



# LHCb @ CERN

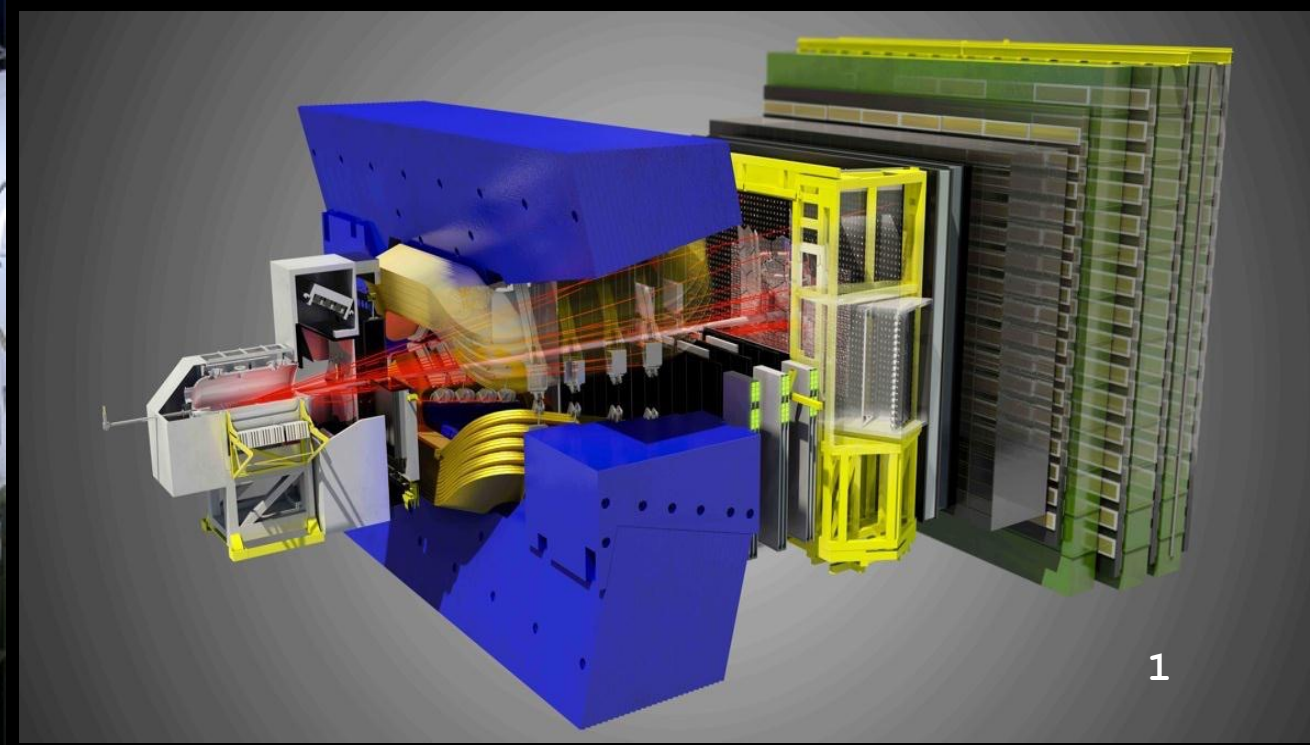
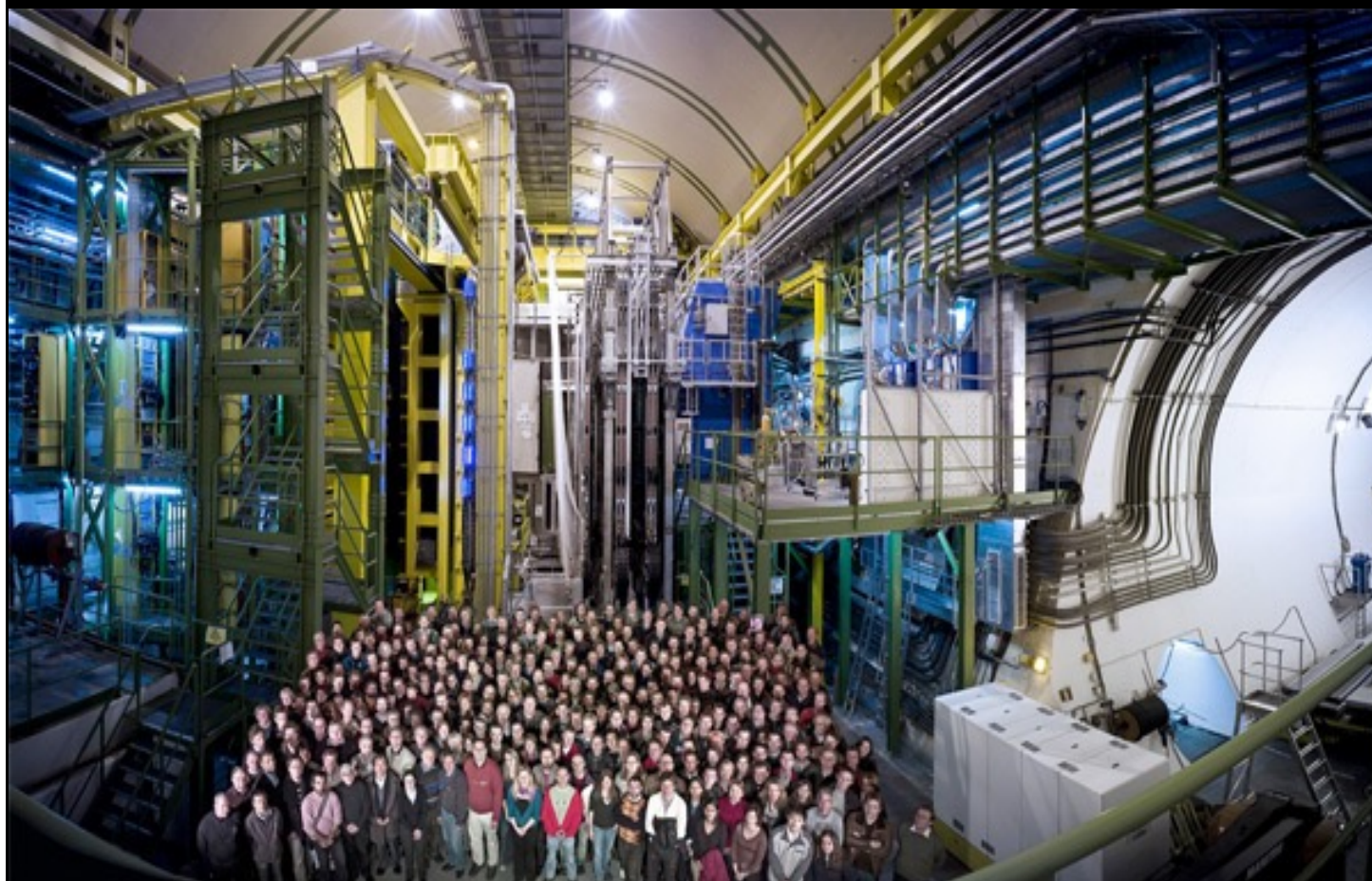
## Masterclass 2024

Perugia 7 Marzo 2024

Monica Pepe  
INFN Sezione di Perugia



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

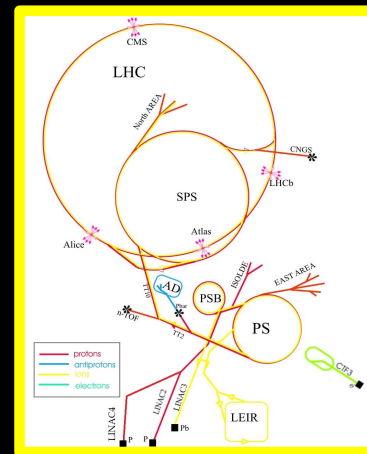


# Sommario

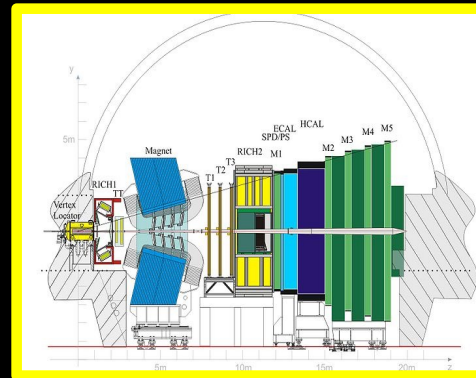
❖ Big Bang:  
Materia e Anti-materia



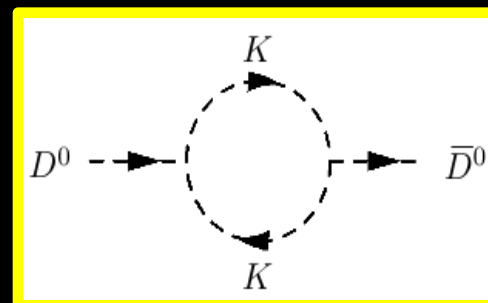
❖ Gli Acceleratori al CERN



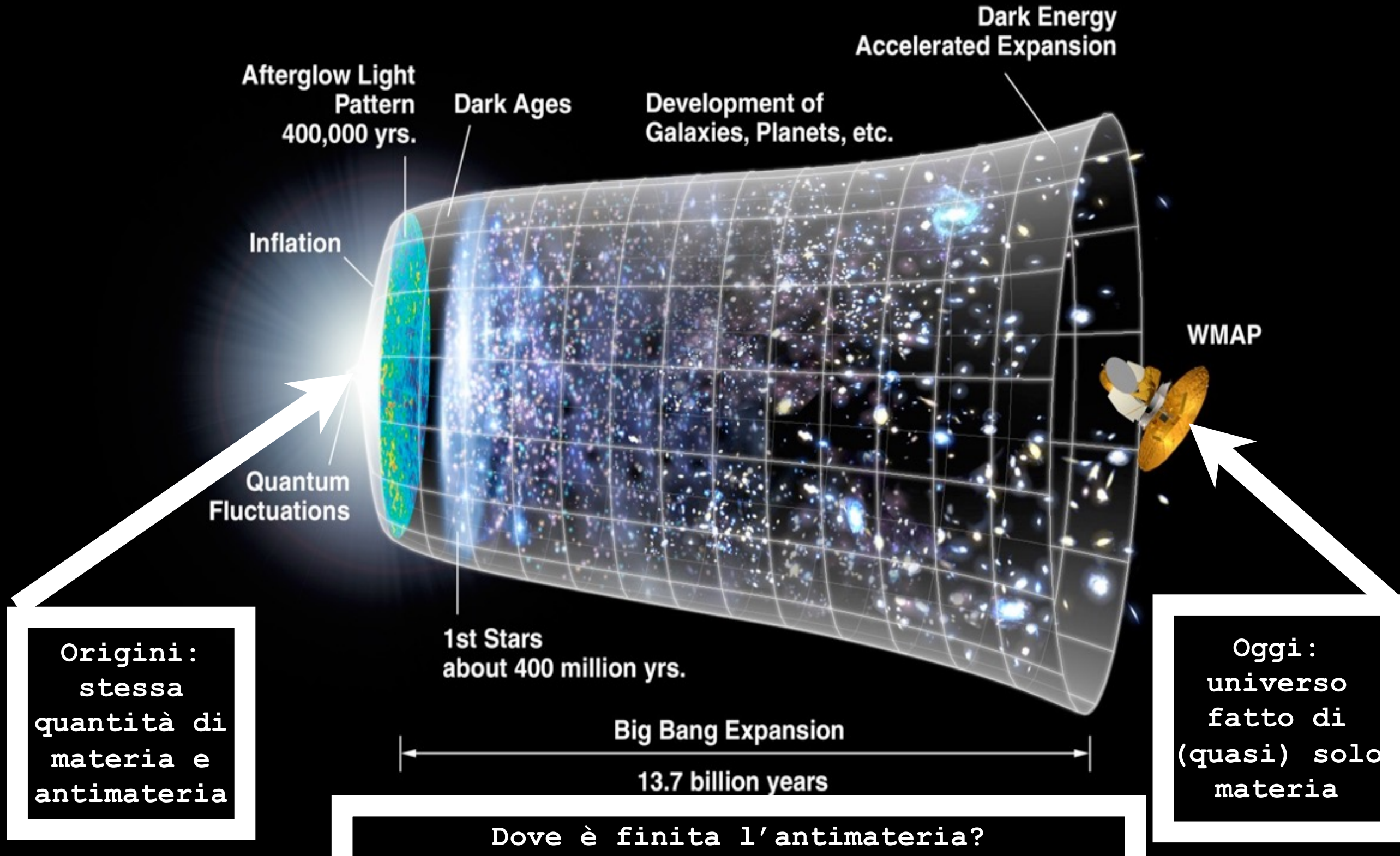
❖ L'esperimento LHCb



❖ La vostra misura



# Why does antimatter matter?

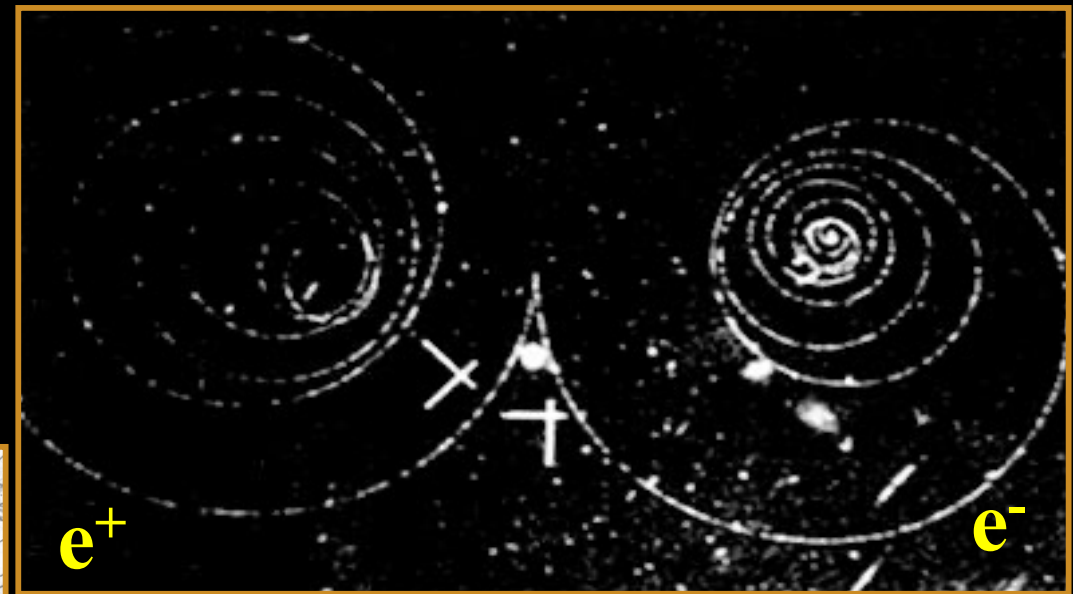
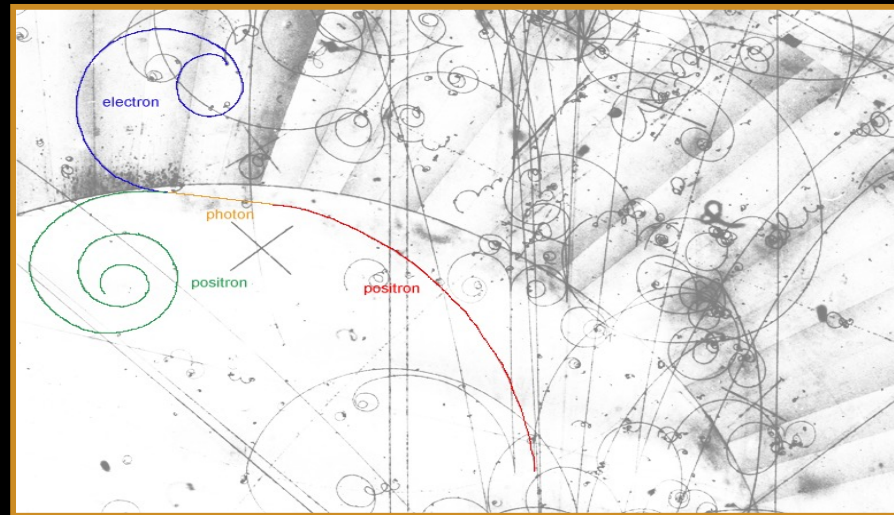


