rari

Il processo raro  $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  avviene circa 3 volte su 1 miliardo di decadimenti!



Rientra nella classe di decadimenti  $b \rightarrow sl^+l^-$  :

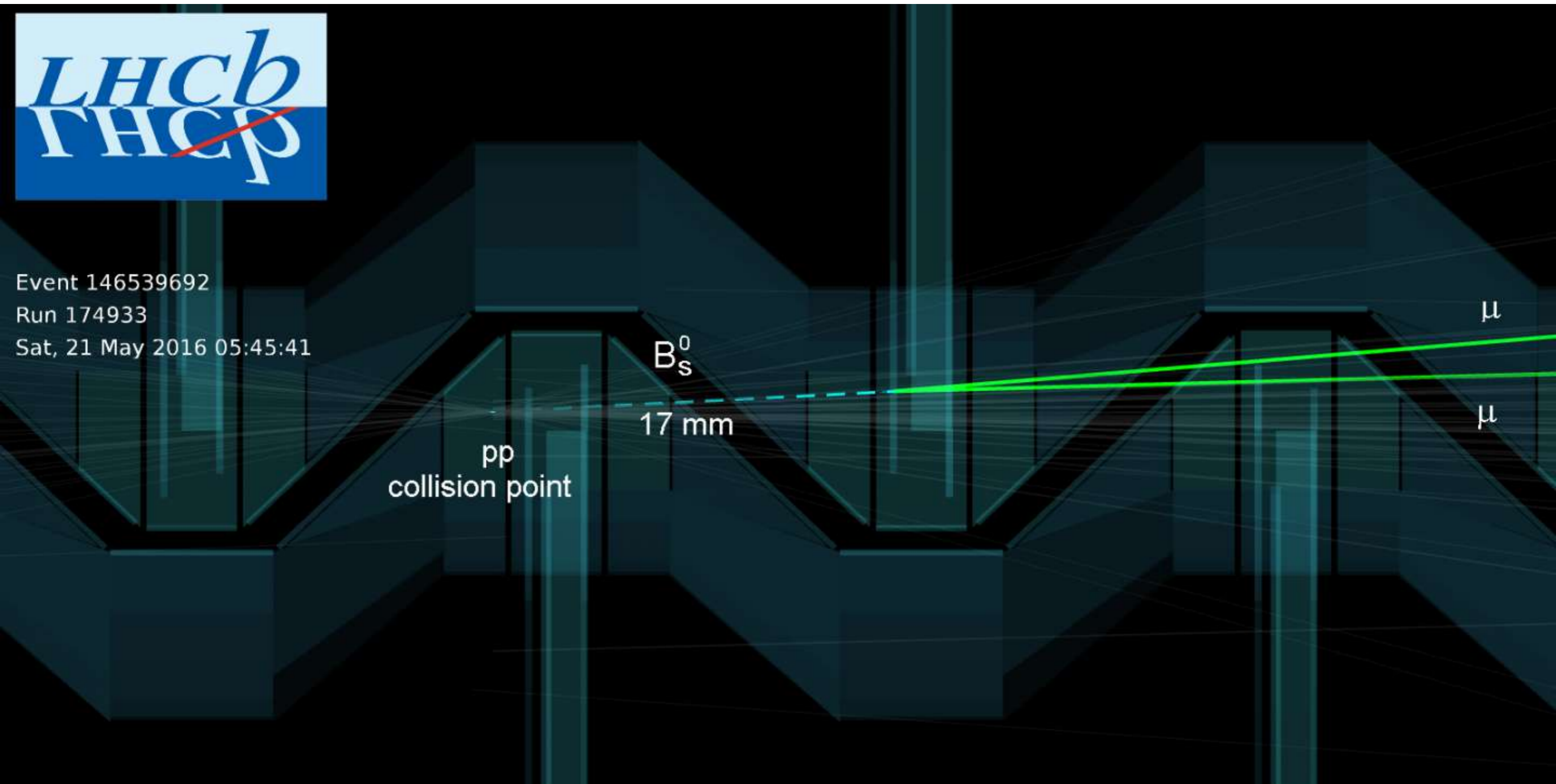


Il decadimento è alterato se ci sono  
Nuove particelle

→ ricerca indiretta di  
“Nuova Fisica”

