



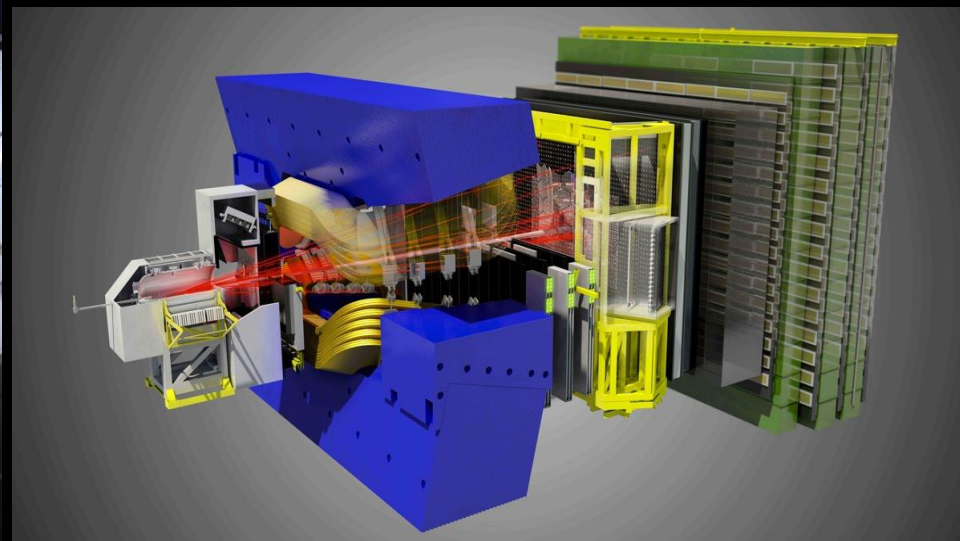
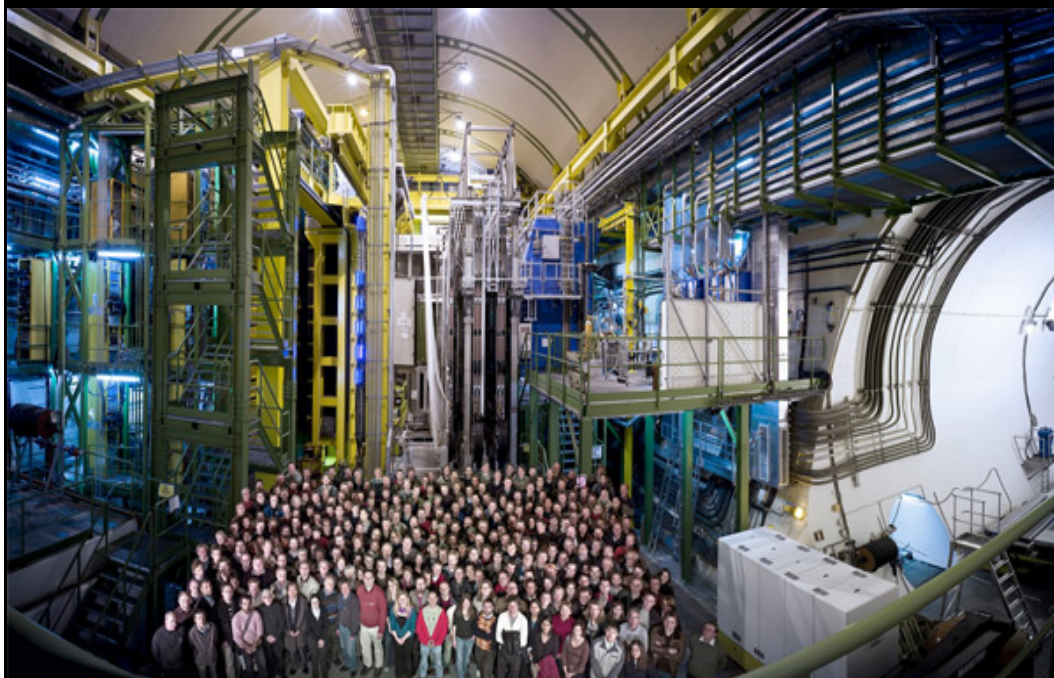
LHCb @ CERN

