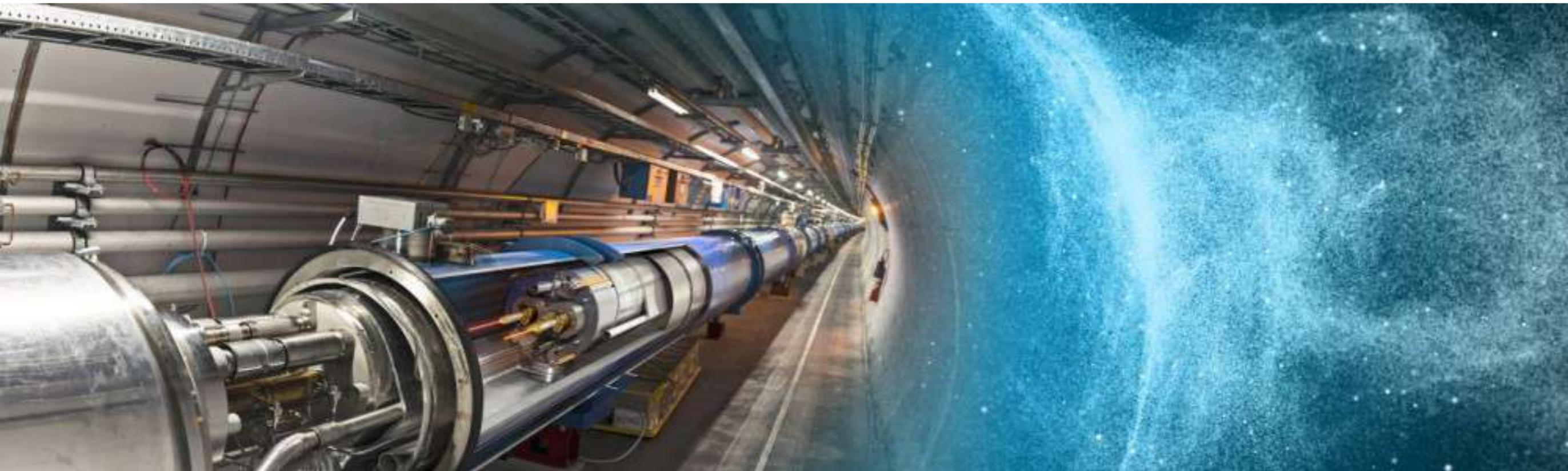




L'esperimento LHCb

Marco Santimaria / Incontri di Fisica 01/04/2022 - LNF



Indice

1. La fisica di LHCb
2. L'acceleratore LHC e il rivelatore LHCb
3. Qualche risultato recenti
4. Upgrade del rivelatore

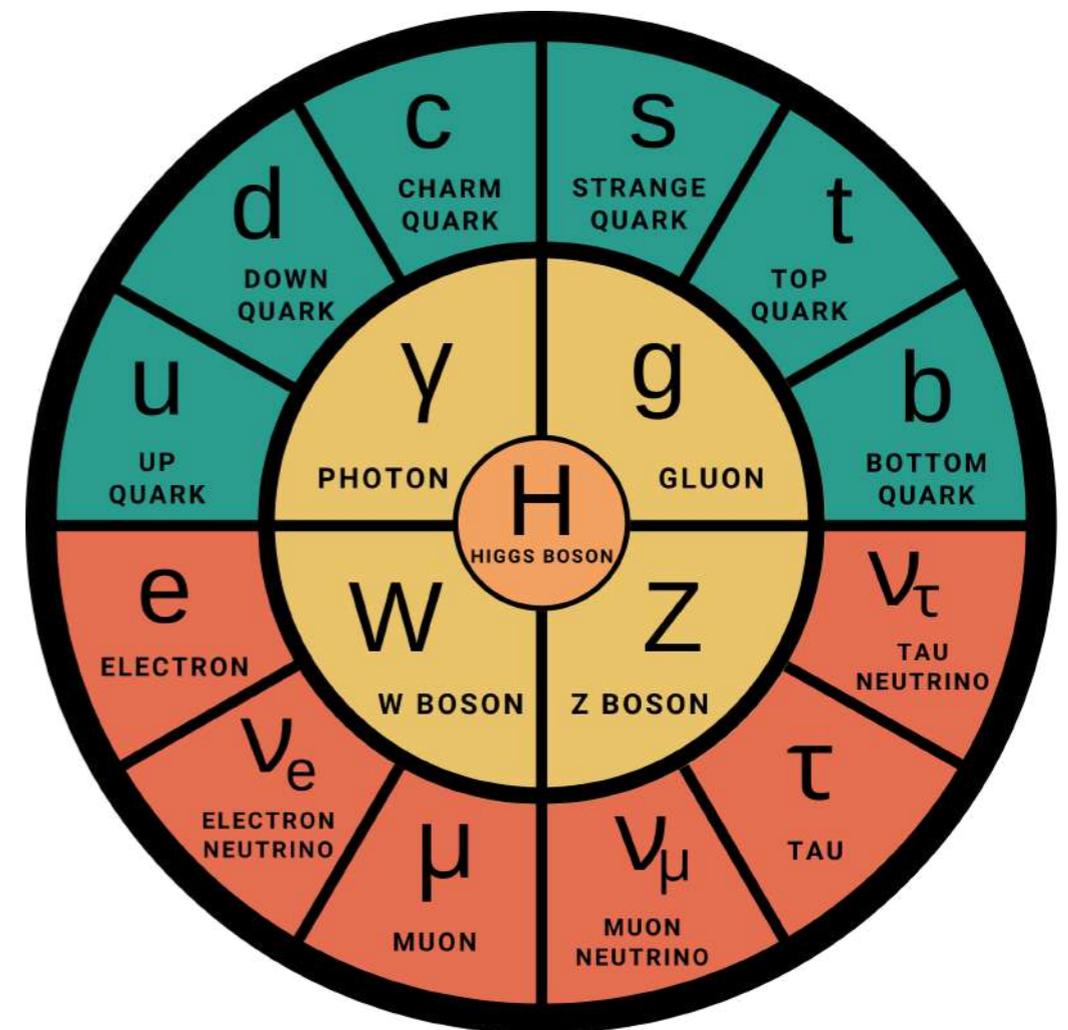
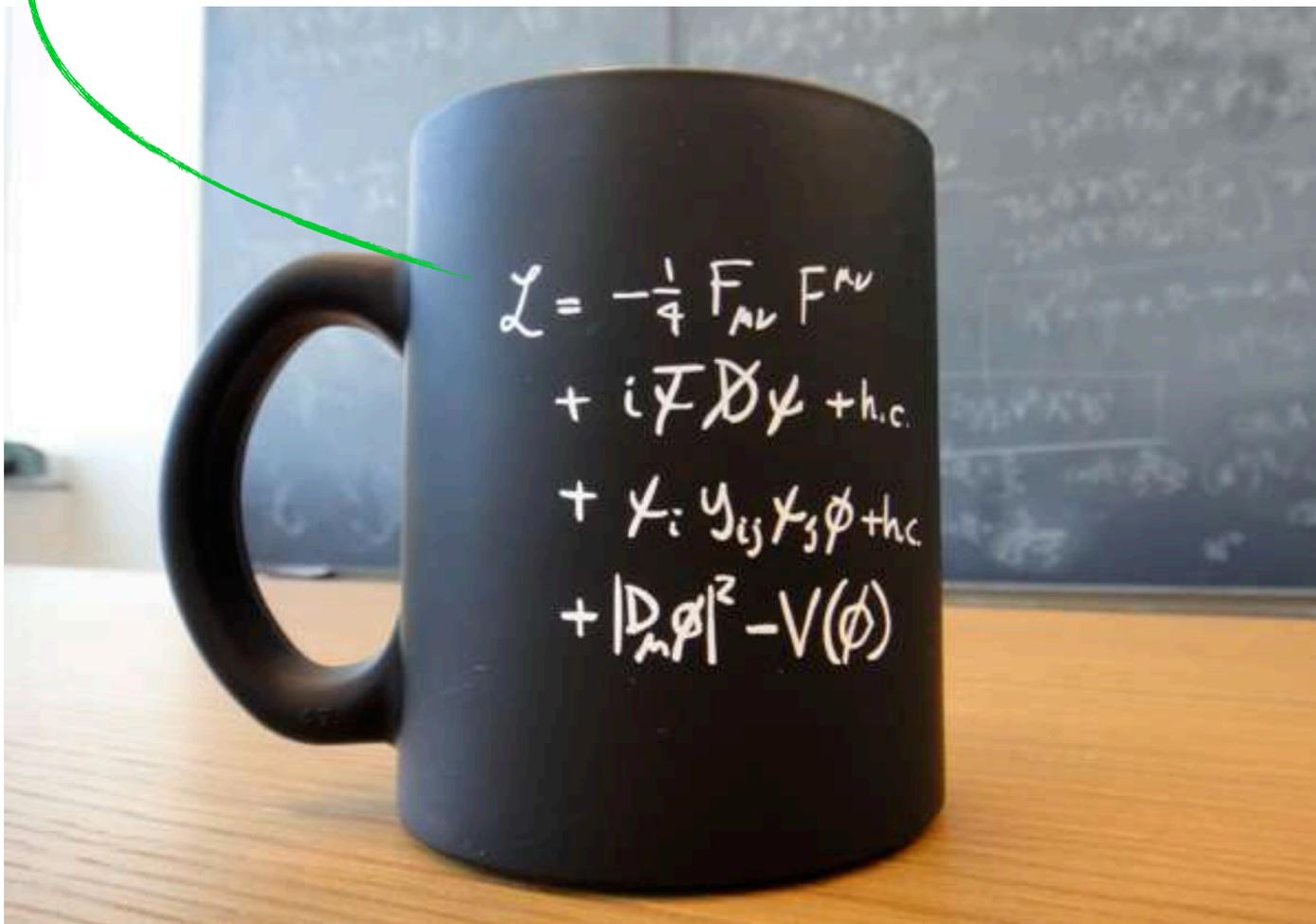


1. La fisica di LHCb

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)**

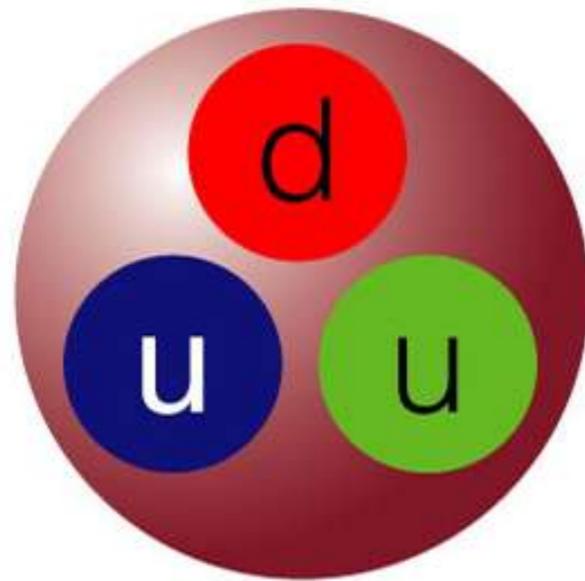


Una particella è **elementare** se si comporta come puntiforme durante una collisione, questa descrizione può quindi cambiare in futuro raggiungendo **energie maggiori**

Dove sono le particelle elementari?

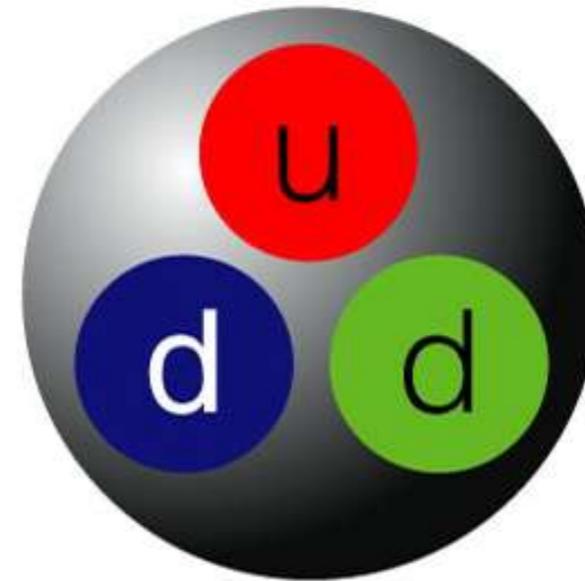
Gli atomi sono formati da **protoni** e **neutroni** (3 quark) + **elettroni** (elementari)

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



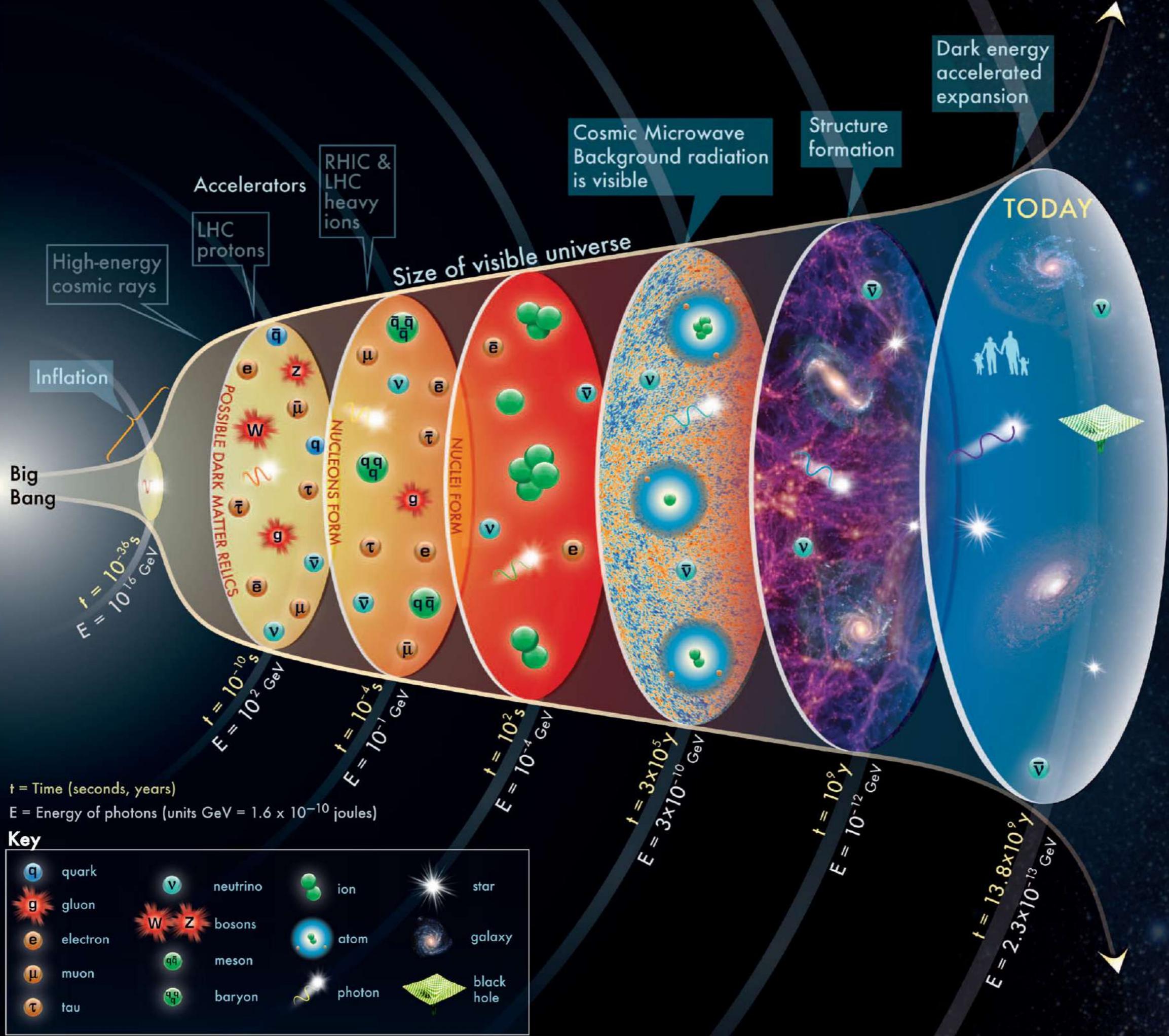
*Total charge:
 $+ 2/3 + 2/3 - 1/3 = +1$*

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, ovvero ad **alta energia**



t = Time (seconds, years)
 E = Energy of photons (units GeV = 1.6×10^{-10} joules)

Key

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

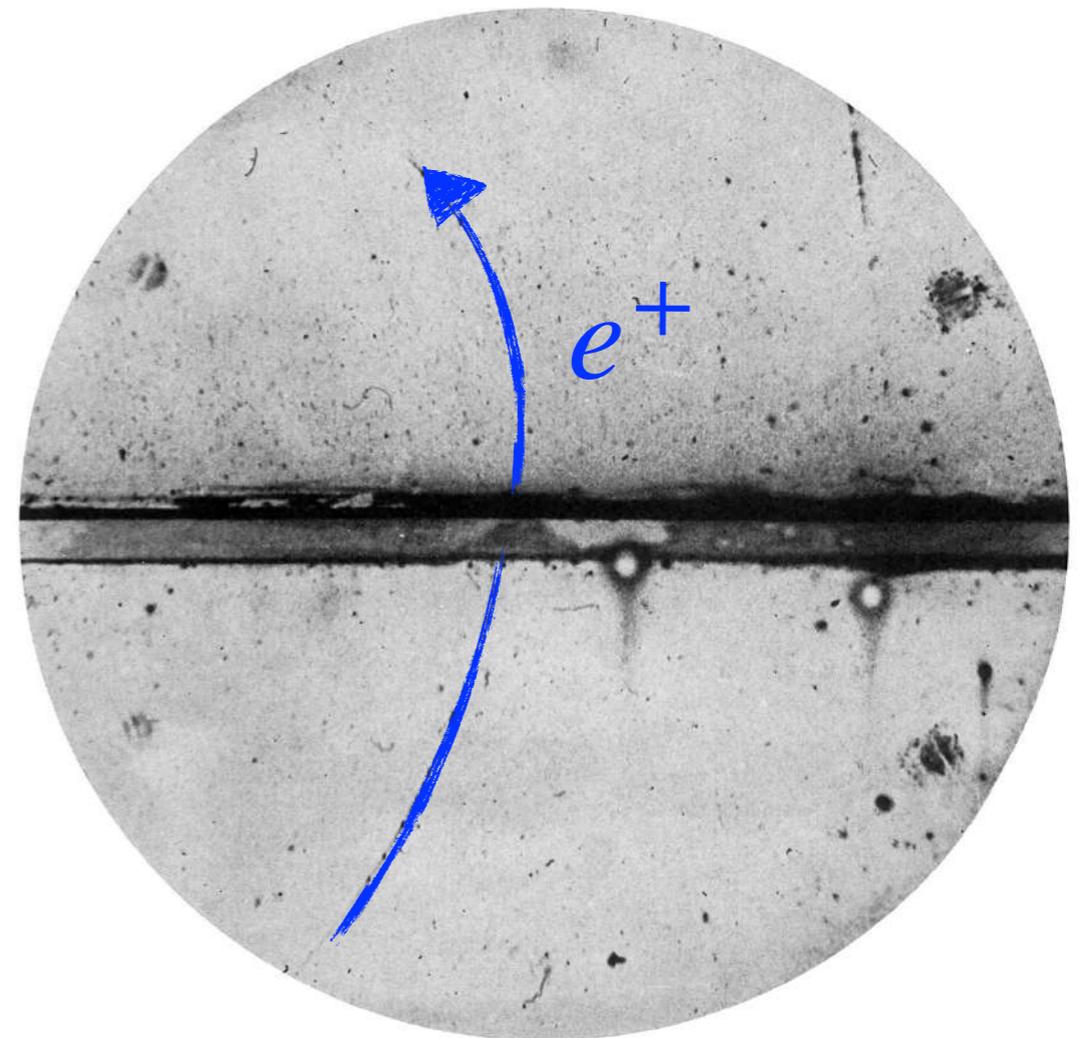
ma c'è di più...

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

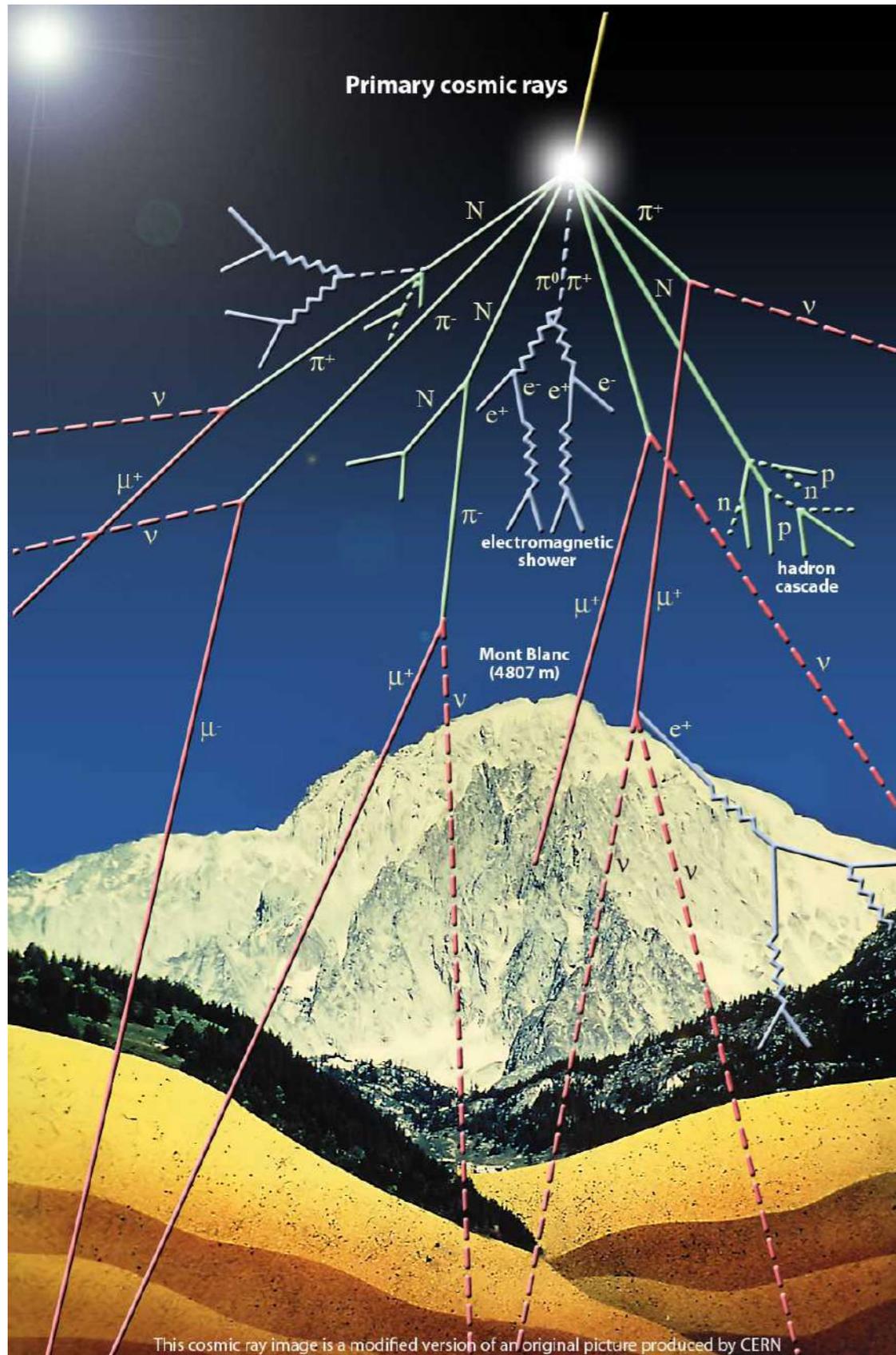
... l'equazione ha 2 soluzioni!
esiste l'antimateria?

$$(i\hat{\phi} - m)\psi = 0$$

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

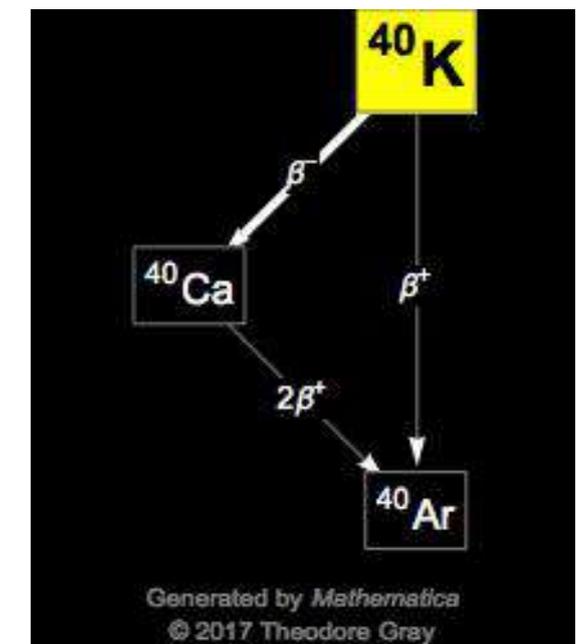


Dove trovare l'antimateria



- Decadimenti di nuclei instabili (es. radioattività terrestre)
- Nei raggi cosmici e nei loro prodotti di interazione con l'atmosfera (scoperta di Anderson)
- Negli (anti) neutrini che ci arrivano dalla fusione nucleare del sole

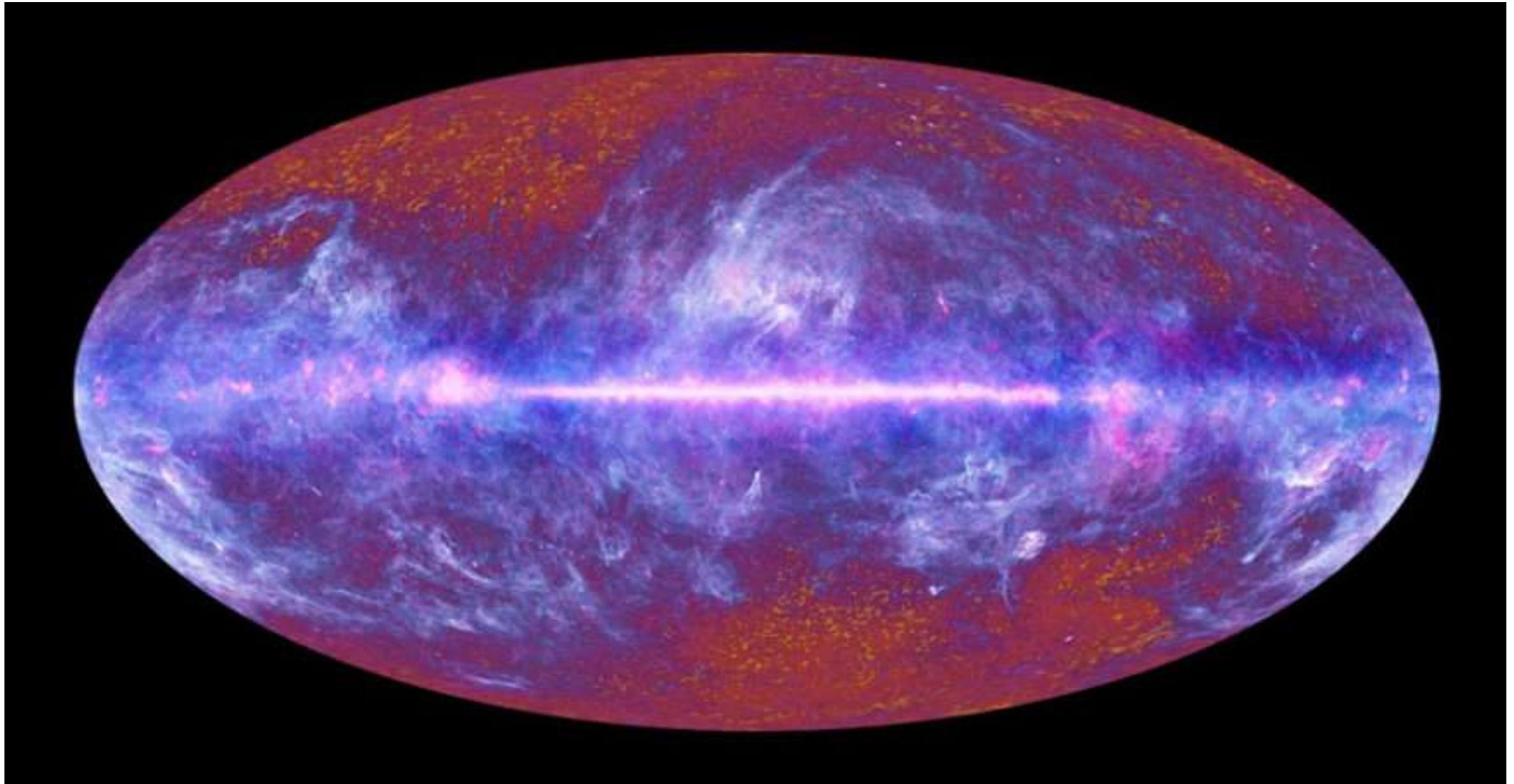
Nelle banane!



- Sappiamo anche produrla (acceleratori di particelle) e usarla (PET)

The Big Bang Theory

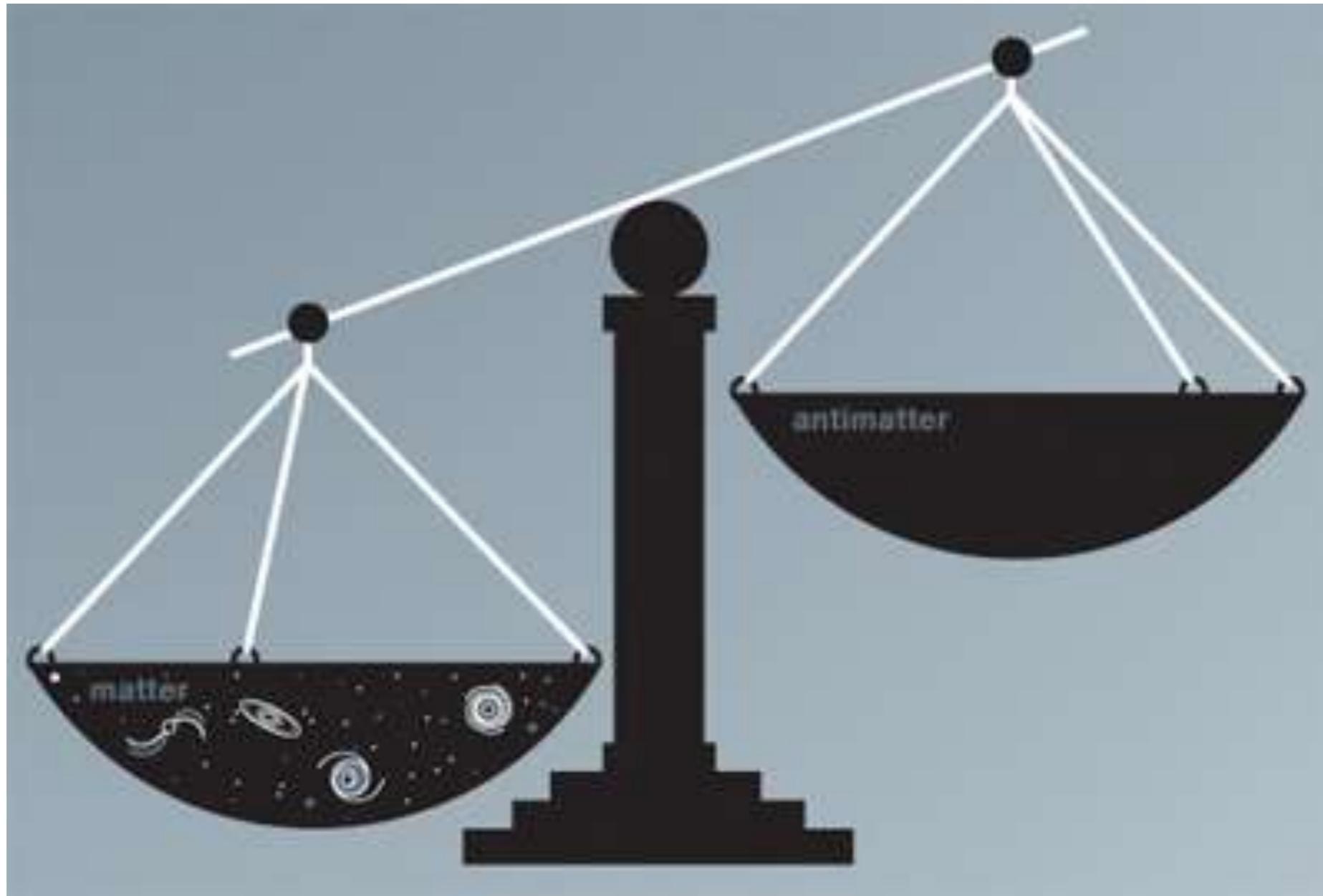
Secondo il modello cosmologico standard, all'inizio nell'universo **c'era tanta materia quanta antimateria**, lo possiamo anche osservare in una foto vecchia 14 miliardi di anni:



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?