# Materia e Antimateria

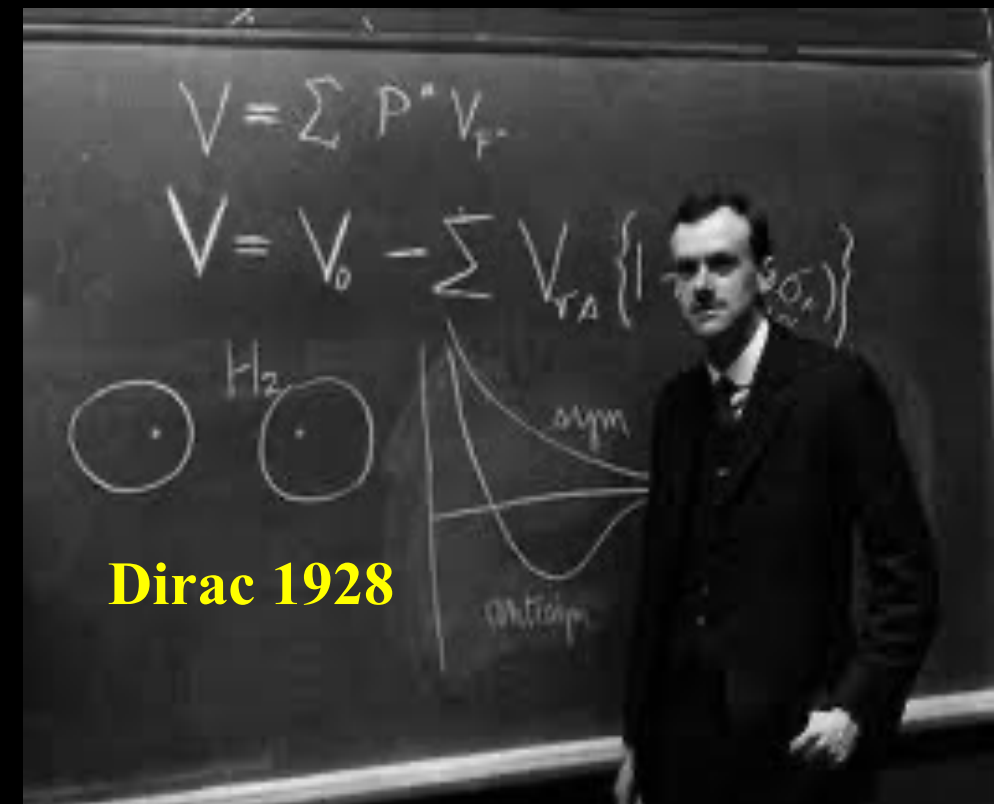
- ❖ La materia è formata da particelle di "materia" (MP)
- ❖ L'antimateria è formata da particelle di "anti-materia" (AP)
- ❖ AP vs MP: stessa massa, carica elettrica opposta
- ❖ MP e AP sono sempre prodotte a coppie
- ❖ MP + AP = Annichilazione



Anderson 1932



- Un esempio di antimateria è il positrone
  - postulato da Dirac nel 1928 nell'equazione relativistica del moto dell'elettrone con due soluzioni (es.  $x^2=4$ ): particella e antiparticella
  - osservato per la prima volta da Anderson nel 1932 fra le particelle prodotte dai raggi cosmici nell'impatto con l'atmosfera terrestre



Dirac 1928

Dopo la scoperta del positrone sono interpretate come anti-particelle: l'anti-materia

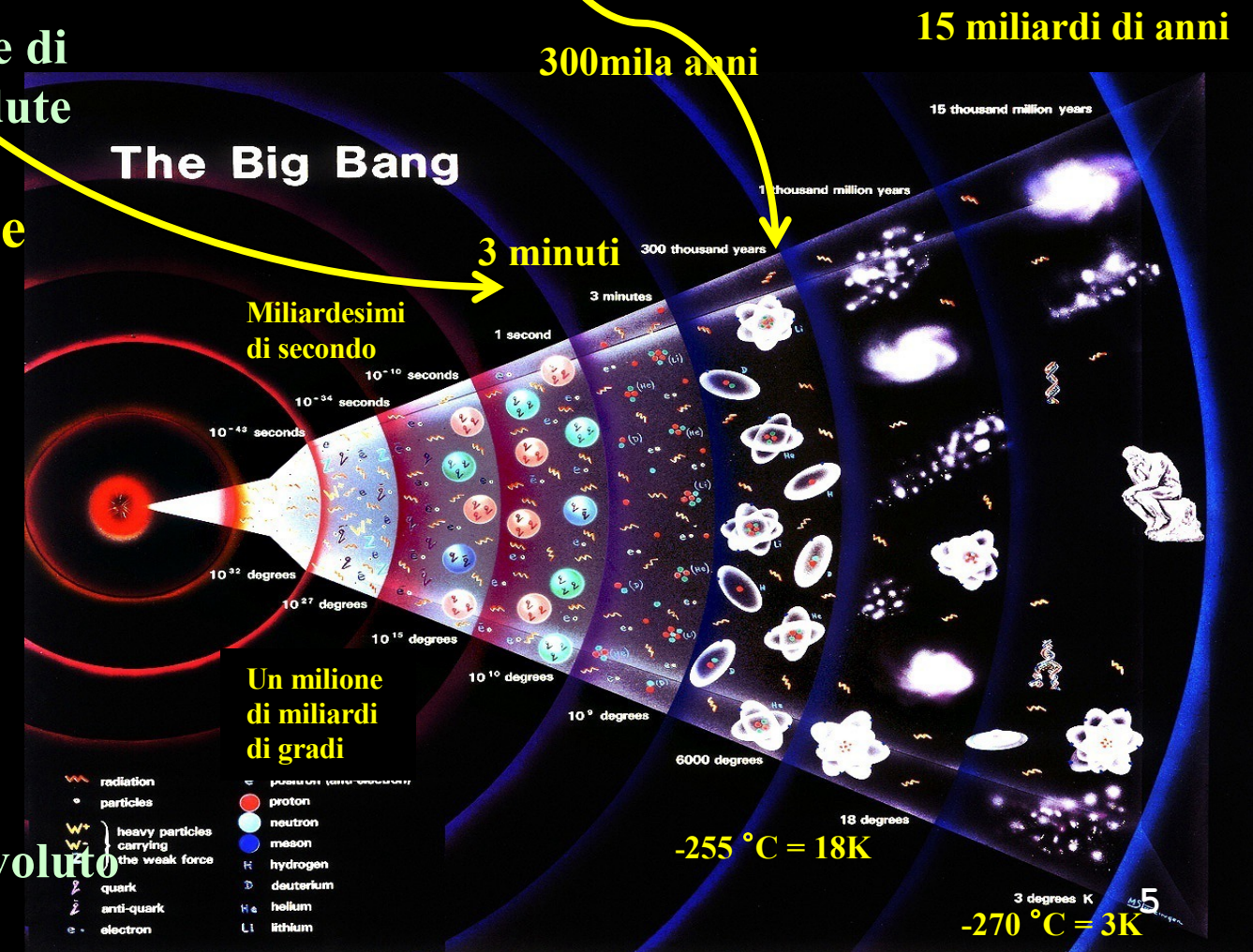
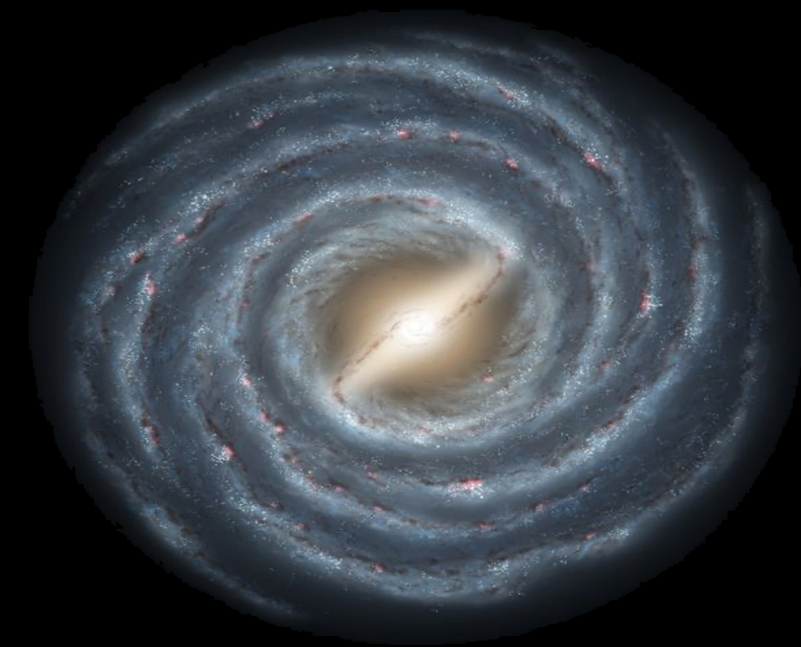
# La teoria del Big Bang

- **Primi 3 minuti** immediatamente dopo il **Big Bang**, circa **14 miliardi di anni fa**
- L'Universo era in rapida espansione e composto di particelle fondamentali
- Attraverso interazioni successive (dopo circa 1 milione di anni e la vittoria di MP su AP) le particelle sono decadute in altre particelle fondamentali e hanno formato gli atomi che hanno gradualmente dato origine all'Universo che conosciamo oggi

Solo l'enorme concentrazione di energia in un acceleratore di particelle può riportare in vita le particelle che sono decadute

**Studiamo le particelle elementari per ricreare l'ambiente del primo Universo**

Studiare le collisioni fra particelle permette di conoscere le Forze che governano l'Universo e capire come esso si è evoluto

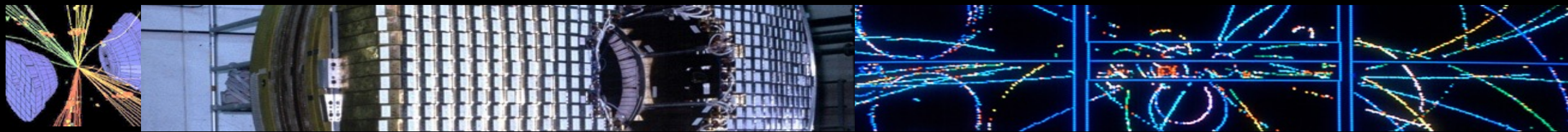


# Acceleratori come una macchina del tempo....

- Dobbiamo riprodurre i primi 400mila anni dopo il Big Bang
- Al CERN studiamo le reazioni fondamentali avvenute fra **un centesimo di miliardesimo di secondo e 3 minuti dopo il Big Bang**
- Negli **acceleratori** le collisioni di **fasci di particelle di alta energia** ci permettono di **ricreare in laboratorio le condizioni che esistevano immediatamente dopo il Big Bang**

## Energy unit in particle physics

- 1 eV =  $1.6 \cdot 10^{-19}$  J
- 1 TeV =  $10^{12}$  eV

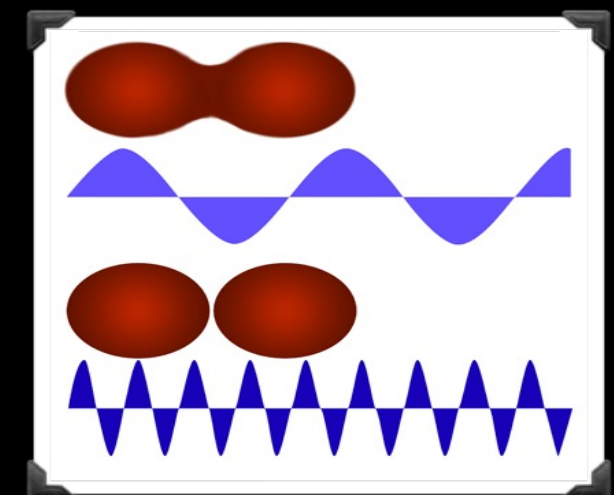


## Come il microscopio più avanzato....

- Ad energie diverse le interazioni hanno ruoli diversi, operano su distanze diverse e diversi sono i fenomeni fisici

Energia maggiore → piccola lunghezza d'onda  $\lambda$   
→ particolari più piccoli

$$E = h\nu$$



**LHC a 14 TeV arriva a risolvere  $\lambda = hc/E \sim 10^{-19}$  m**

Planck constant  
 $h = 6 \cdot 10^{-34}$  J\*s

# Acceleratori + 3 “semplici” operazioni :

- **Concentrare l’energia nelle particelle**

**Acceleratore di particelle di alta energia in grado di produrre un grandissimo numero di collisioni**

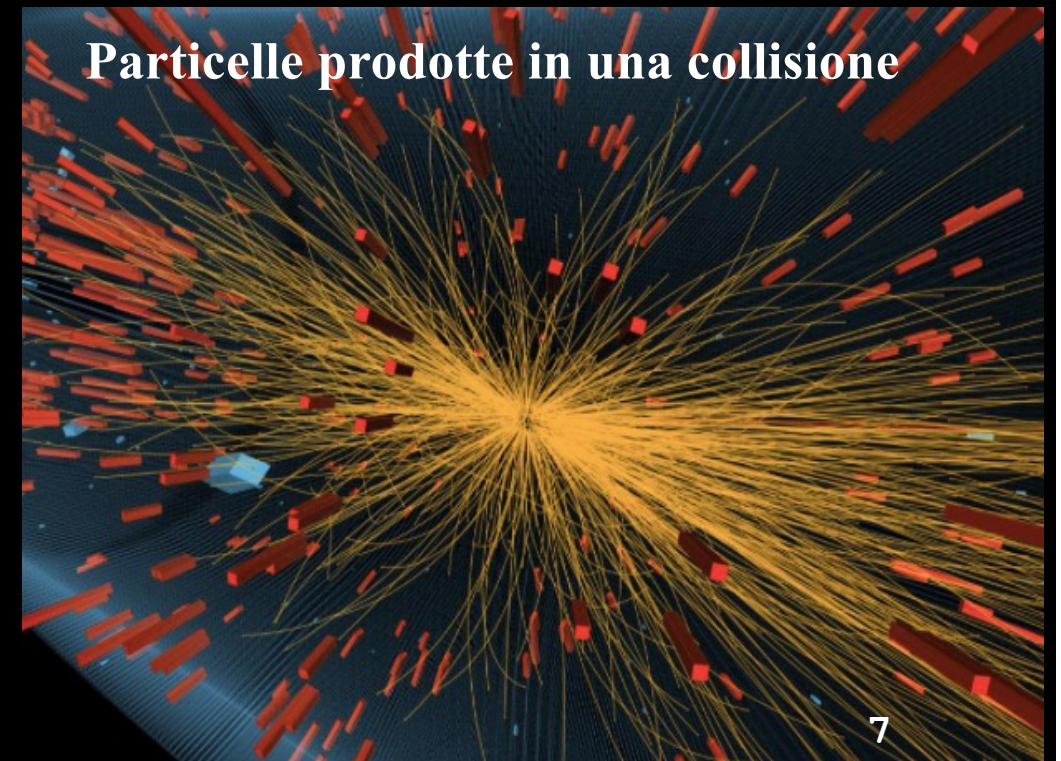
- **Fare collidere le particelle**

**Nelle collisioni si concentra una grande quantità di energia in un piccolo spazio**

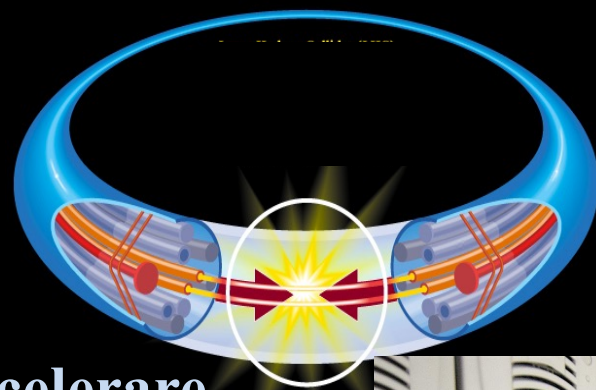
**→ Questa energia si materializza nella produzione di altre particelle per ricreare le condizioni dopo il Big Bang**