Masterclass 2021



Perugia 16/02/2021

Monica Pepe
INFN Sezione di Perugia

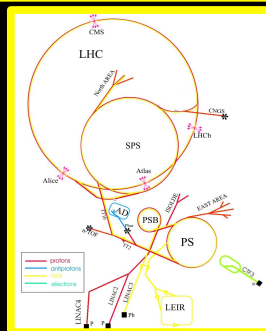


Sommario

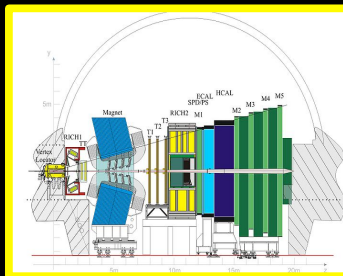
❖ Big Bang:
Materia e Anti-materia



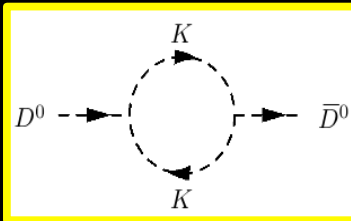
❖ Gli Acceleratori al CERN



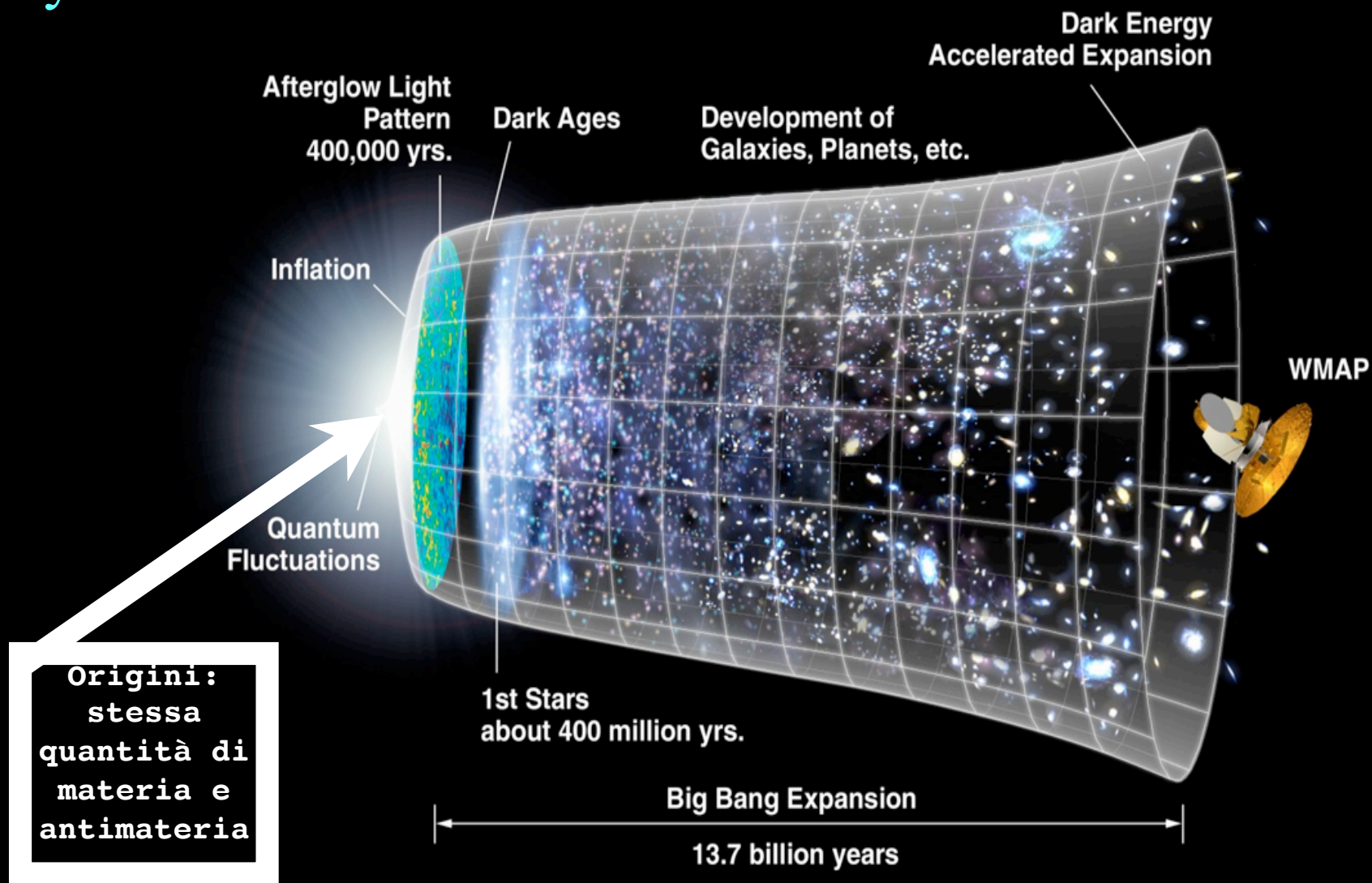
❖ L'esperimento LHCb



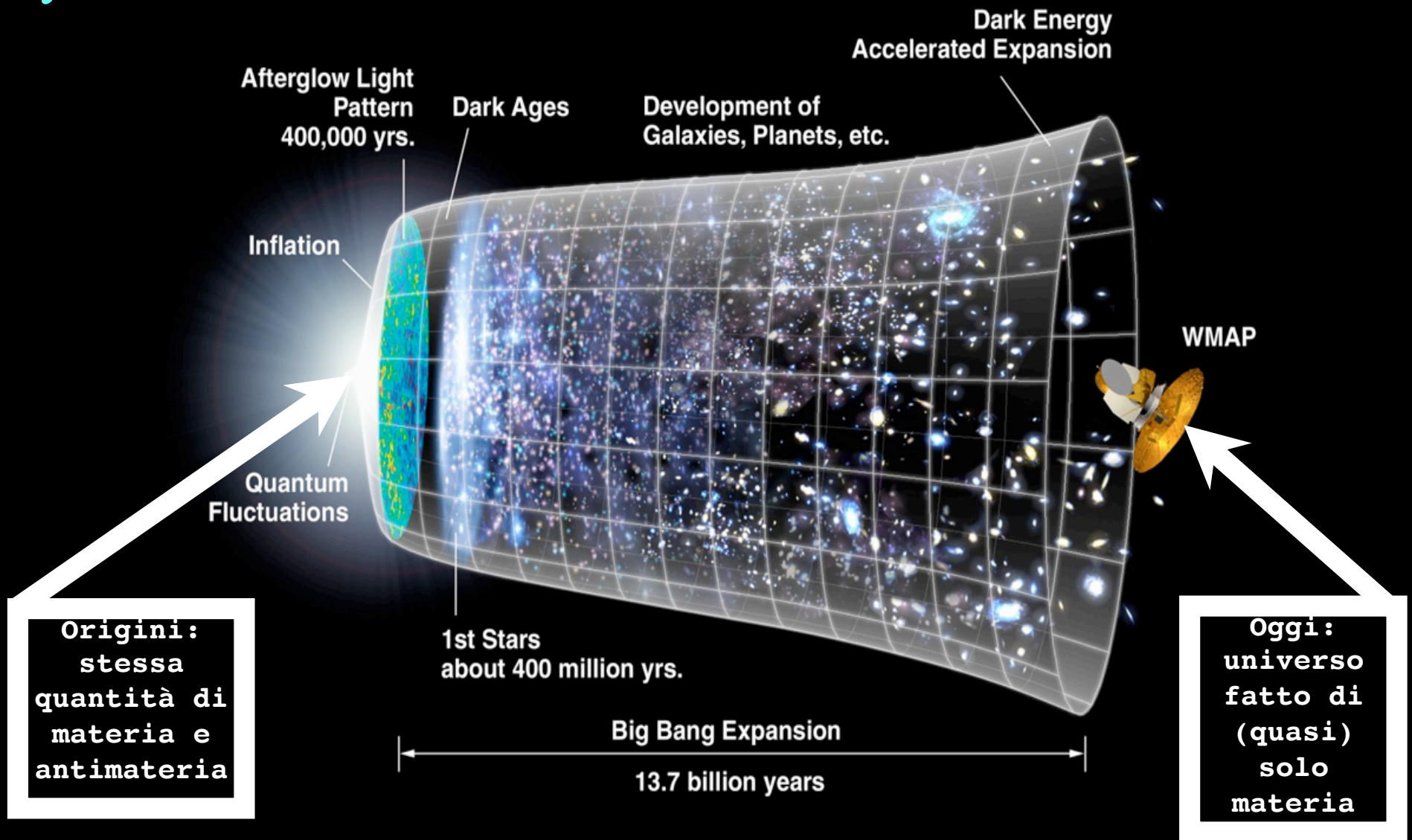
❖ La vostra misura



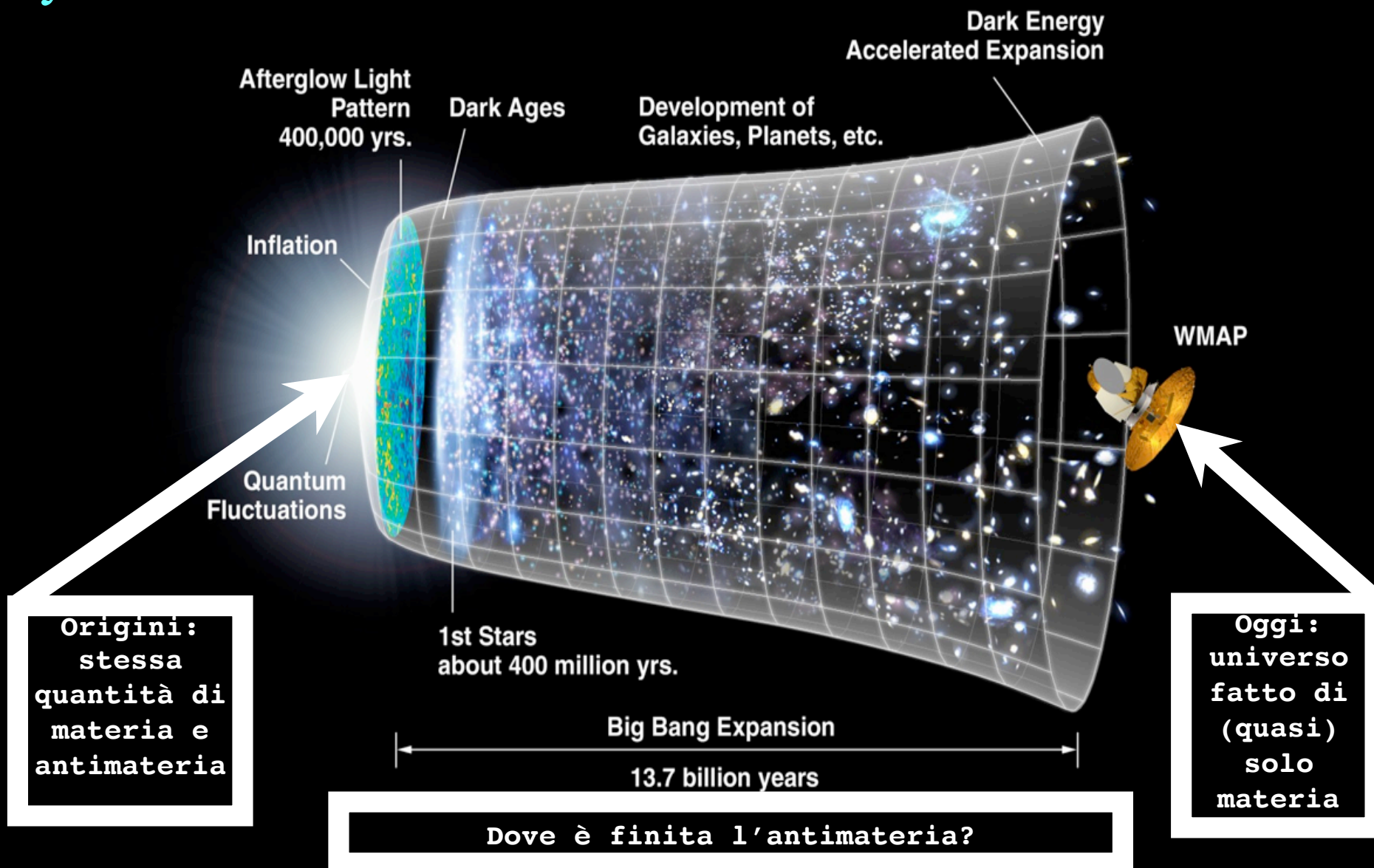
Why does antimatter matter?