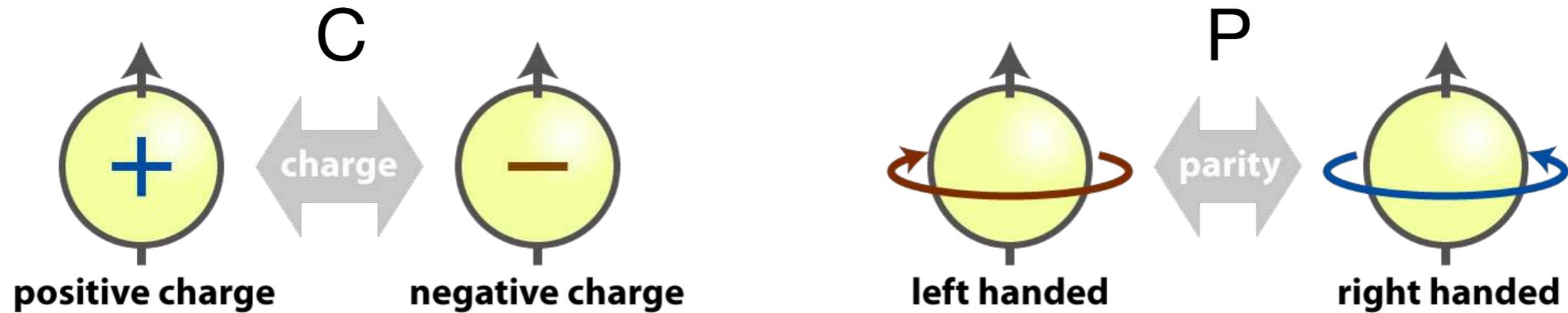
Osservata in raggi cosmici, decadimenti radioattivi e prodotta negli acceleratori di particelle
ma... **è pochissima!**



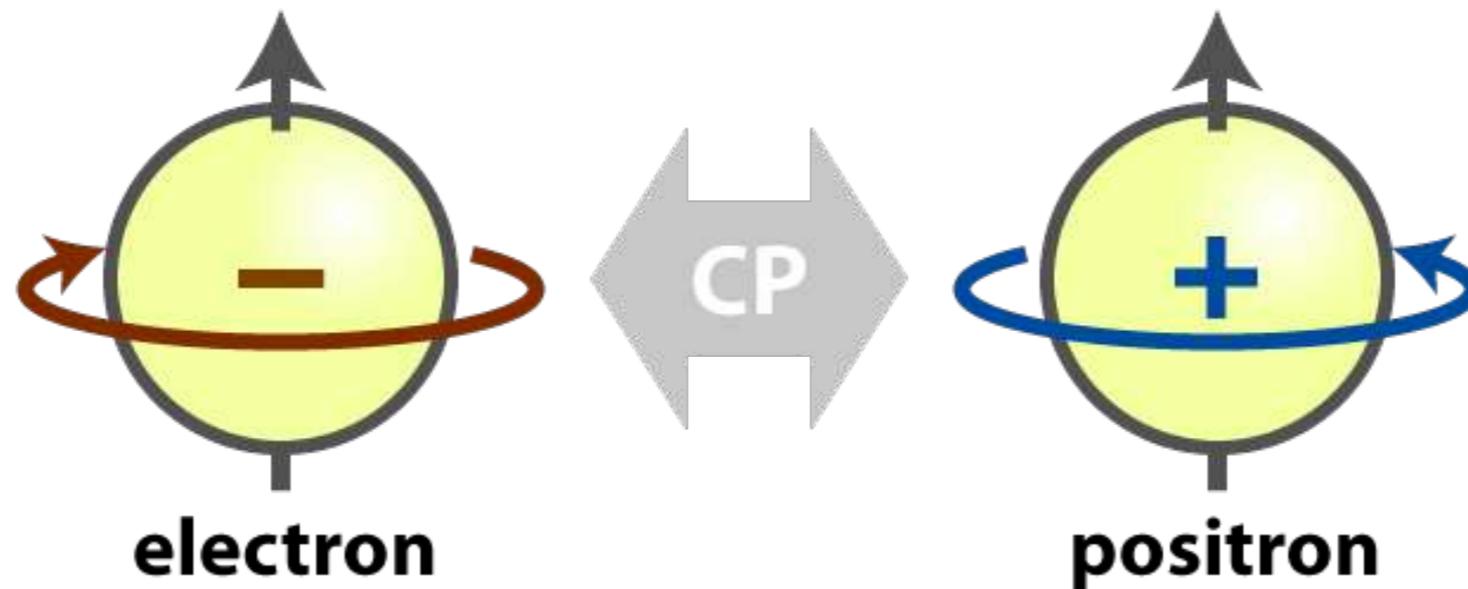
per cercare la risposta dobbiamo analizzare il legame tra materia e antimateria...

La simmetria CP

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

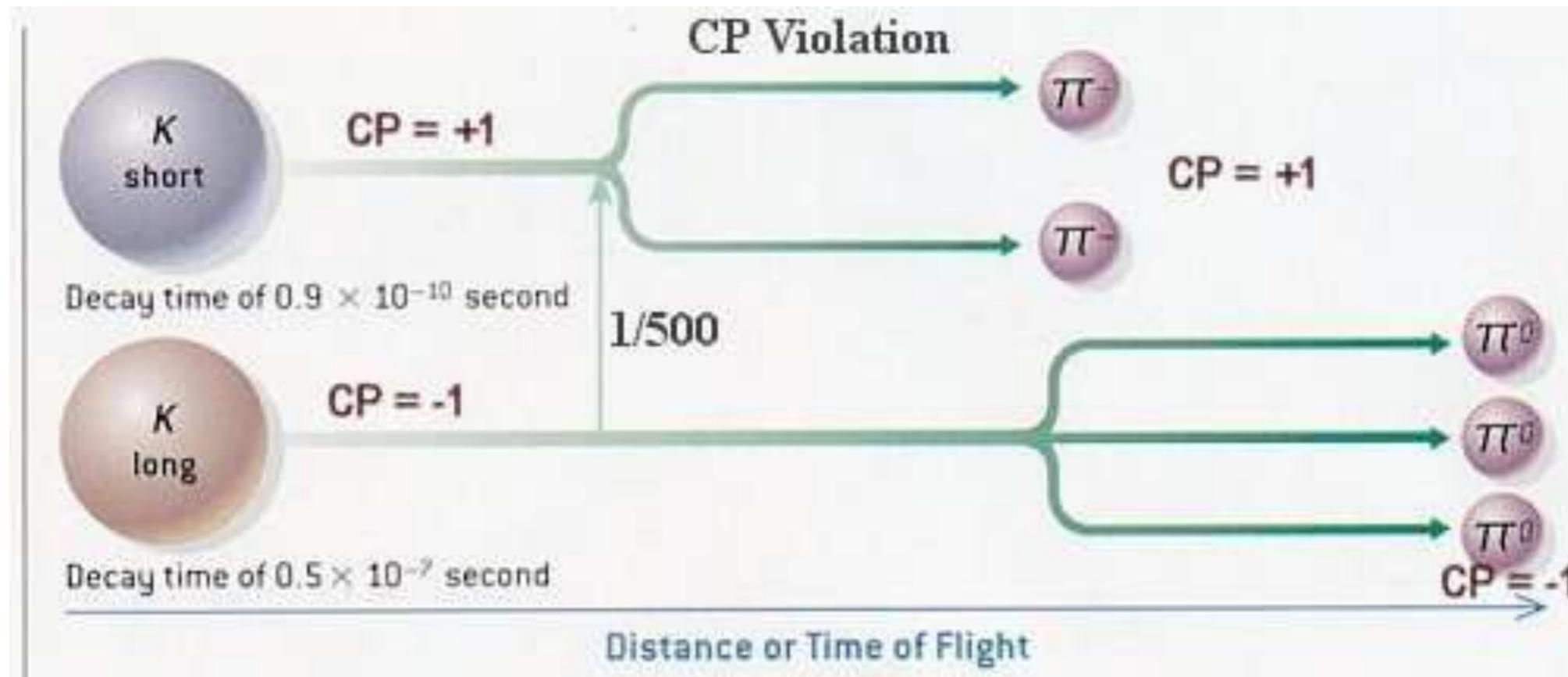


Applicando l'operazione **C+P** si cambia una particella in un'antiparticella, e viceversa



La simmetria CP non è sempre rispettata

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



Alcune particelle si comportano diversamente se guardate allo specchio! Perché?



Mixing dei quark

A seguito della scoperta delle particelle strane si osserva sperimentalmente che l'intensità delle interazioni deboli (bosoni W^\pm e Z^0) dipende dal tipo (**sapore**) del quark

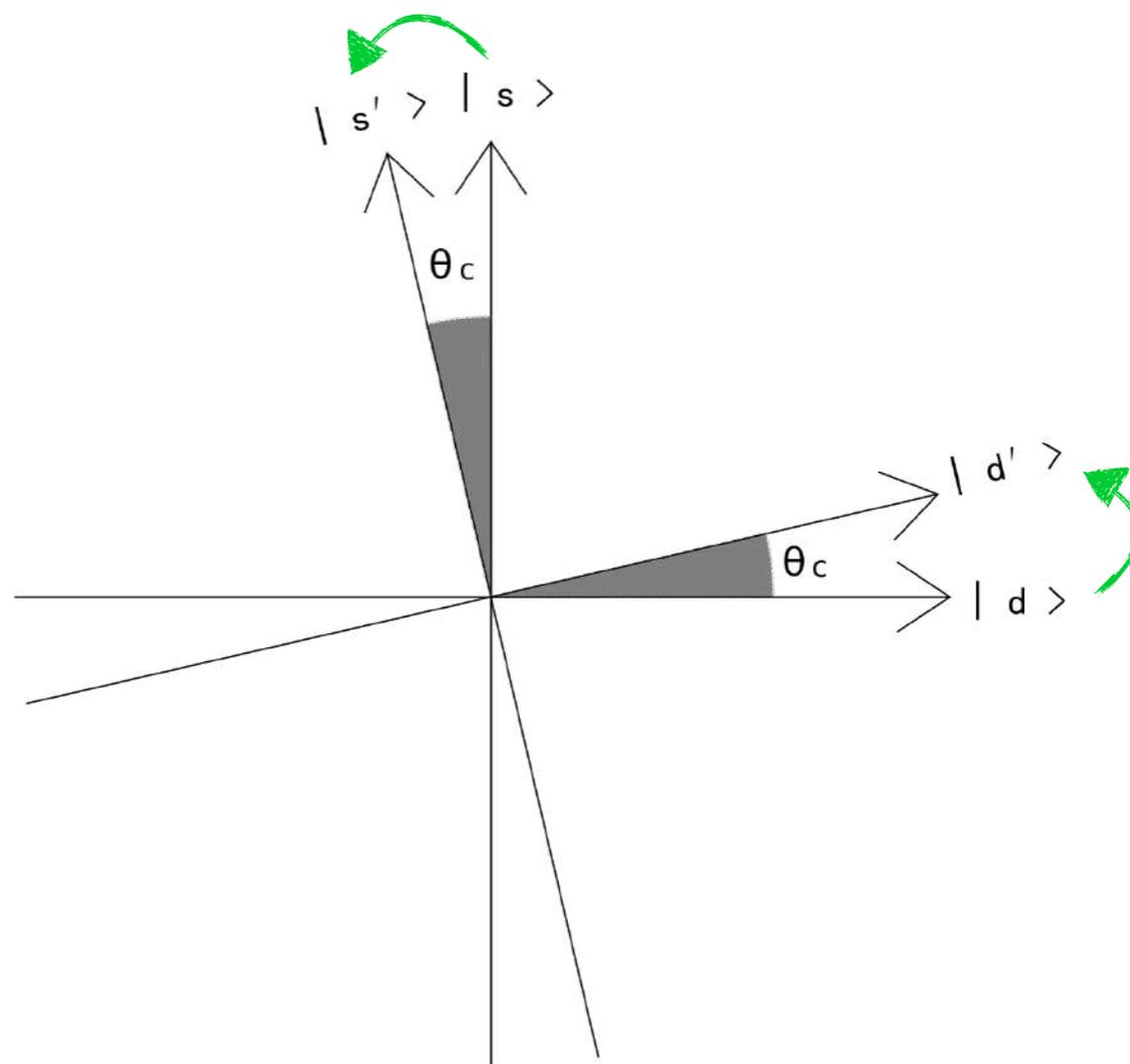
1963: Nicola Cabibbo teorizza il **mixing dei quark** attraverso il parametro $\theta_c = 13^\circ$:
Le interazioni deboli sono universali, ma i quark si accoppiano in uno stato "mescolato"

All'epoca erano noti solo tre quark: u, d e s:

$$|d'\rangle = \cos \theta_c |d\rangle + \sin \theta_c |s\rangle$$

$$|s'\rangle = -\sin \theta_c |d\rangle + \cos \theta_c |s\rangle$$

- $|q'\rangle$: stati dell'interazione (debole)
- $|q\rangle$: stati di massa (che misuriamo)



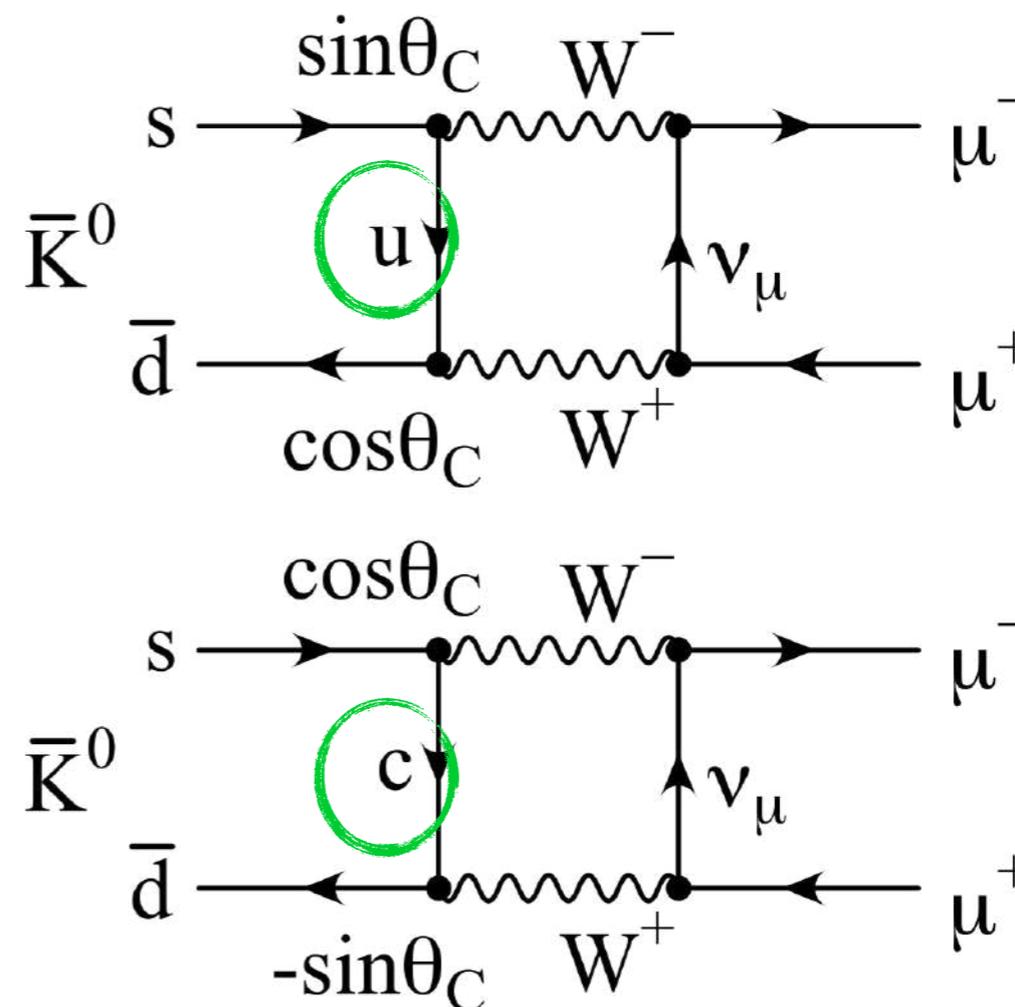
Il quark charm

Sorge un problema: si osserva $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ ma non si osserva $K^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$, che dovrebbe avvenire con stessa frequenza secondo la teoria di Cabibbo

1970: Glashow, Iliopoulos e Maiani (GIM) teorizzano l'esistenza di un quarto quark (c) che vieta alla corrente neutra (Z^0) il cambiamento di sapore

$K^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ può avvenire però attraverso lo scambio simultaneo di due bosoni carichi W^\pm , dunque il processo è effettivamente possibile, ma **estremamente raro!**

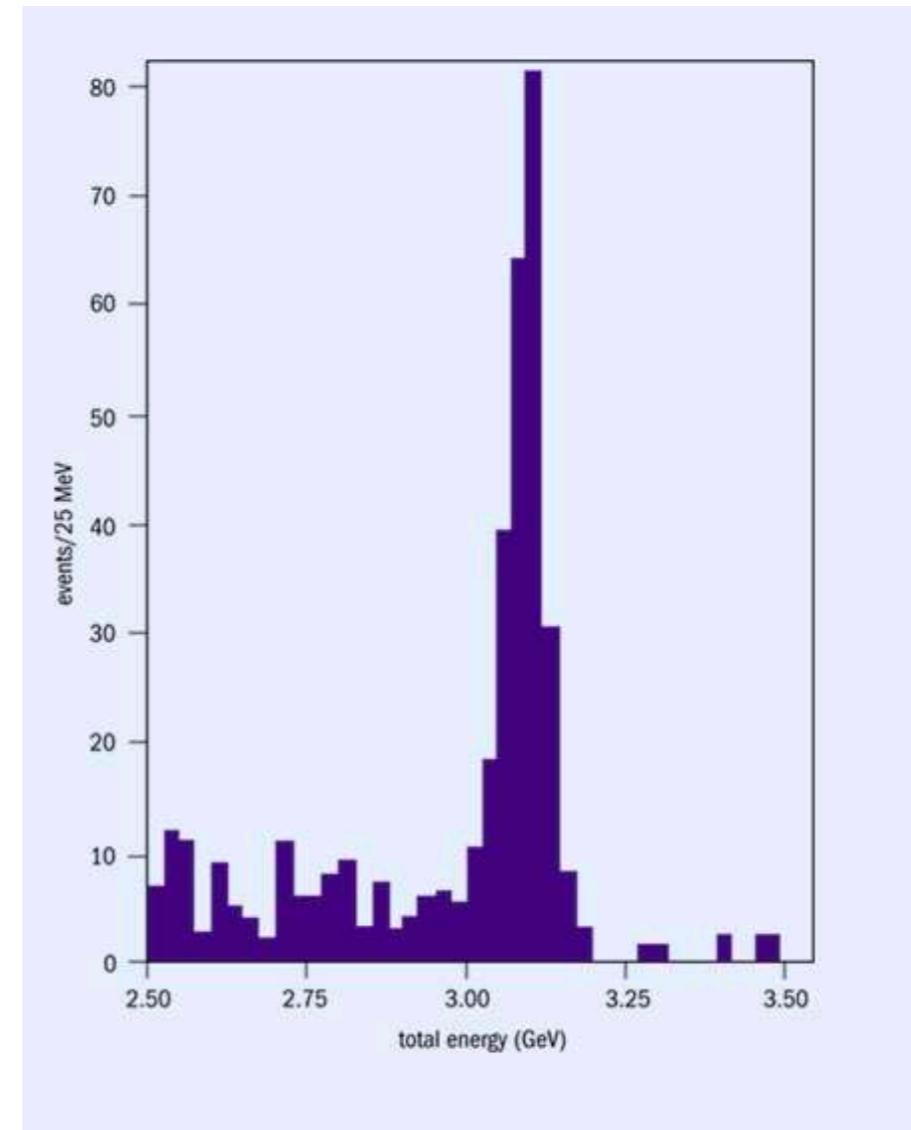
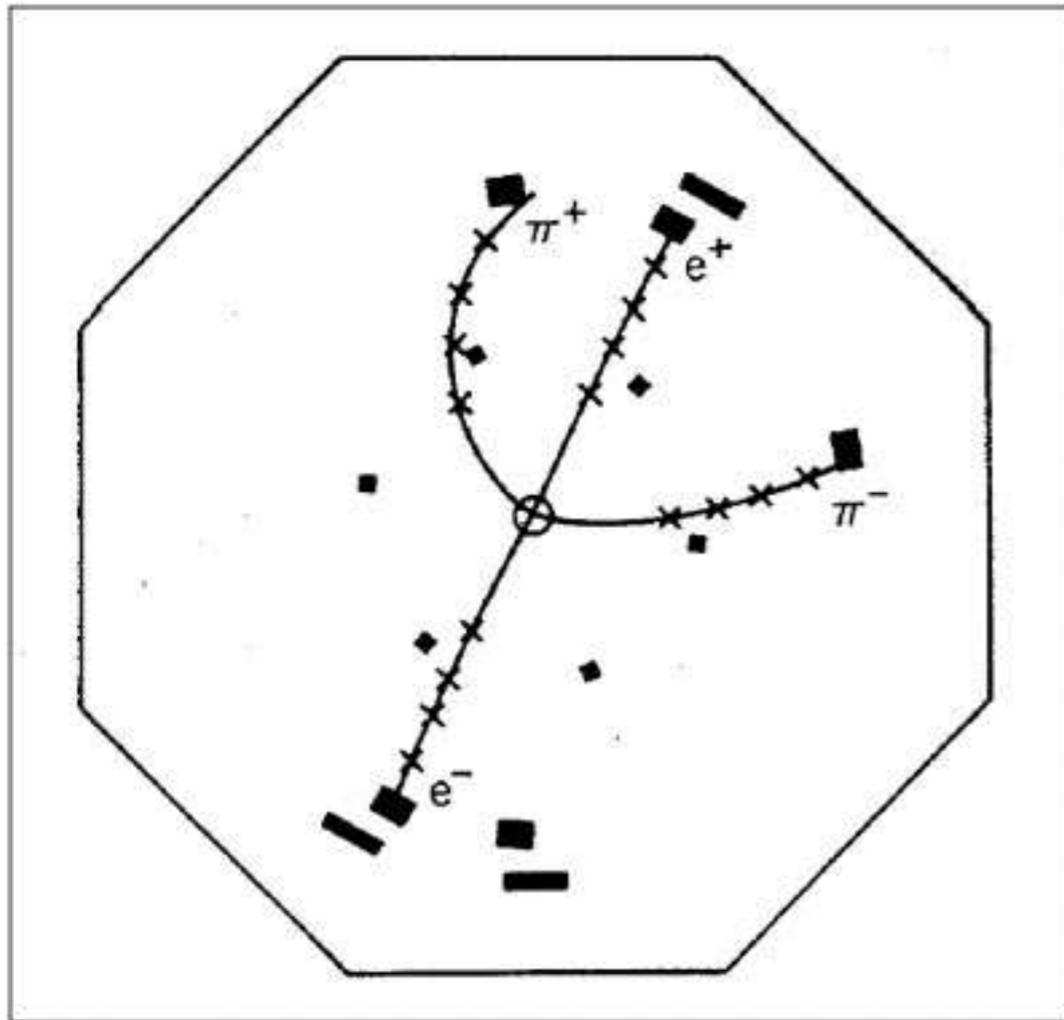
Vedremo nel seguito perché questi processi sono importanti a LHCb



Scoperta del charm

GIM danno anche una stima indiretta della massa del quark charm

1974: osservazione della J/ψ ($c\bar{c}$) in due laboratori americani (BNL e SLAC)



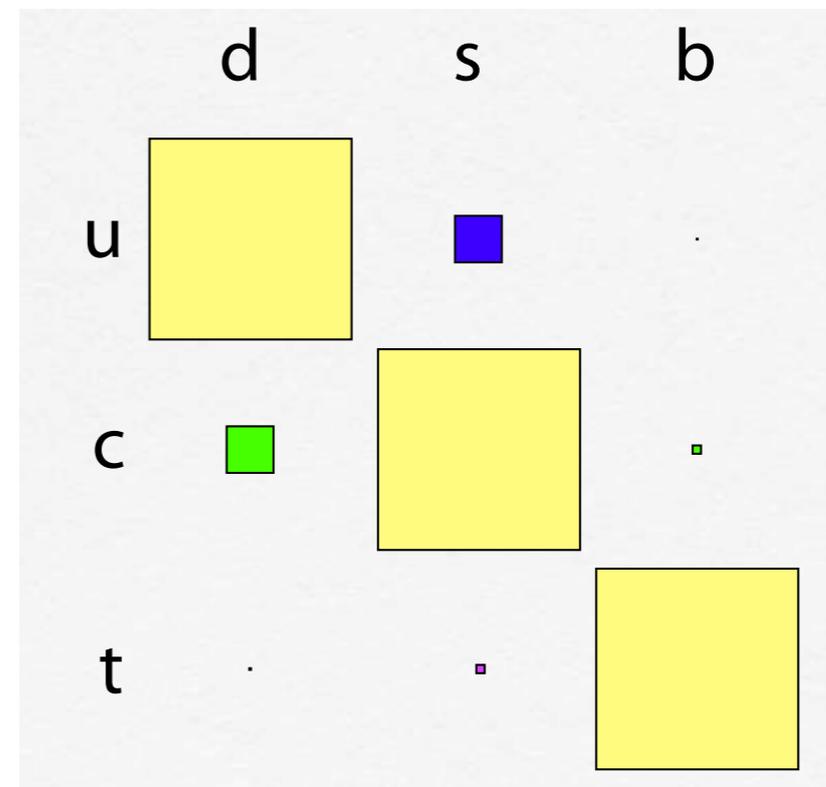
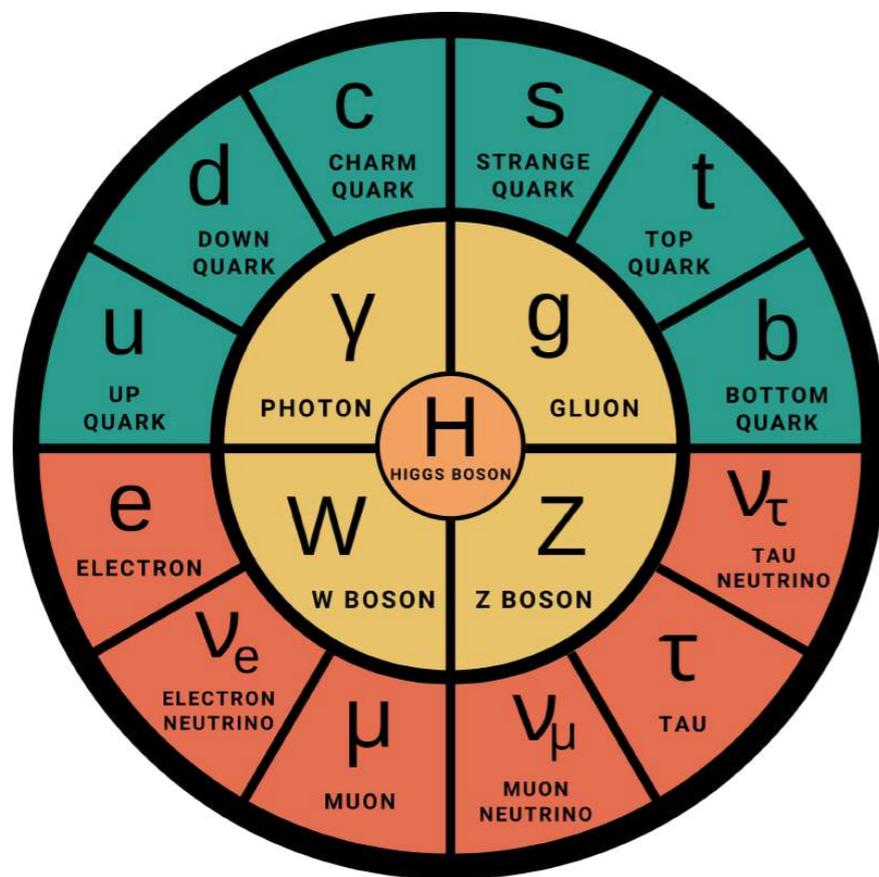
$m = 3.1$ GeV è poco sopra il limite di Adone a Frascati, che la osserva 2 giorni dopo!

<https://youtu.be/osCDYEmhUJk>

La matrice CKM

1964: osservata la violazione CP nei decadimenti dei kaoni

1973: Kobayashi e Maskawa: sono necessarie **3 generazioni di quark** per avere, nella matrice di mixing, una fase complessa che distingue materia e antimateria!