**La relazione chiave:  $E = mc^2$**

- **Misurare il risultato con un rivelatore e studiare le leggi della fisica**



# Cosa serve?



## 1. Acceleratori:

macchine potenti capaci di accelerare particelle fino a energie estremamente alte e portarle a collidere con altre particelle

## 2. Rivelatori:

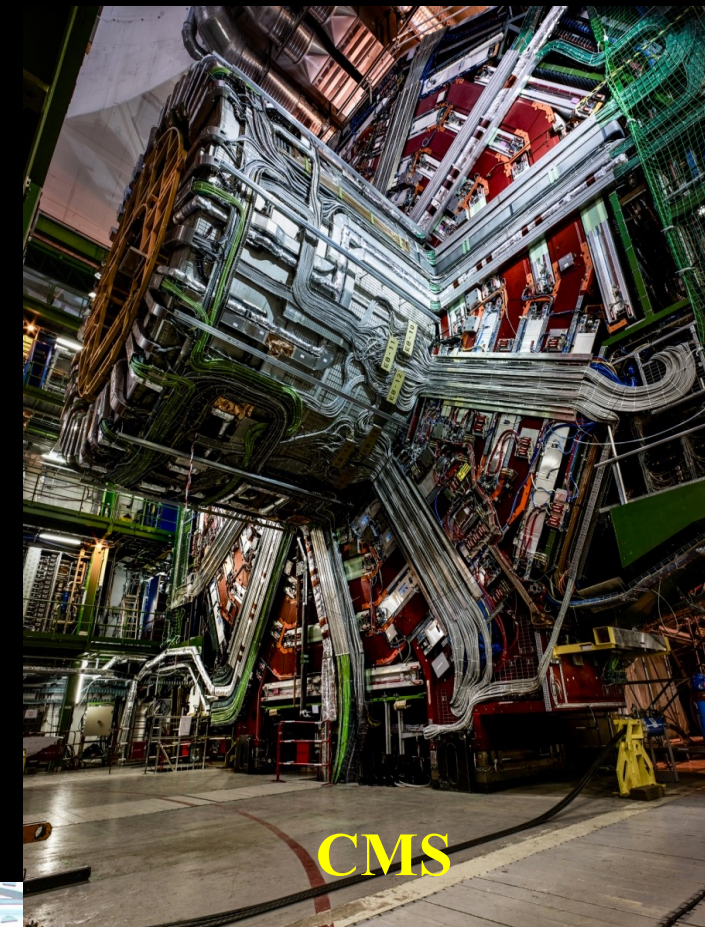
strumenti giganteschi per rivelare le particelle prodotte nelle collisioni

## 3. Computer:

raccogliere, immagazzinare, distribuire e analizzare enormi quantità di dati prodotti dai rivelatori

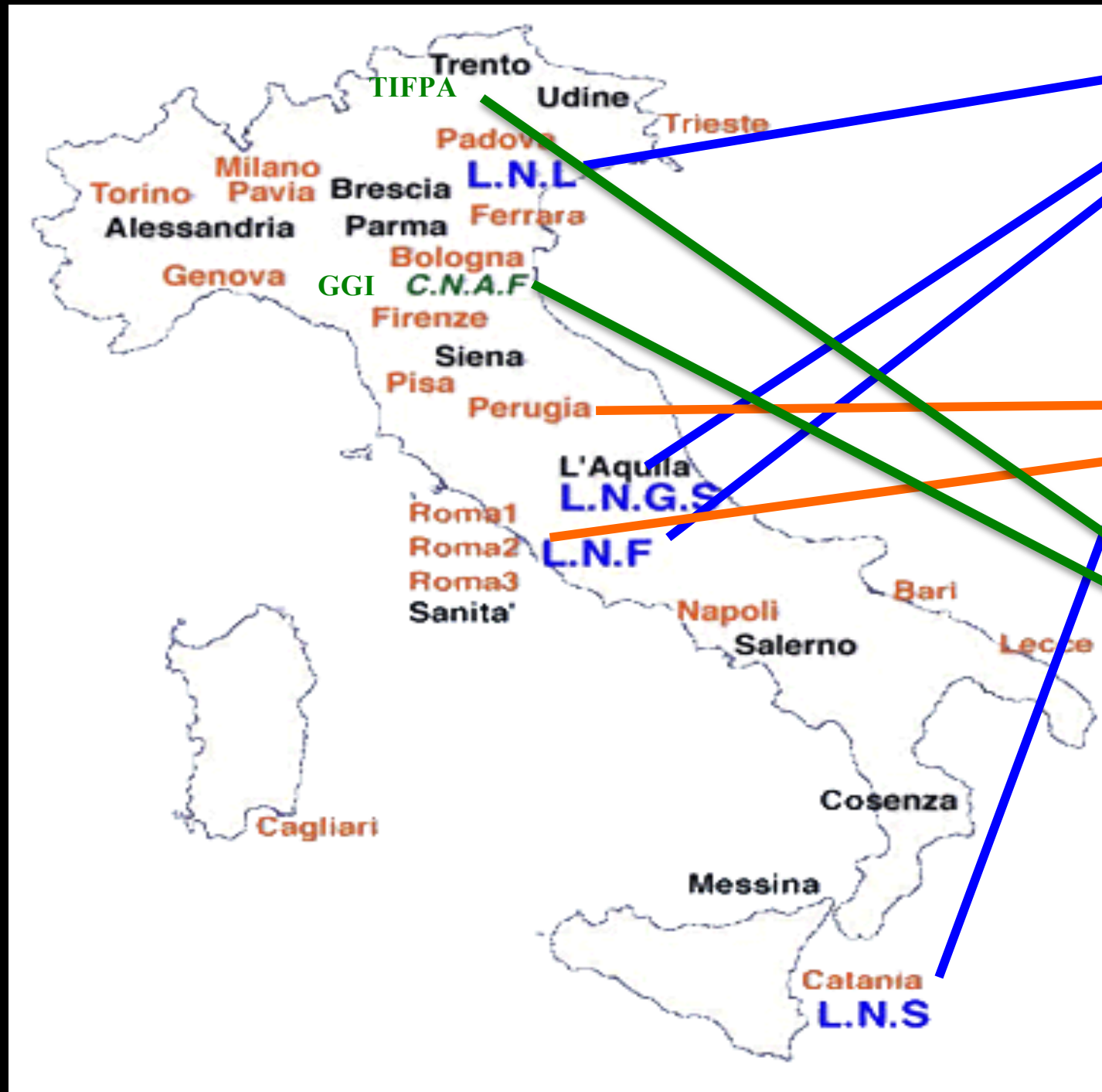
## 4. Persone:

solo una collaborazione di migliaia di fisici, ingegneri, tecnici e personale di supporto può progettare, costruire e far funzionare queste macchine





# La ricerca in Italia



**4 Laboratori Nazionali**

**20 Sezioni**

**3 Centri Nazionali**

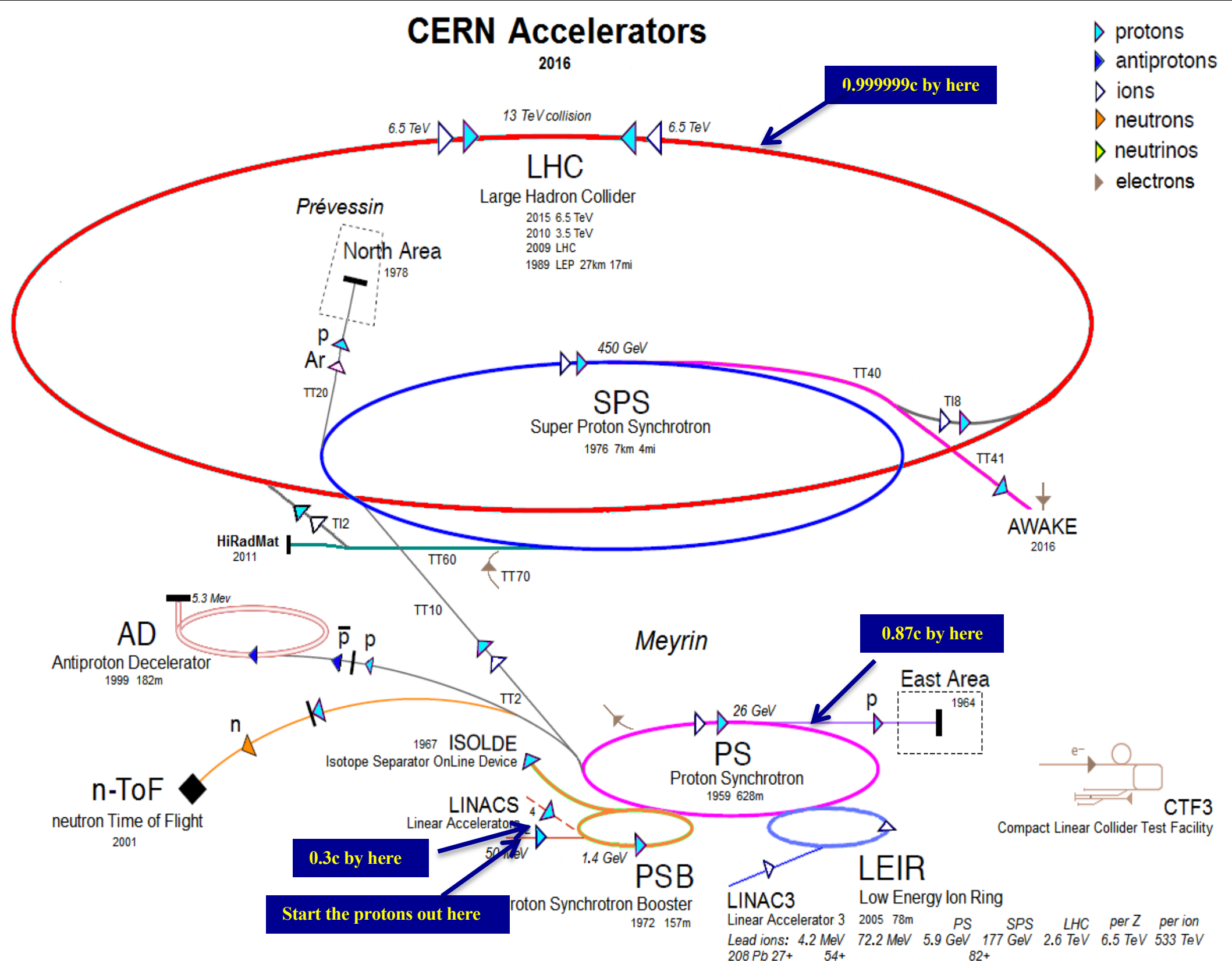
# Electronvolt

$$1 \text{ eV} = 1.6021 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ TeV} = 1.6021 \times 10^{-7} \text{ J}$$

# Auto a 100km/h

$$\sim 7 \times 10^5 \text{ J}$$



# LHC = Large Hadron Collider

Jura mountains

France



Geneva airport

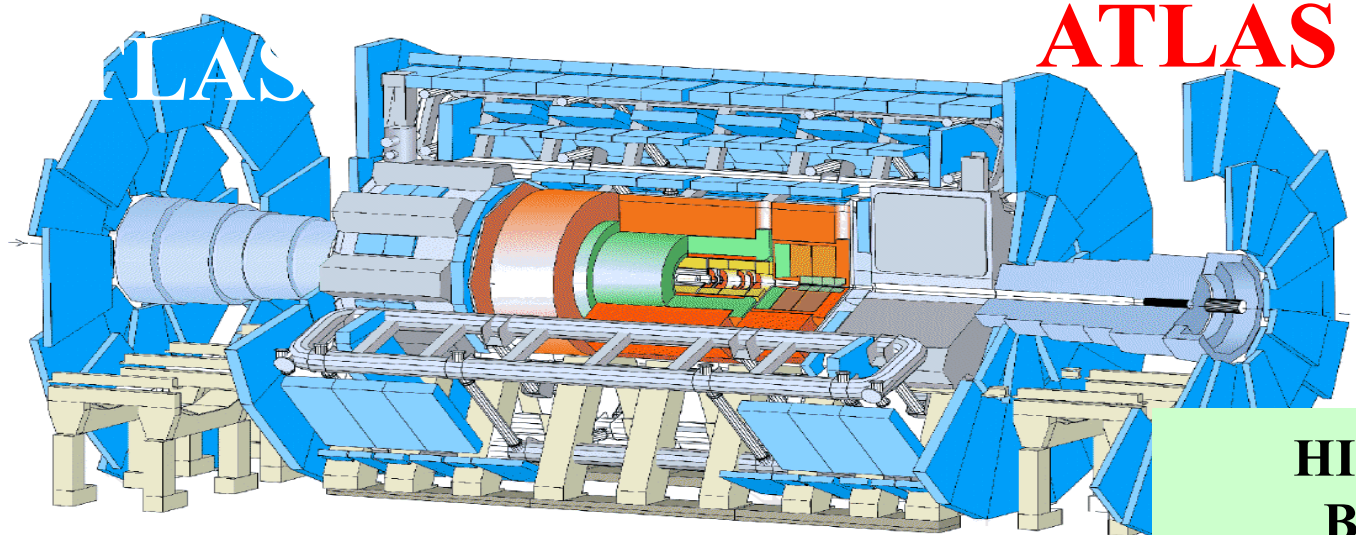
Switzerland

N

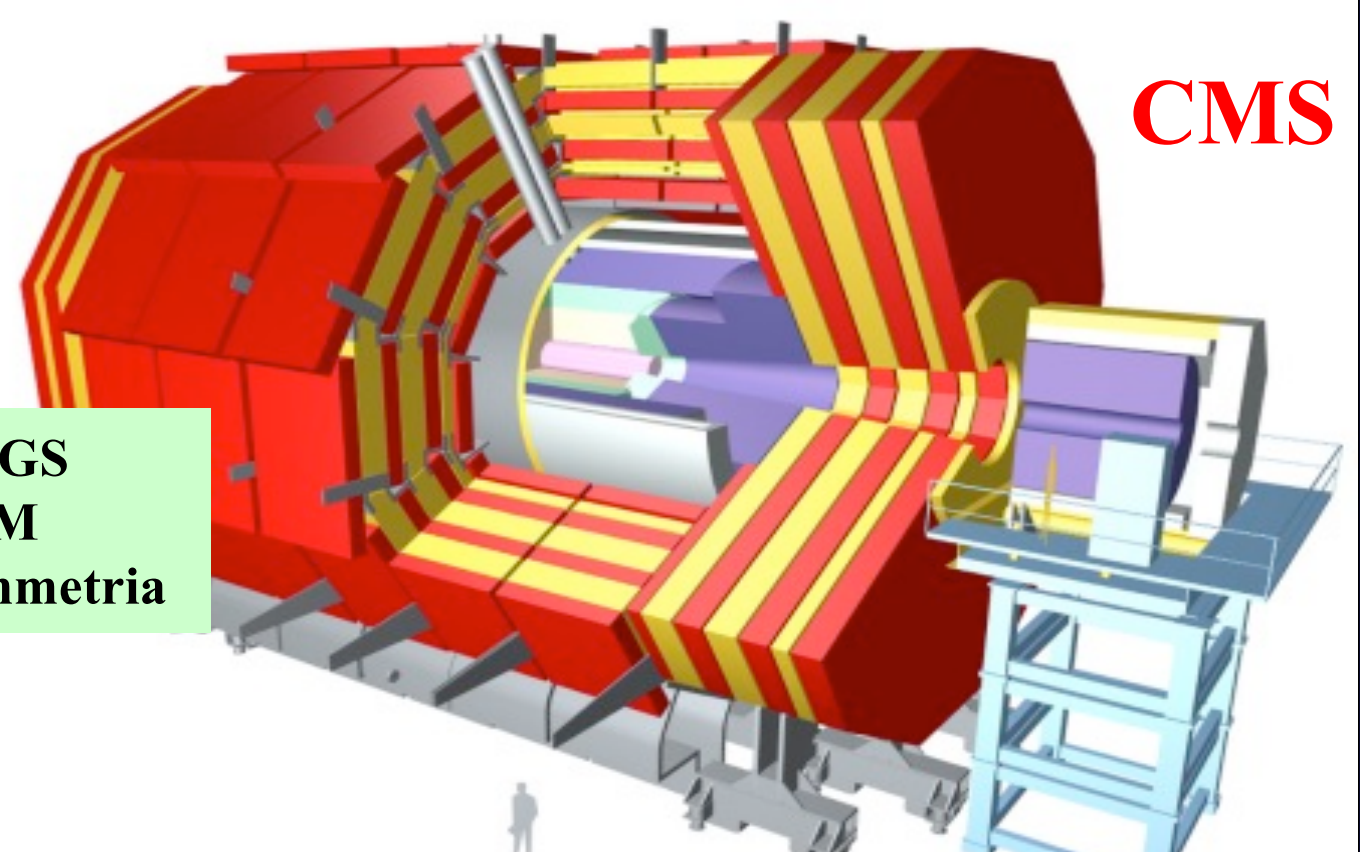
# Large Hadron Collider @ CERN



- Installato in un tunnel lungo 27 km a ~100 m di profondità
- I due fasci di protoni sono accelerati in direzioni opposte e fatti incrociare 40 milioni di volte al secondo nei punti dove sono collocati quattro grandi rivelatori producendo ~1 miliardo di collisioni al secondo!
- Tecnologia dei semiconduttori per mantenere stabili le orbite dei fasci
- Altissima energia!  
(fino a 14 TeV nel baricentro)
- Cosa c'è di impressionante? 1 TeV è l'energia di una zanzara in volo!
- Ma a LHC concentriamo questa energia in uno spazio che è un milione di milioni di volte più piccolo del corpo di una zanzara....