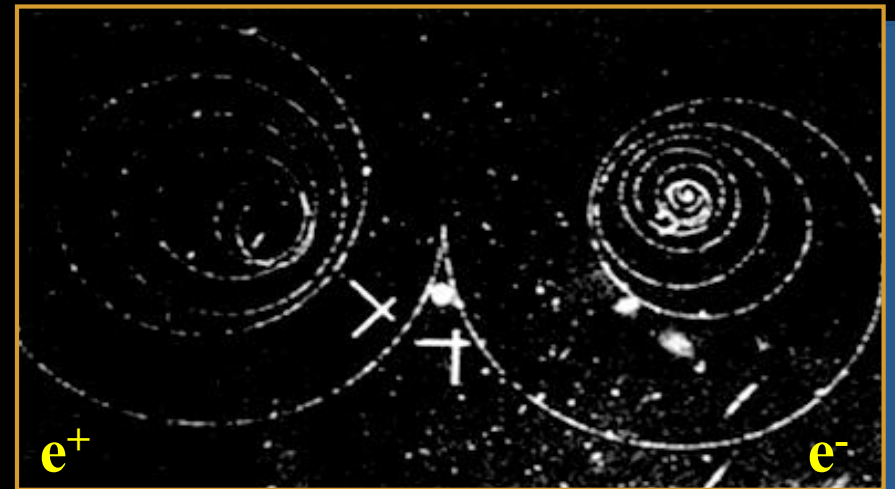
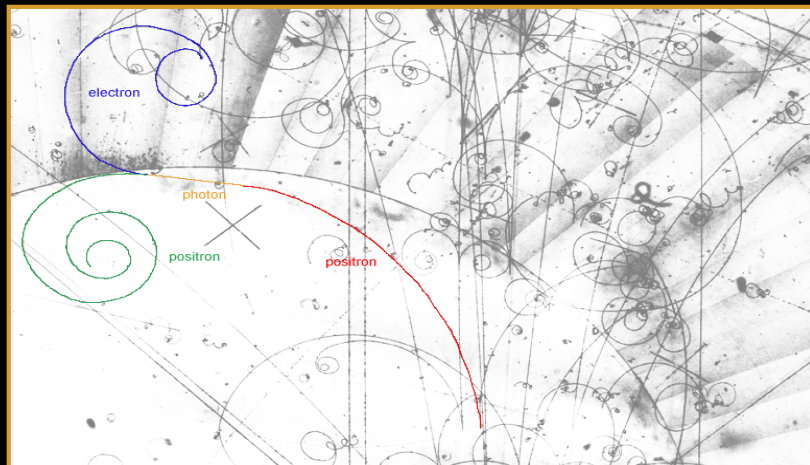
Why does antimatter matter?



Why does antimatter matter?

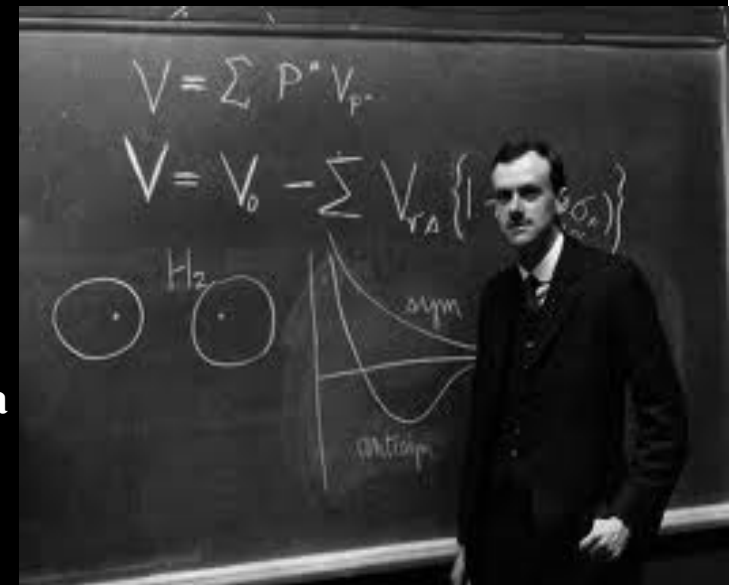


- Un esempio di **antimateria** è il **positrone**
 - postulato da **Dirac** nel 1928
 - osservato per la prima volta da **Anderson** nel 1932 fra le particelle prodotte dai raggi cosmici nell'impatto con l'atmosfera terrestre



➤ **Equazione di Dirac:**

Una nuova equazione del moto prodotta dalla Relatività applicata alla Meccanica Quantistica prevede delle soluzioni inaspettate: particelle con energia negativa... che viaggiano all'indietro nel tempo...

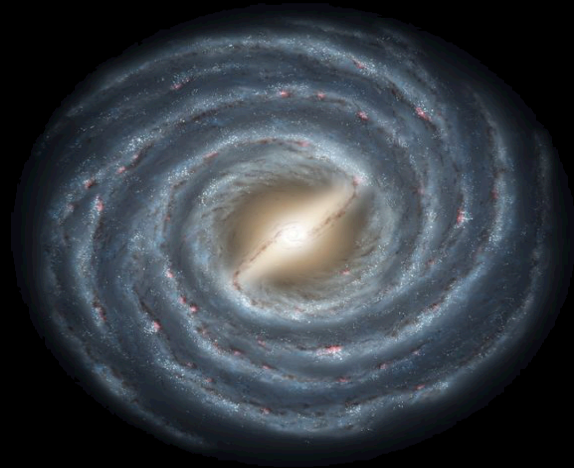


Dopo la scoperta del positrone sono interpretate come anti-particelle: l'anti-materia

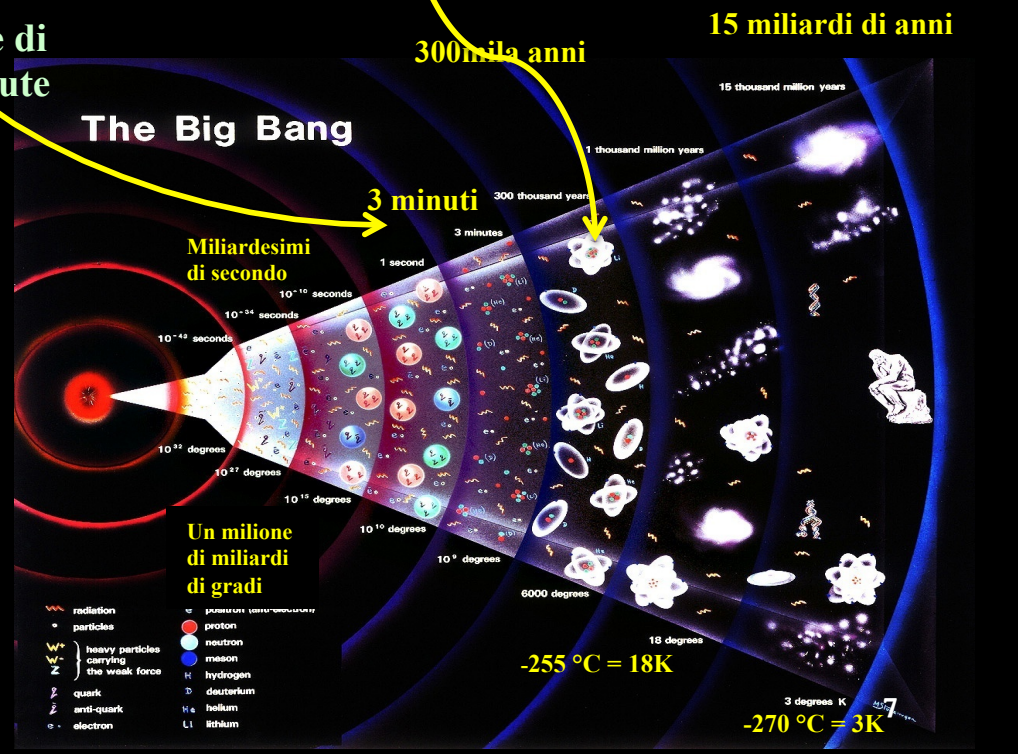
La teoria del Big Bang

- **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) le particelle sono decadute in altre particelle fondamentali 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

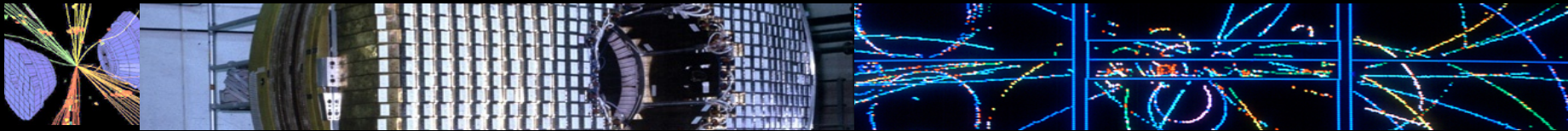


Studiamo le particelle elementari per ricreare l'ambiente del primo Universo



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



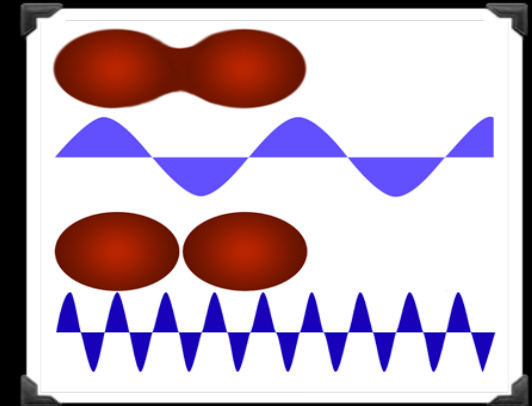
Come il microscopio più avanzato....