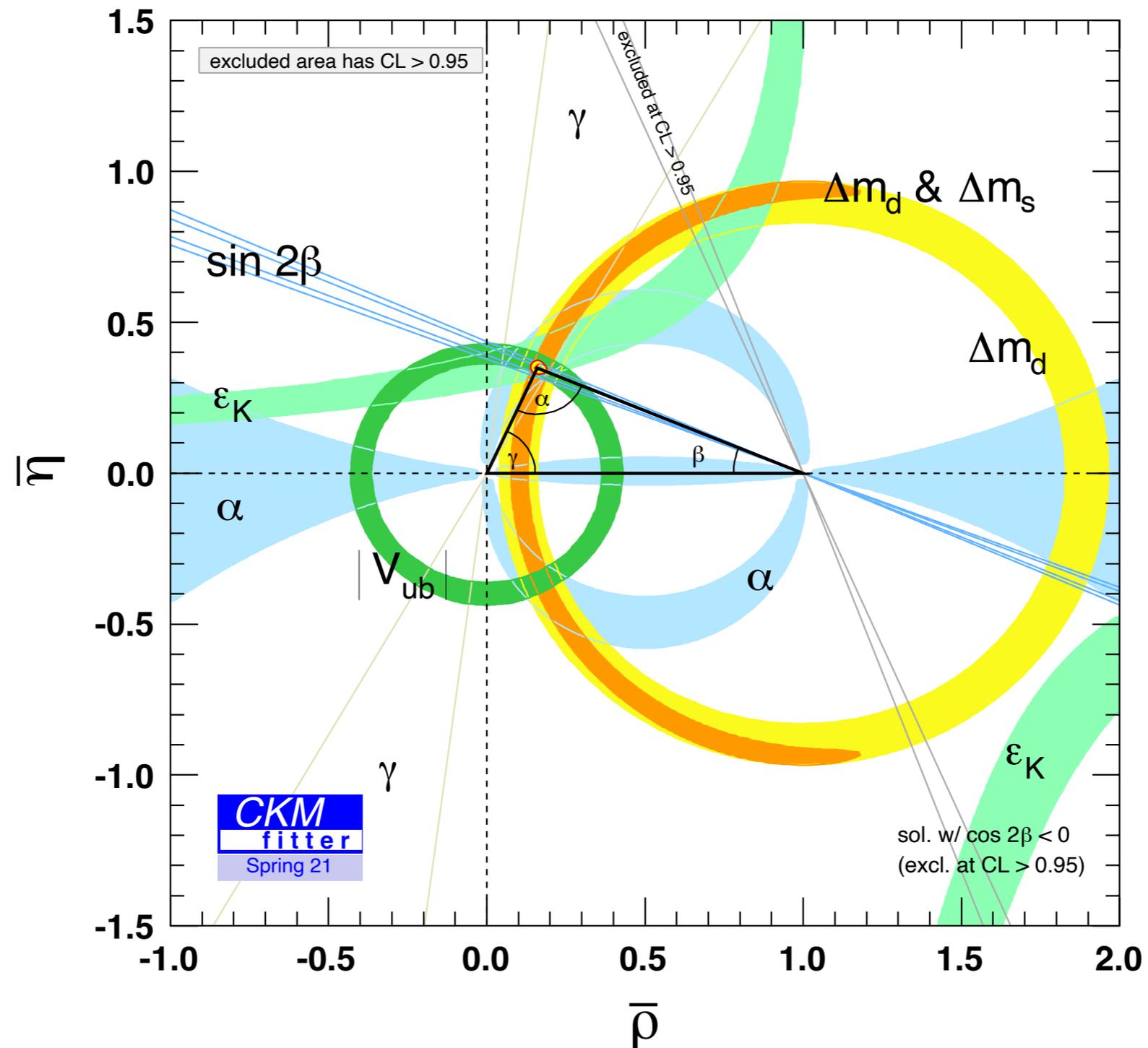


La matrice di Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) quantifica l'intensità degli accoppiamenti tra quark di sapore diverso

I quark b e t vengono successivamente osservati nel 1977 e nel 1995

La fisica del sapore

Abbiamo il meccanismo ma i valori dei parametri non sono predetti dalla teoria: possiamo solo misurarli! es. relazione tra i parametri CKM \rightarrow triangolo di unitarietà



Quindi tornano tutti i conti?

Abbiamo scoperto la violazione CP e capito il meccanismo che la genera ma...
l'effetto è molto piccolo! **Un problema noto, ma non ancora risolto!**

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

A. D. Sakharov

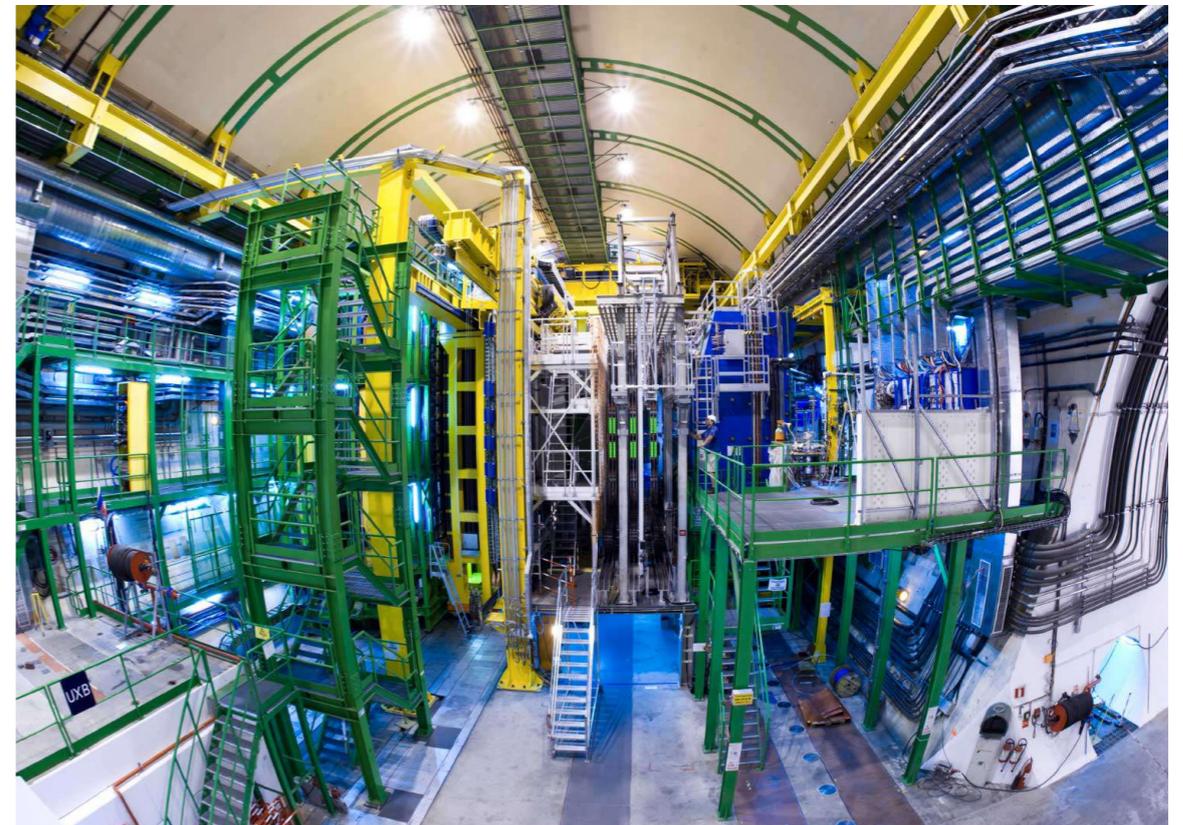
Submitted 23 September 1966

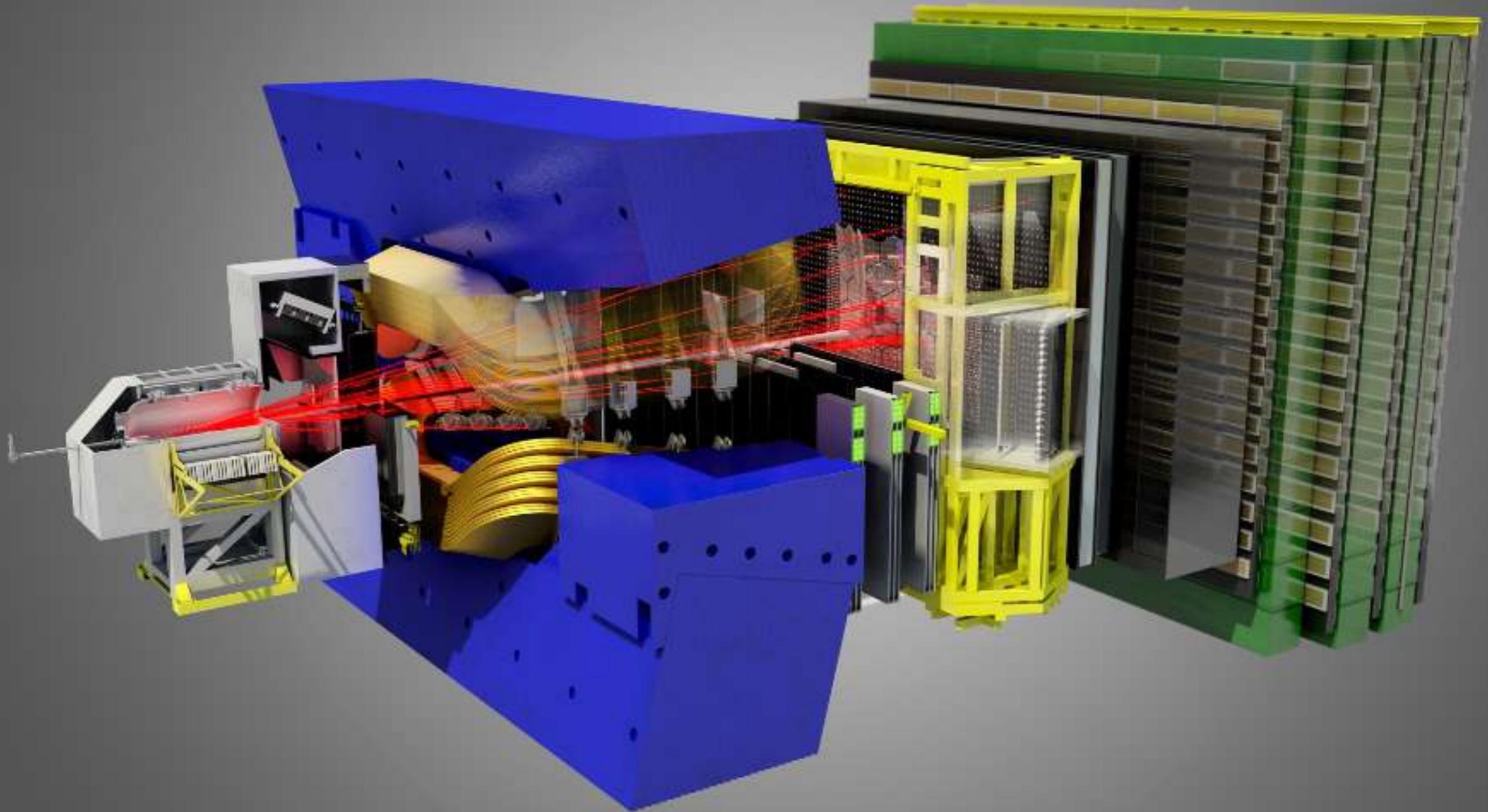
ZhETF Pis'ma 5, No. 1, 32-35, 1 January 1967

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)**

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

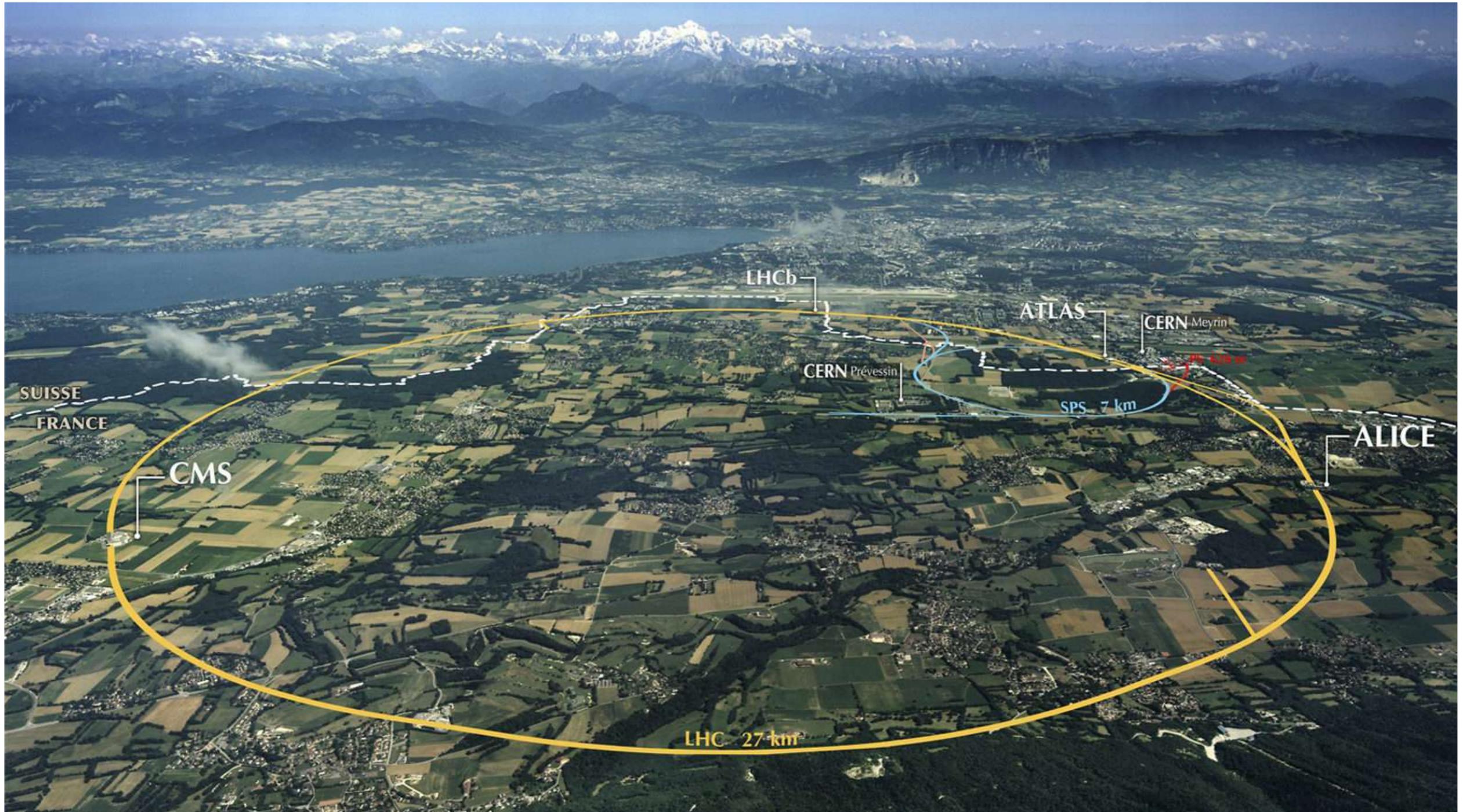




2. LHC e il rivelatore LHCb

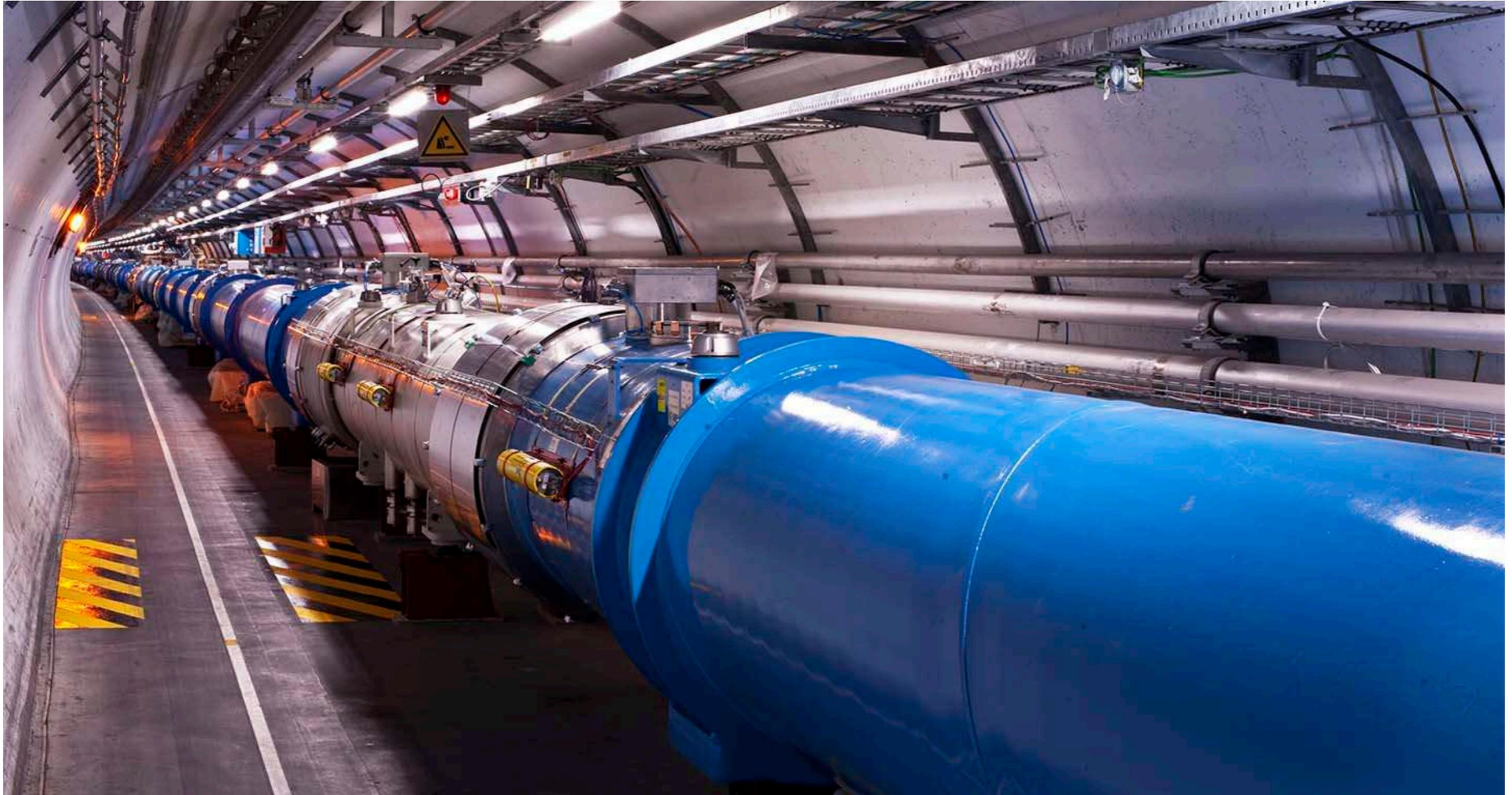
Il CERN e LHC

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** ($1 \text{ TeV} = 10^{12}$ ElettronVolt)

Un “settore” di LHC

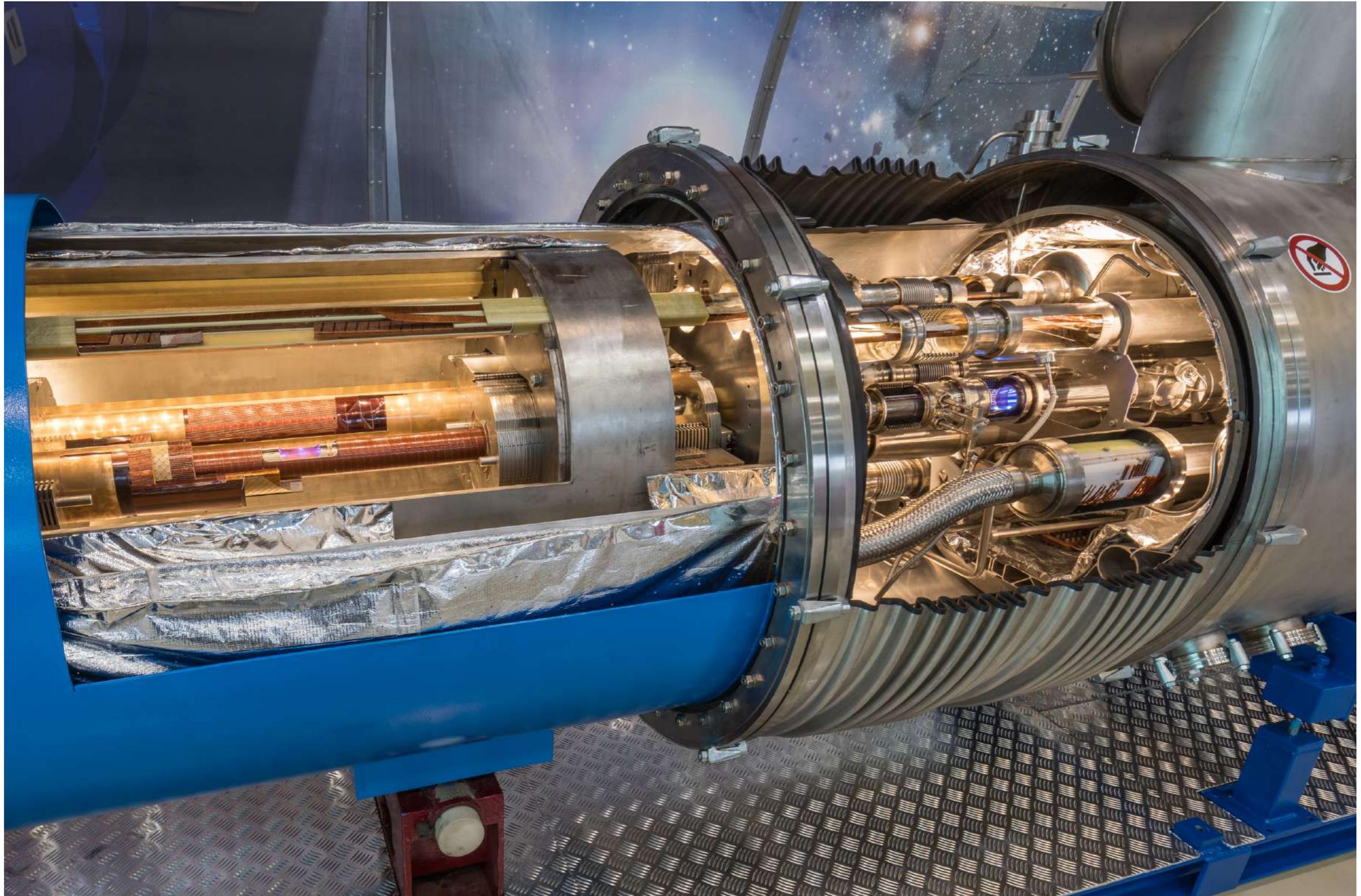
2005: 1/1232 settori (circa 20 m ciascuno) viene calato nel tunnel



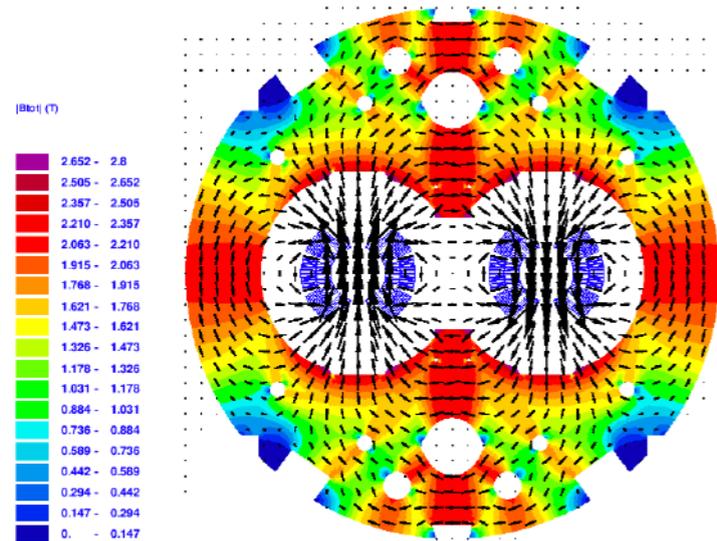
<http://lhc-machine-outreach.web.cern.ch/>

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 ("beam pipe") a 10^{-9} mbar (più vuoto dell'universo!)

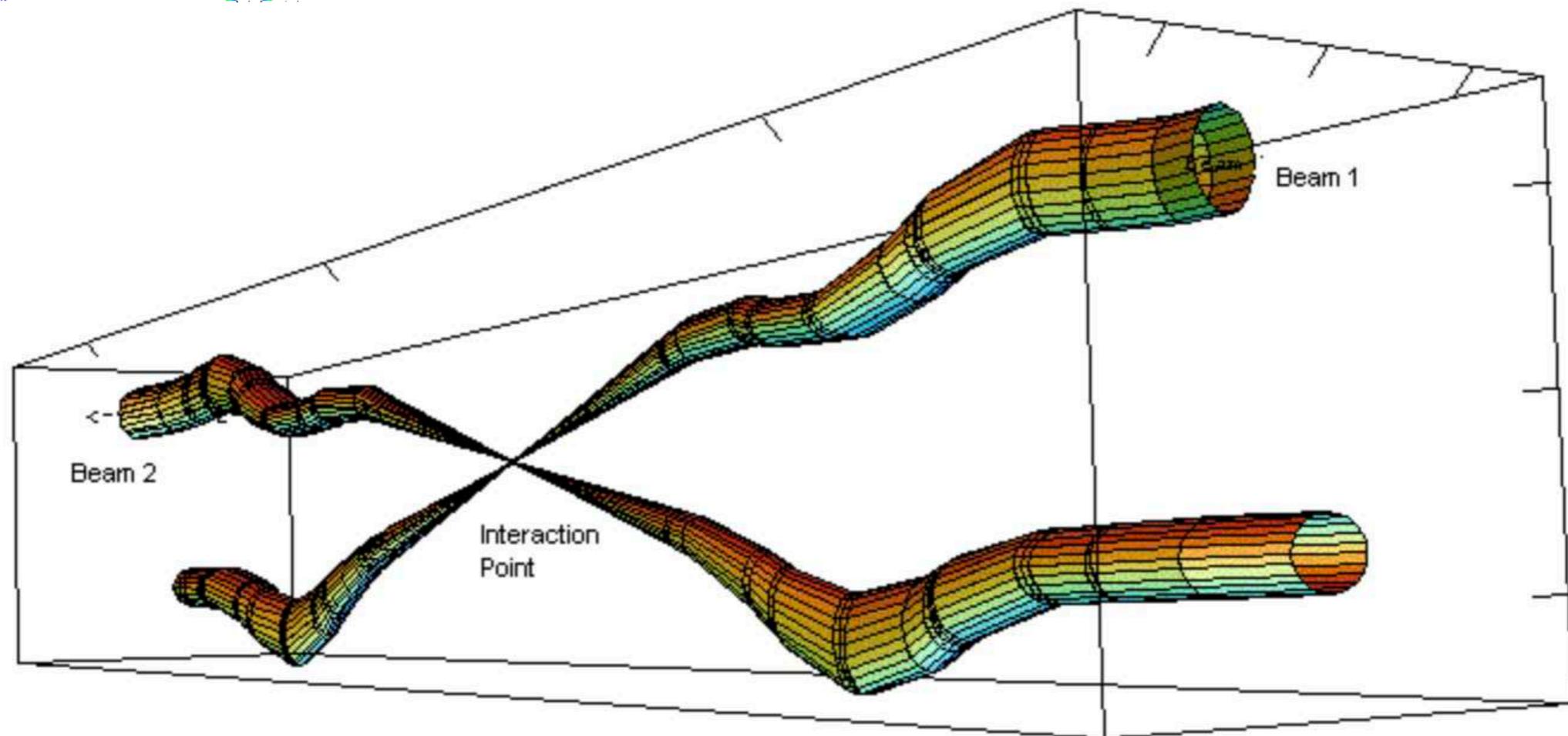


Collisioni dei fasci di protoni



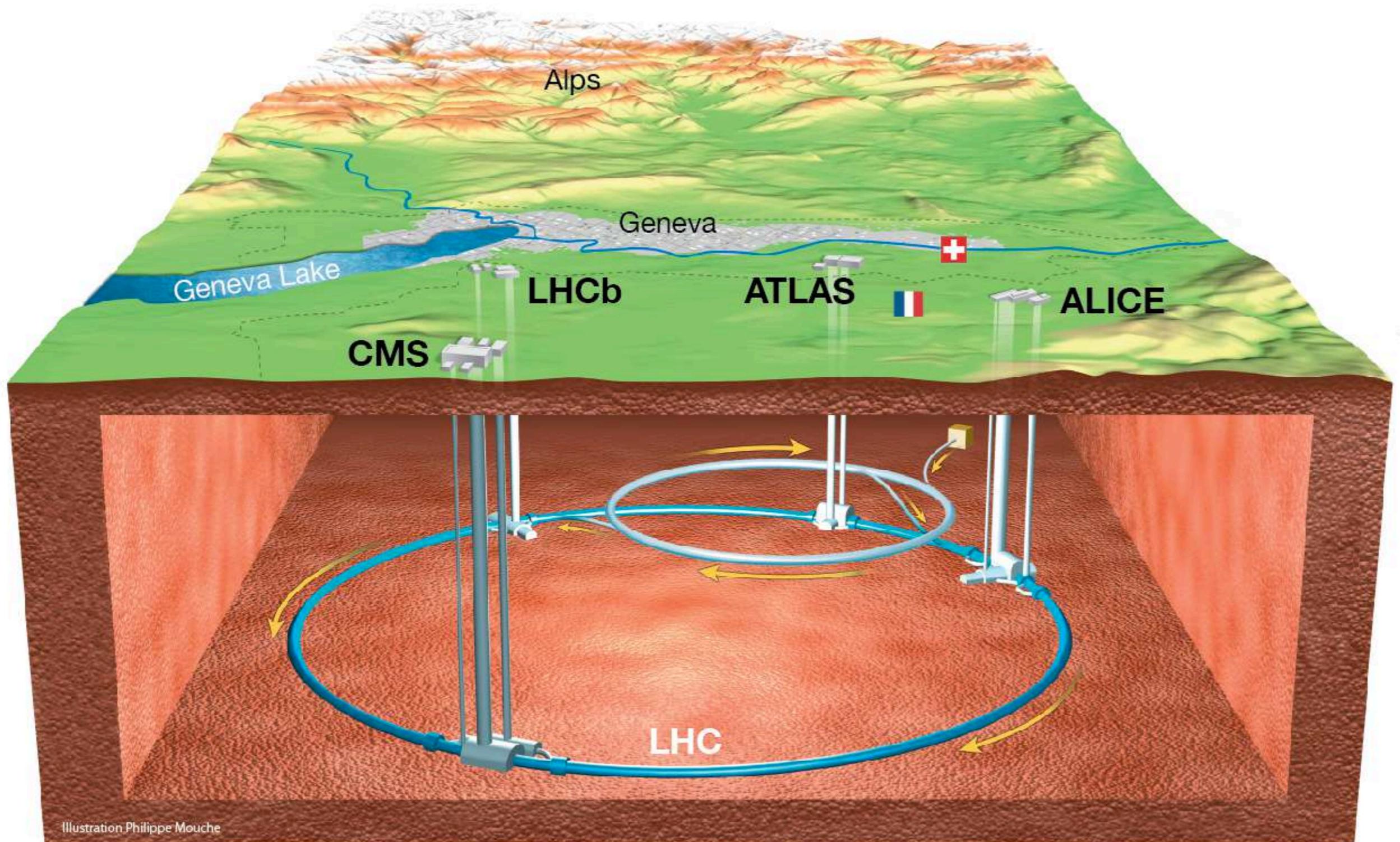
Elementi base:

- 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

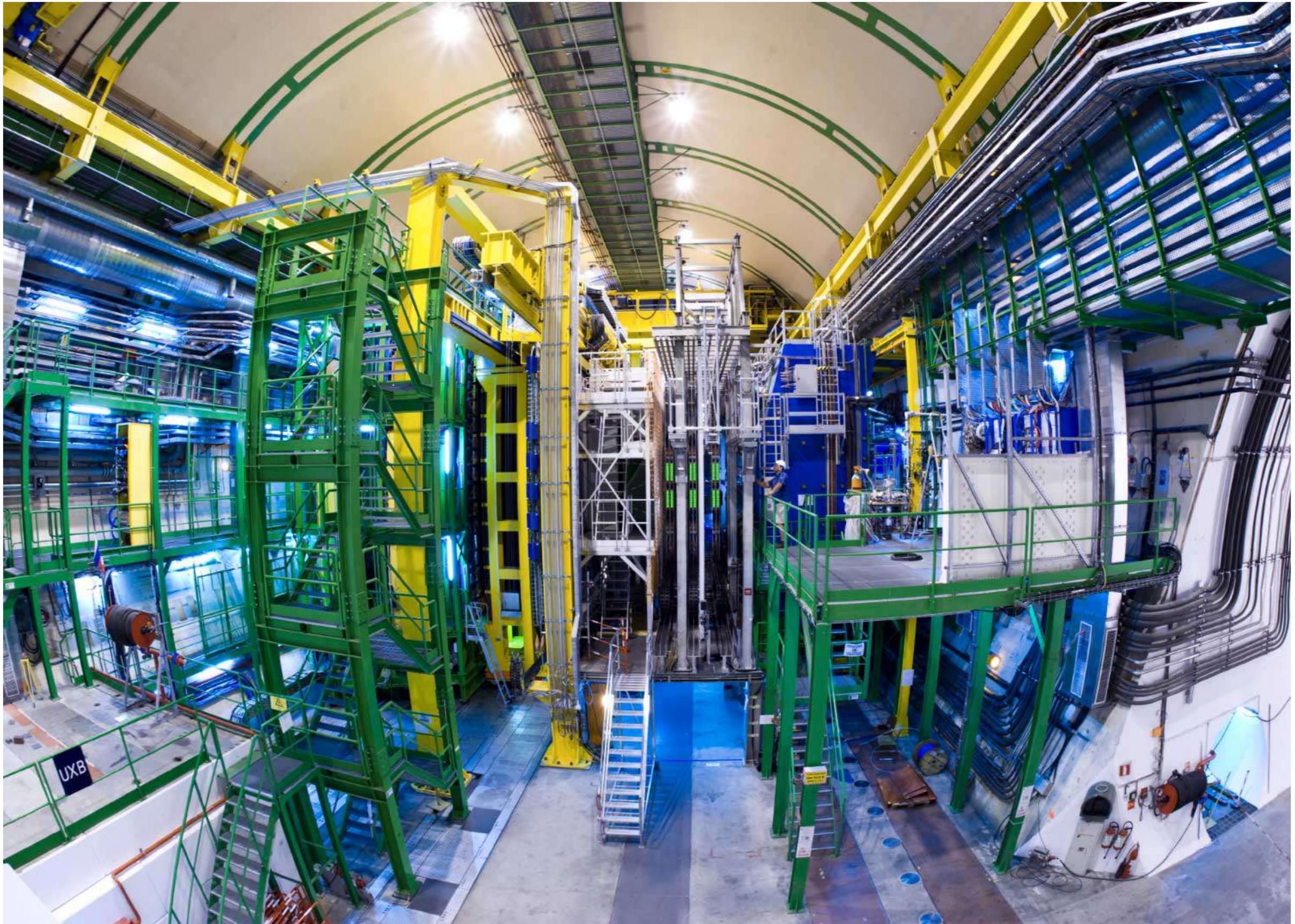


I due fasci vengono collimati e si incrociano in 4 siti sperimentali, producendo circa **600 milioni di collisioni al secondo**

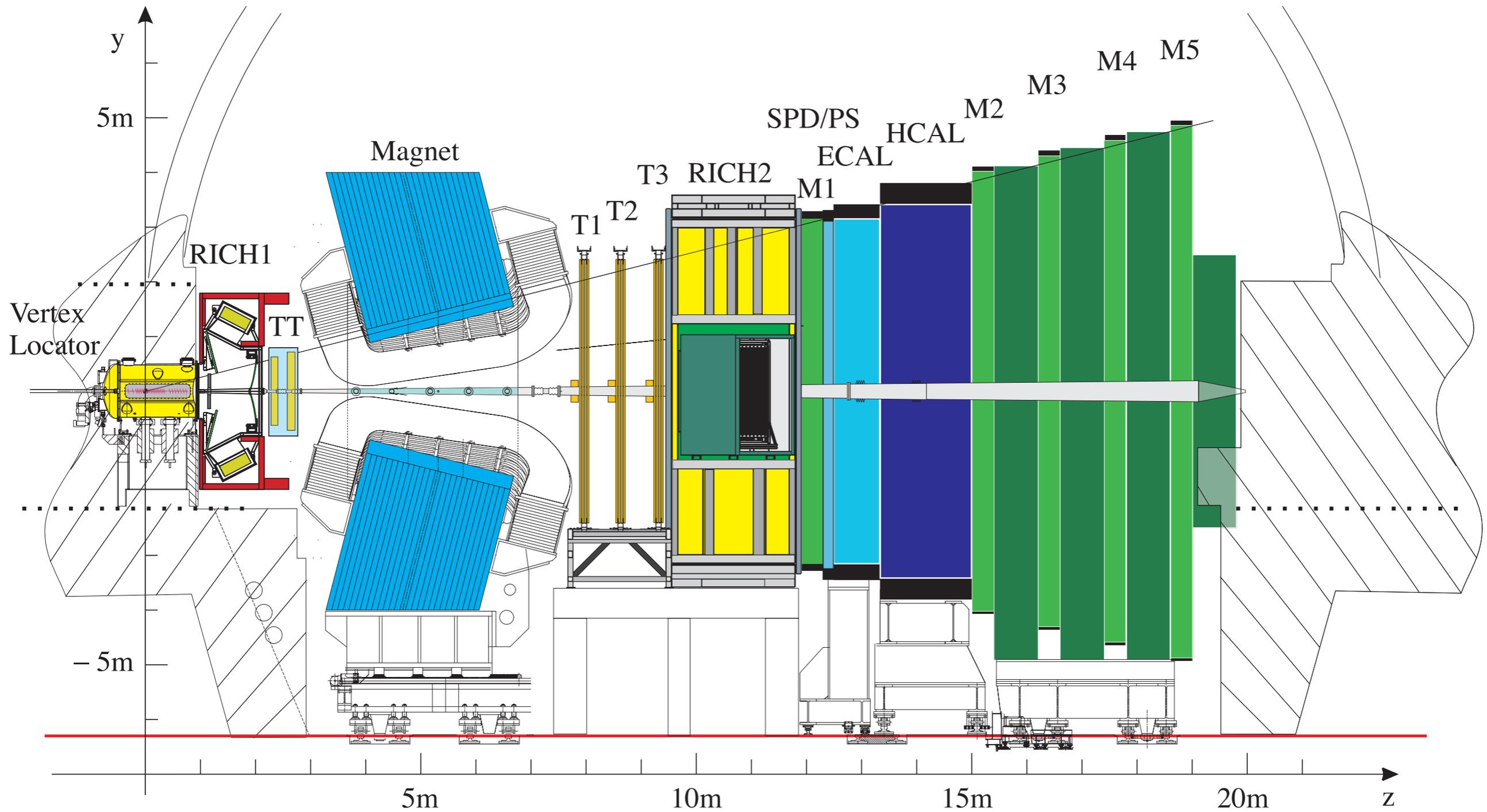
Large Hadron Collider Beauty (LHCb)



Il rivelatore LHCb

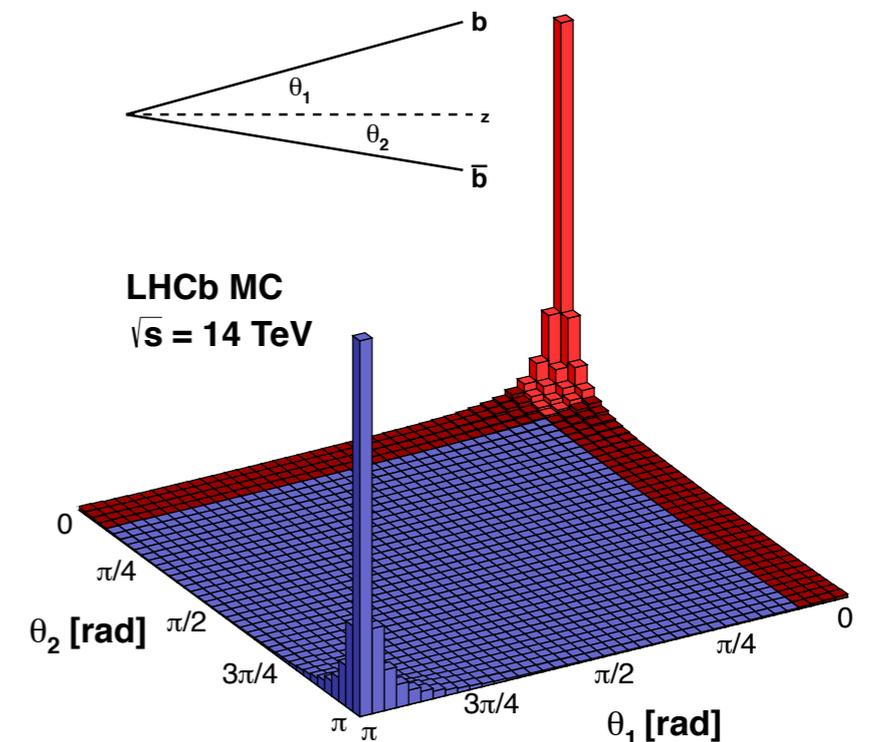
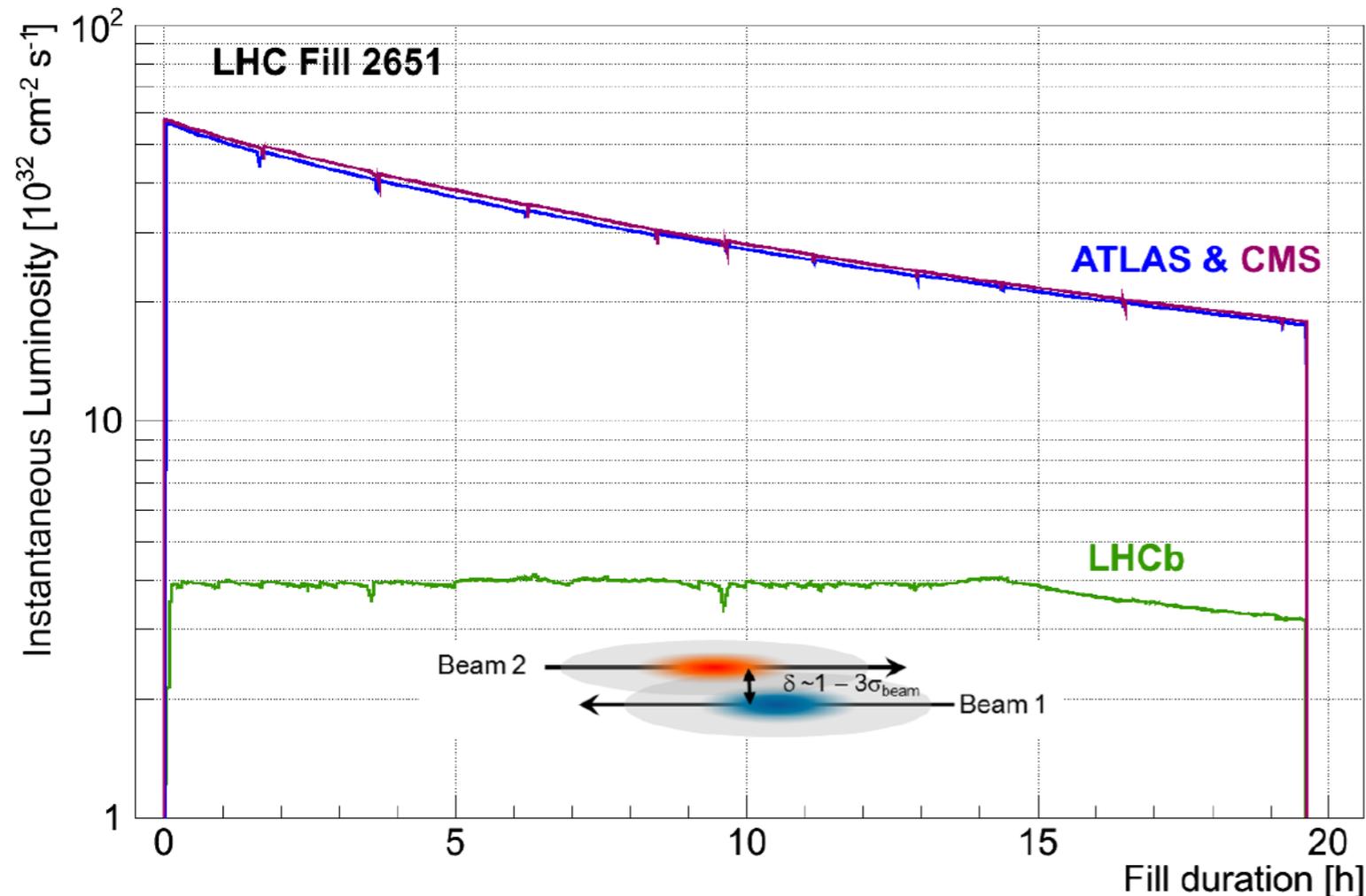


Schema del rivelatore



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”)

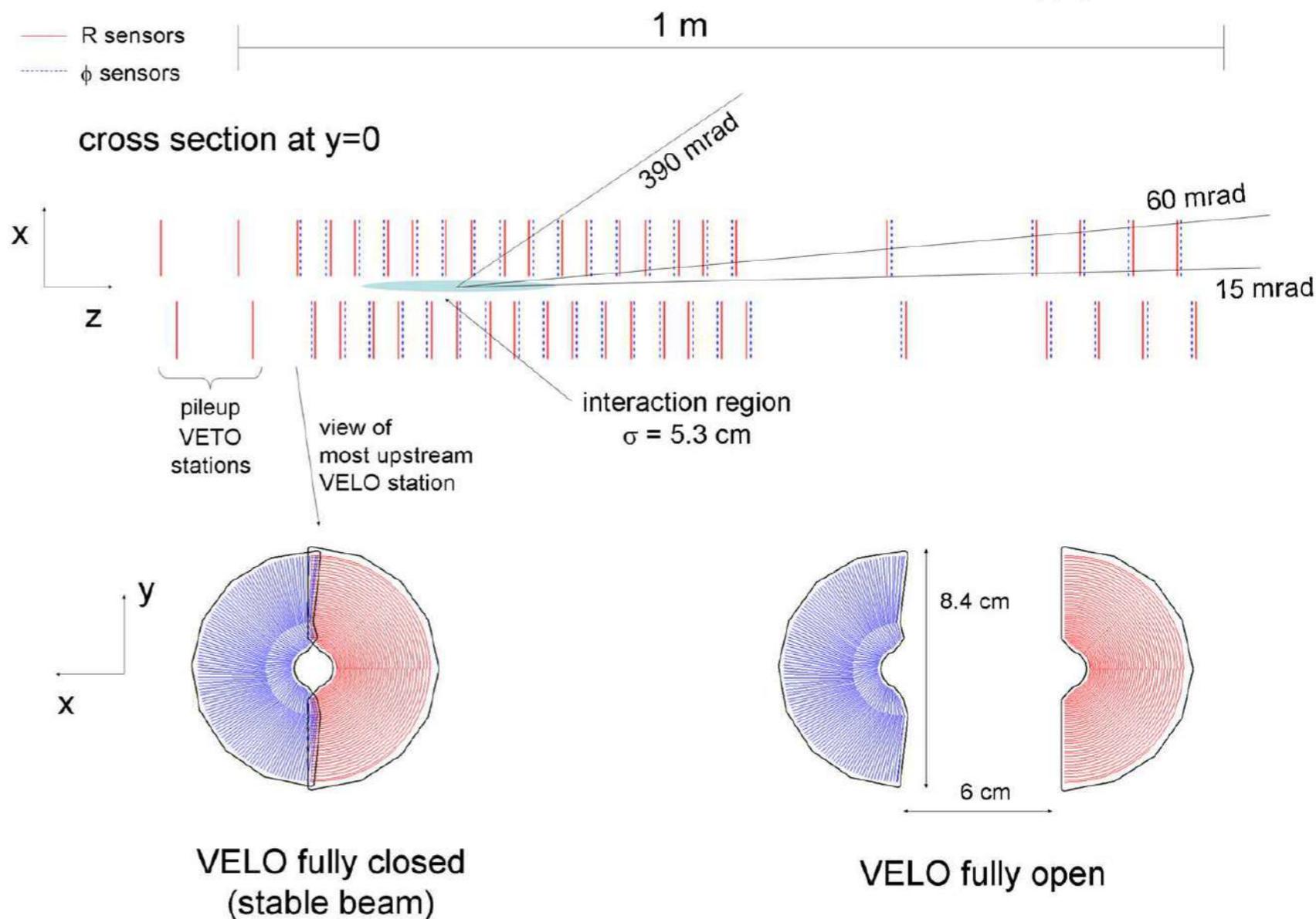
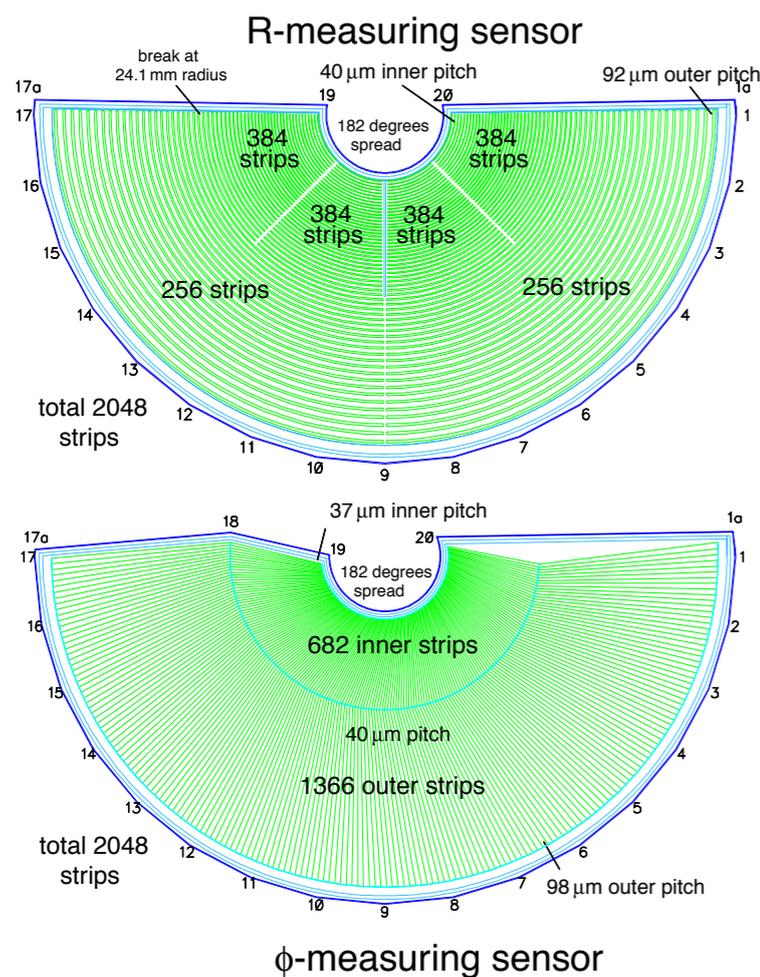
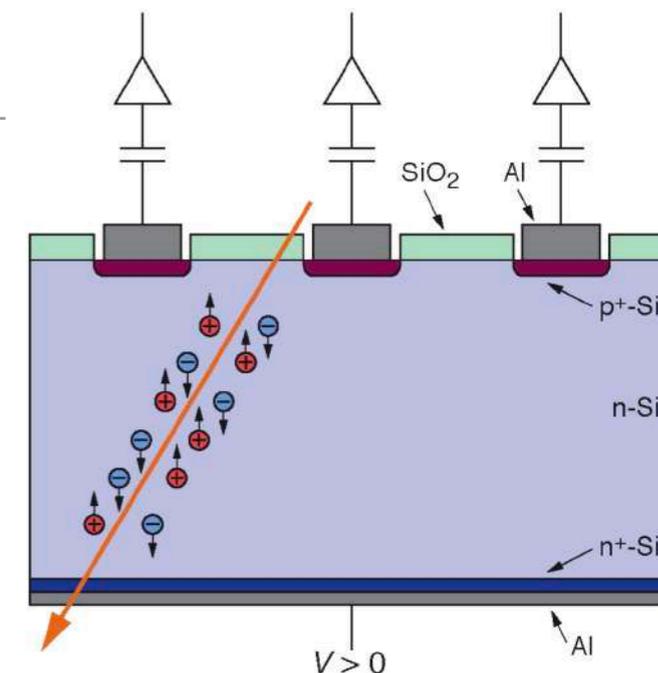


- La **produzione dei quark pesanti** (c e b), che ci interessano, avviene “in avanti” → rivelatori a piccolo angolo

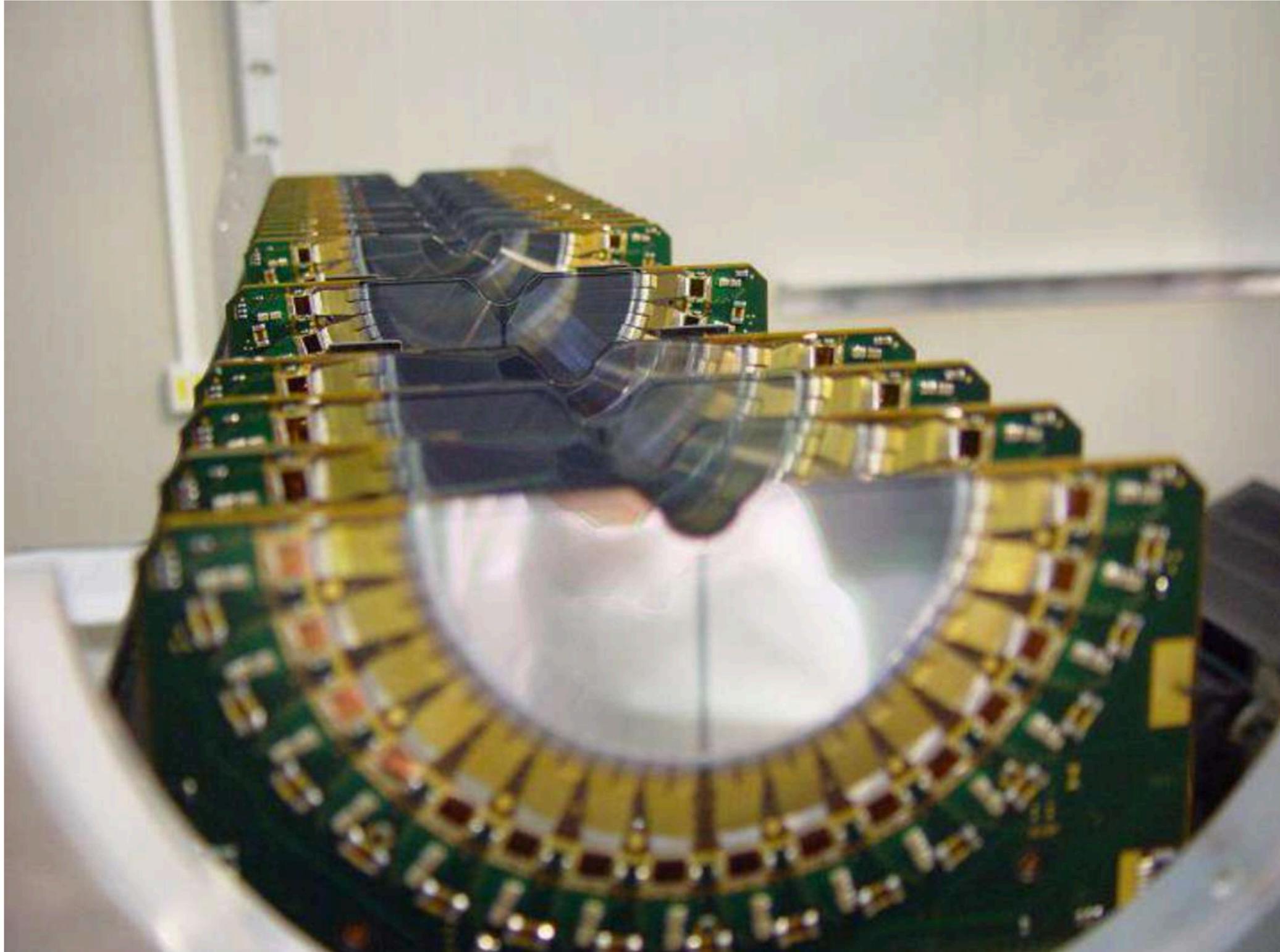
Il rivelatore di vertice (VELO)

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 due rivelatori a strip di silicio: misura di R e ϕ



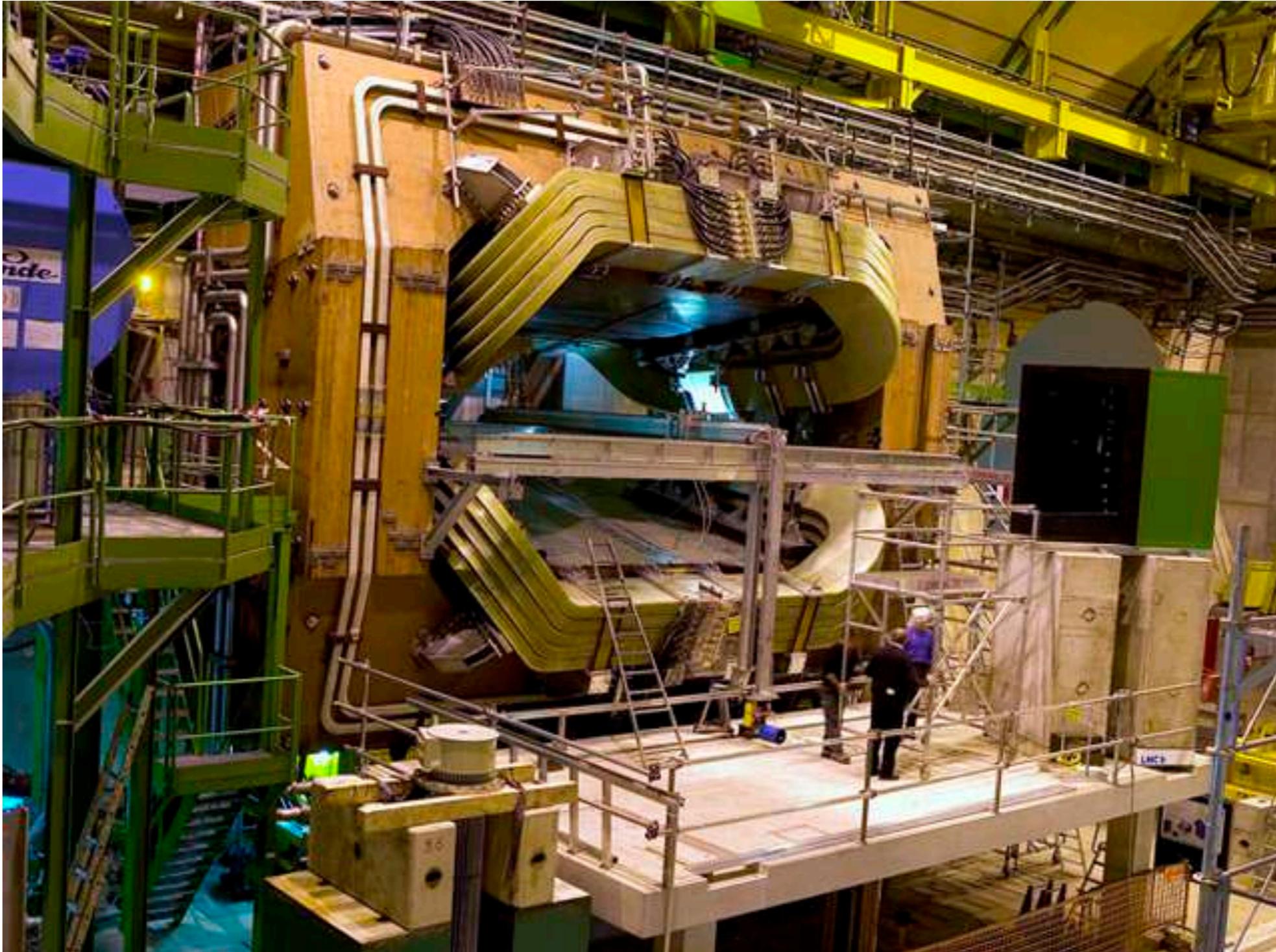
Una delle due metà del VELO



Durante le collisioni il VELO dista solo 5 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



Particelle in campo magnetico

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

[se v e B perpendicolari]

$$F = qvB$$

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

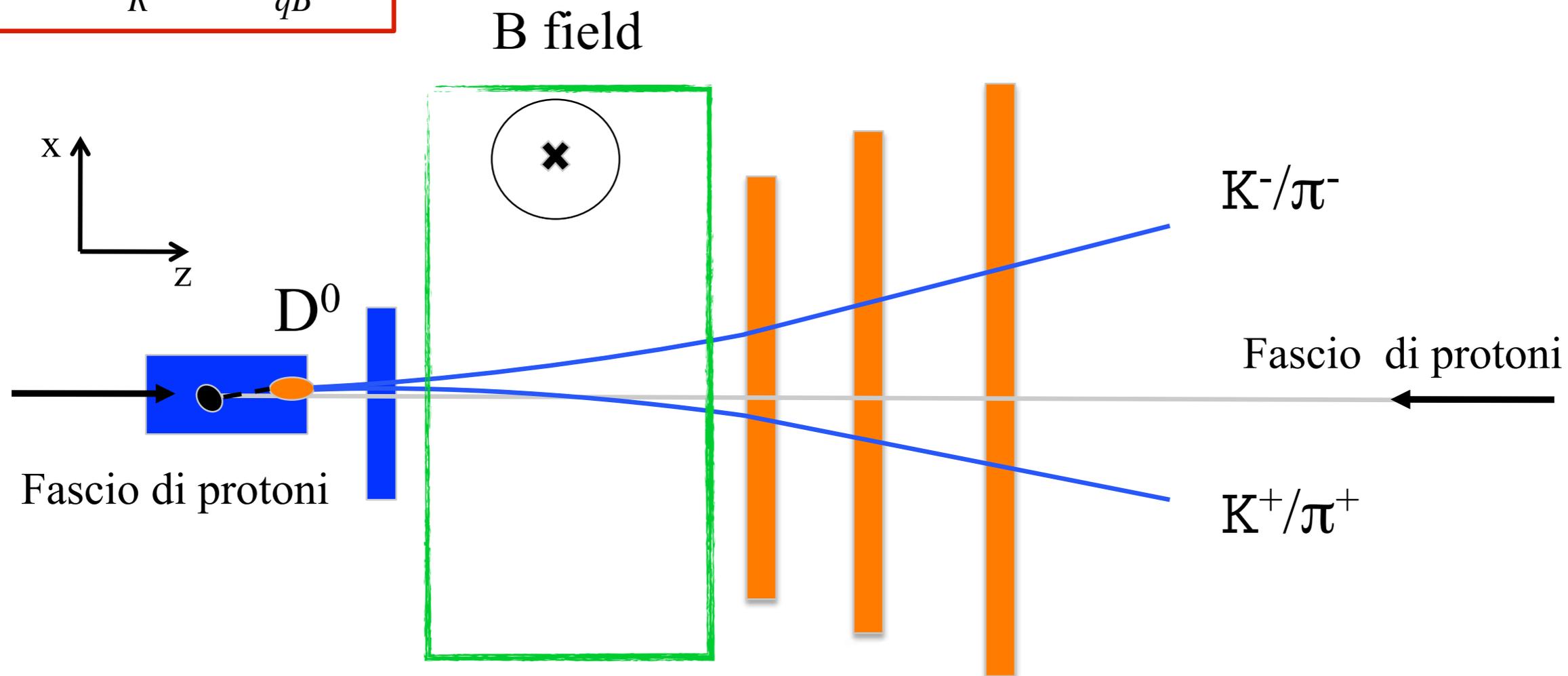
$$qvB = m \frac{v^2}{R} \Rightarrow R = \frac{p}{qB}$$