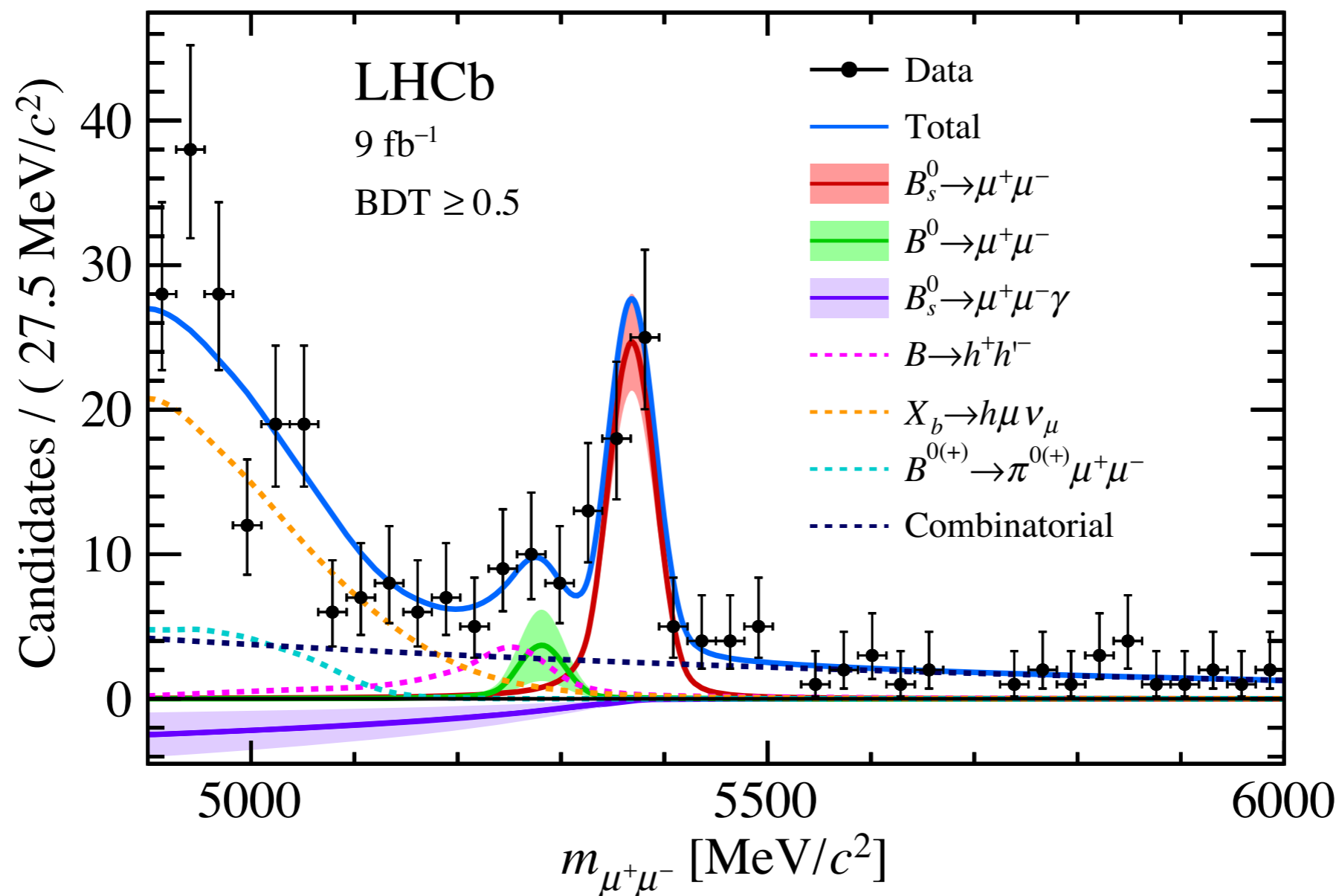
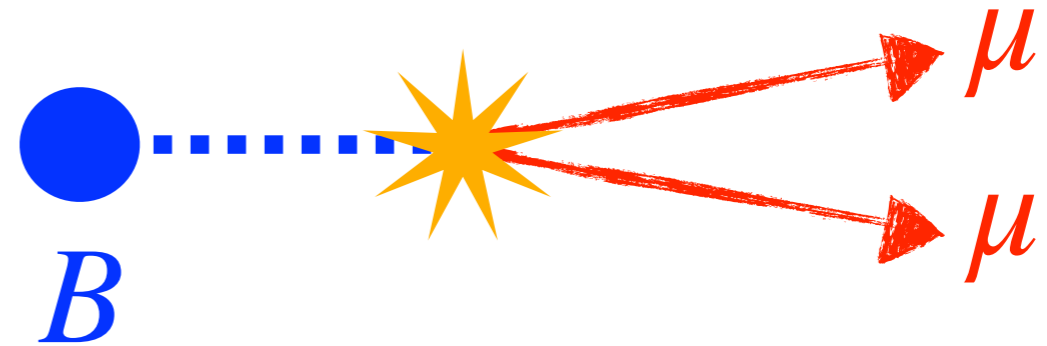
# $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ : event display