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

Energia maggiore → piccola lunghezza d'onda
→ particolari più piccoli

$$E = h\nu$$

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



Bastano 3 “semplici” operazioni :

- **Concentrare l'energia nelle particelle**

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

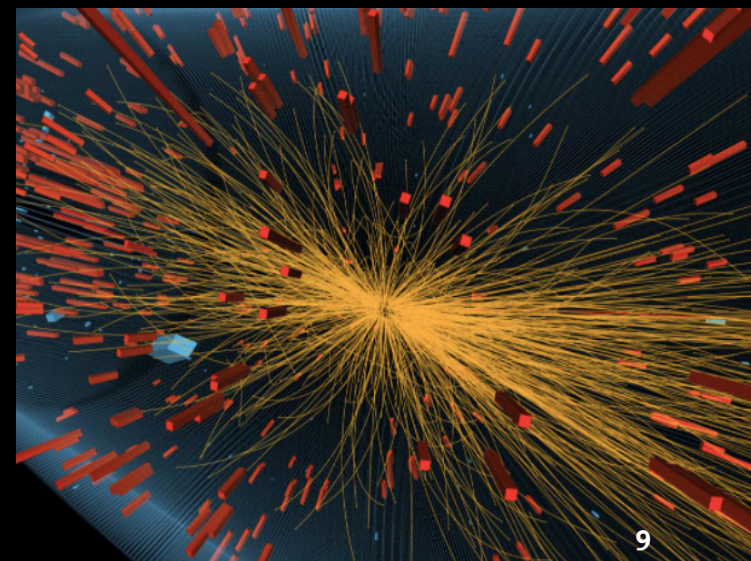
- **Fare collidere le particelle**

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: $E = mc^2$

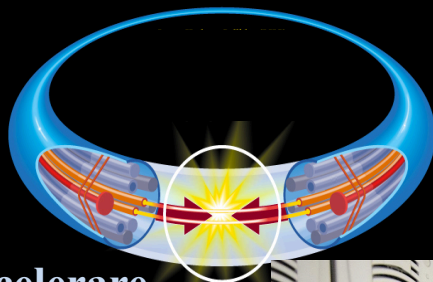
- **Misurare il risultato con un rivelatore**
studiare le leggi della fisica



Cosa serve?

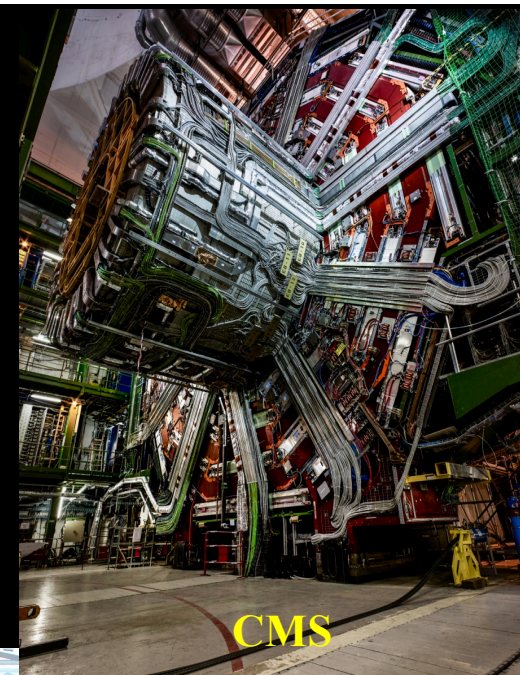
1. Acceleratori:

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:

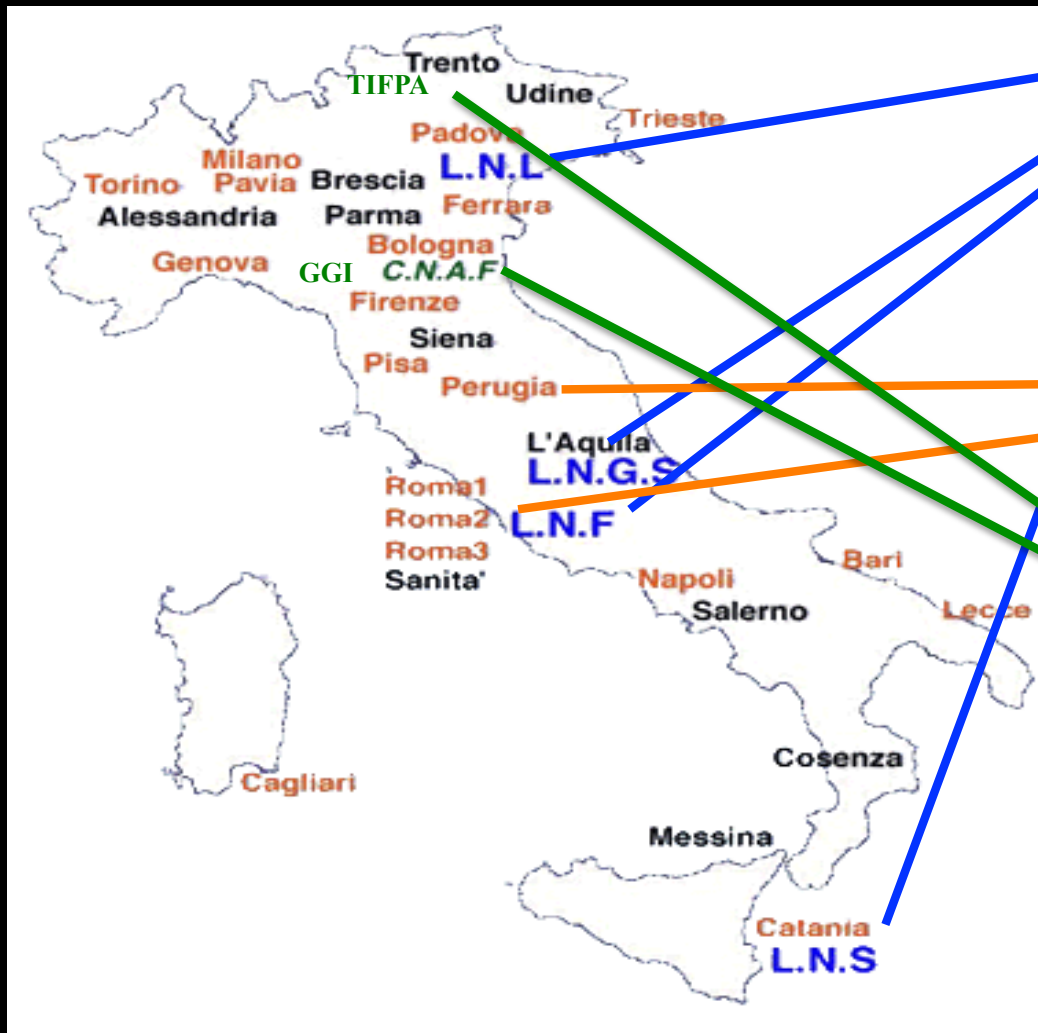
raccogliere, immagazzinare, distribuire e analizzare enormi quantità di dati prodotti dai rivelatori