Forza di Lorentz

Equazione di Newton
per moto circolare

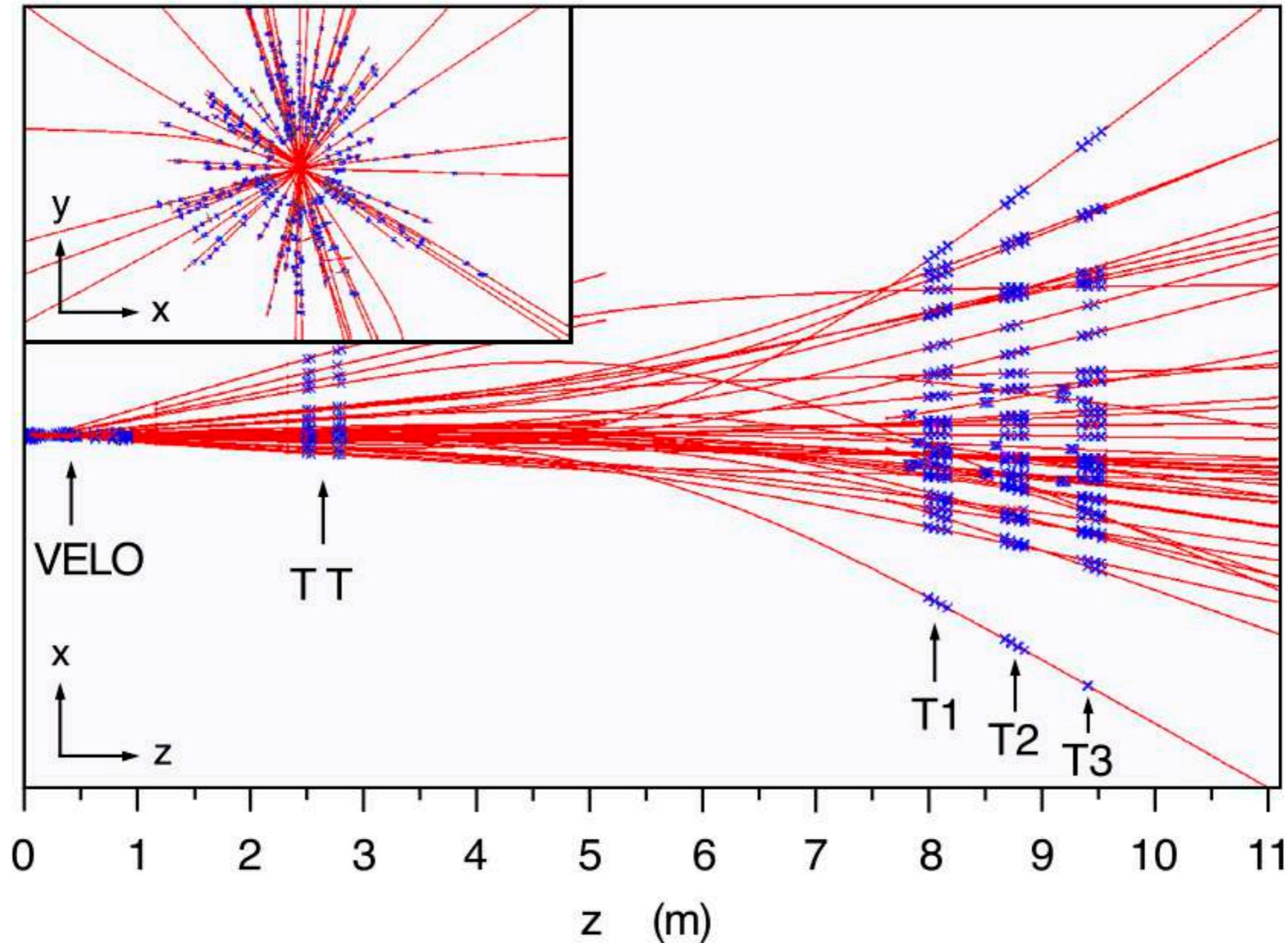
Dal raggio di curvatura R ,
ovvero dalla deflessione θ ,
si ricava l'impulso $p = mv$

$$\theta = \frac{0.3}{p} \int B \cdot dl$$

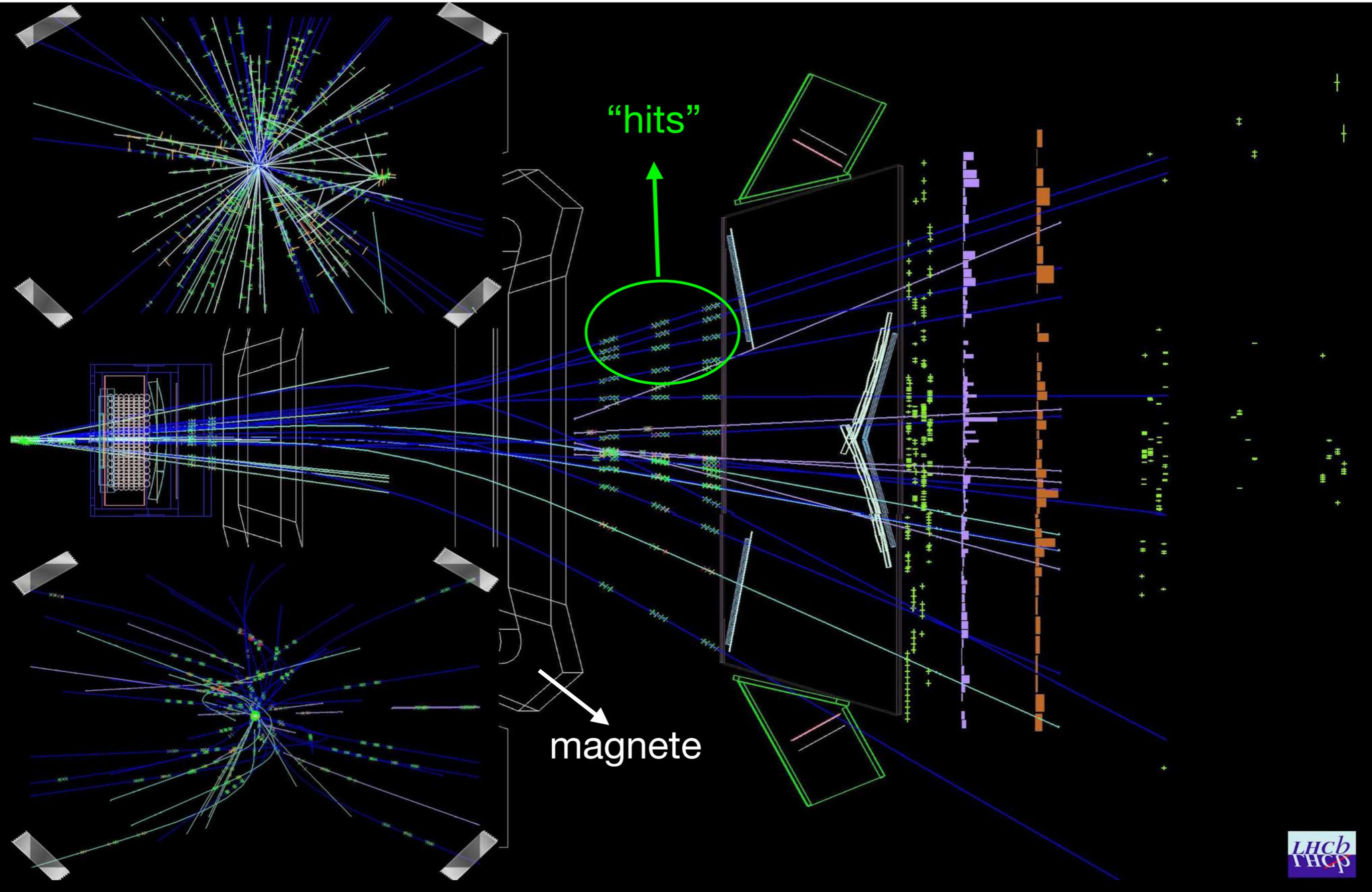


I tracciatori

Rivelatori a strip di silicio / tubi a deriva registrano i punti di passaggio delle particelle ("hits") per ricostruirne la traiettoria



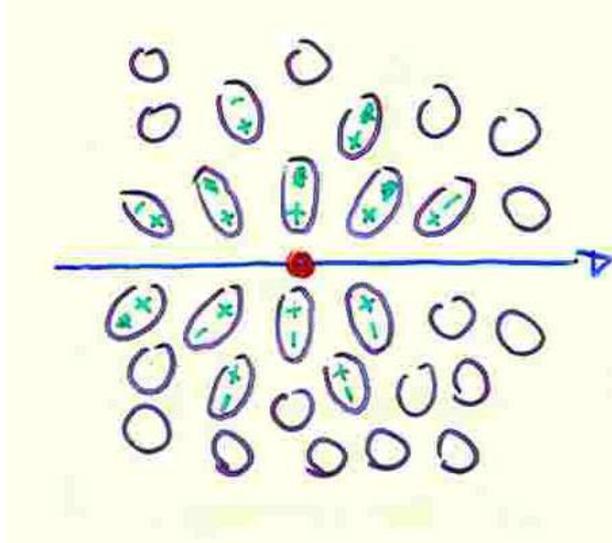
Ricostruzione delle tracce



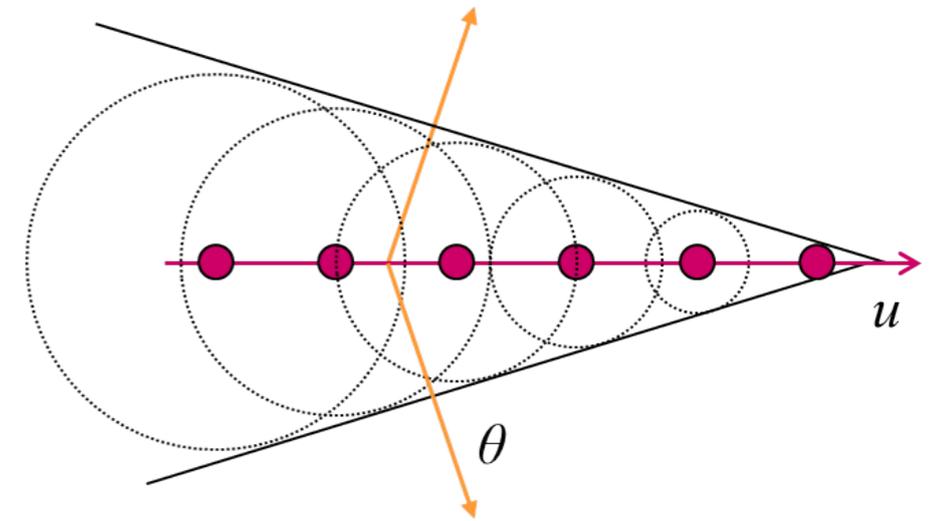
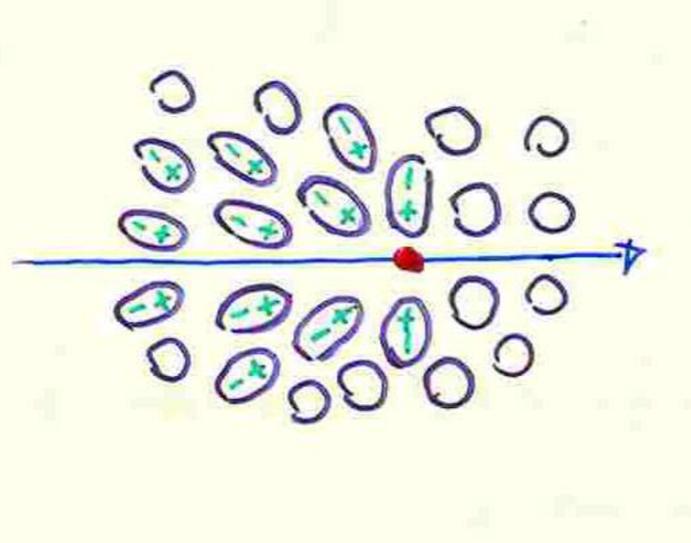
Luce Cherenkov

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

$$v < c/n$$



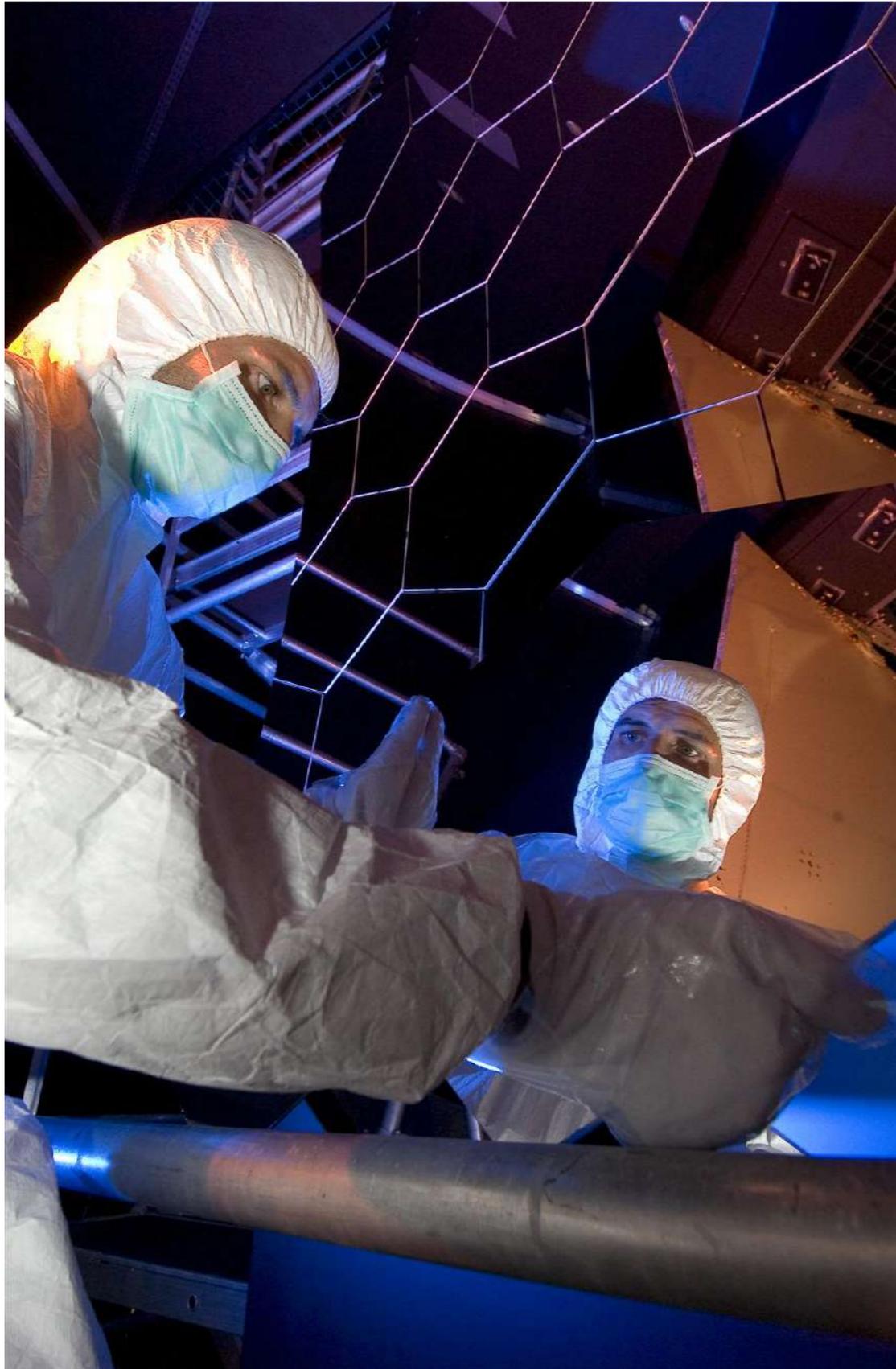
$$v > c/n$$



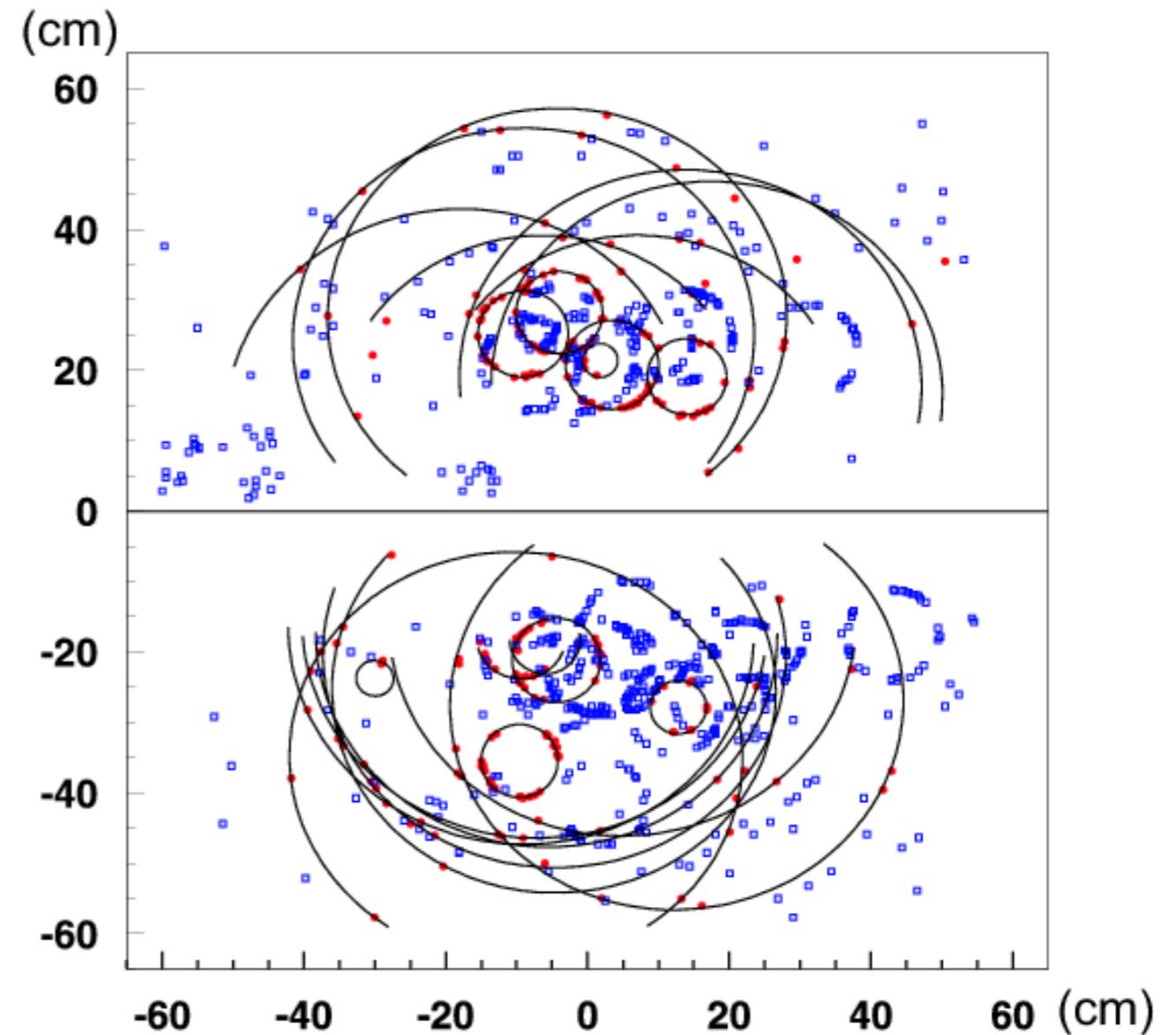
$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta}, \quad \beta = v/c$$

Noto l'impulso $p = mv$ dal tracciamento, misurando v si ricava m

Ring Imaging Cherenkov Detector (RICH)

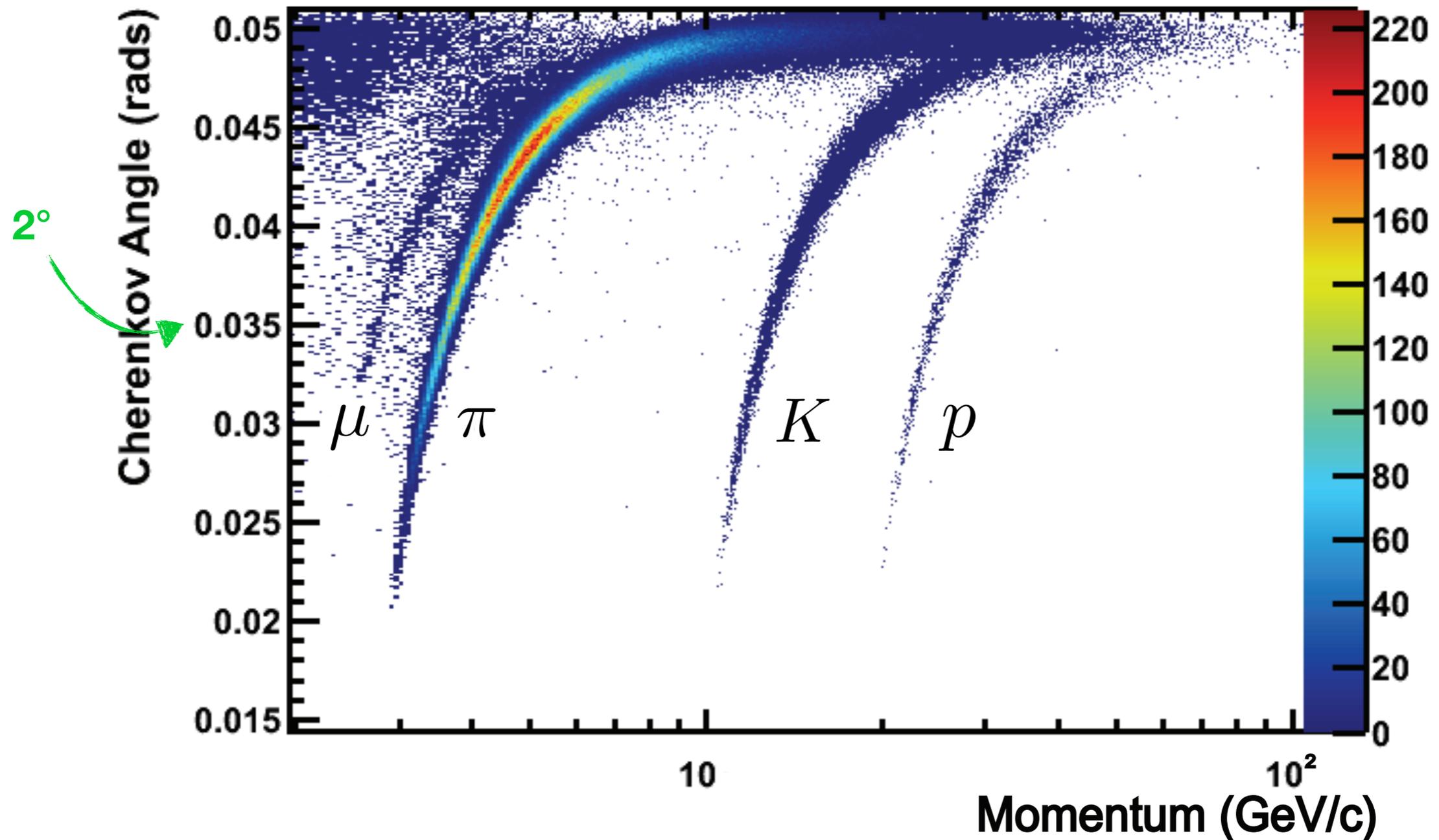


La luce Cherenkov emessa in un gas si riflette sugli specchi e viene convertita in segnale elettrico da fotomoltiplicatori (PMT)



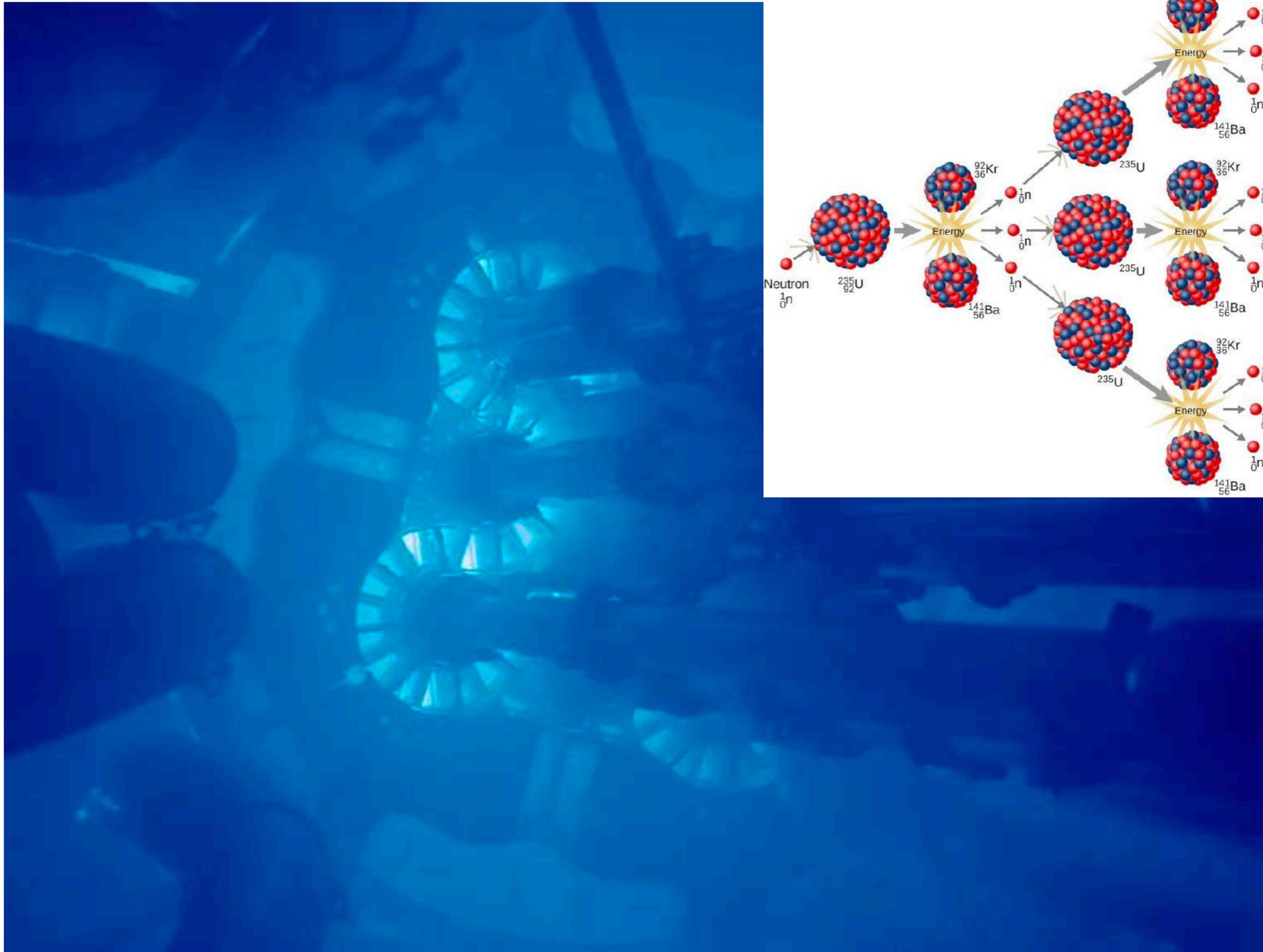
Performance del RICH

π , K , p diverse popolano regioni ben distinte



Luce Cherenkov a occhio nudo

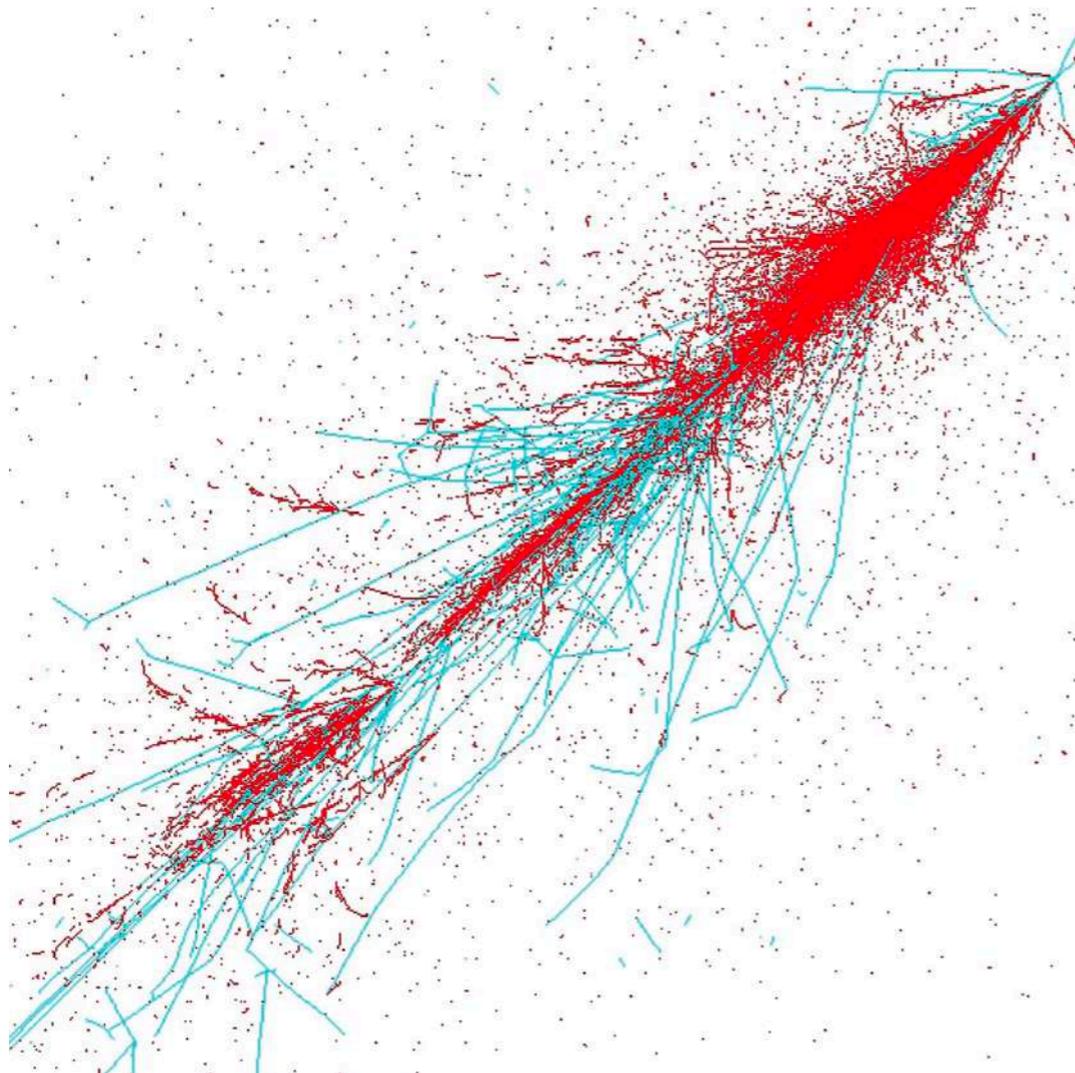
elettroni/positroni emessi dai frammenti nucleari nell'acqua di un reattore