**ATLAS**



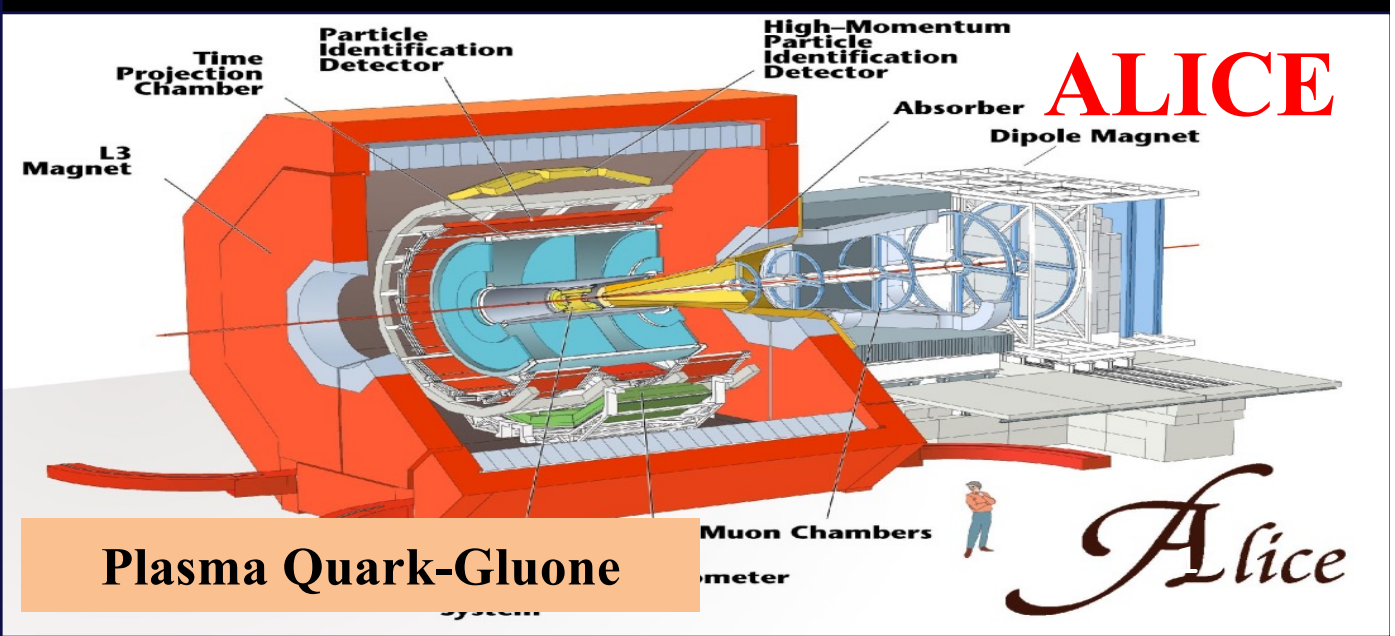
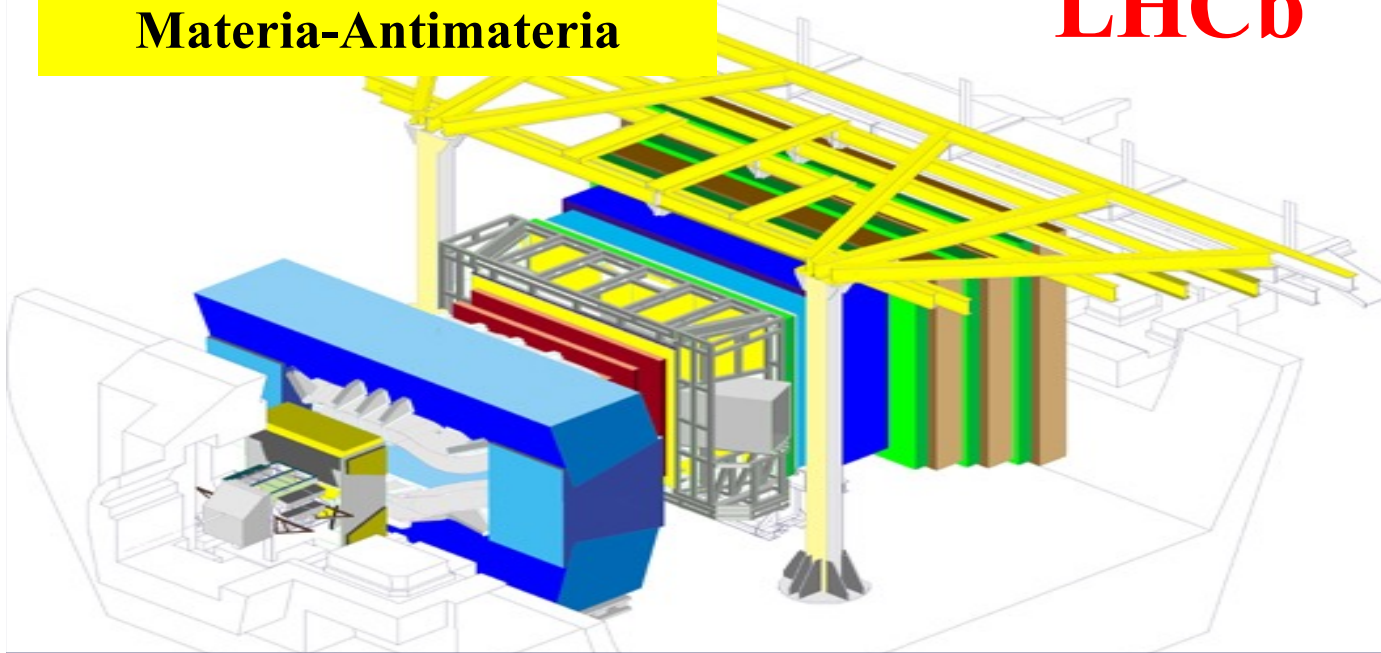
**CMS**