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

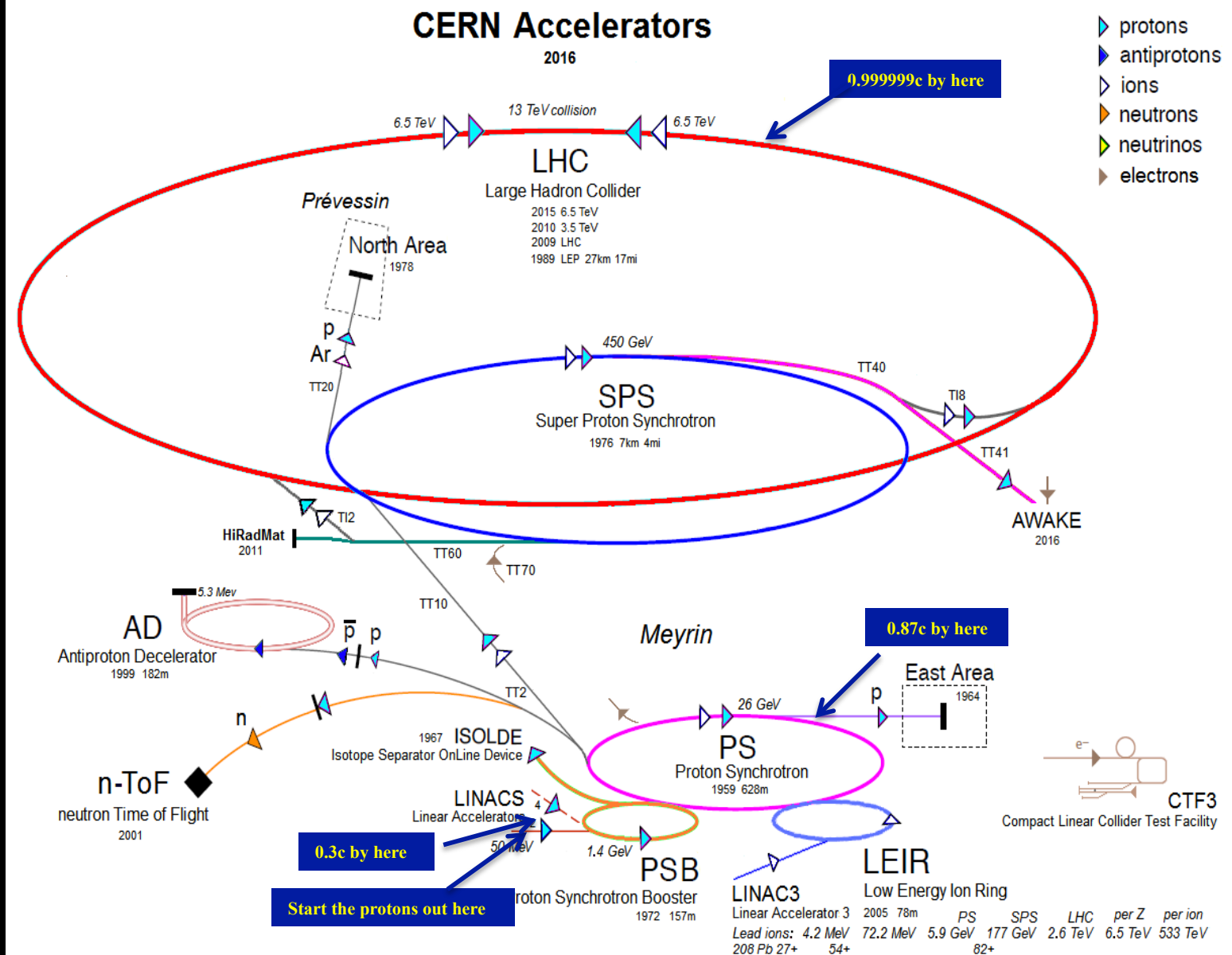
Elettronvolt

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

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

Auto a 100km/h

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



LHC = Large Hadron Collider

Jura mountains

France

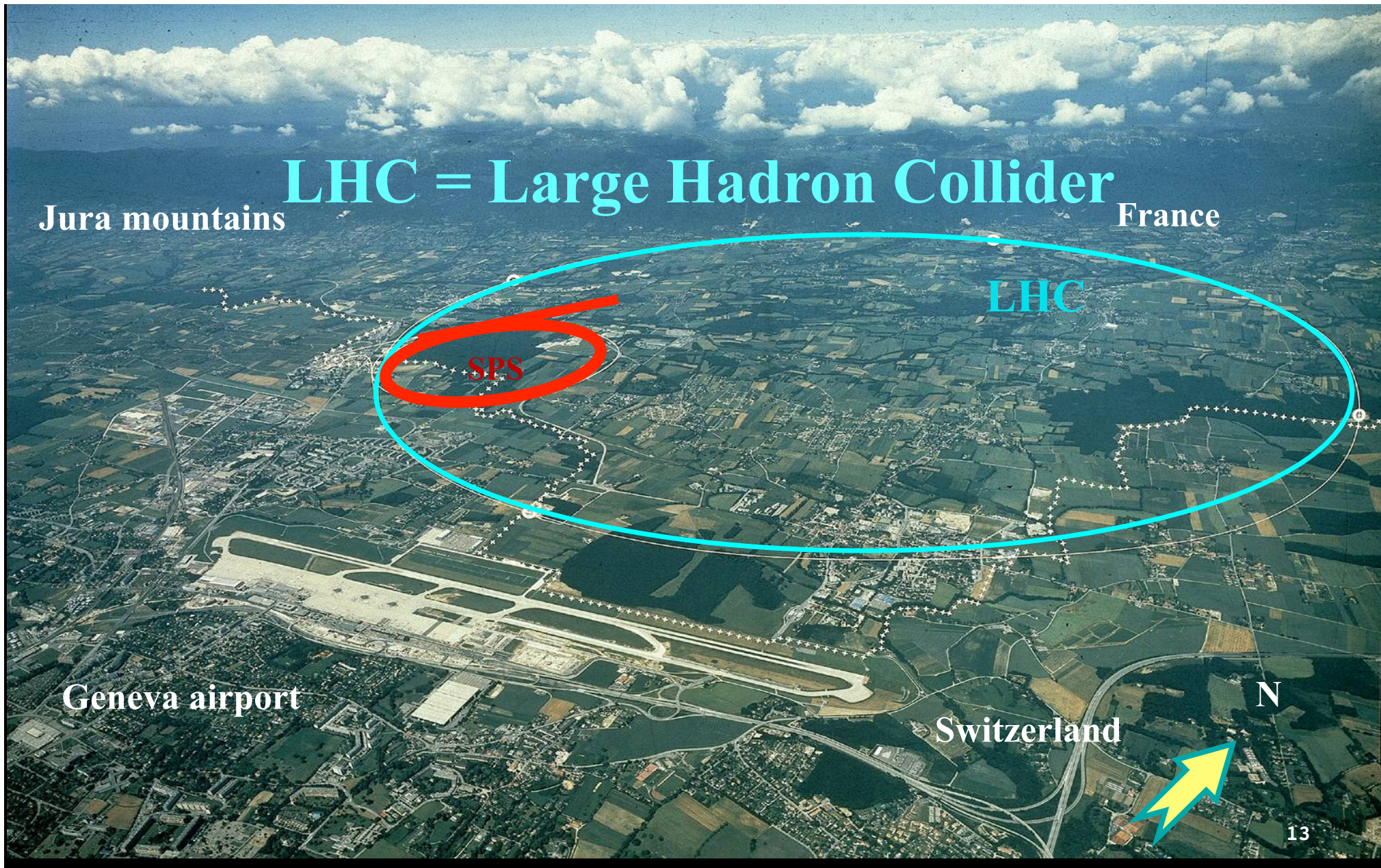
LHC

SPS