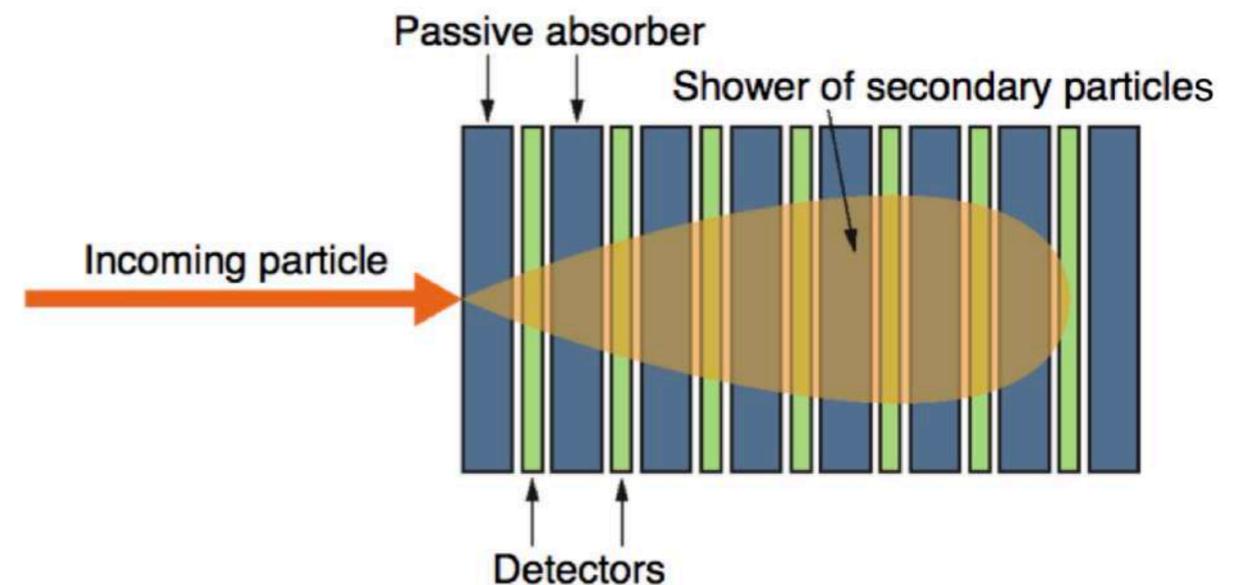
https://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_Test_Reactor

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
- Questo processo è sfruttato per l'identificazione di e^- , γ e particelle neutre

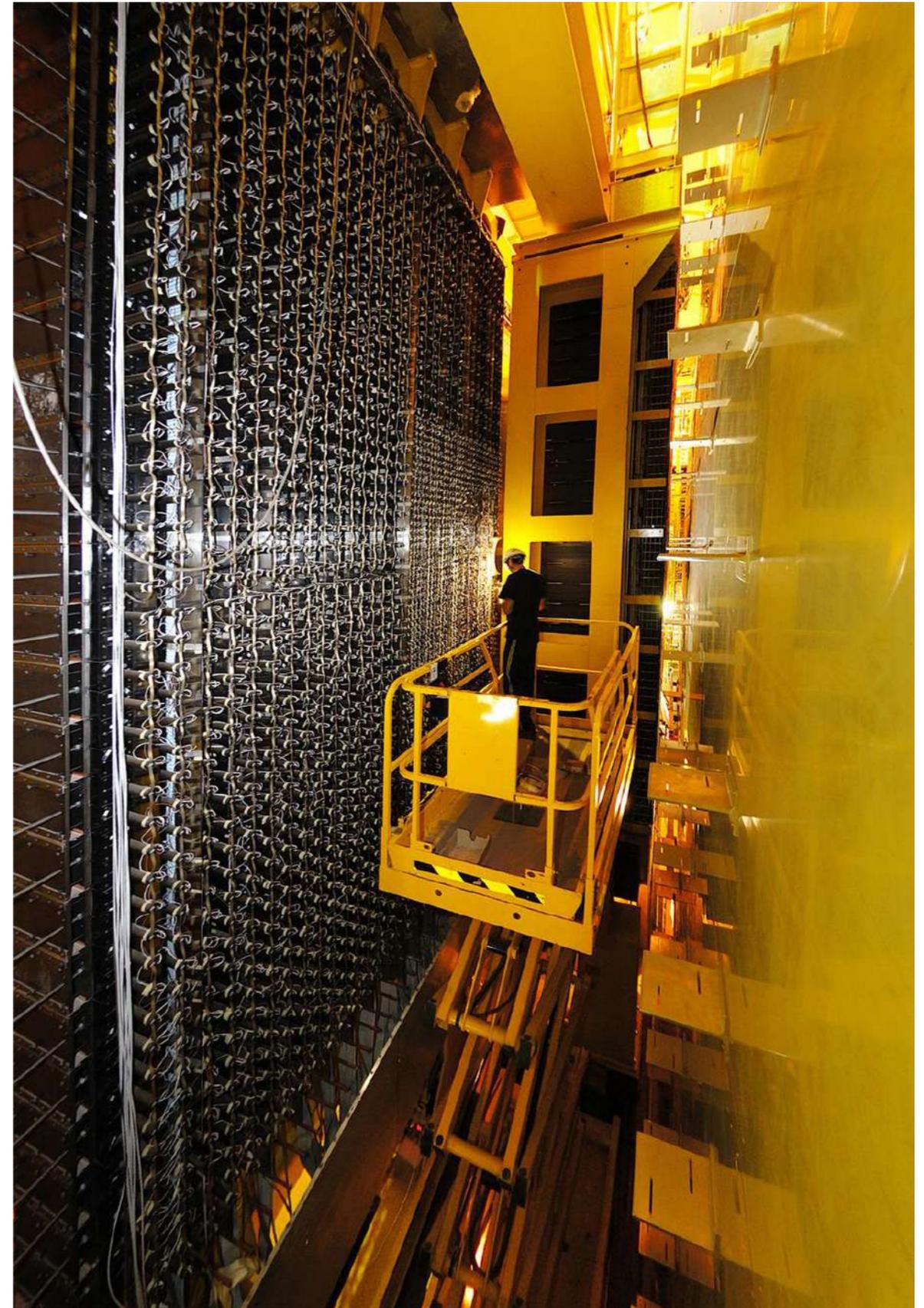
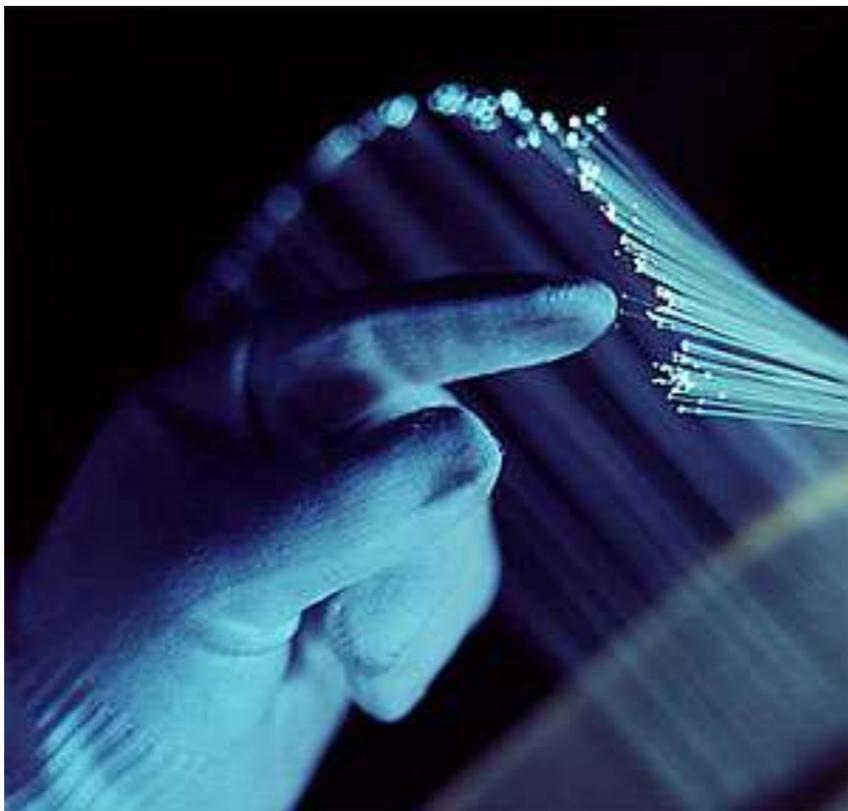


Materiale attivo + passivo: calorimetro a campionamento



I calorimetri di LHCb

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

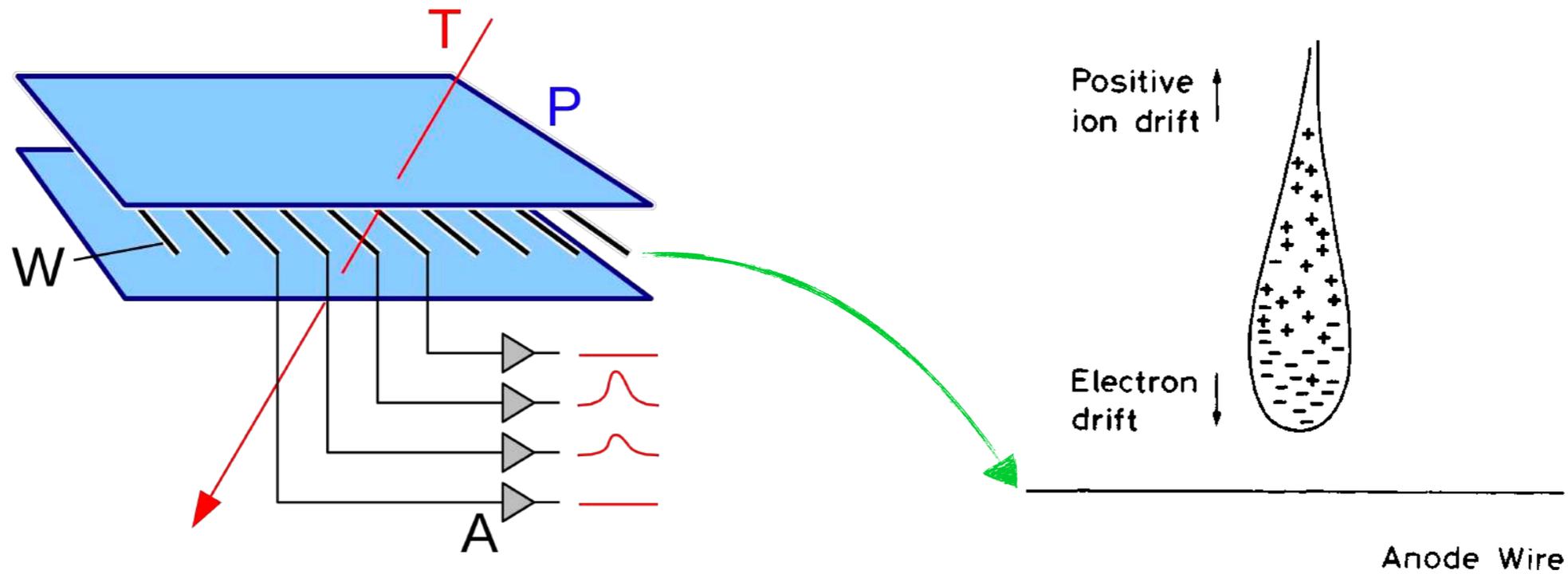


Il rivelatore di muoni

I muoni interagiscono poco: 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

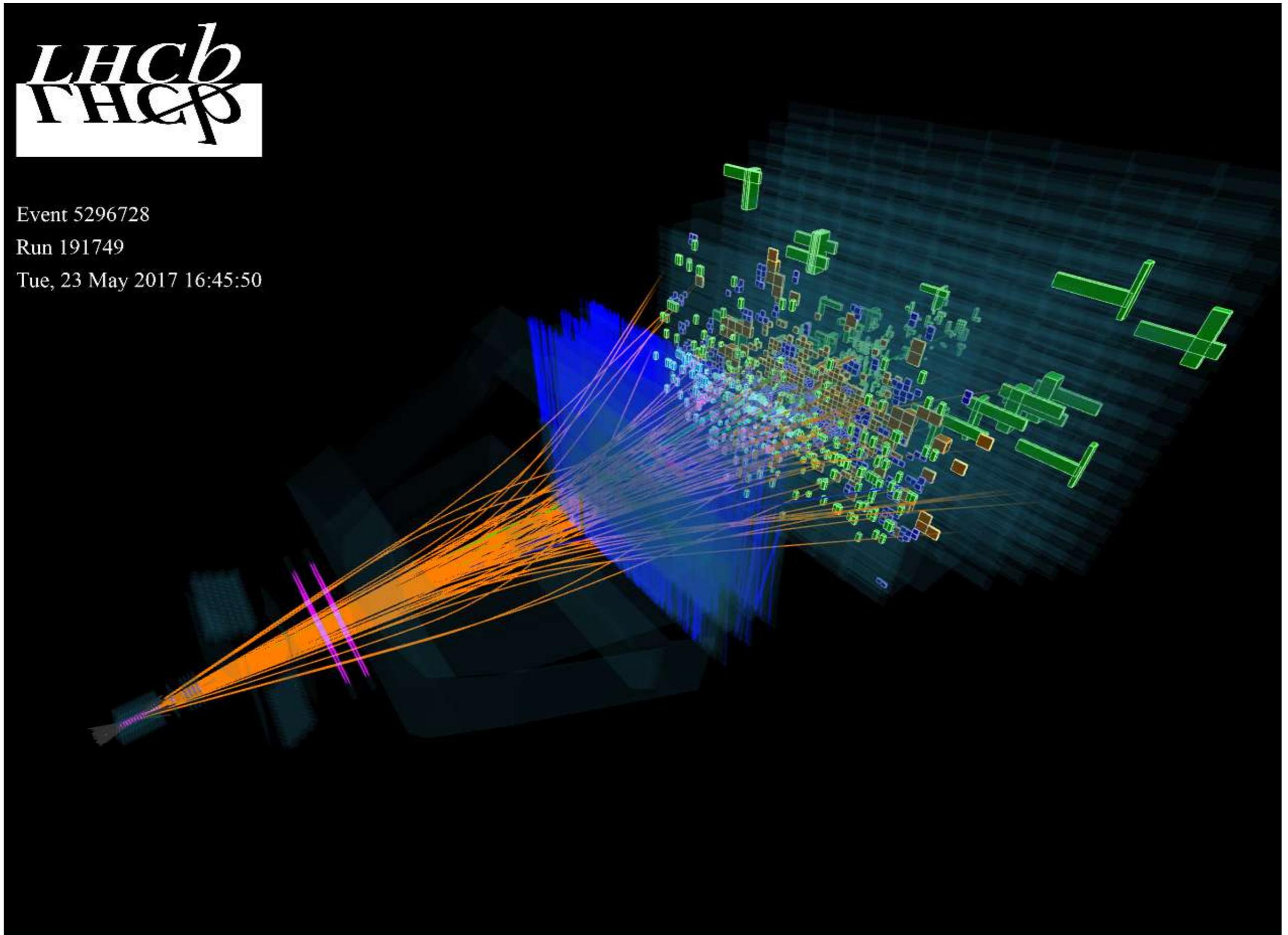


2 piani racchiudono fili conduttori che rivelano la ionizzazione prodotta dai muoni in un gas

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



Event display



Acquisizione dati: il trigger

40 Tb di dati al secondo!



Ricostruzione e selezione eventi
interessanti: Trigger



80 Gb al secondo, salvati su disco

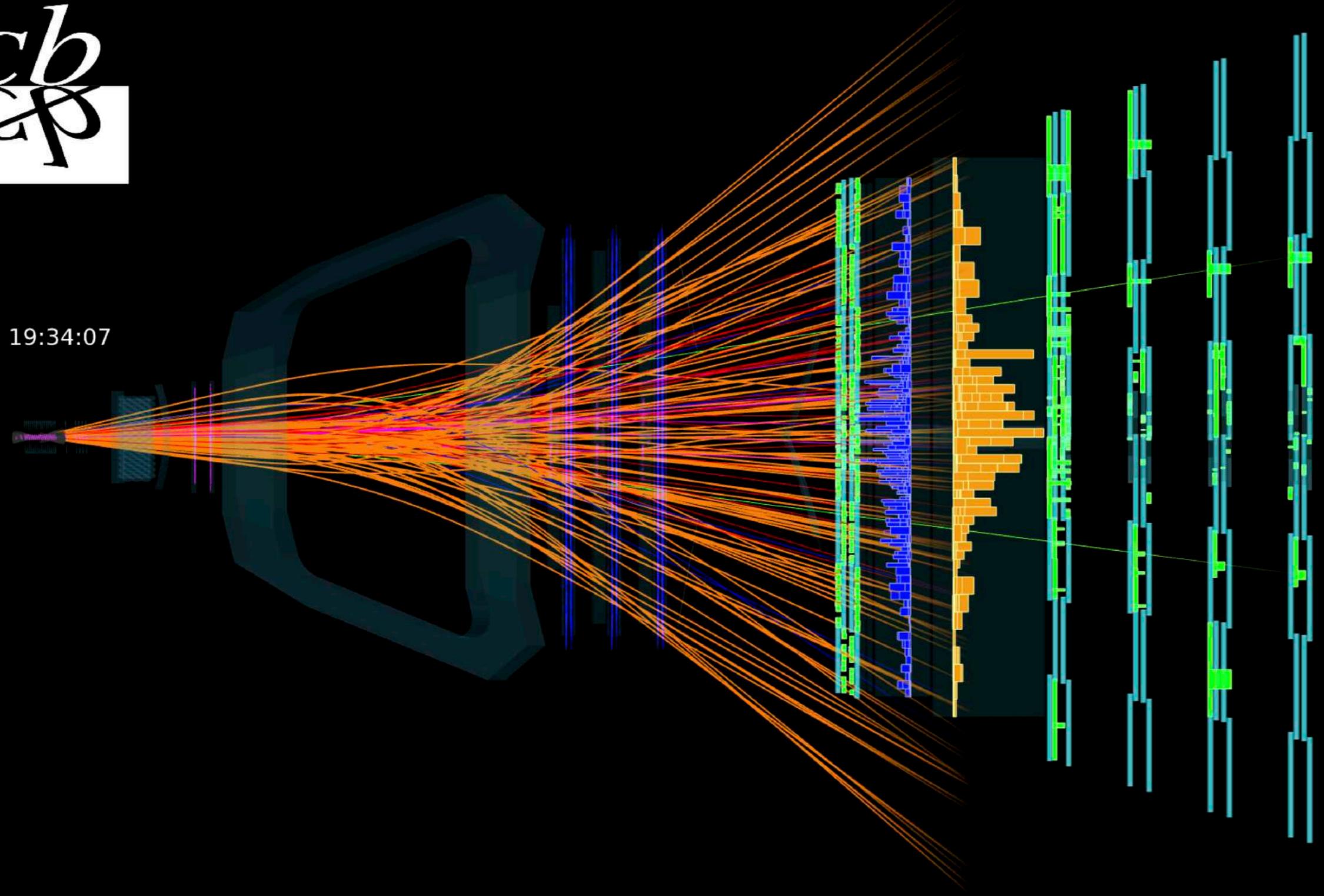
Il trigger prende una decisione rapida in
tempo reale, separata in:

Livello 0 (hardware): implementato
sull'elettronica dei rivelatori

Livello 1 & 2 (software): algoritmi C++
Gestito da una "server farm" di CPU



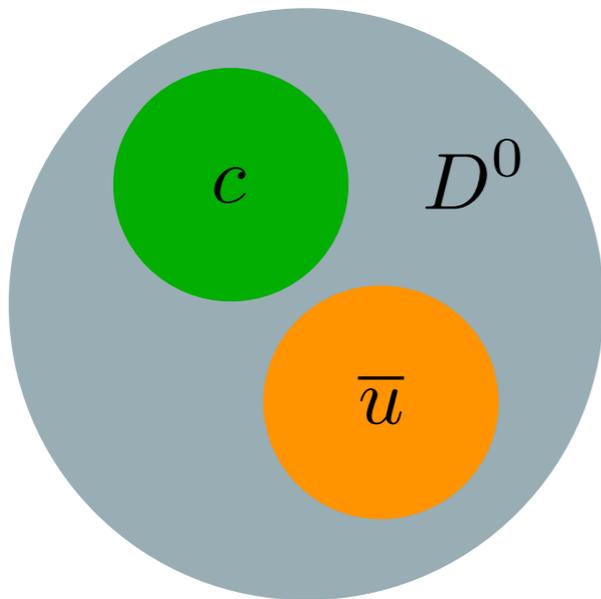
Event 924938
Run 168926
Tue, 01 Dec 2015 19:34:07



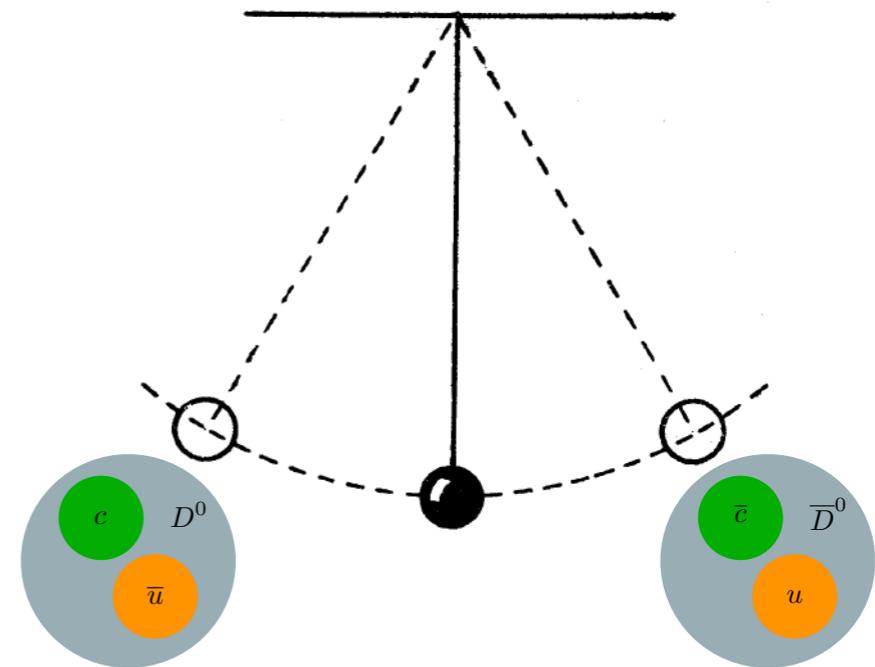
3. Qualche risultato recente

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



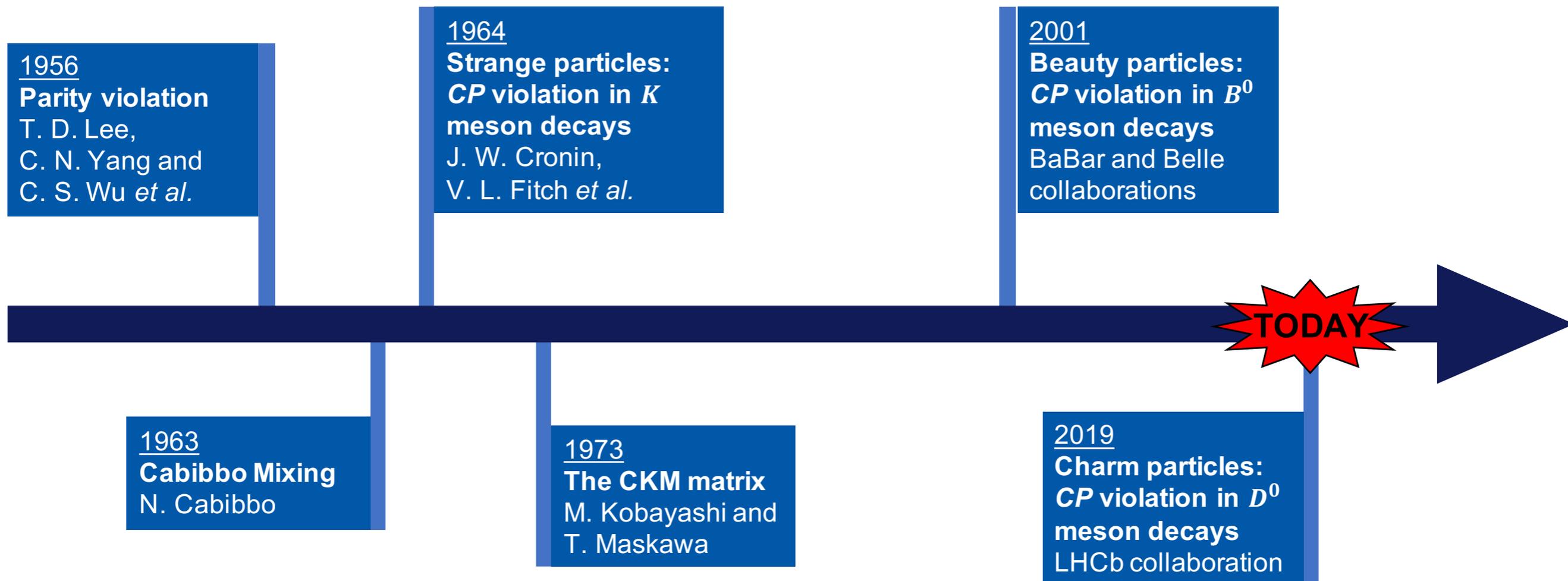
2019: La probabilità di decadimento di D^0 e \bar{D}^0 è diversa: CP è violata!

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

$$\left| D^0 \rightarrow f \right|^2 \neq \left| \bar{D}^0 \rightarrow \bar{f} \right|^2$$

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

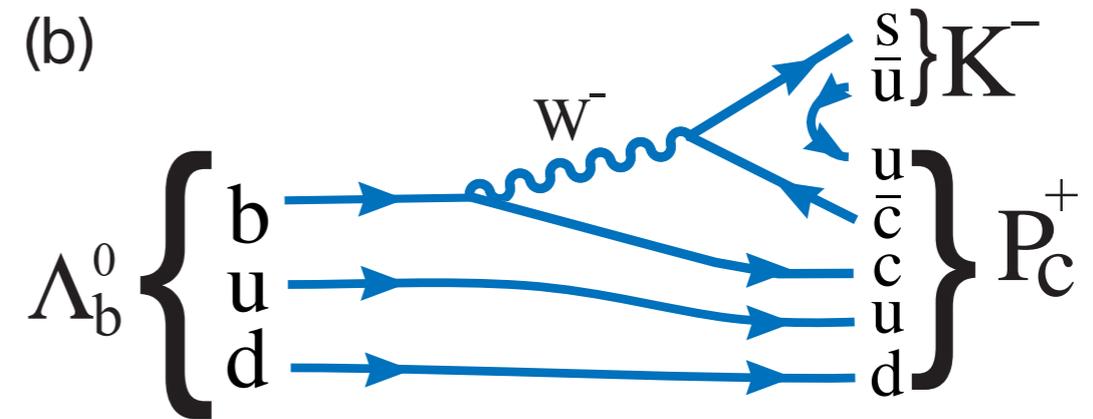
If we assume that the strong interactions of baryons and mesons are correctly described in terms of the broken "eightfold way" ¹⁻³, we are tempted to look for some fundamental explanation of the situation. A highly promised approach is the purely dynamical "bootstrap" model for all the strongly interacting particles within which one may try to derive isotopic spin and strangeness conservation and broken eightfold symmetry from self-consistency alone ⁴). 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" ⁶) 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

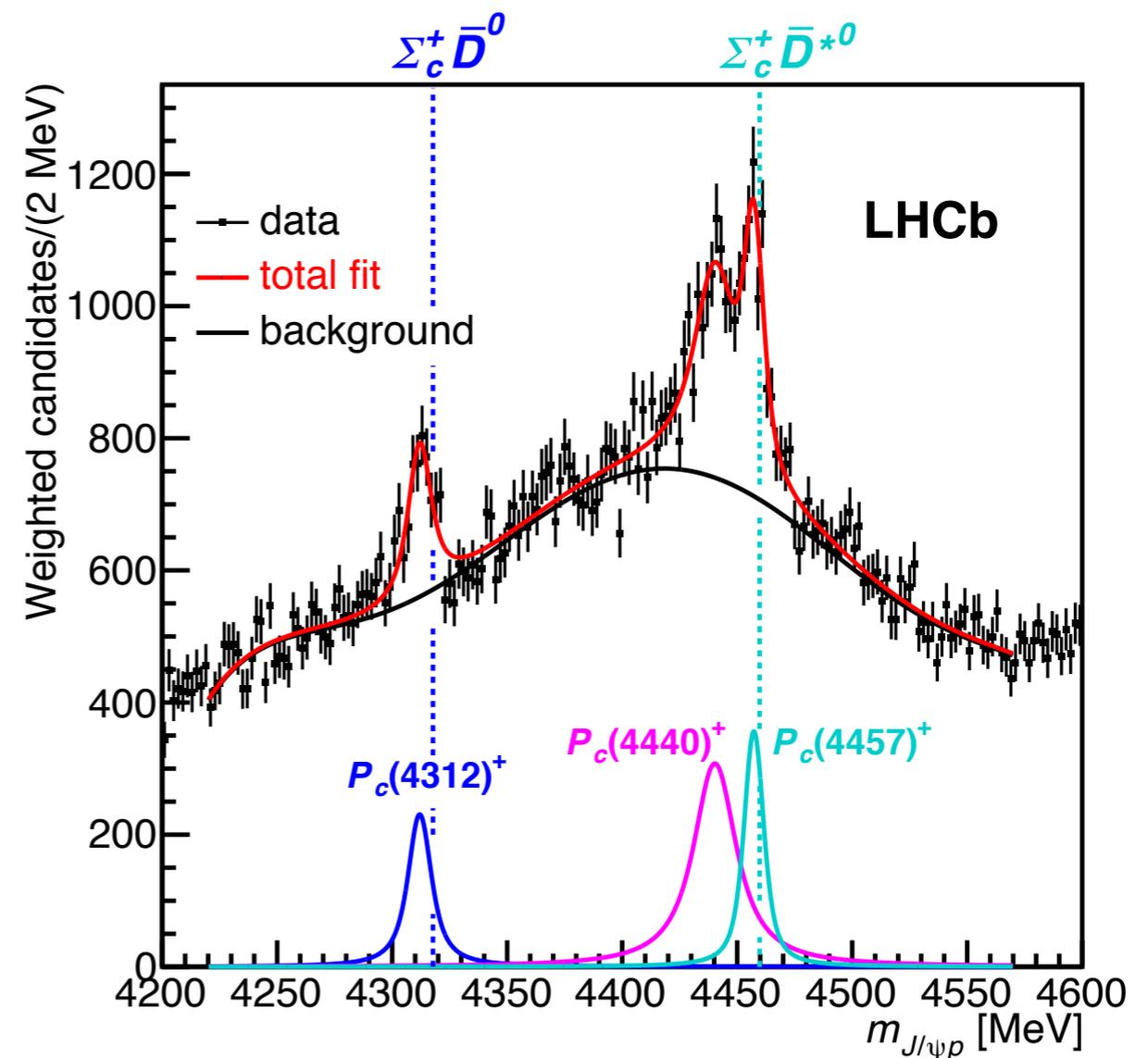
2015: scoperta a LHCb di 2 stati a 5 quark nei decadimenti della Λ_b^0



2019: un altro pentaquark nascosto!