**HIGGS  
BSM  
Supersimmetria**



**Asimmetria  
Materia-Antimateria**

**LHCb**



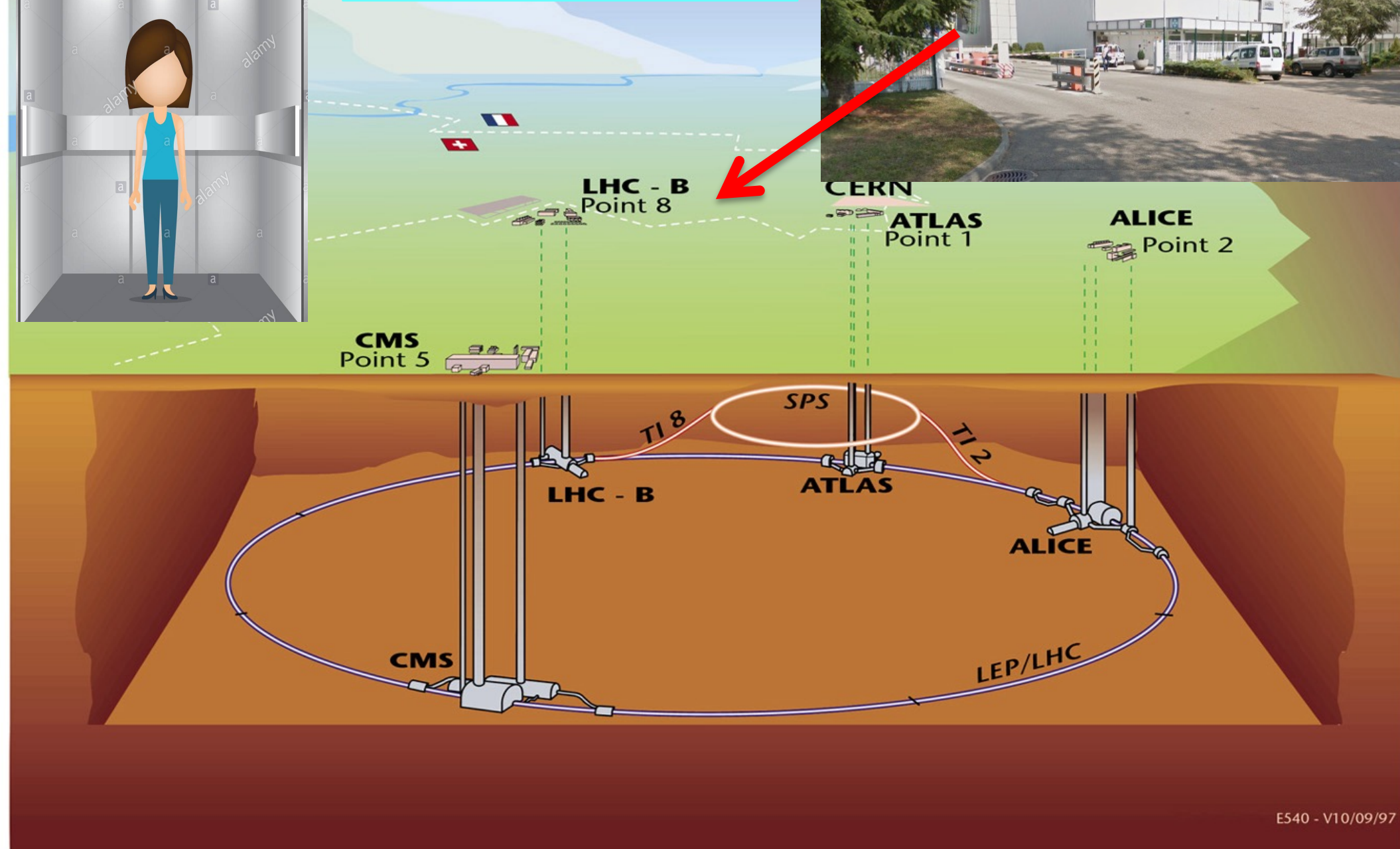
**ALICE**

**Plasma Quark-Gluone**

*Alice*

# Overall view of the LHC experiments.

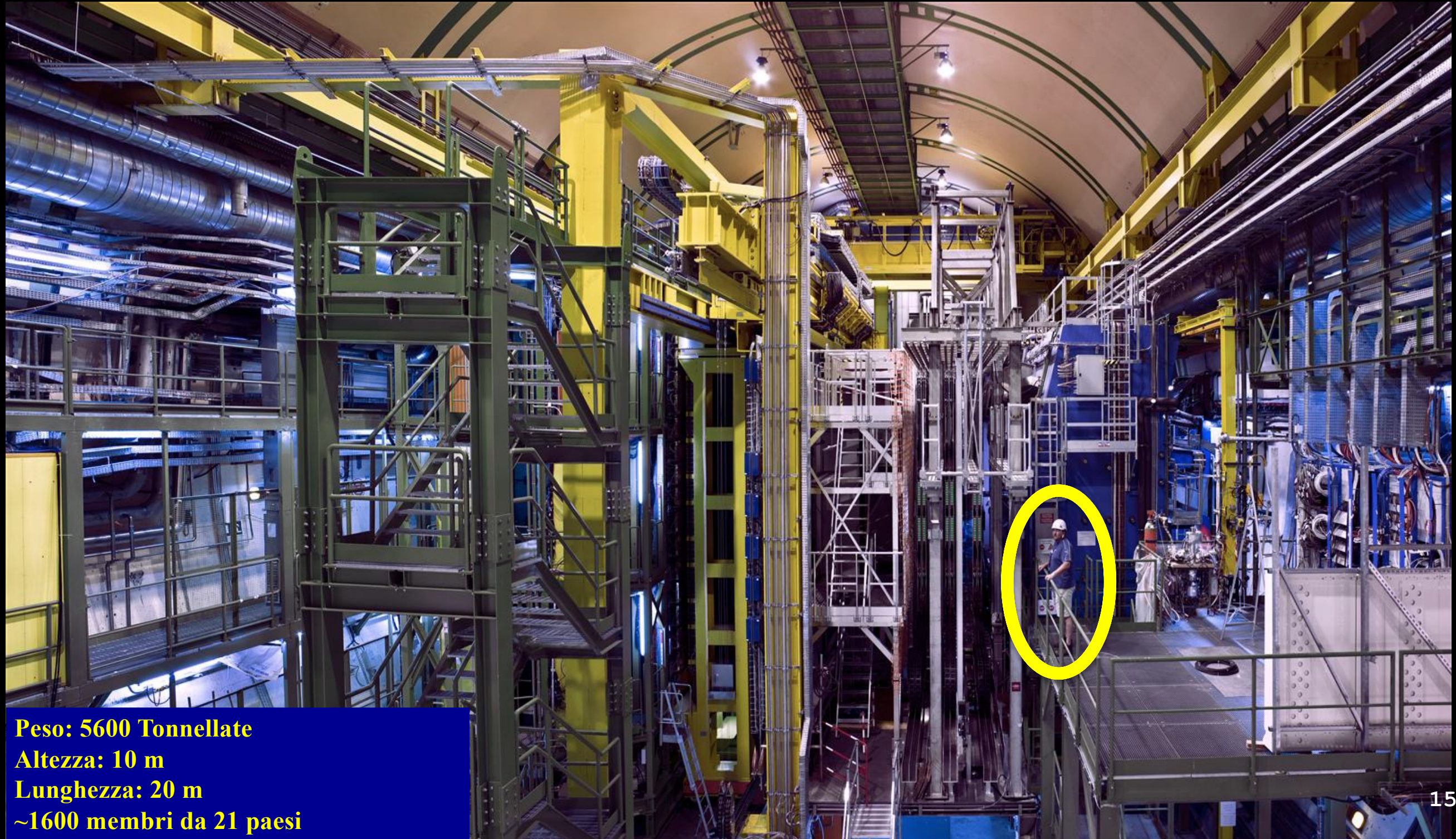
**Andiamo a LHCb**



E540 - V10/09/97

# La caverna di LHCb a 100m sotto terra

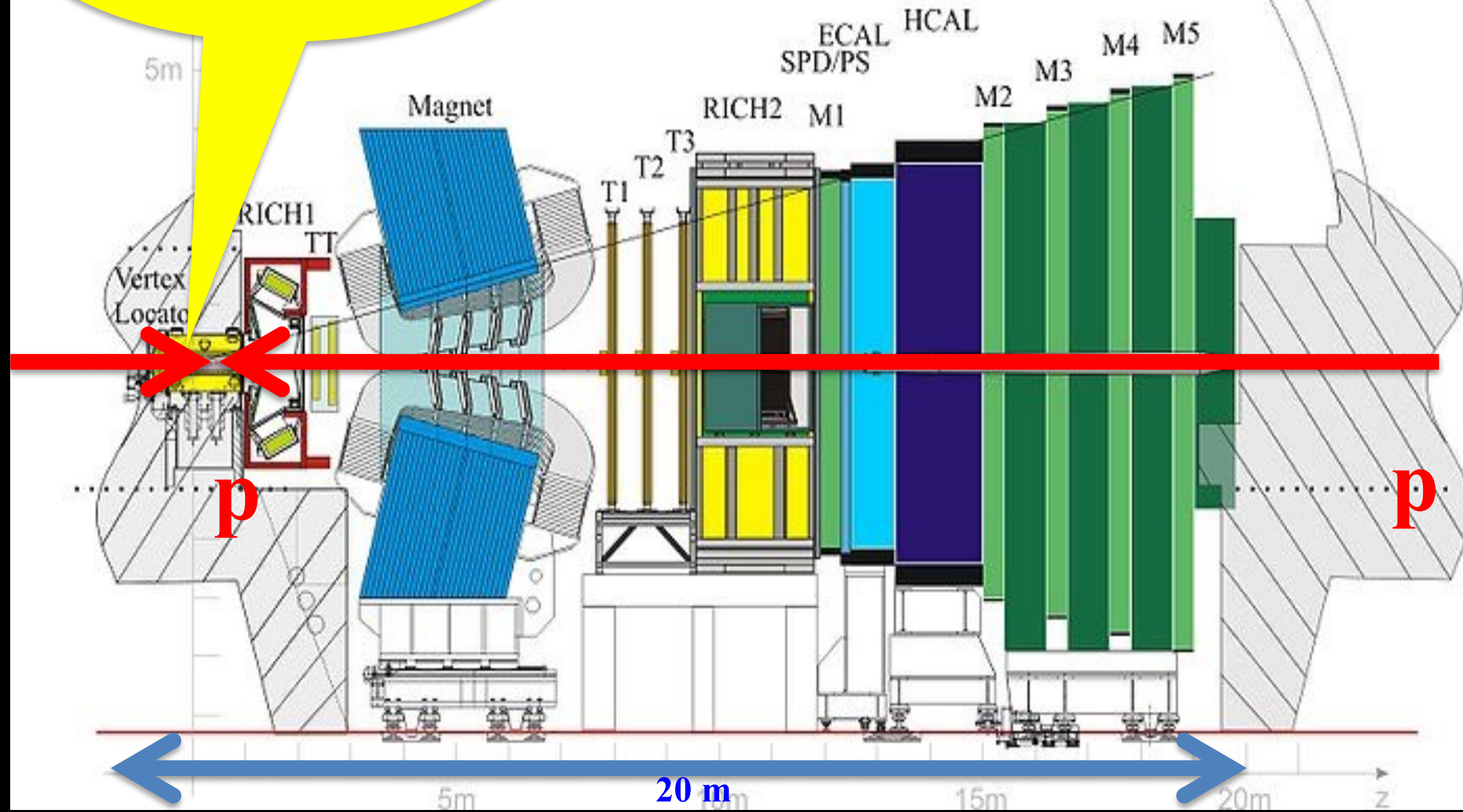
B come **Beauty** ma l'esperimento è ideale anche per rivelare particelle con **Charm**



**Peso: 5600 Tonnellate**  
**Altezza: 10 m**  
**Lunghezza: 20 m**  
**~1600 membri da 21 paesi**

# LHCb con i vari “strati” sovrapposti

Punto di collisione





# Perugia @ LHCb

## Attività a Perugia

- Hardware: **Light leak detector (LLD)** per il RICH
- Luminosità: numero di particelle per s per  $\text{cm}^2$  misurate con **LLD**
- Analisi dati: ricerca di nuove particelle nei decadimenti di B e Iperoni

## RICH detector e LLD

- Le particelle che attraversano il rivelatore producono luce Cherenkov
- I sensori di luce "vedono" il singolo fotone
  - devono essere isolati dalla luce dell'ambiente circostante



**Light leak detector** (sensori di luce per monitorare il "buio")

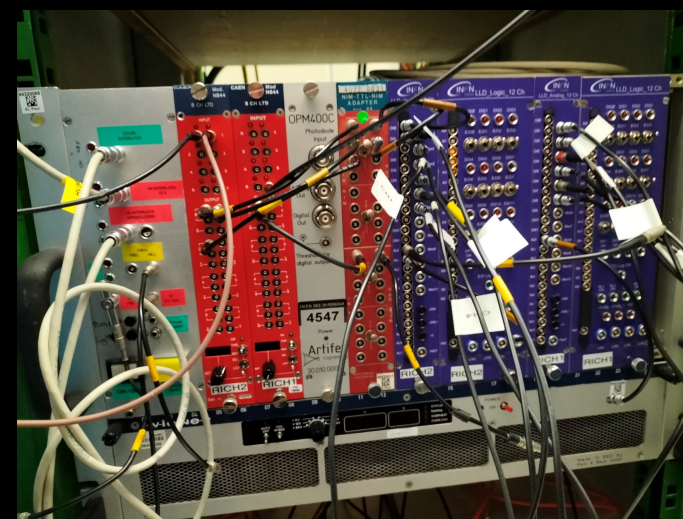
LLD module: box with a photomultiplier



R&D tests in Perugia



Electronics to read signals from the LLD



LLD installation at CERN



# La fisica di LHCb

- Una collisione produce tantissime particelle
- La maggior parte sono instabili e decadono in altre particelle

Per ricostruire cosa succede nell'interazione tra due protoni dobbiamo identificare il più gran numero di particelle che sono prodotte nello stato finale, determinandone le proprietà (energia, velocità,...)

## Cosa studiamo a LHCb

- Decadimenti di mesoni B (con b-quark)
- Decadimenti di mesoni D (con c-quark)
- Decadimenti di mesoni K e Iperoni (con s-quark)
- ...

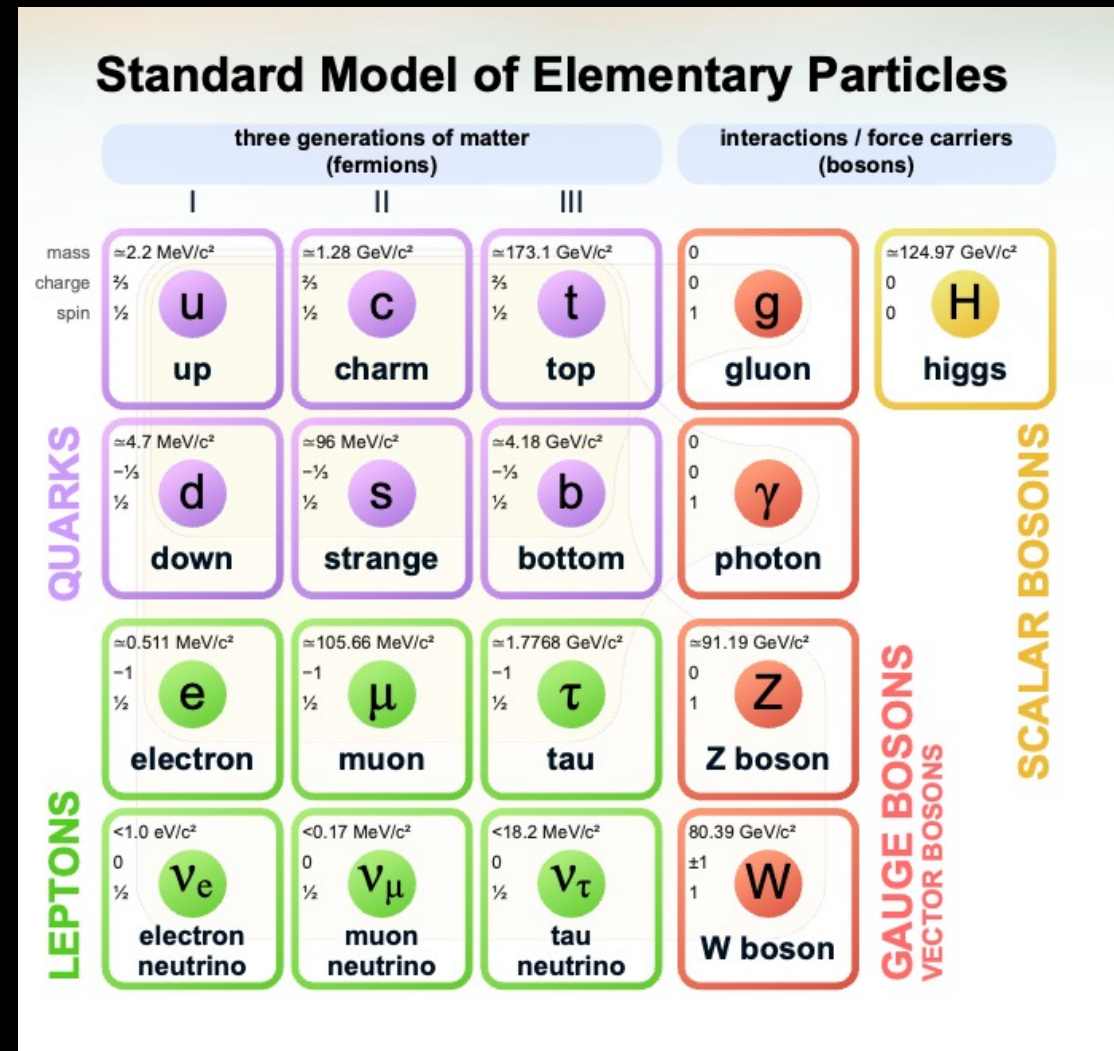
## Come distinguiamo i diversi decadimenti?

- Riveliamo le particelle prodotte nel decadimento dei mesoni
- Ricostruiamo il "vertice" del decadimento
- Calcoliamo l'energia totale nel centro di massa (cms) per identificare la particella "genitore":  
nel cms l'energia a riposo della particella che decade si trasforma nell'energia dei prodotti di decadimento

**Esempio:  $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$**

Misuriamo i muoni (momento, energia, identificazione)

Calcoliamo l'energia totale dei due muoni nel cms  $\rightarrow$  deve essere uguale alla massa del  $B_s$



# Identificazione delle particelle

## Cosa misuriamo:

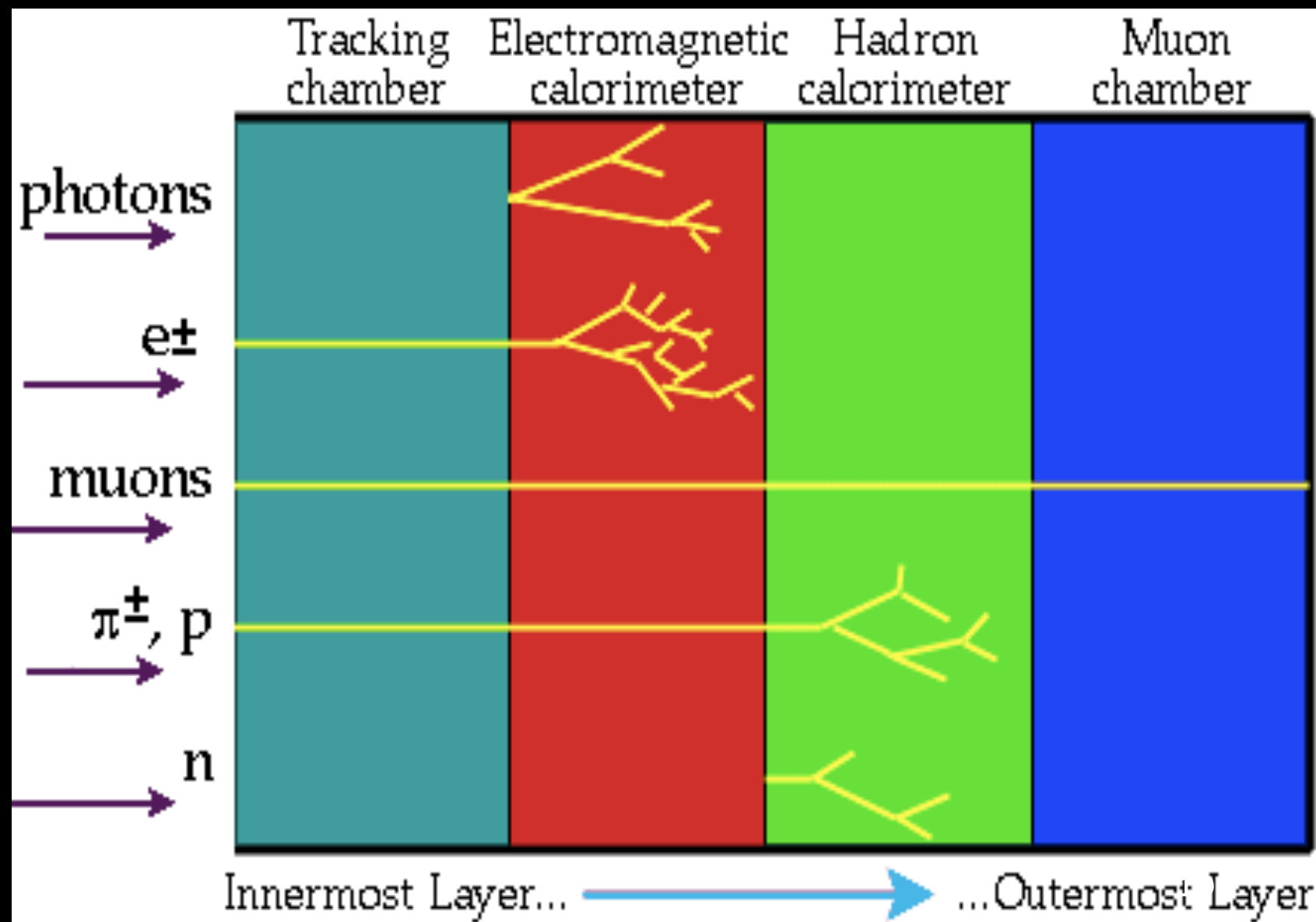
- ✓ coordinate spaziali
- ✓ tempo
- ✓ energia rilasciata nel passaggio attraverso un rivelatore