Geneva airport

Switzerland

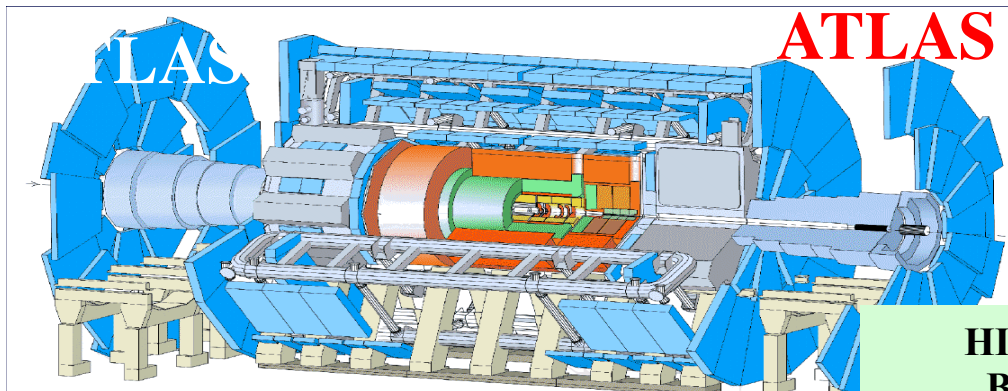
N



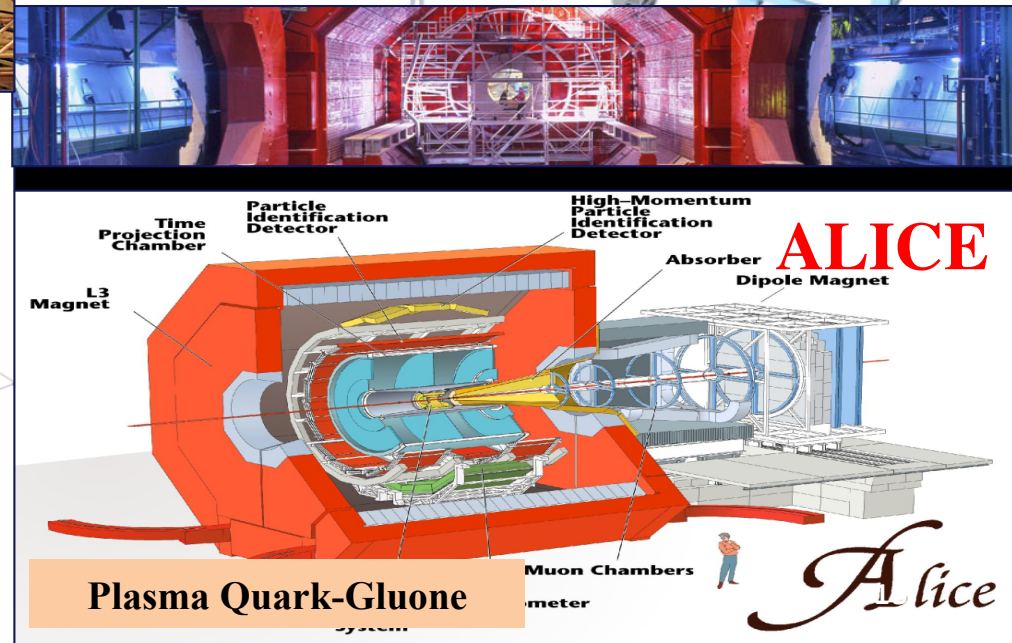
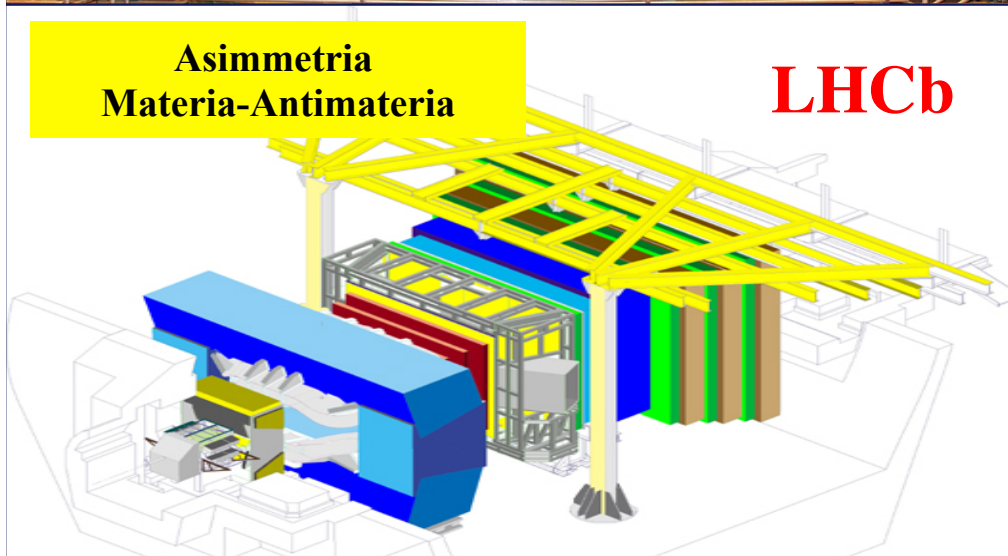
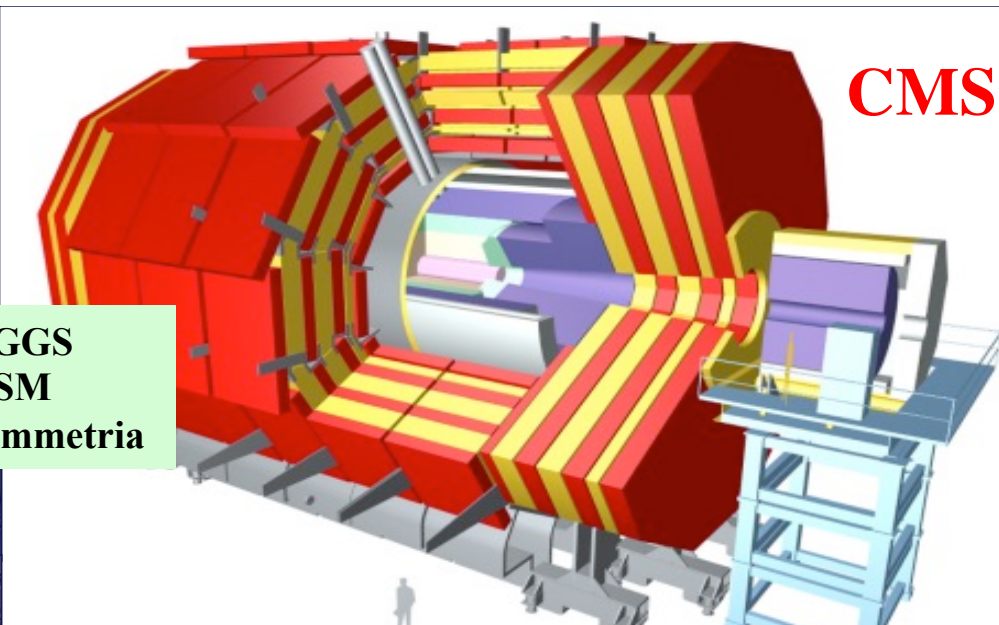
Large Hadron Collider @ CERN



- 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....



HIGGS
BSM
Supersimmetria



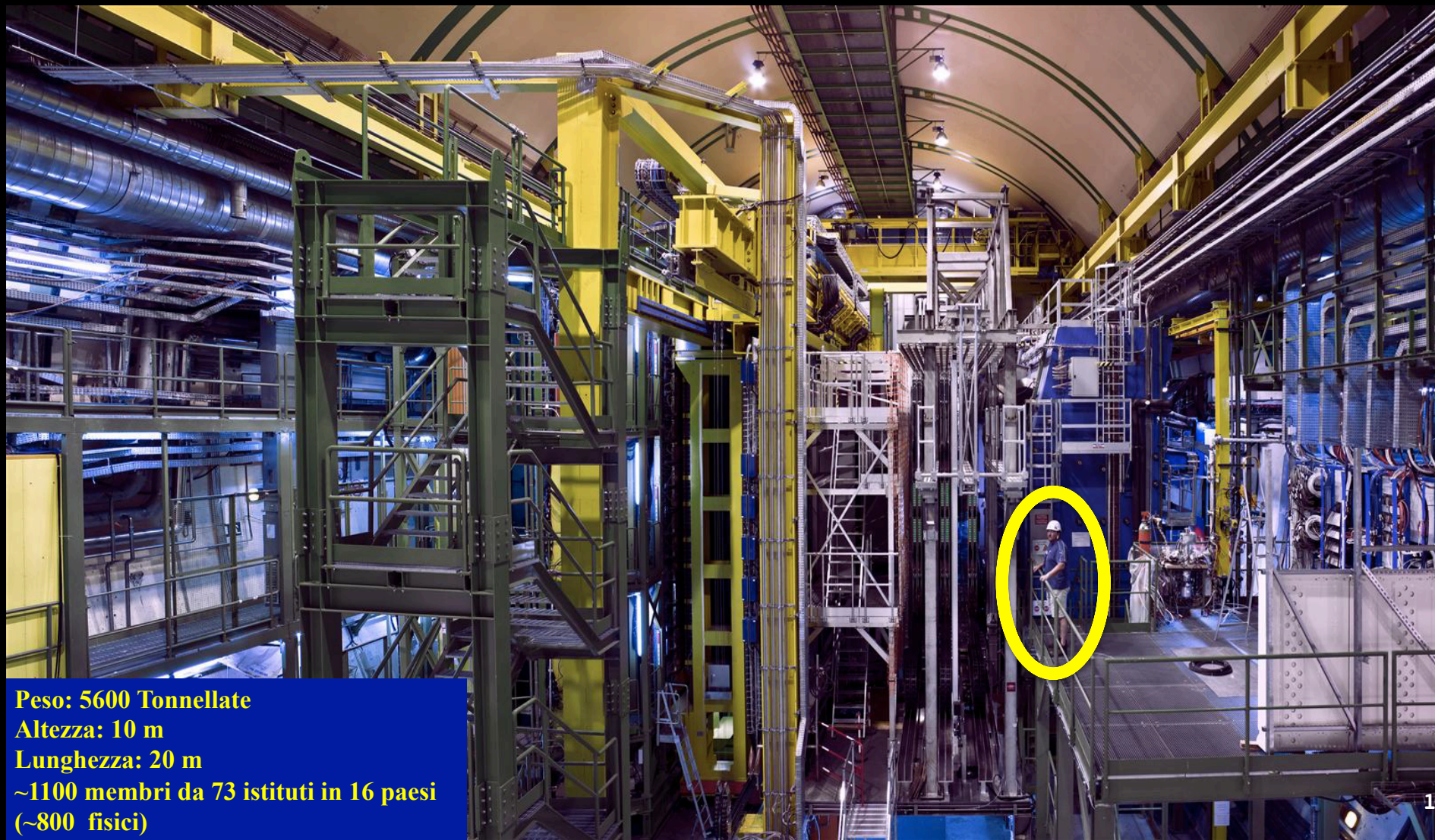
Overall view of the LHC experiments.