Cercato per 30 anni, osservato per la prima volta a LHCb + CMS nel 2014



# $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ : risultato

**2021:** Usando tutti i dati a disposizione, LHCb misura la probabilità di decadimento con precisione: il risultato è in accordo con il Modello Standard

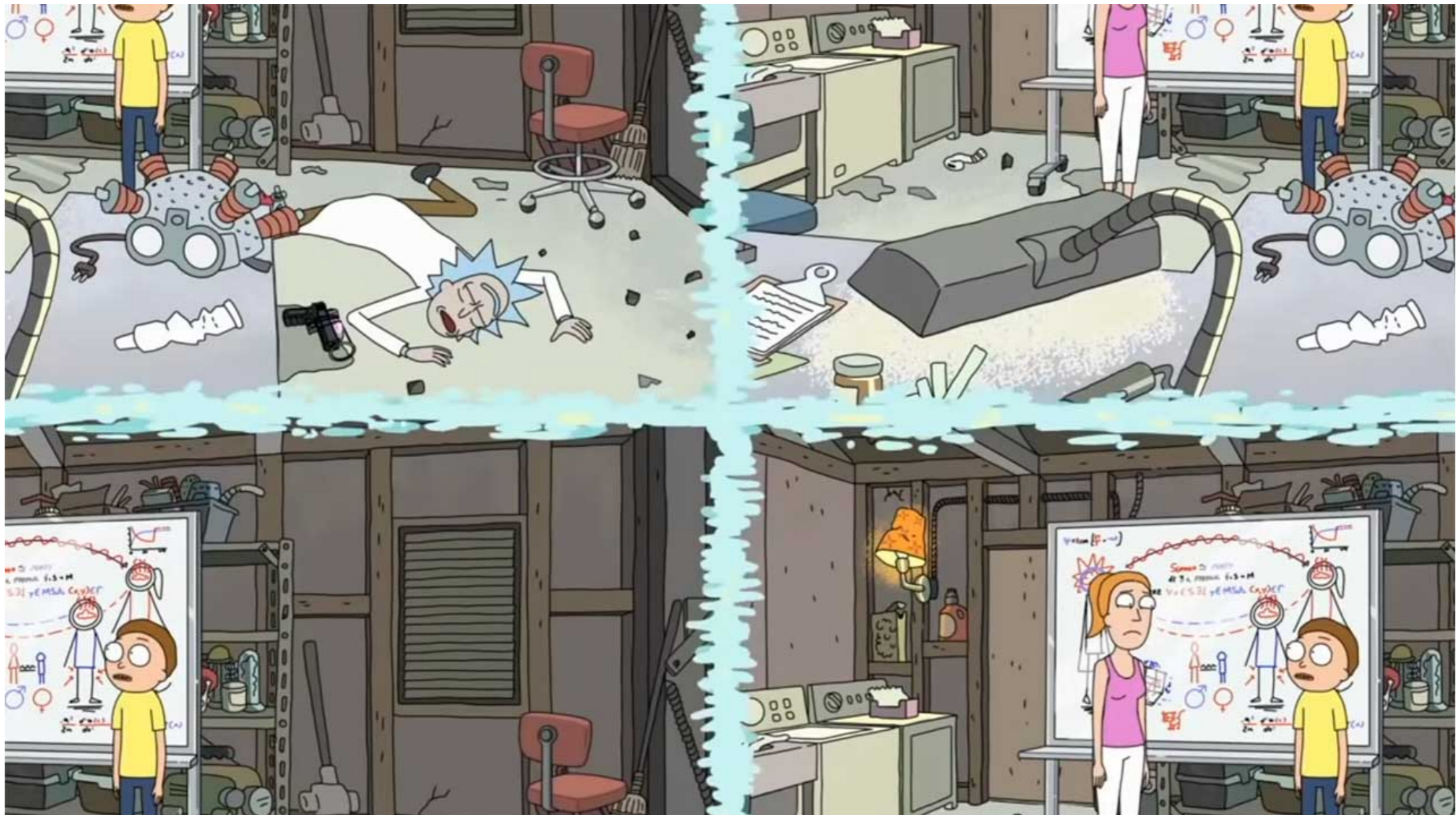


# Ricerca di Nuova Fisica

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!



Finora niente, ma continuiamo a cercare!



*That's all Folks!*