## Cosa calcoliamo:

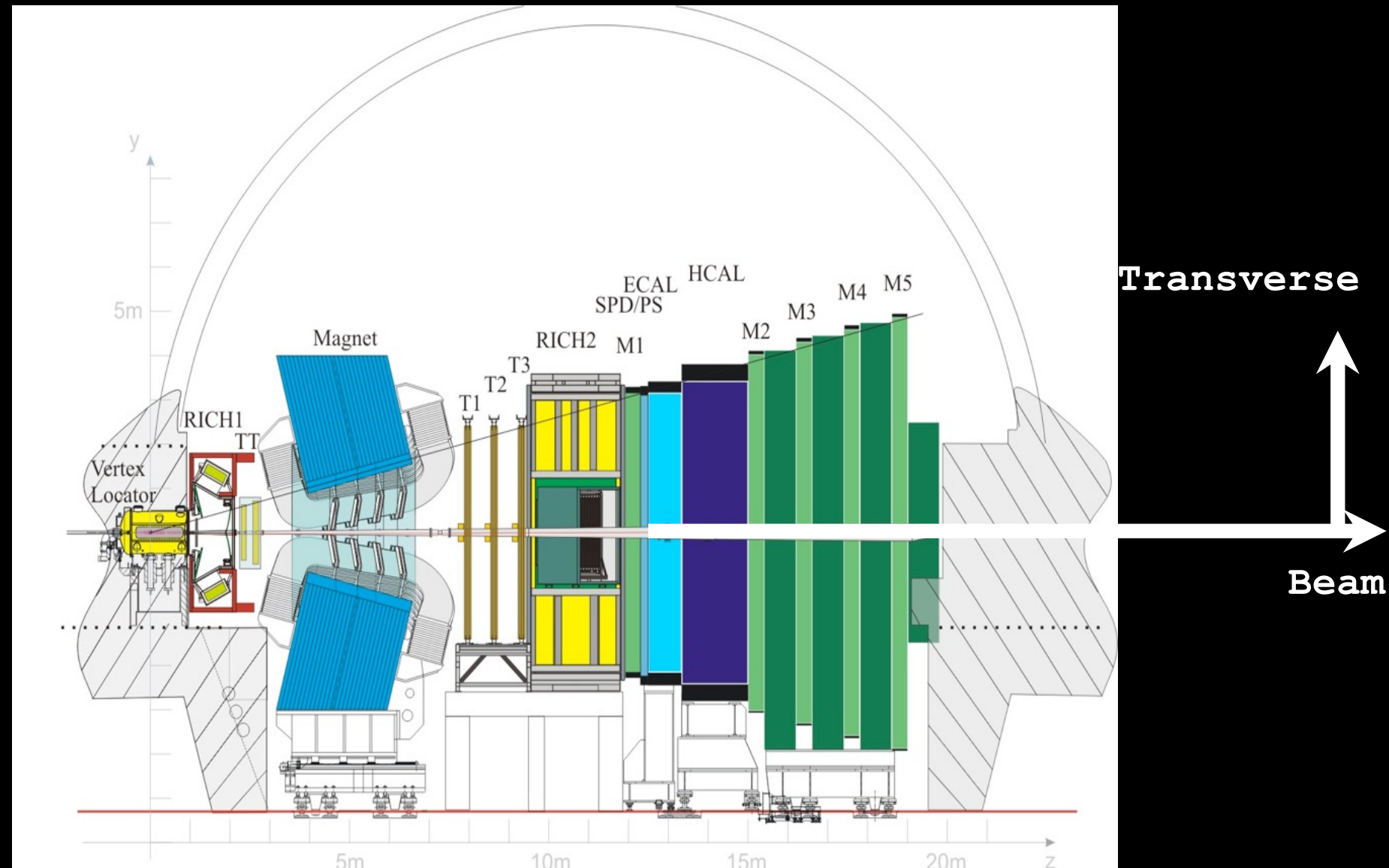
- traccia rilasciata dalla particella
- momento
- massa

Per far questo combiniamo l'informazione di molti rivelatori in successione capaci di rivelare il passaggio di diversi tipi di particelle

➔ **Un rivelatore a “strati”**



# LHCb @ LHC

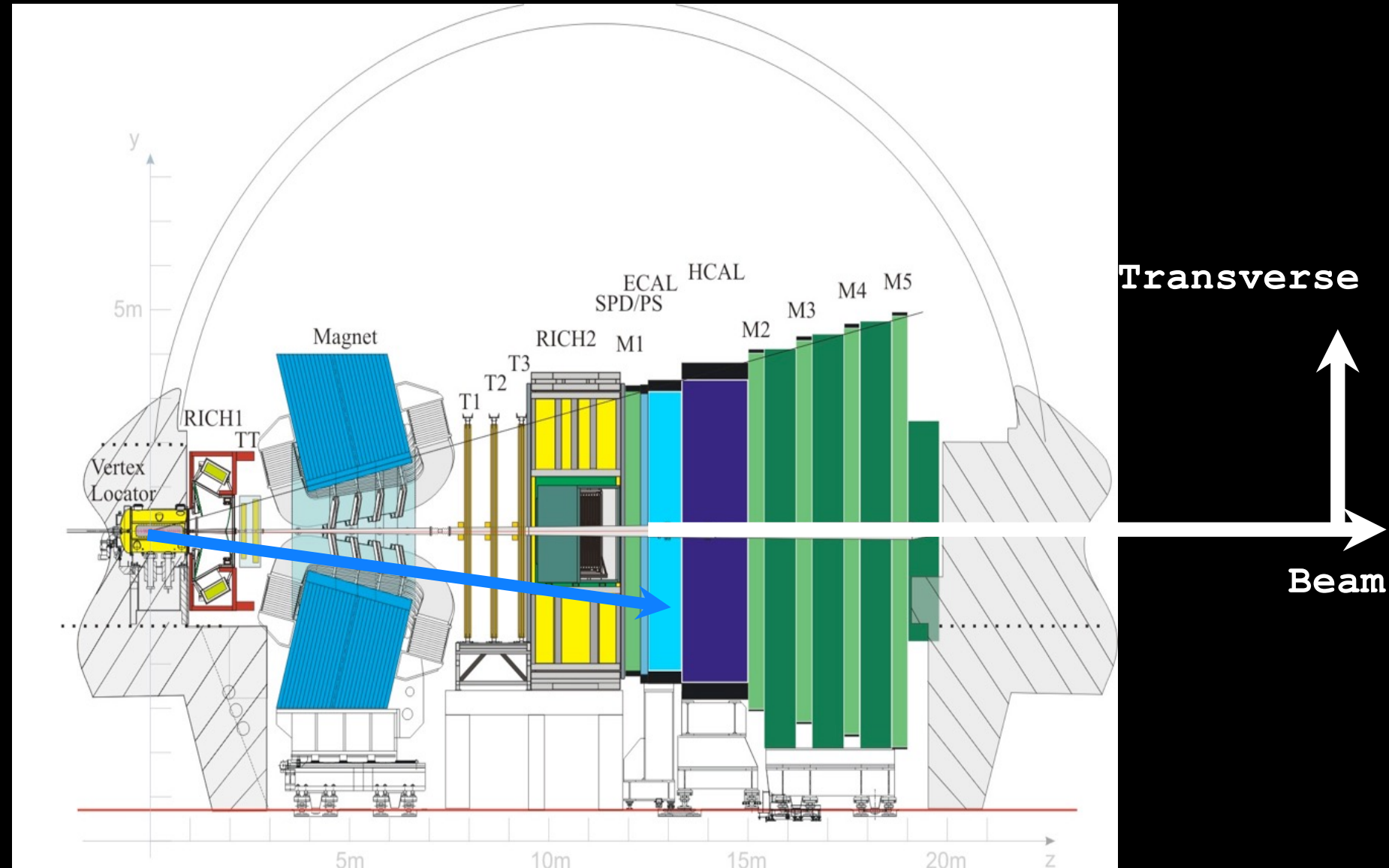


$p_T$  = Quantità di moto trasversa  
 $E_T$  = Energia trasversa

# LHCb @ LHC

→ ELETTRONI

→ FOTONI



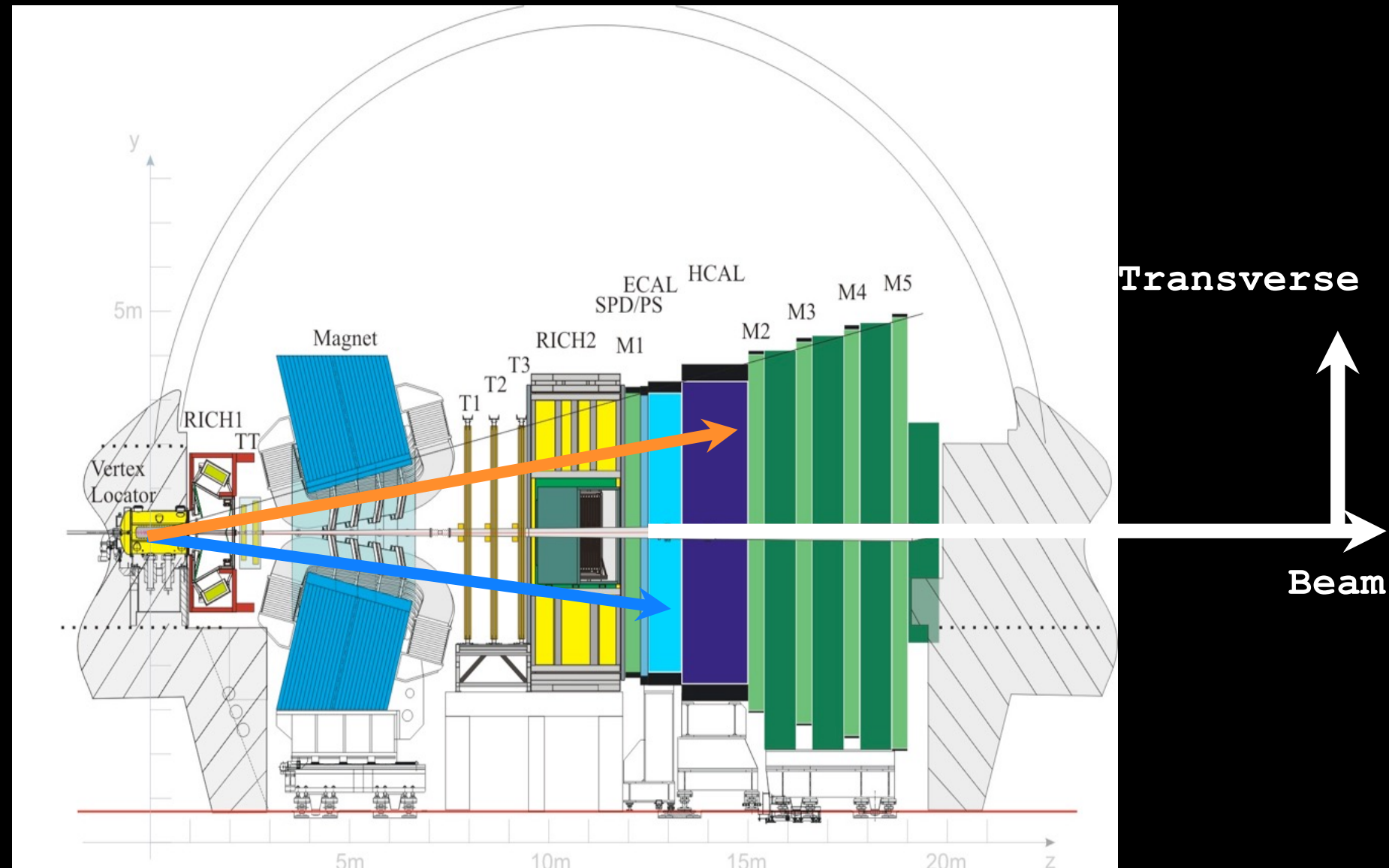
$p_T$  = Quantità di moto trasversa  
 $E_T$  = Energia trasversa

# LHCb @ LHC

→ ELETTRONI

→ FOTONI

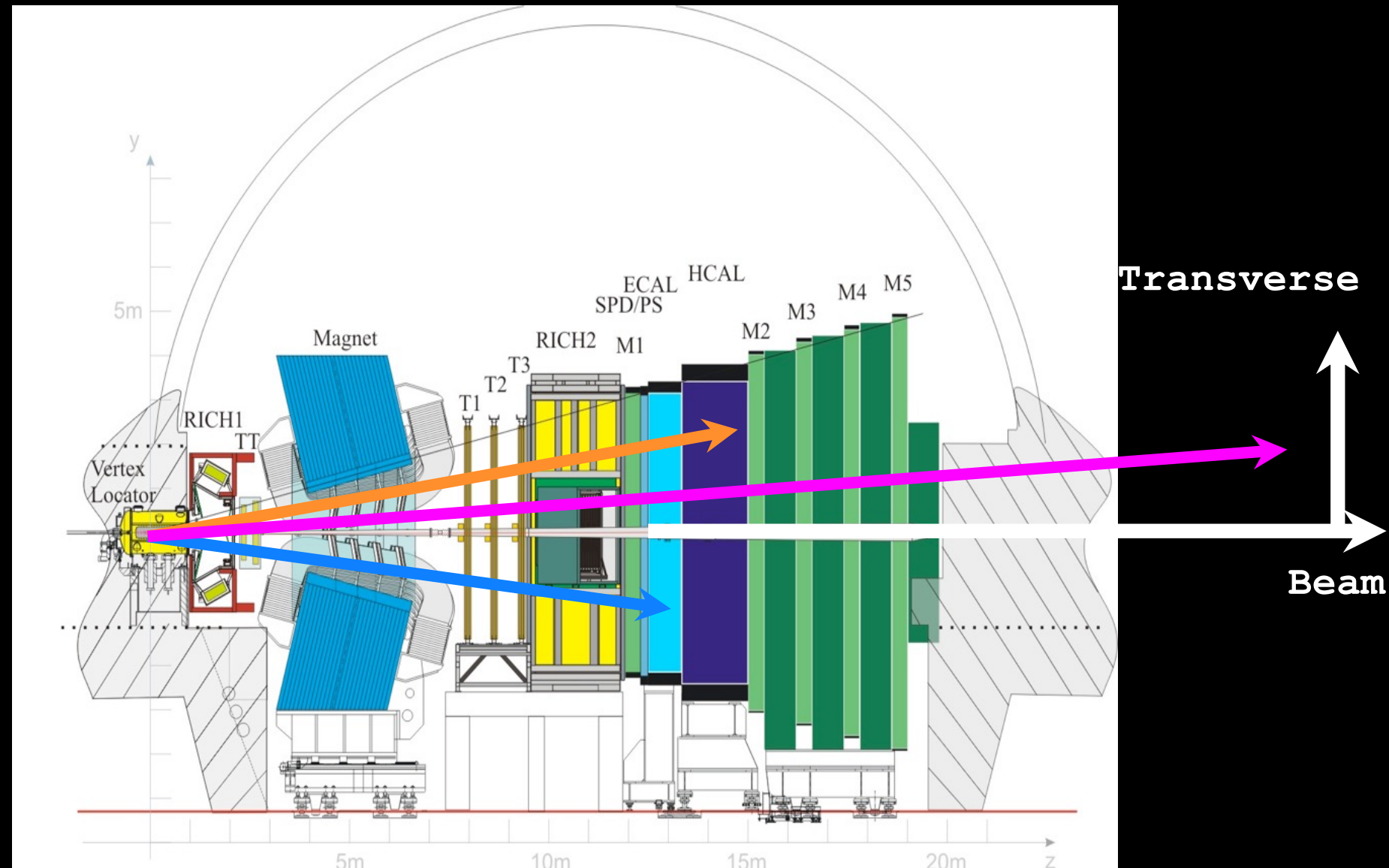
→ ADRONI



$p_T$  = Quantità di moto trasversa  
 $E_T$  = Energia trasversa

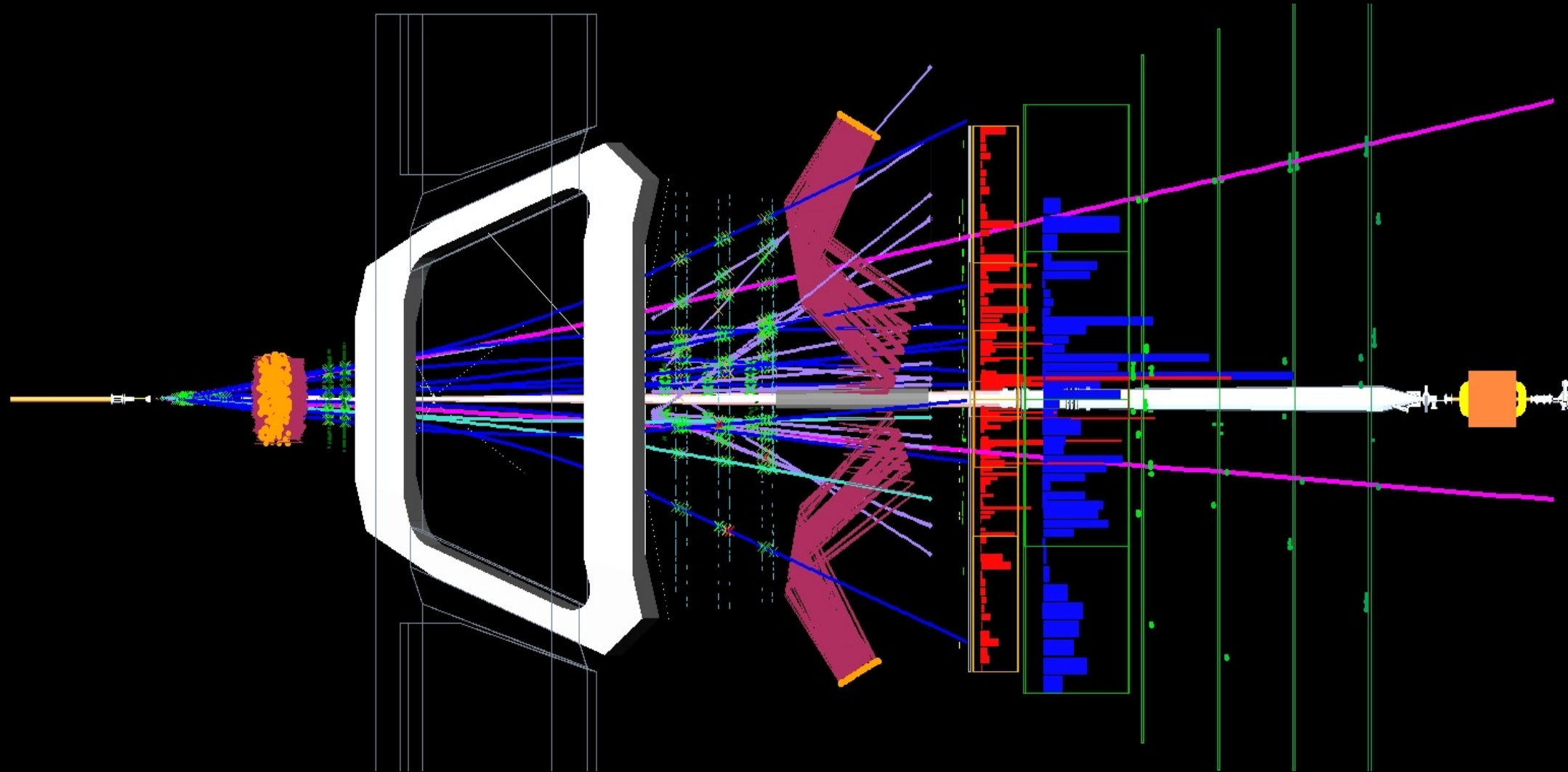
# LHCb @ LHC

- ELETTRONI
- FOTONI
- ADRONI
- MUONI



$p_T$  = Quantità di moto trasversa  
 $E_T$  = Energia trasversa

# Come appare una collisione



❖ La **traccia** è come una firma che la particella imprime nel rivelatore e va interpretata con opportuni strumenti di calcolo per permetterne l'identificazione e la misura delle **caratteristiche principali che sono l'energia e la direzione del moto**