Scendiamo ora al punto 8



La caverna di LHCb a 100m sotto terra

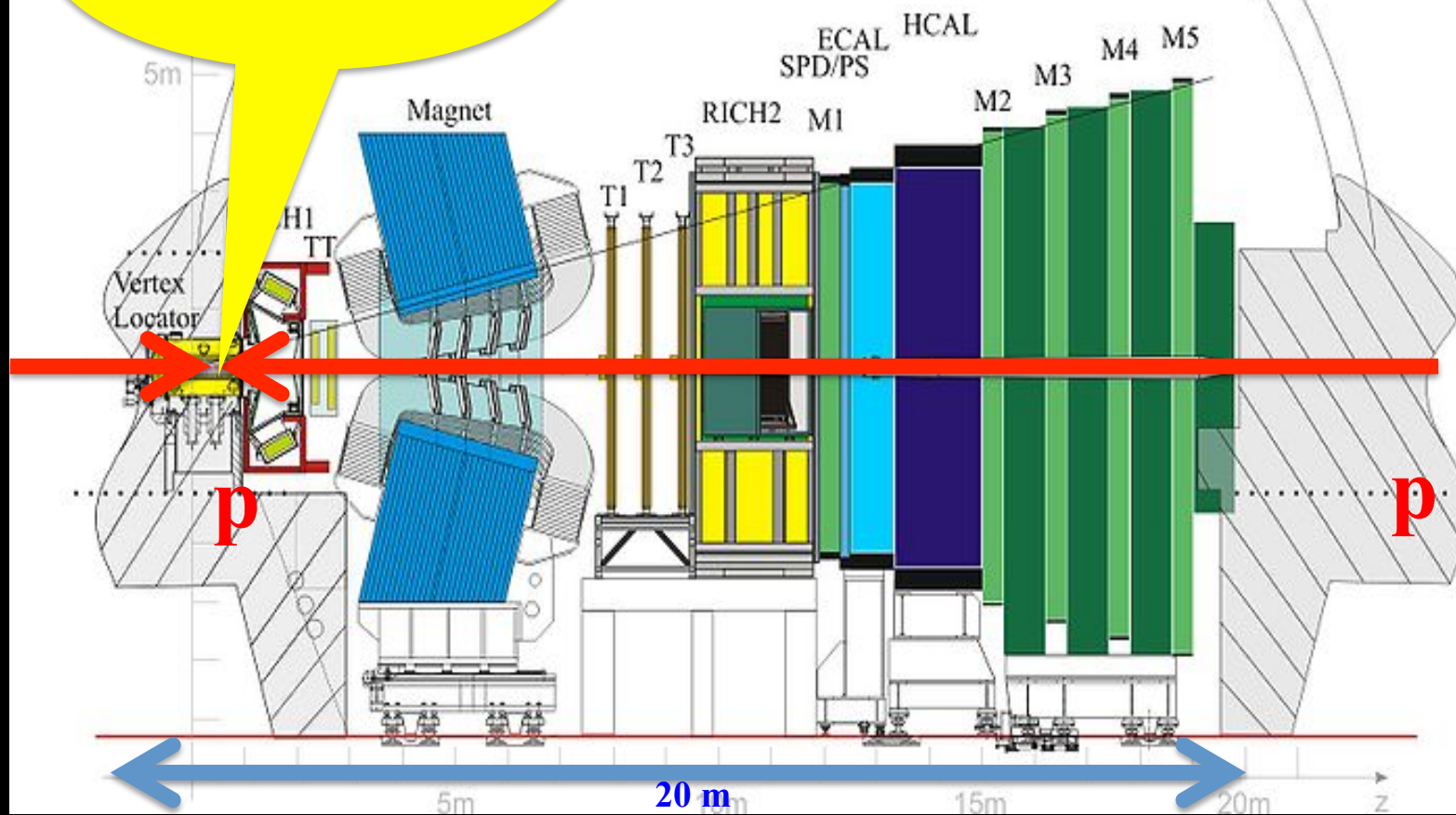
B come **Beauty** ma l'esperimento è ideale anche per rivelare particelle con **Charm**



Peso: 5600 Tonnellate
Altezza: 10 m
Lunghezza: 20 m
~1100 membri da 73 istituti in 16 paesi
(~800 fisici)