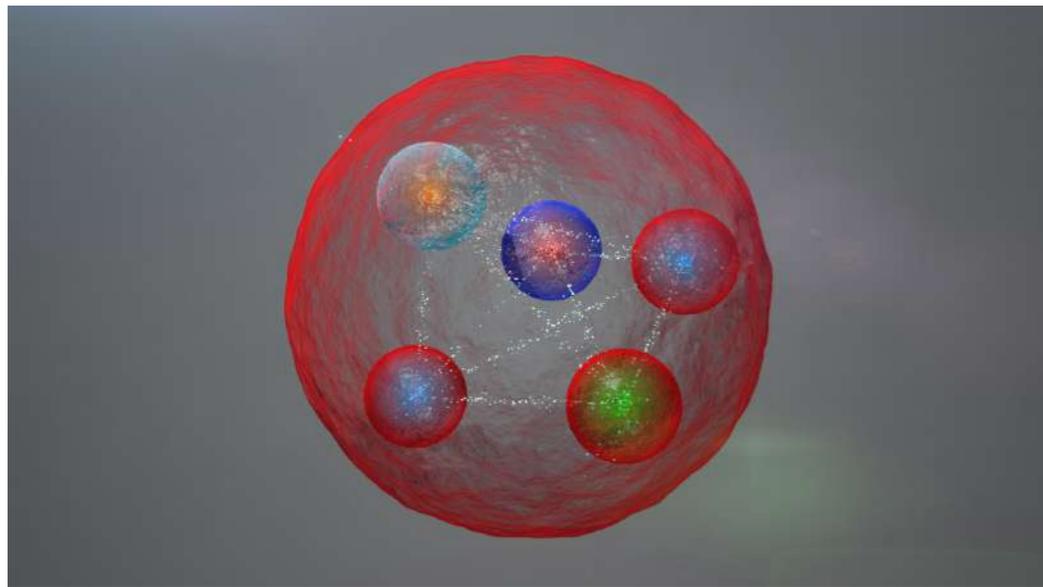
2021: scoperta dello stato T_{cc}^+ ($cc\bar{u}\bar{d}$)

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

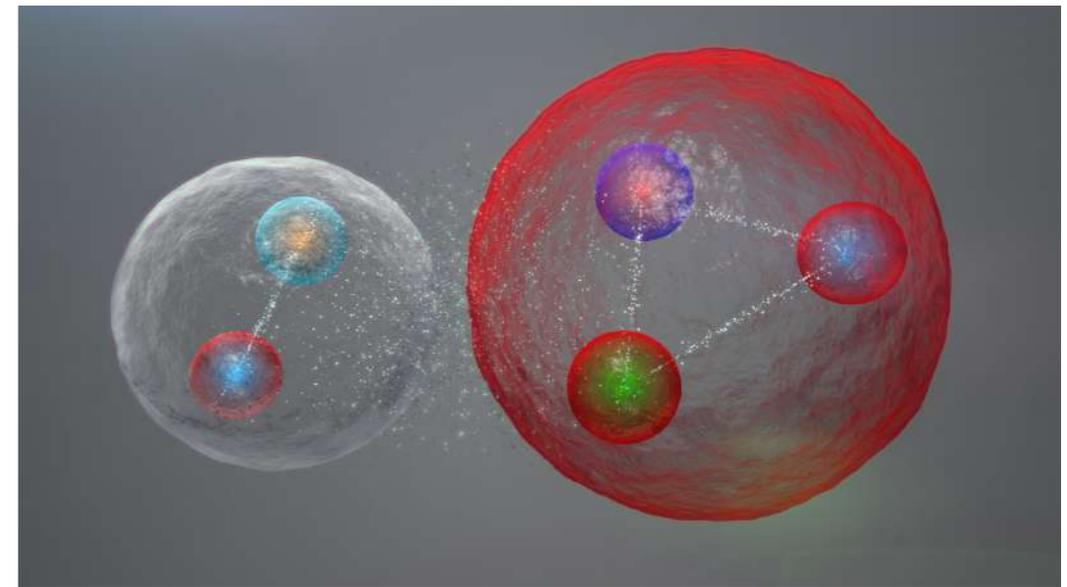


Come si legano i quark?

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



5 quark fortemente legati?



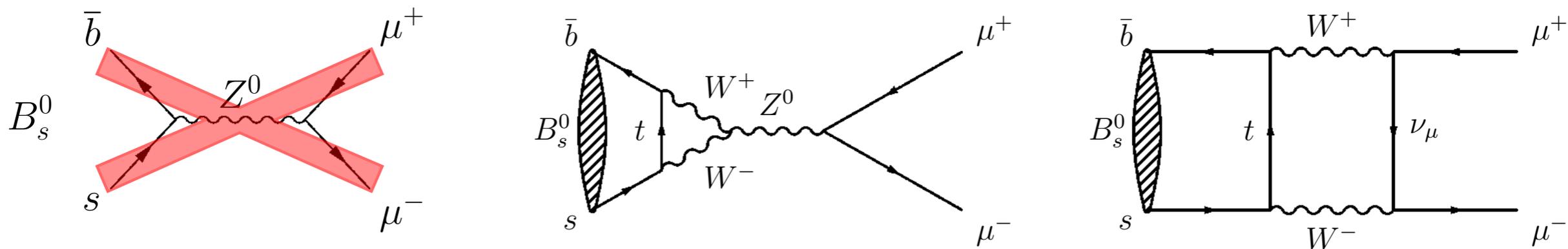
Una “molecola” mesone + barione?

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

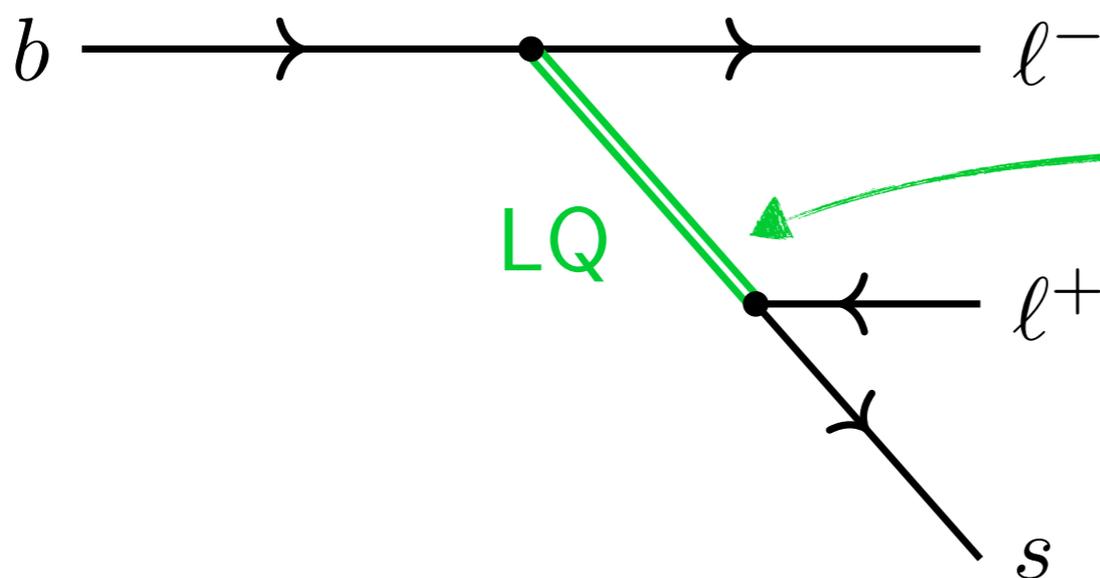
Nota: >99% della nostra massa è data proprio dall'interazione forte!

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 $b \rightarrow sl^+l^-$:

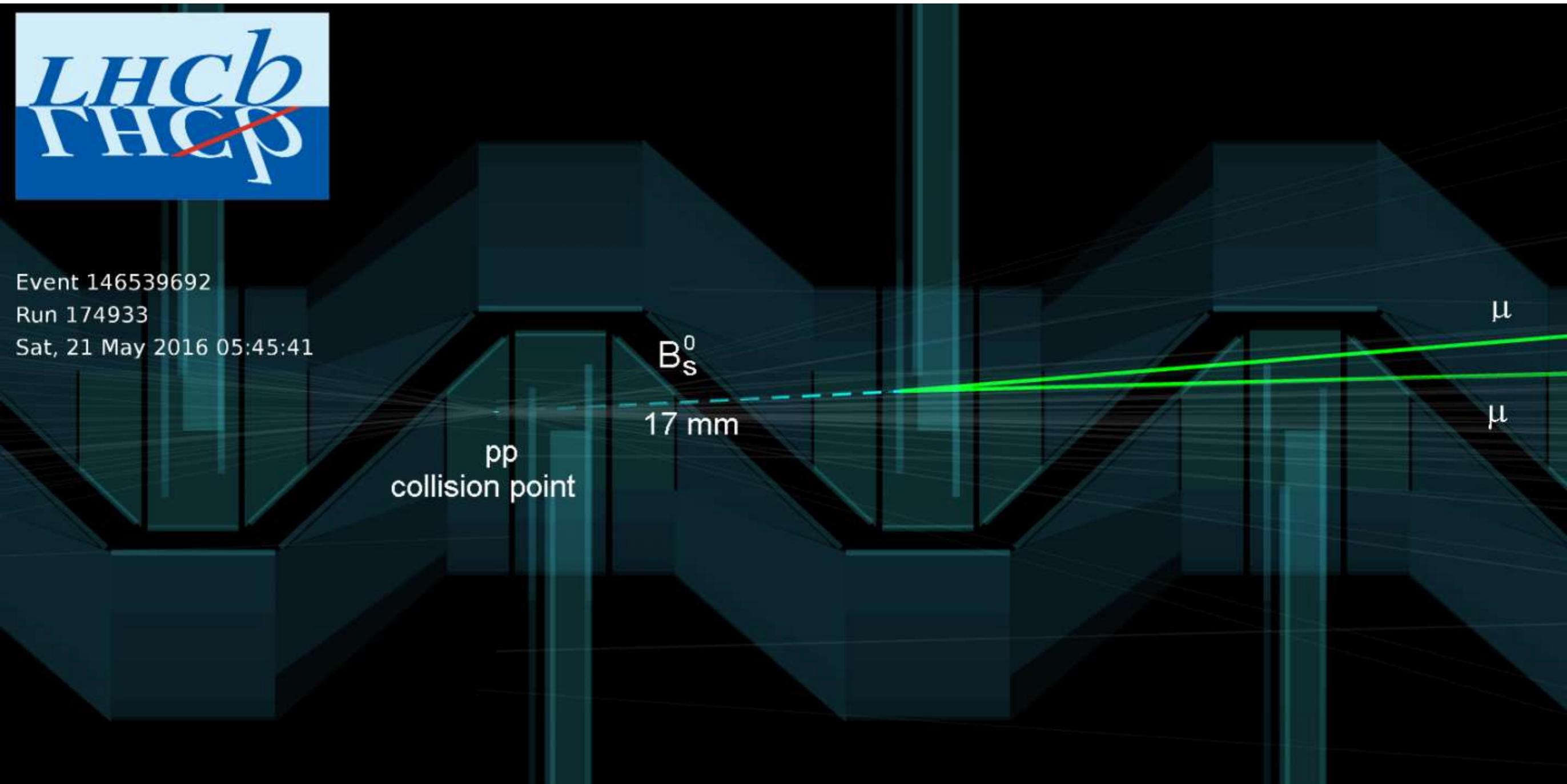


Il decadimento è alterato se ci sono Nuove particelle

→ ricerca indiretta di “Nuova Fisica”

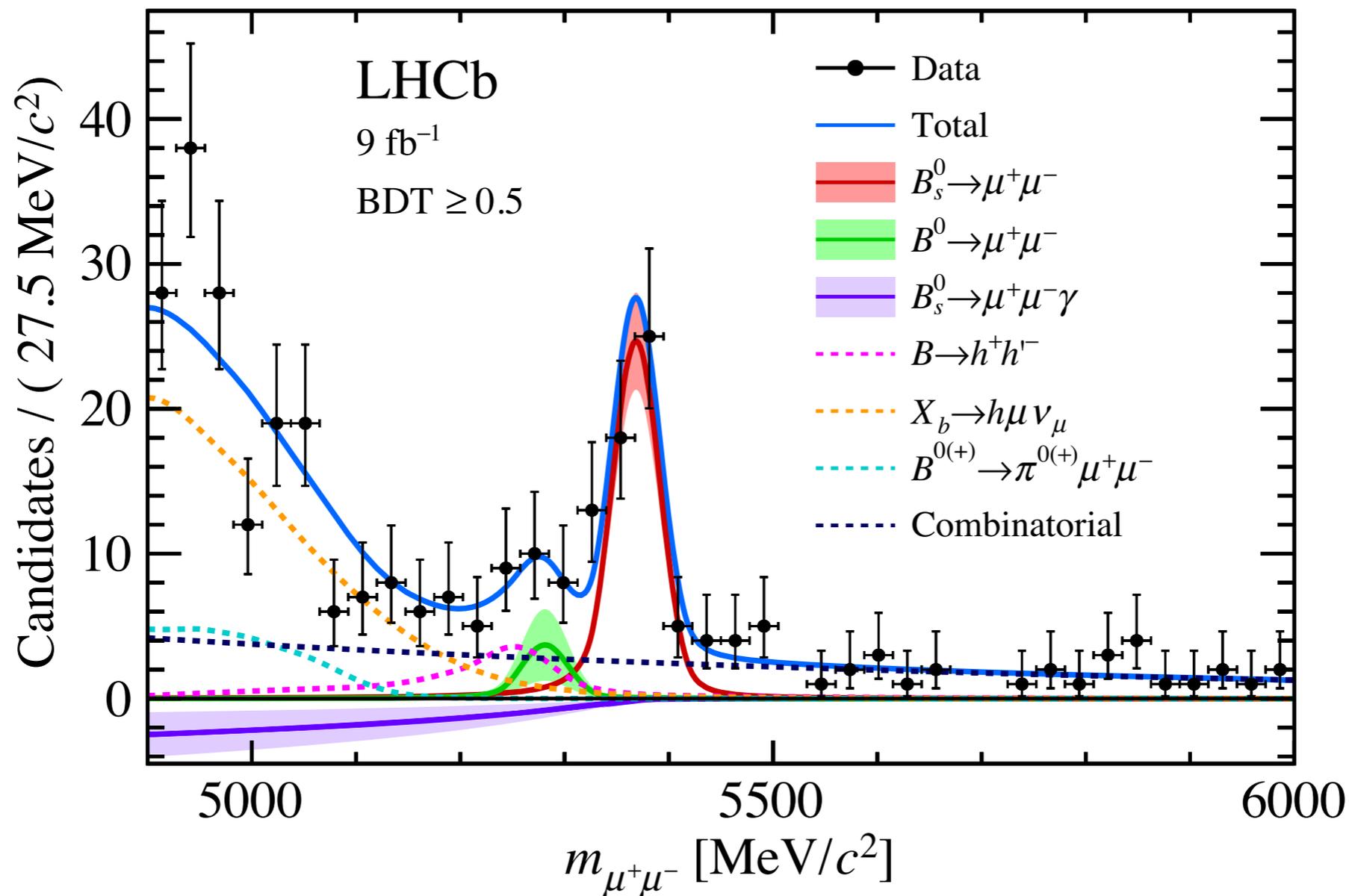
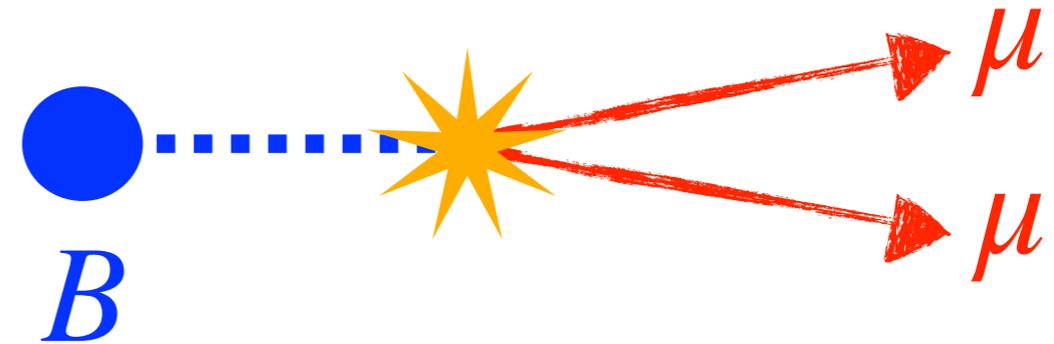
$B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$: event display

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 $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ con precisione: la frequenza è compatibile con quella predetta dal Modello Standard

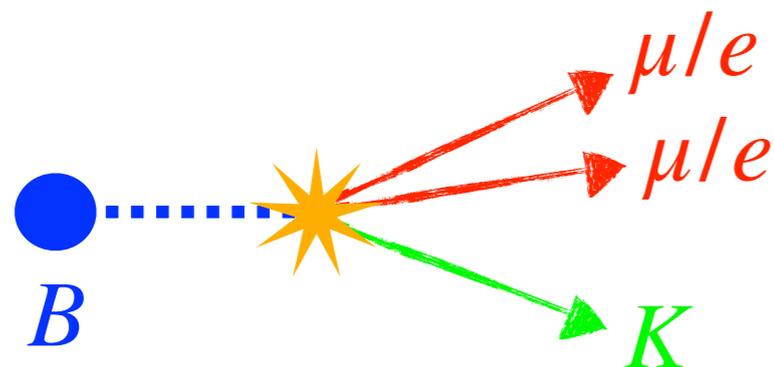


Le “anomalie”

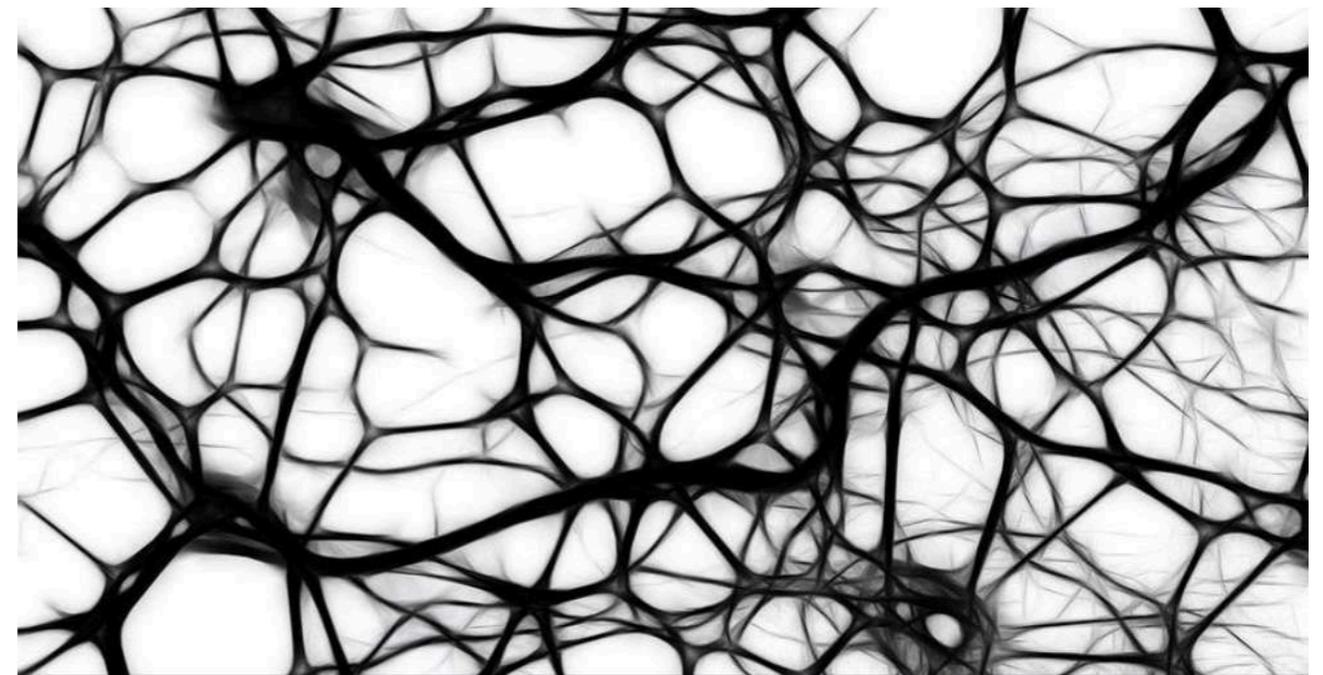
Da circa 10 anni però, vari altri decadimenti dei mesoni B mostrano delle anomalie...

In particolare, $B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-$ sembra comportarsi in un modo che non sappiamo spiegare con il Modello Standard!

2021 misura di precisione di LHCb:
Il rapporto tra decadimento in elettroni
rispetto a muoni è diverso da 1!



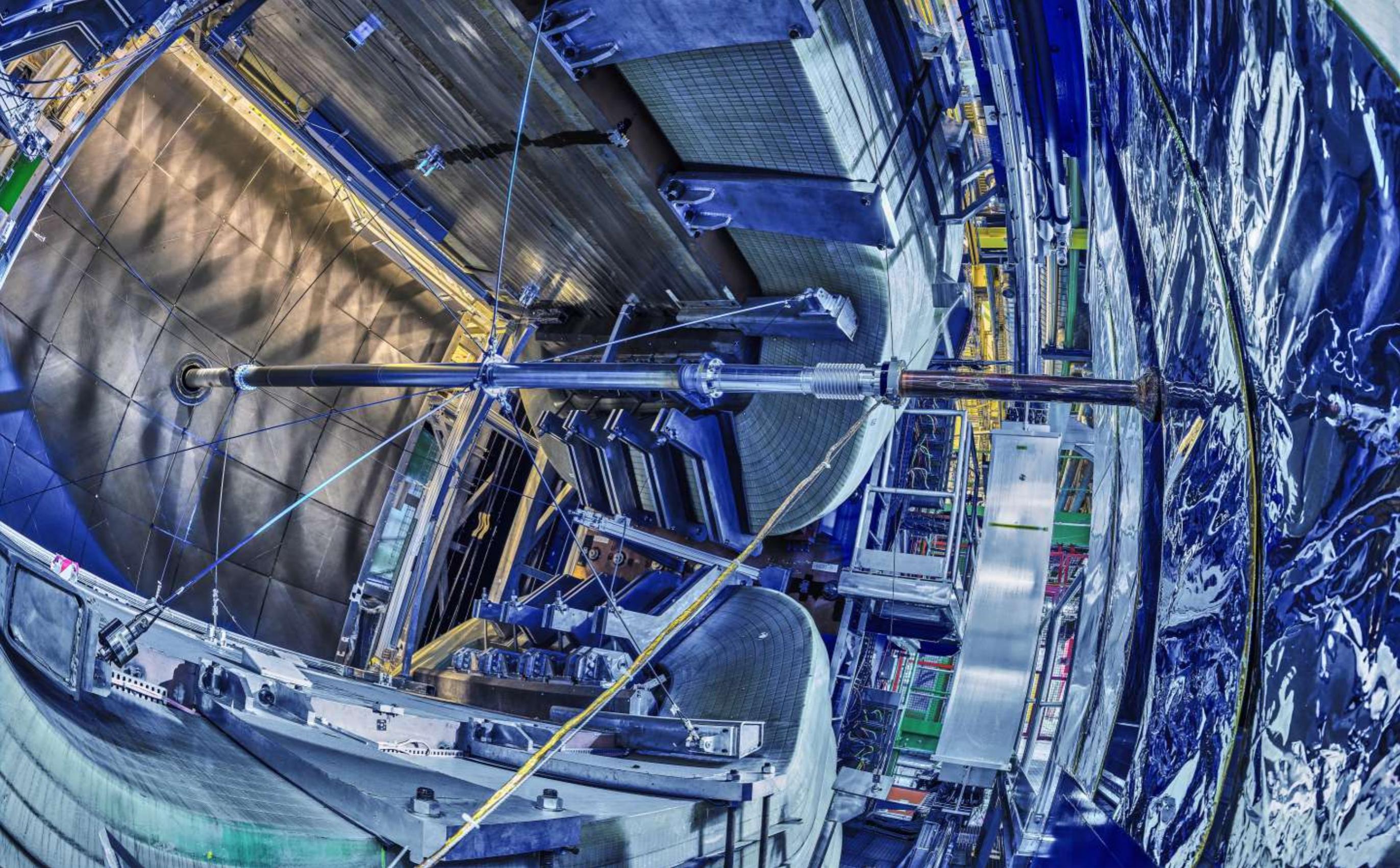
$$R_K = 0.846^{+0.042}_{-0.039} \text{ (stat)}^{+0.013}_{-0.012} \text{ (syst)}$$



LASTAMPA.IT

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

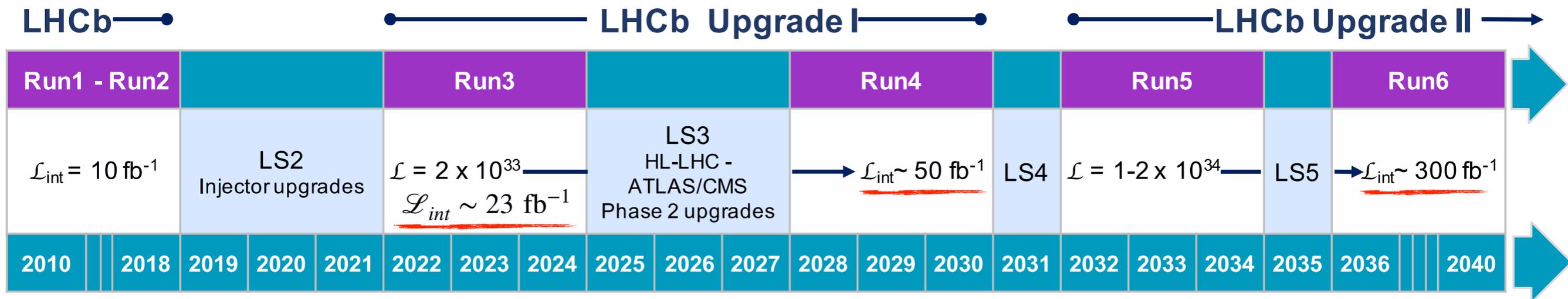
un po' avventato... servono più dati per
confermare il risultato!