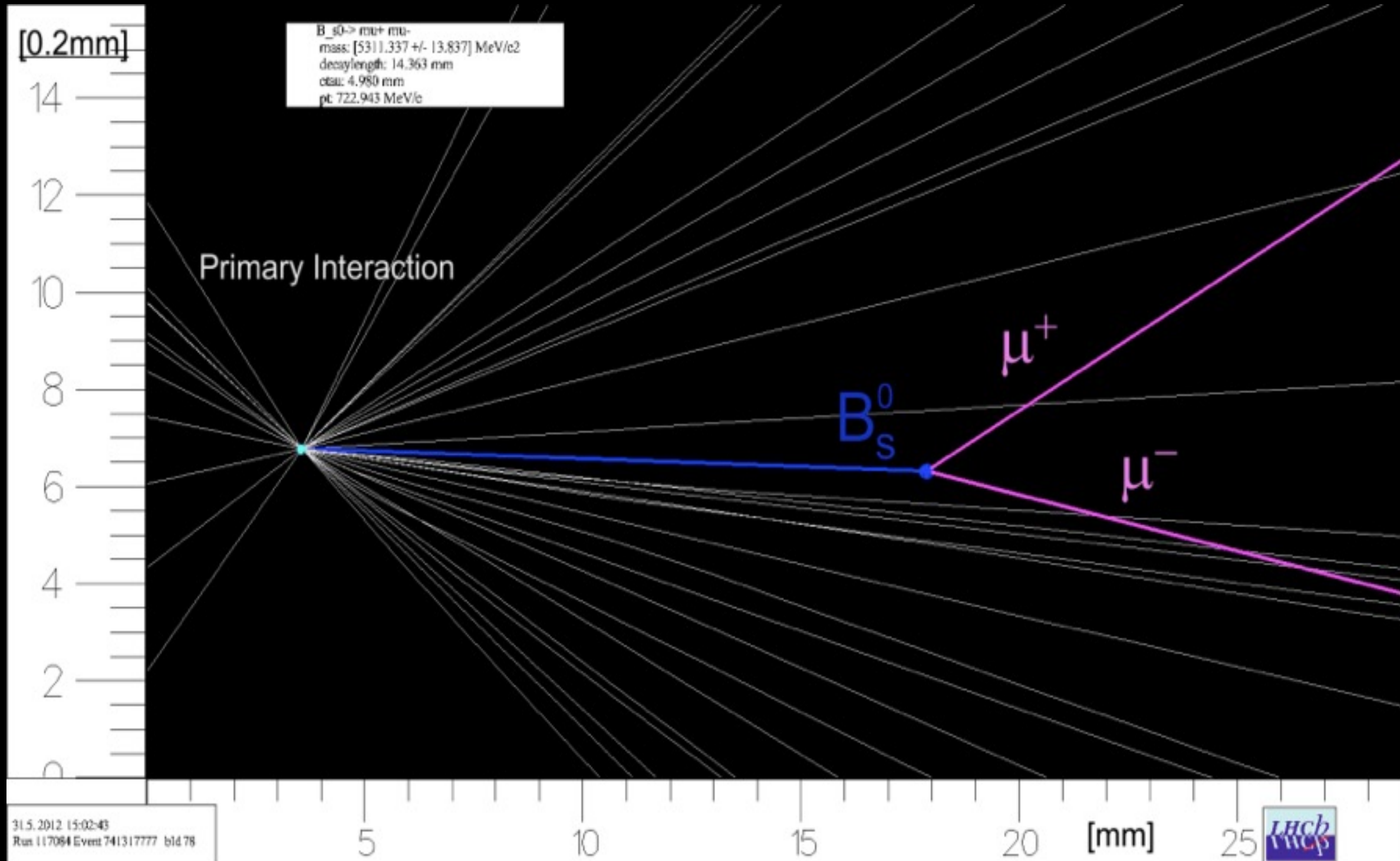
❖ **10 milioni di collisioni al secondo:**  
ma solo per **2000 di esse** vengono registrate le informazioni



**TRIGGER**  
decisione in 4 milionesimi di  
secondo o i dati saranno persi!<sup>24</sup>

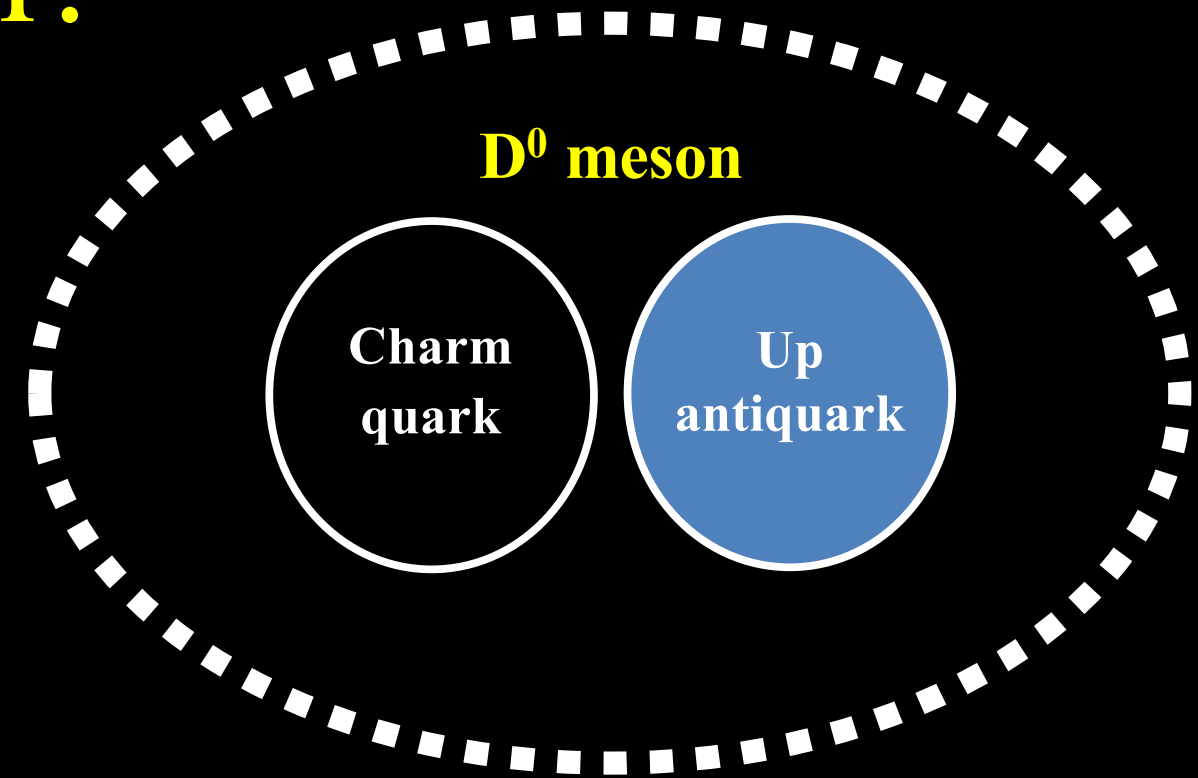


# Zoom al vertice dell'interazione



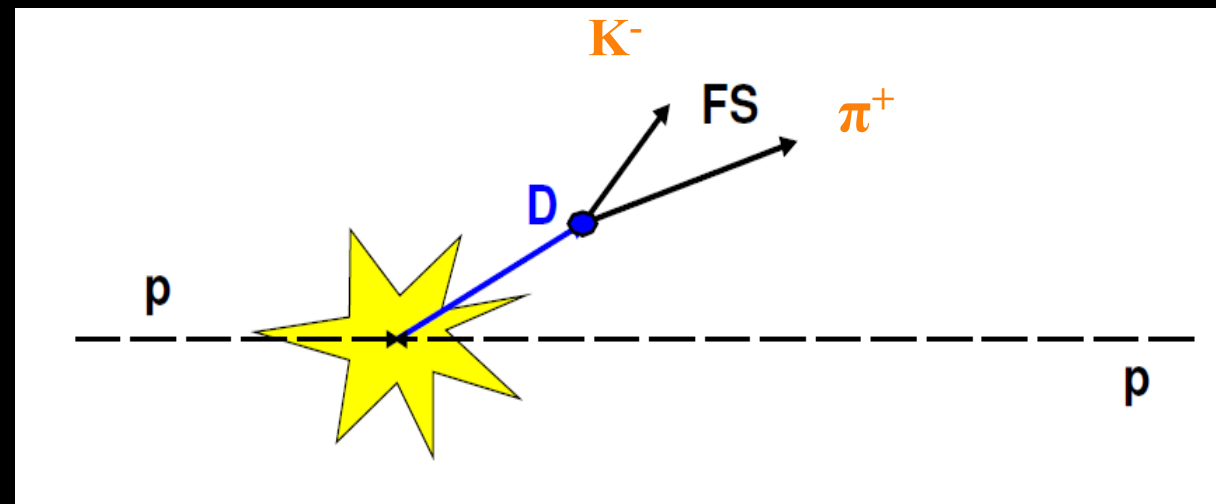
# Che cosa misurerete oggi?

L'obiettivo dell'esercizio è quello di misurare la **massa** e la **vita media** di una particella chiamata **D<sup>0</sup>**



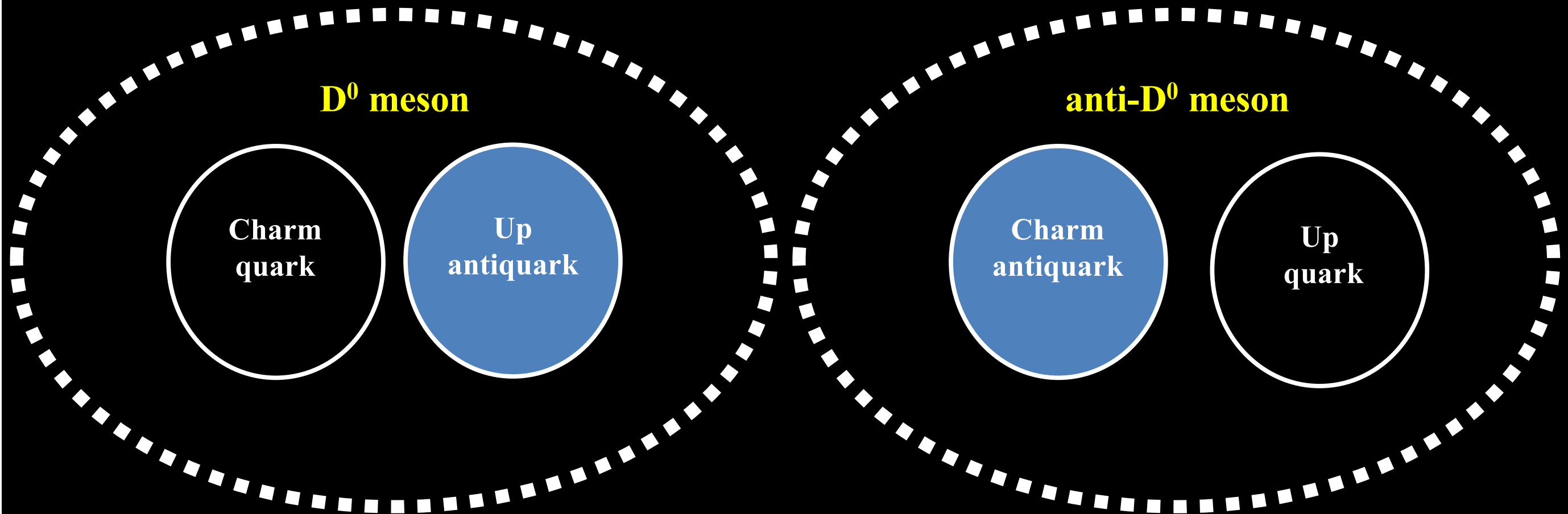
## Come si fa la misura?

- il **D<sup>0</sup>** può decadere in un coppia **K<sup>-</sup> π<sup>+</sup>**
- identifichiamo e misuriamo **K<sup>-</sup>** e **π<sup>+</sup>**
- ricostruiamo il vertice del decadimento
- calcoliamo l'energia e la massa del **D<sup>0</sup>**



# Perché il mesone $D^0$ è così speciale?

## Oscilla!



- ❖ Il  $D^0$  è una particella neutra:  
può oscillare fra gli stati di materia e di antimateria prima di decadere!
- ❖  $D^0$  e anti- $D^0$  possono avere proprietà leggermente differenti:  
il loro comportamento può dare vita a piccole asimmetrie fra materia e antimateria

# Vita media delle particelle

Particelle instabili decadono spontaneamente in sistemi più leggeri  $N(t) = N_0 e^{(-t/\tau)}$

Tempo di dimezzamento: quando  $N(T_{1/2}) = \frac{1}{2} N_0 \rightarrow \tau = T_{1/2} / \ln(2) = \text{Vita Media}$

Type	Name	Symbol	Energy (MeV)	Mean lifetime
Lepton	Electron / Positron	$e^- / e^+$	0.511	$> 4.6 \times 10^{26}$ years
	Muon / Antimuon	$\mu^- / \mu^+$	105.7	$2.2 \times 10^{-6}$ seconds
	Tau lepton / Antitau	$\tau^- / \tau^+$	1777	$2.9 \times 10^{-13}$ seconds
Meson	Neutral Pion	$\pi^0$	135	$8.4 \times 10^{-17}$ seconds
	Charged Pion	$\pi^+ / \pi^-$	139.6	$2.6 \times 10^{-8}$ seconds
Baryon	Proton / Antiproton	$p^+ / p^-$	938.2	$> 10^{29}$ years
	Neutron / Antineutron	$n / \bar{n}$	939.6	885.7 seconds
Boson	W boson	$W^+ / W^-$	80,400	$10^{-25}$ seconds
	Z boson	$Z^0$	91,000	$10^{-25}$ seconds

Uno spettro enorme nei valori delle vite medie, voi misurerete una vita media piuttosto piccola!

$D_0 :$

$$\tau = 0.41 \times 10^{-12} \text{ s}$$

# Misura della vita media

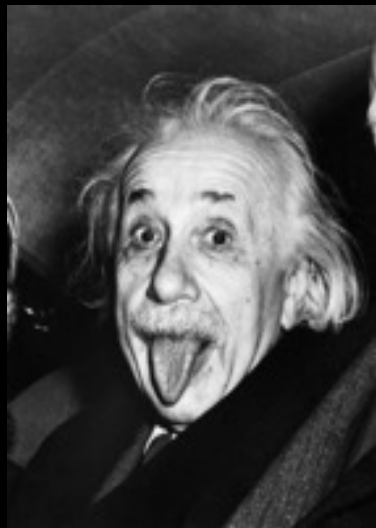
Per esempio consideriamo una particella con **vita media di  $10^{-12}$  secondi**

Se viaggiasse alla velocità della luce ( $c=3 \times 10^8$  m/s) prima di decadere percorrerebbe uno spazio pari a

$$\tau \times c = 3 \times 10^8 \times 10^{-12} \text{ m} = 3 \times 10^{-4} \text{ metri} = 0.3 \text{ mm}$$

Non è una distanza molto lunga... ma per fortuna il calcolo è sbagliato...

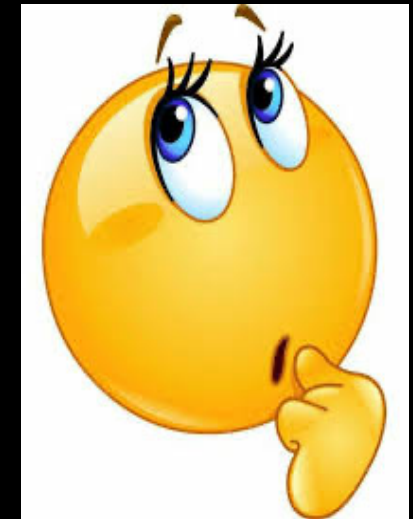
Quando si trattano particelle che viaggiano vicino alla velocità della luce, entra in gioco la relatività speciale!



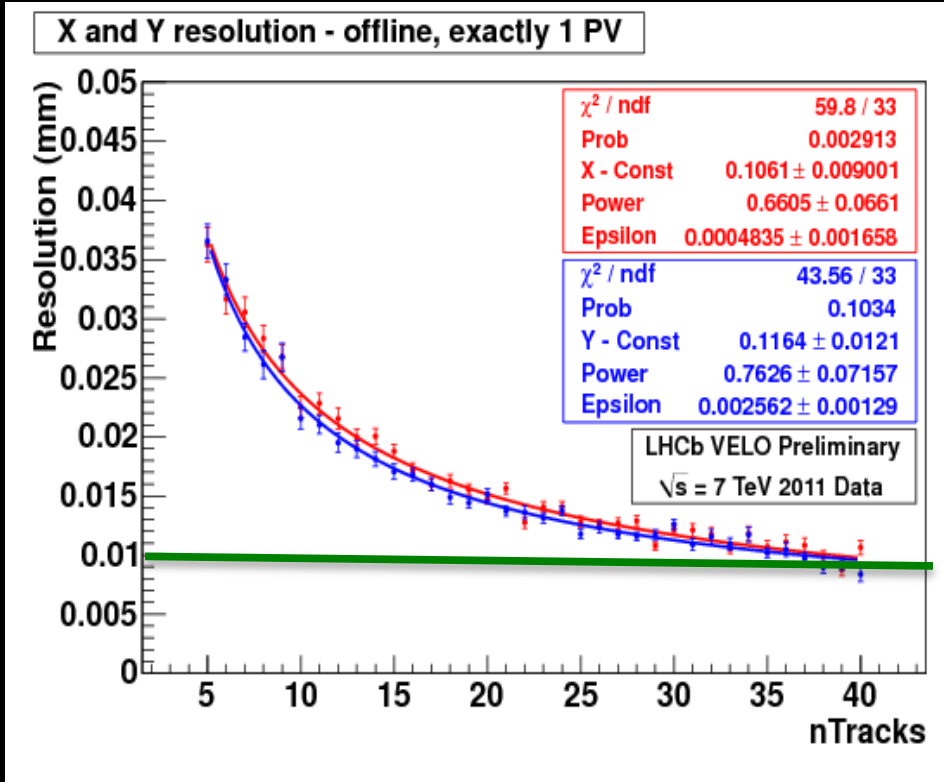
Le particelle vivono di più a causa della dilatazione del tempo:

$$t' = t / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

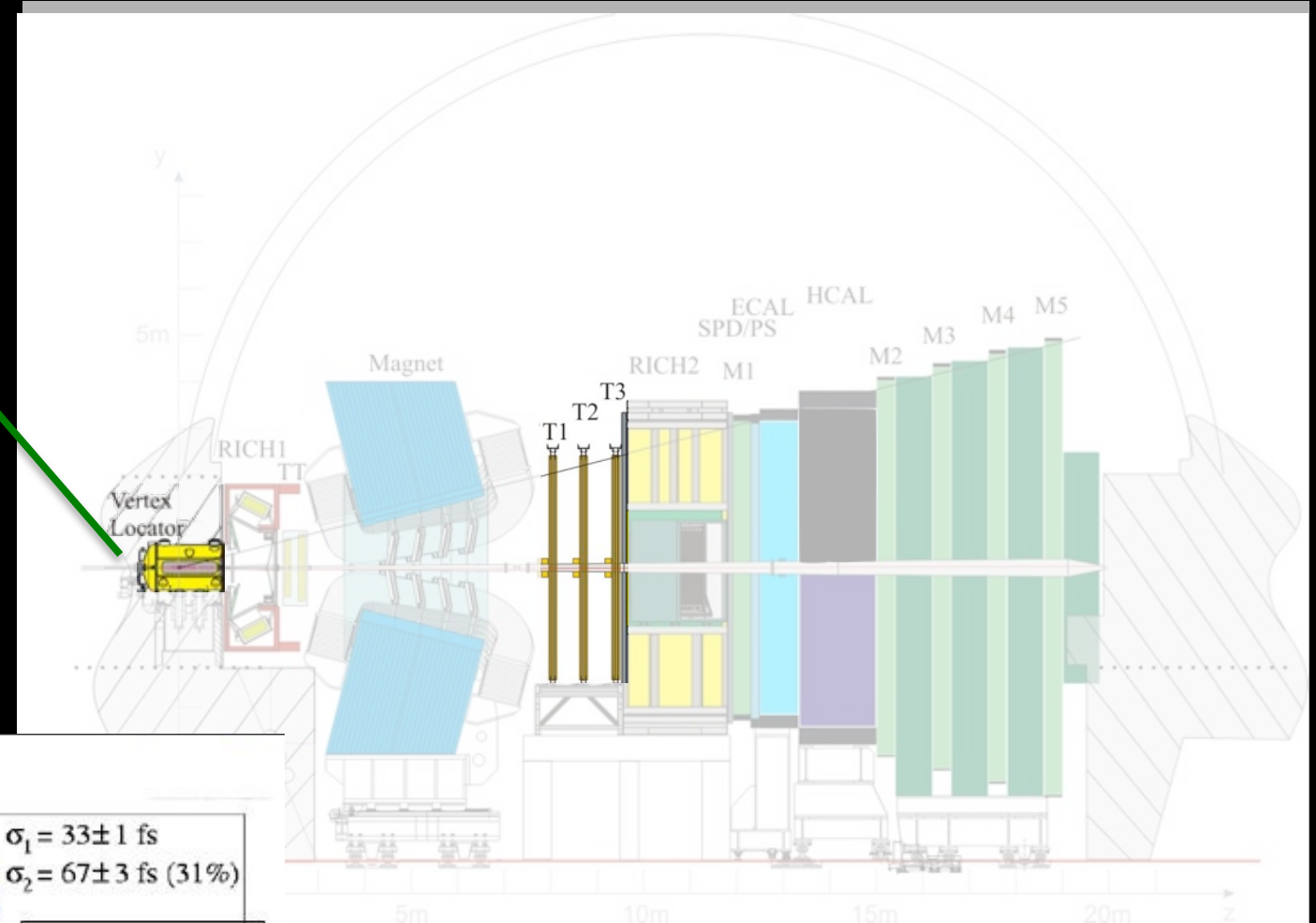
Tipicamente una particella a LHCb con una vita media di  $10^{-12}$  secondi viaggia per circa 1 cm, abbastanza da rendere misurabile tale distanza!



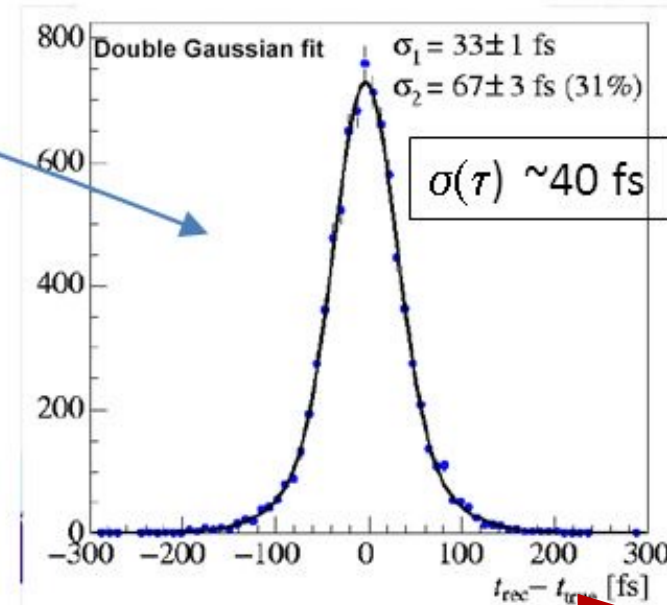
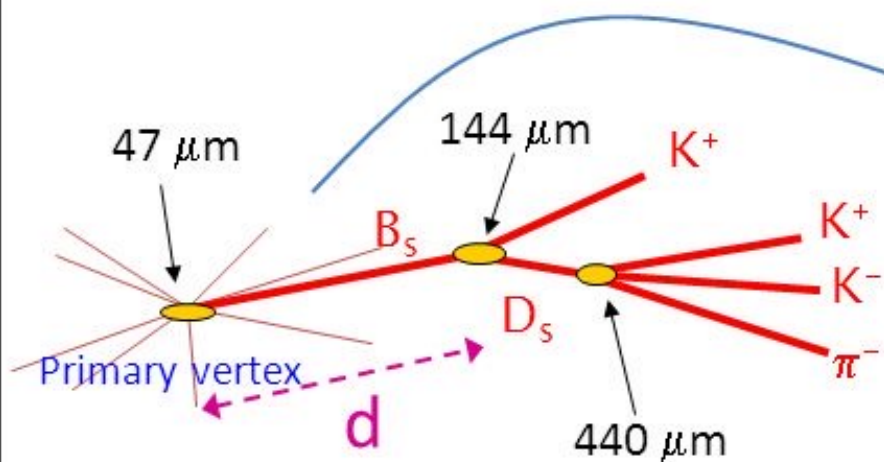
# Prestazioni di LHCb



Risoluzione  
 fino a  
 1/100 di mm



Example:  $B_s \rightarrow D_s K$

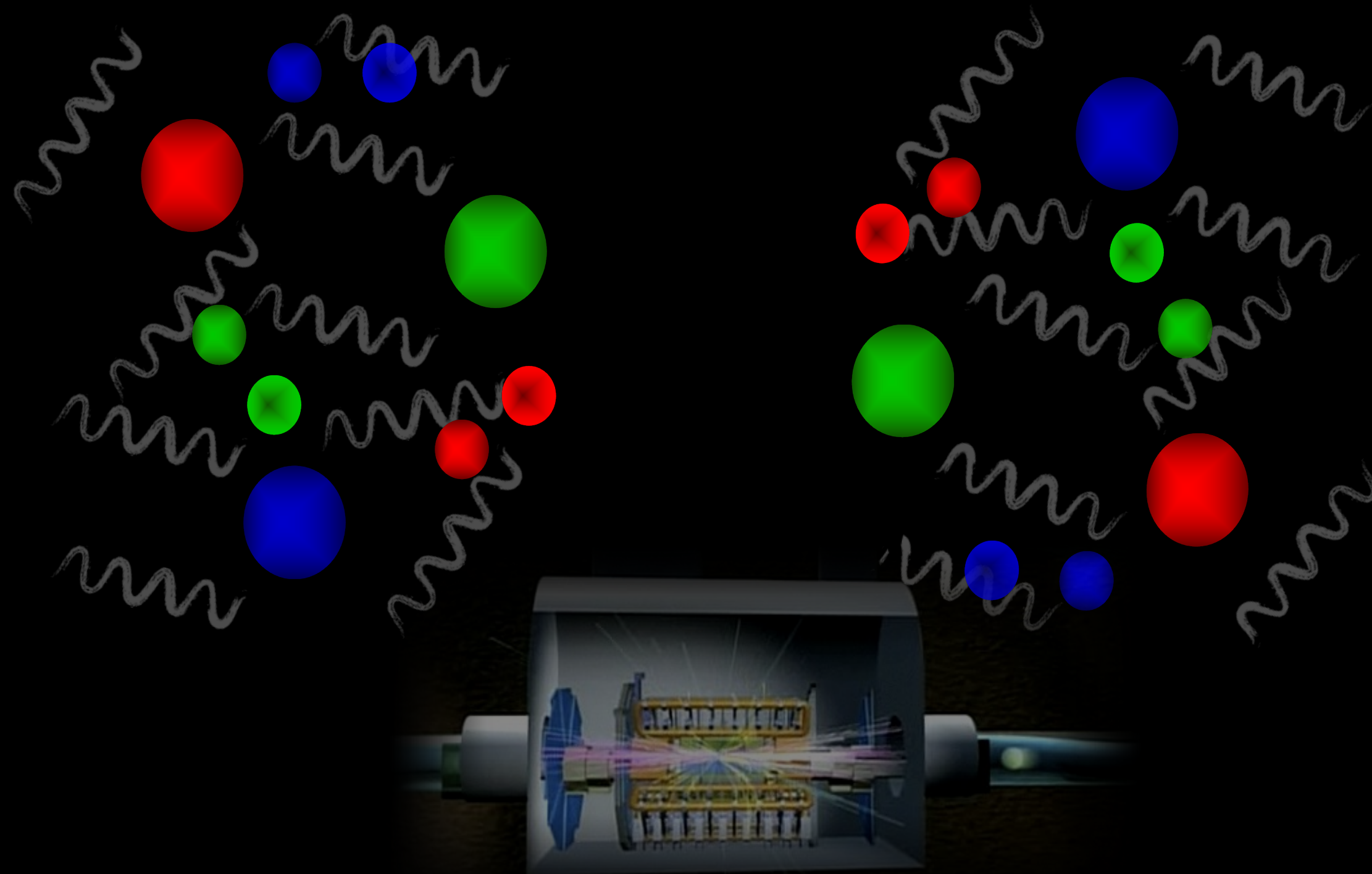


Decay time resolution = 40 fs

$1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$   
 (1 milionesimo di miliardesimo di secondo)

**Possiamo misurare vite medie  
 fino a  $\sim 10^{-14}$  secondi**

# Collisioni tra protoni...



# Produzione di adroni con Charm @ LHC



**Il 10% delle collisioni a LHC produce un adrone contenente almeno un quark charm:  
LHCb ha già acquisito diversi miliardi di eventi con decadimenti di particelle con charm**

**Certo non riuscirete ad analizzarli tutti.....**



# Conclusioni

- **LHCb** è uno dei 4 maggiori esperimenti a **LHC**
- **GOAL:** comprendere l'asimmetria fra materia e antimateria
- **COME:**
  - studia i decadimenti di particelle instabili prodotte nelle collisioni **p-p**
  - le particelle prodotte sono identificate e misurate nei rivelatori
- **VOI:** misurerete la massa e la vita media del **D<sup>0</sup>**



I dettagli nella prossima presentazione di Mauro Piccini