4. Upgrade di LHCb

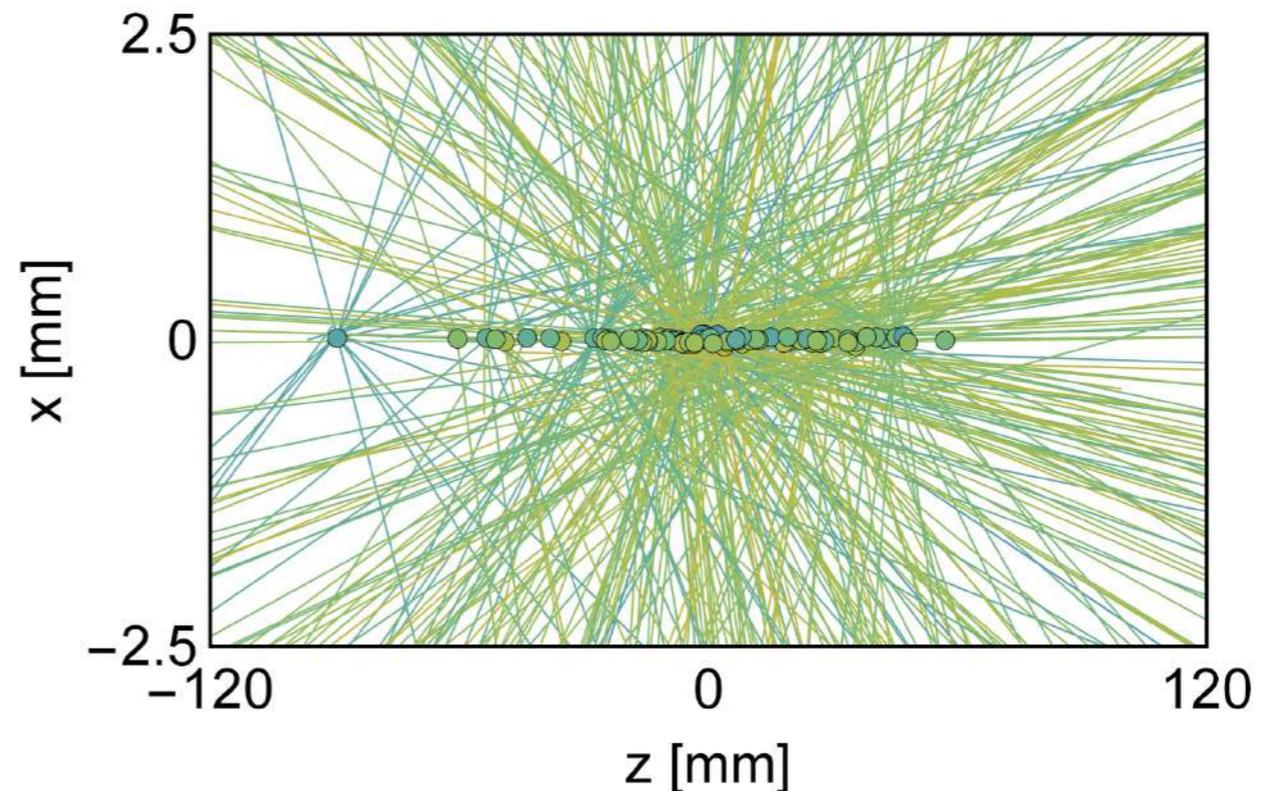
Tabella di marcia

Periodi di presa dati (“Run”) alternati a “Shutdown” per migliorare LHC e i rivelatori

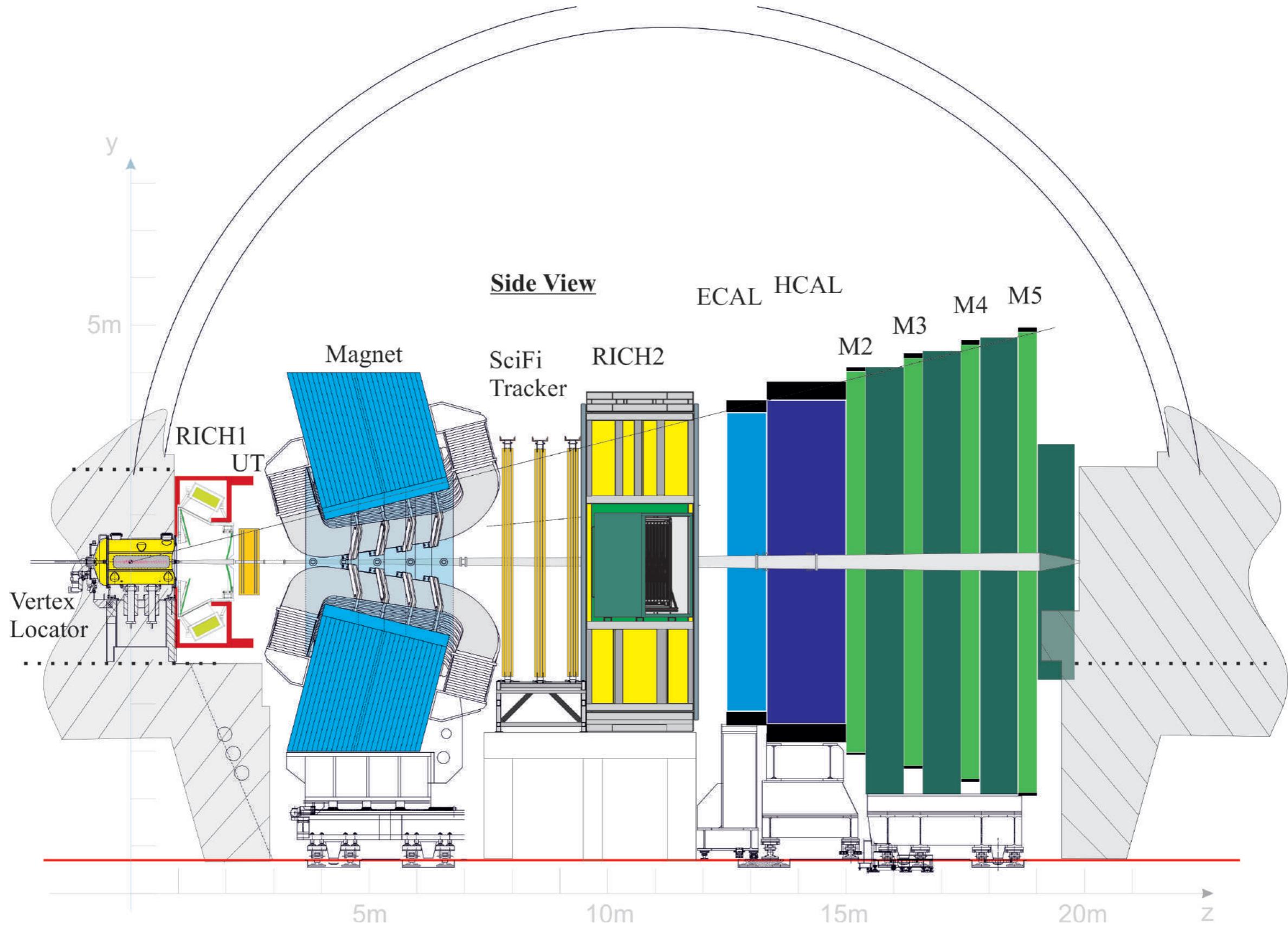


Terminati gli interventi, ci prepariamo a ripartire per il Run 3

- Nel Run 3 LHC produrrà 5 volte più collisioni
- Eseguiti interventi hardware sostanziali per raccogliere dati ad **alta luminosità**



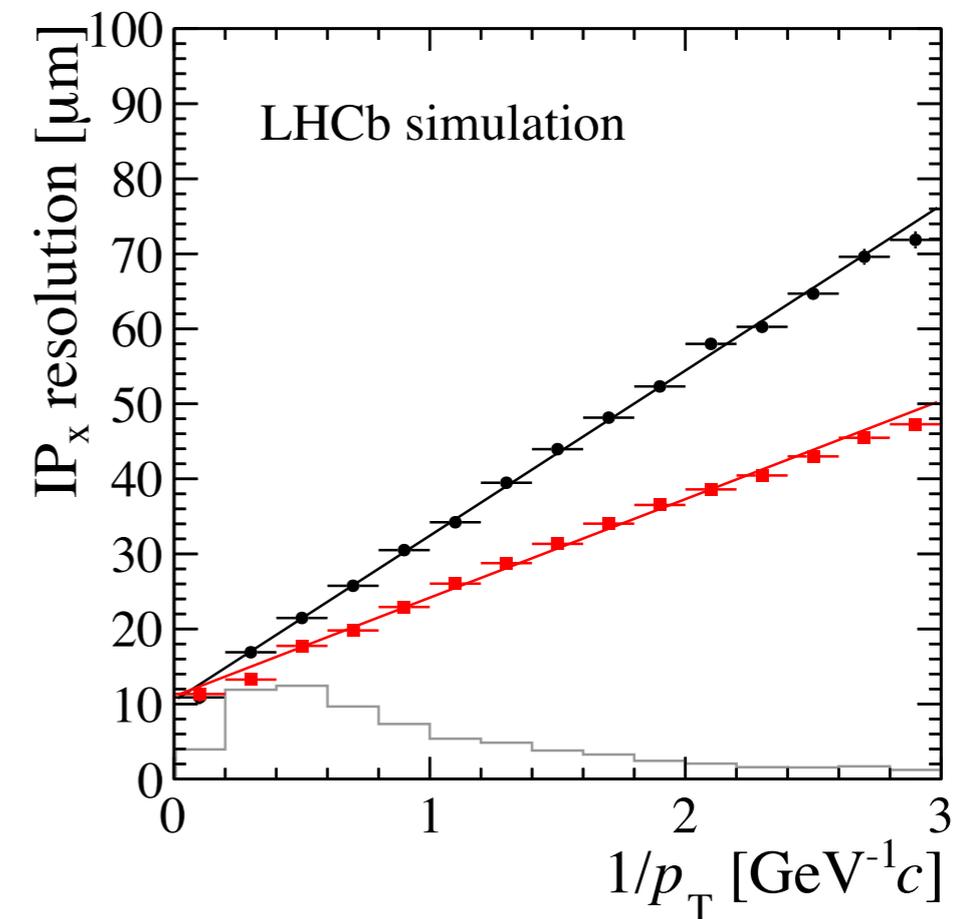
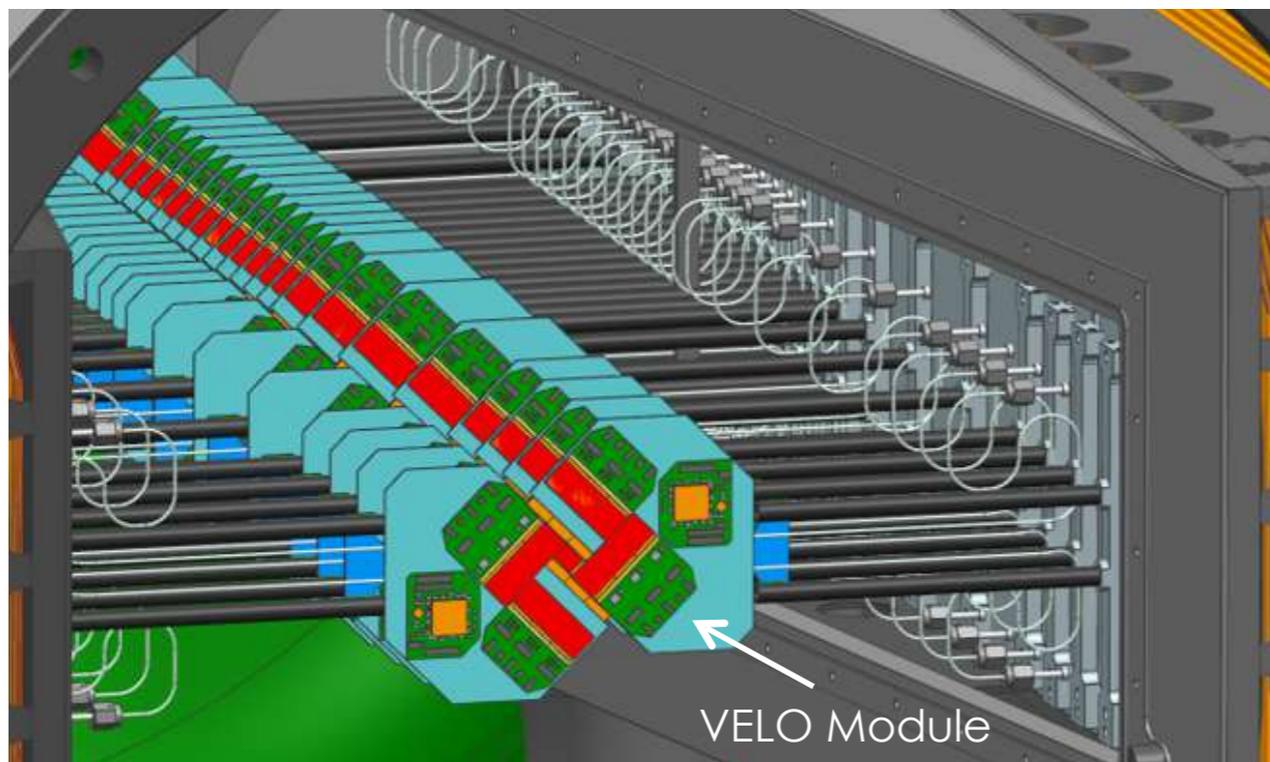
Schema del rivelatore nel Run 3



Il nuovo rivelatore di vertice

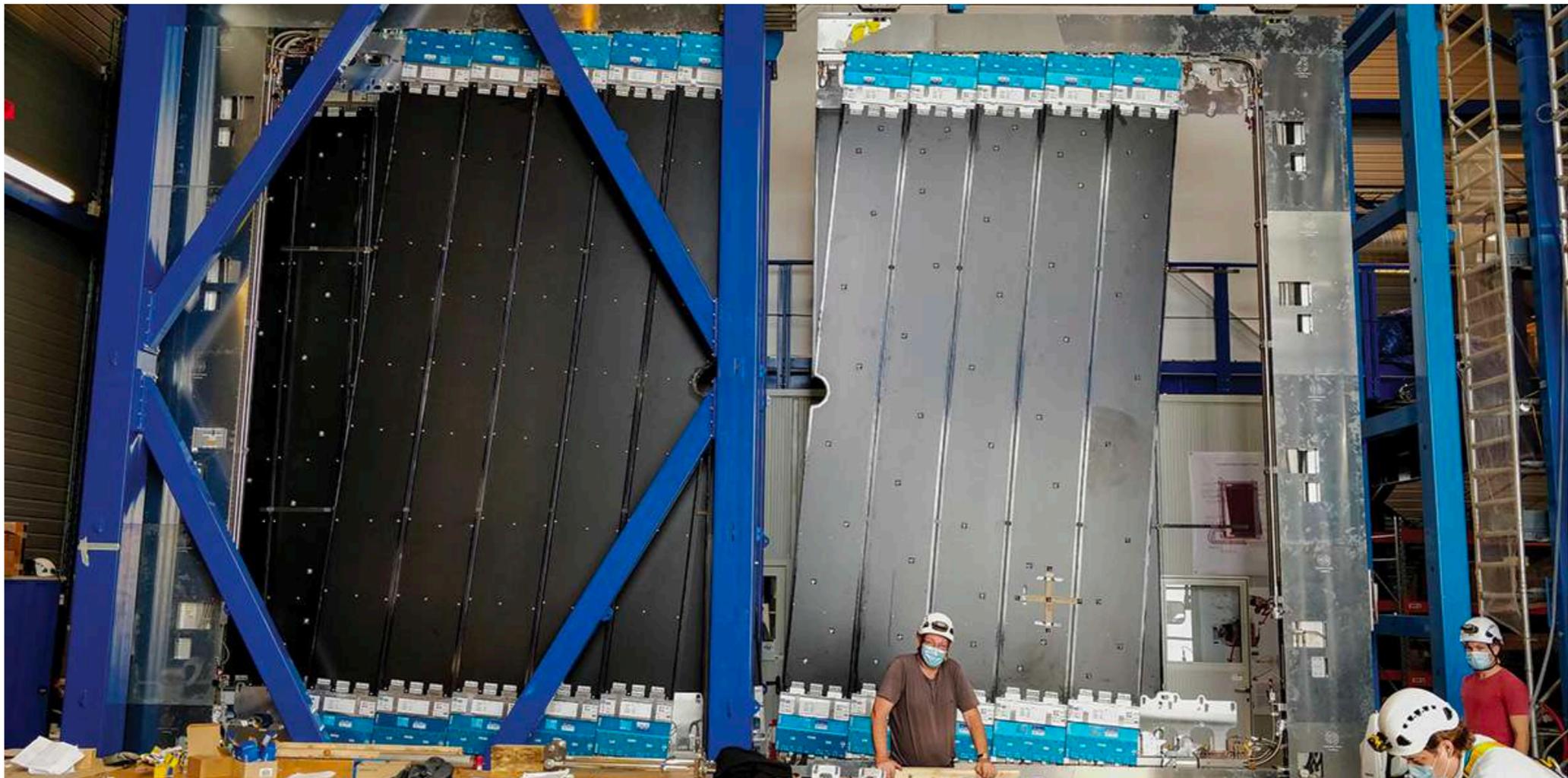
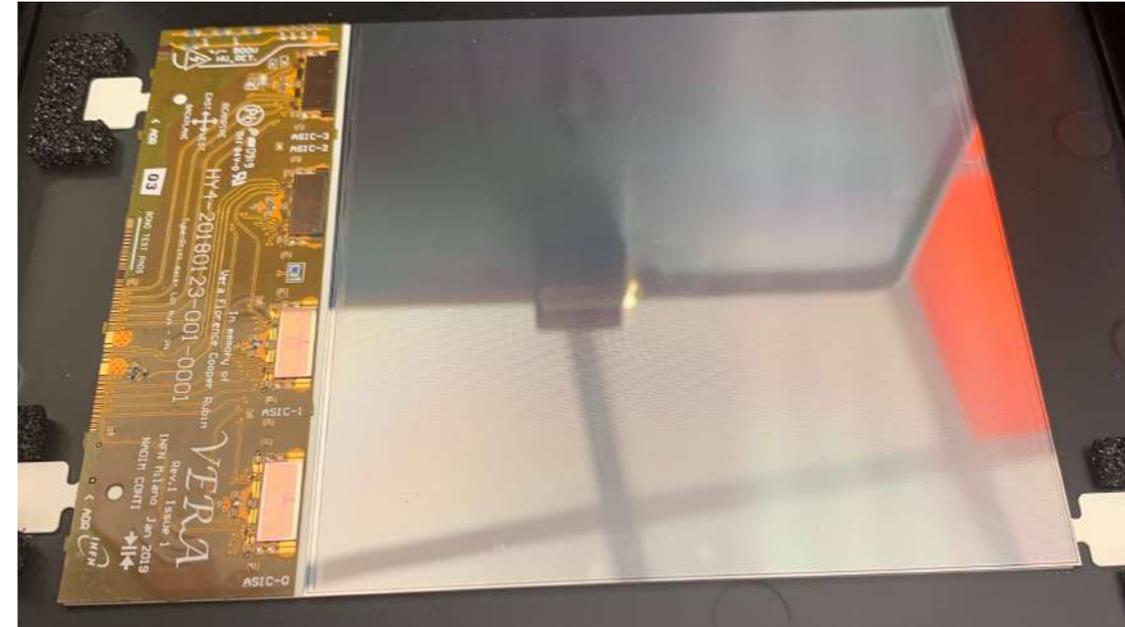
VELOpix:

- Strip \rightarrow pixel di silicio. 41M di pixel da $55 \times 55 \mu\text{m}^2$
- 5 mm \rightarrow 3 mm dal fascio (riduzione della distanza estrapolata)
- Migliore risoluzione spaziale



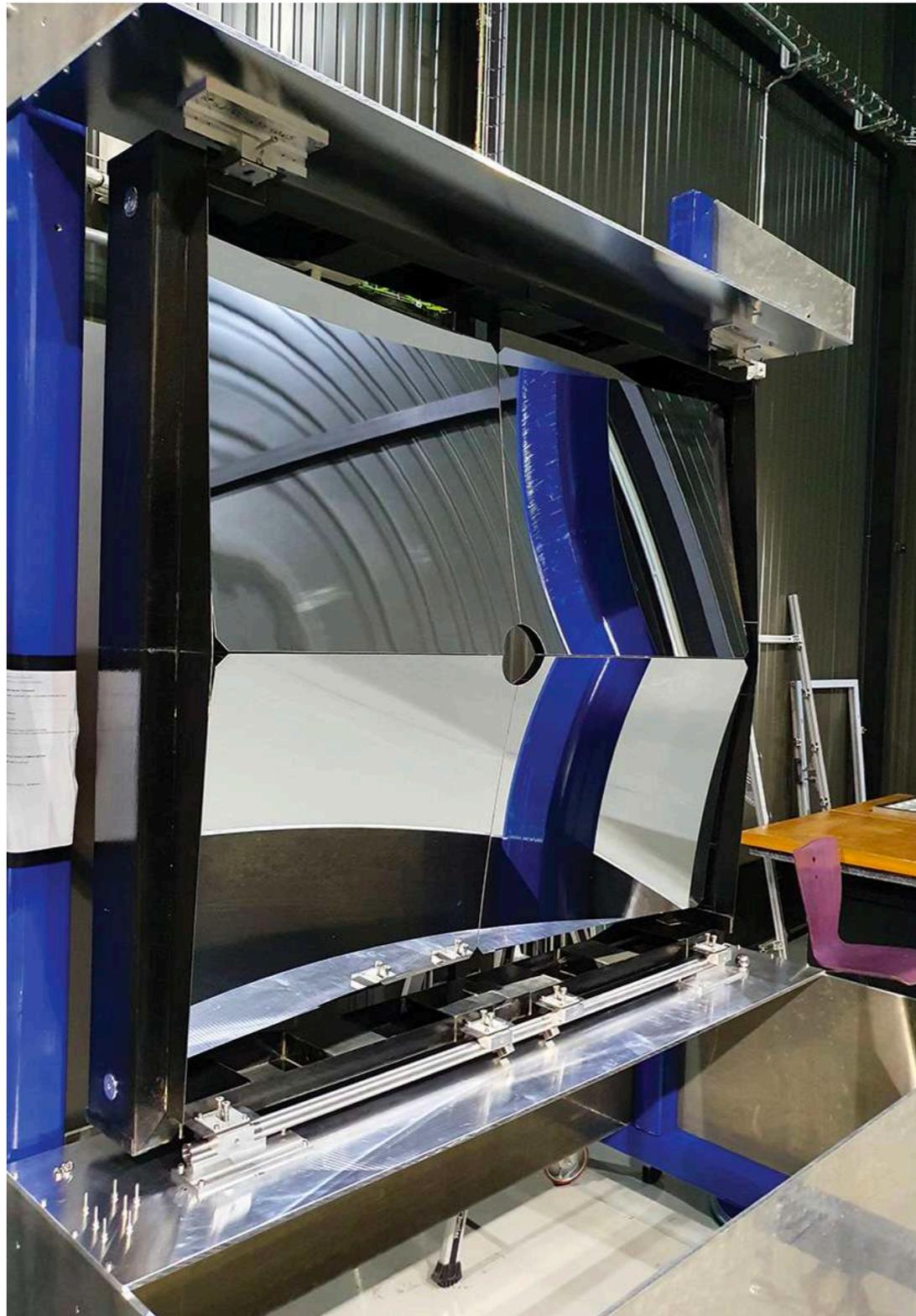
I nuovi tracciatori

- Upstream tracker: 2 stazioni a 2 piani di strip di silicio prima del magnete, granularità più fine ($100\ \mu\text{m}$)
- SciFi: 3 stazioni a 4 piani di fibre scintillanti dopo il magnete. 10000 km di fibre!



I nuovi RICH

Specchio per il RICH1



PMT per il RICH2



Il nuovo schema di trigger

- ECAL, HCAL ottimizzazione parametri, rivelatori inalterati
- MUON: stesso rivelatore ma rimozione di M1 + aumento granularità

Acquisizione dati:

- Nuova elettronica di lettura per tutti i rivelatori $1 \rightarrow 40$ MHz
- Rimozione stadio hardware del trigger (Livello 0), che limitava l'output dati a 1 MHz, e trigger interamente software a 40 MHz

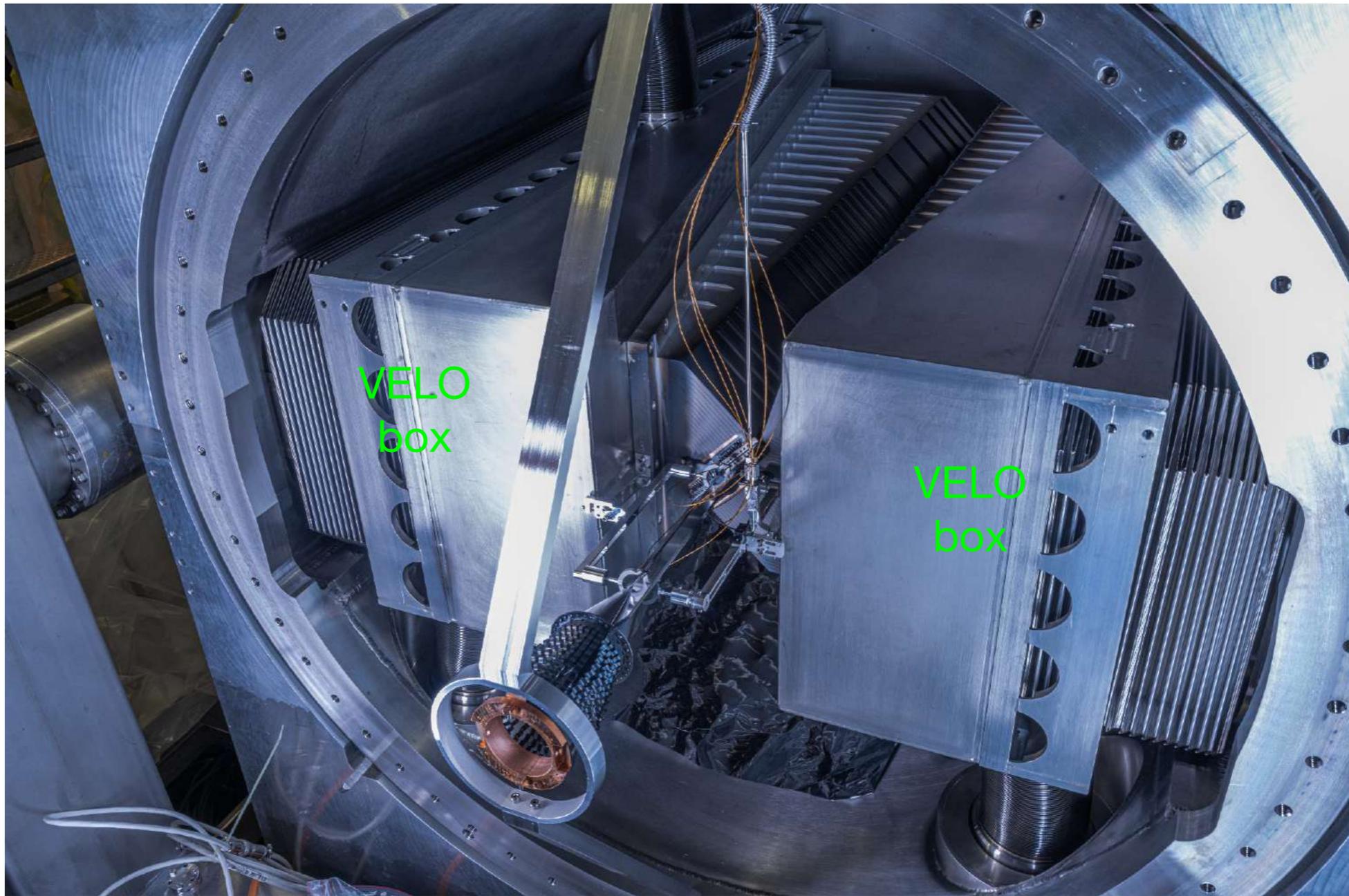
Dobbiamo essere **40 volte più veloci**, e con più tracce:

- Grande lavoro sugli algoritmi per la ricostruzione accurata e veloce di eventi densi di tracce (es. ottimizzazione, intelligenza artificiale)
- Costruito un **nuovo data centre** per l'analisi in tempo reale degli eventi su GPU commerciali



SMOG2

2015: iniezione di gas nobili dentro il VELO (SMOG). Es: misura produzione \bar{p} su elio.
2020: Installata la cella di accumulazione del gas SMOG2, di fronte al VELO

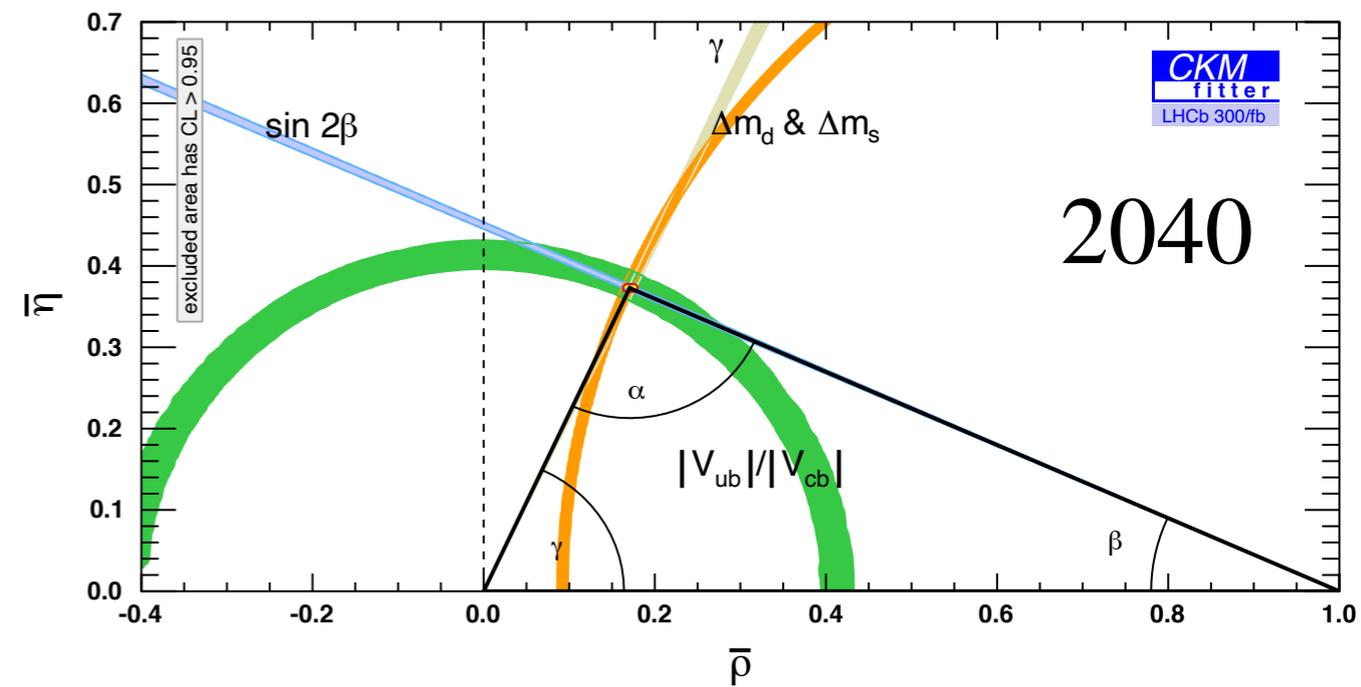
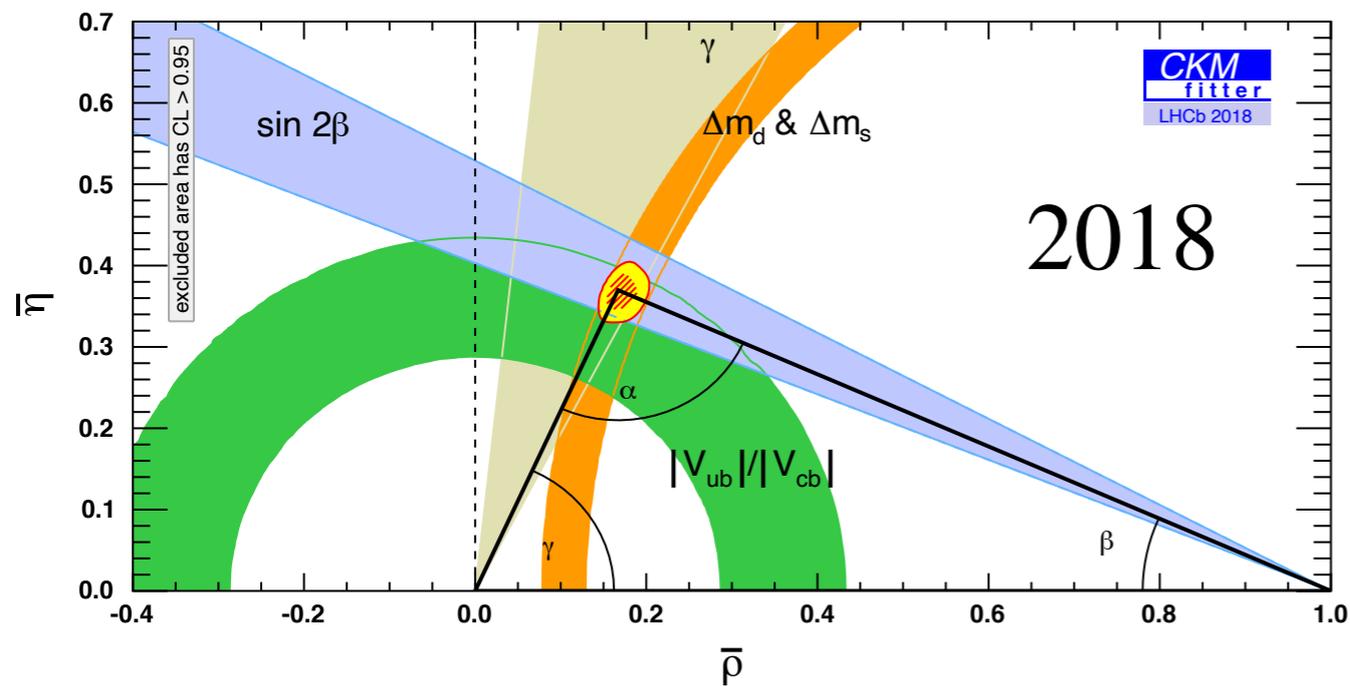


Dal Run 3 avremo anche un ricchissimo programma di fisica a “bersaglio fisso”!

Cosa ci aspettiamo

Le misure presentate (e tante altre) rappresentano delle **svolte importanti** nella fisica delle particelle, ma spesso sono solo un **punto di partenza!**

Tantissime motivazioni per il programma futuro di LHCb: decadimenti rari (capire le “anomalie”), violazione CP, misure di precisione dei parametri CKM...



- Ma soprattutto:
- Scoprire nuove particelle
 - Esplorazione!



That's all Folks!