LHCb con i vari “strati” sovrapposti

Punto di collisione

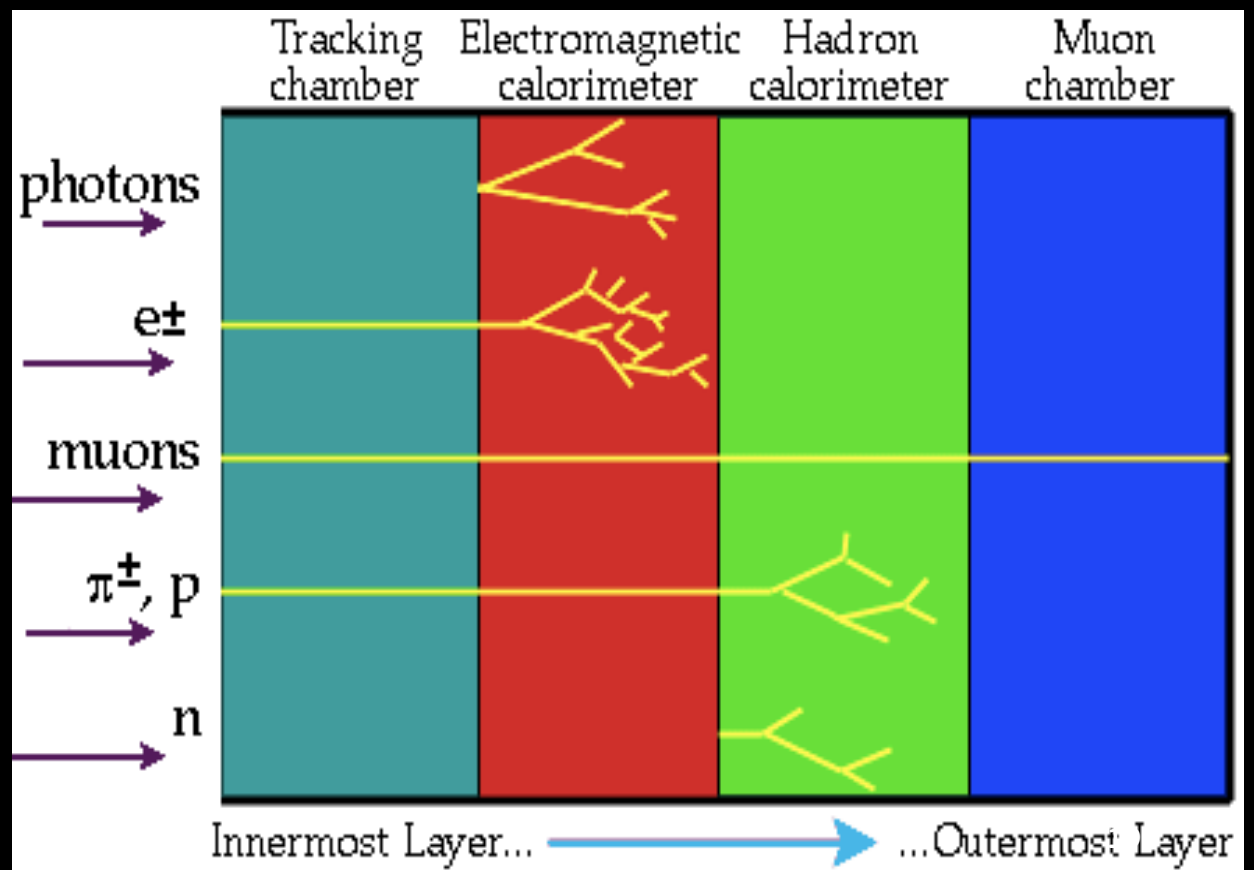


Come identifichiamo le particelle

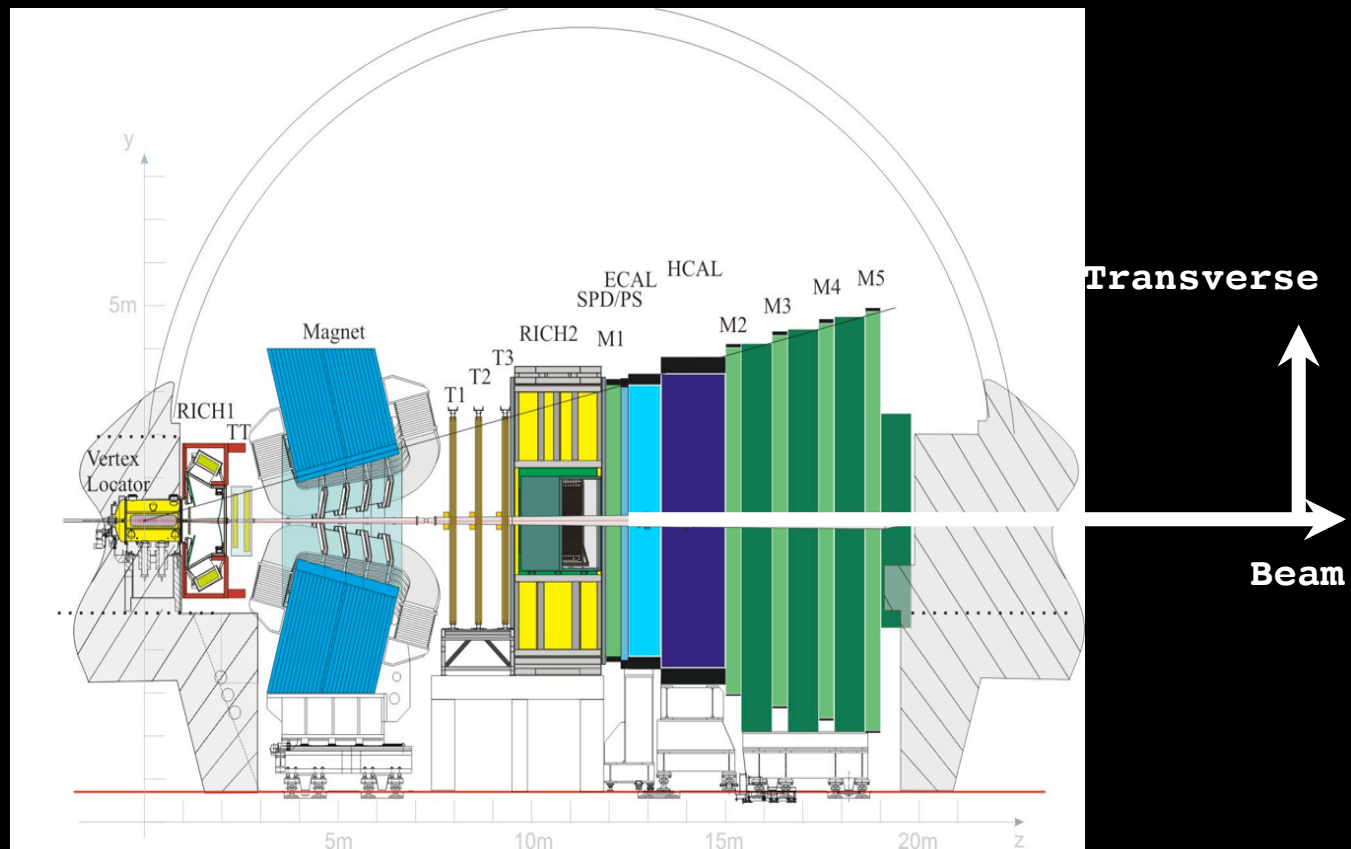
Per ricostruire che cosa succede in un'interazione tra due protoni dobbiamo identificare il più gran numero di particelle che sono prodotte nello stato finale determinandone le proprietà (energia, velocità,...)

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”



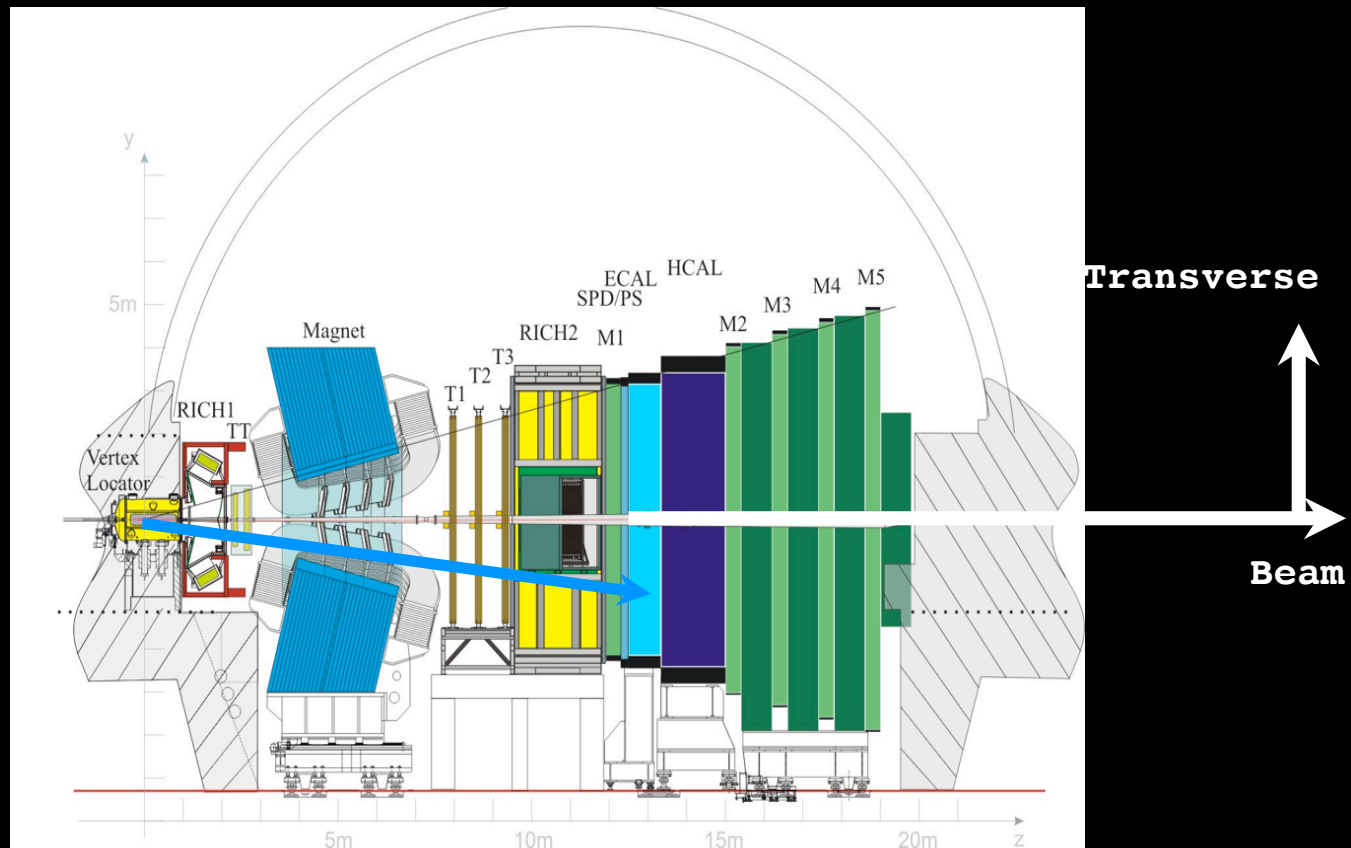
LHCb @ LHC



p_T = Quantità di moto trasversa
 E_T = Energia trasversa

LHCb @ LHC

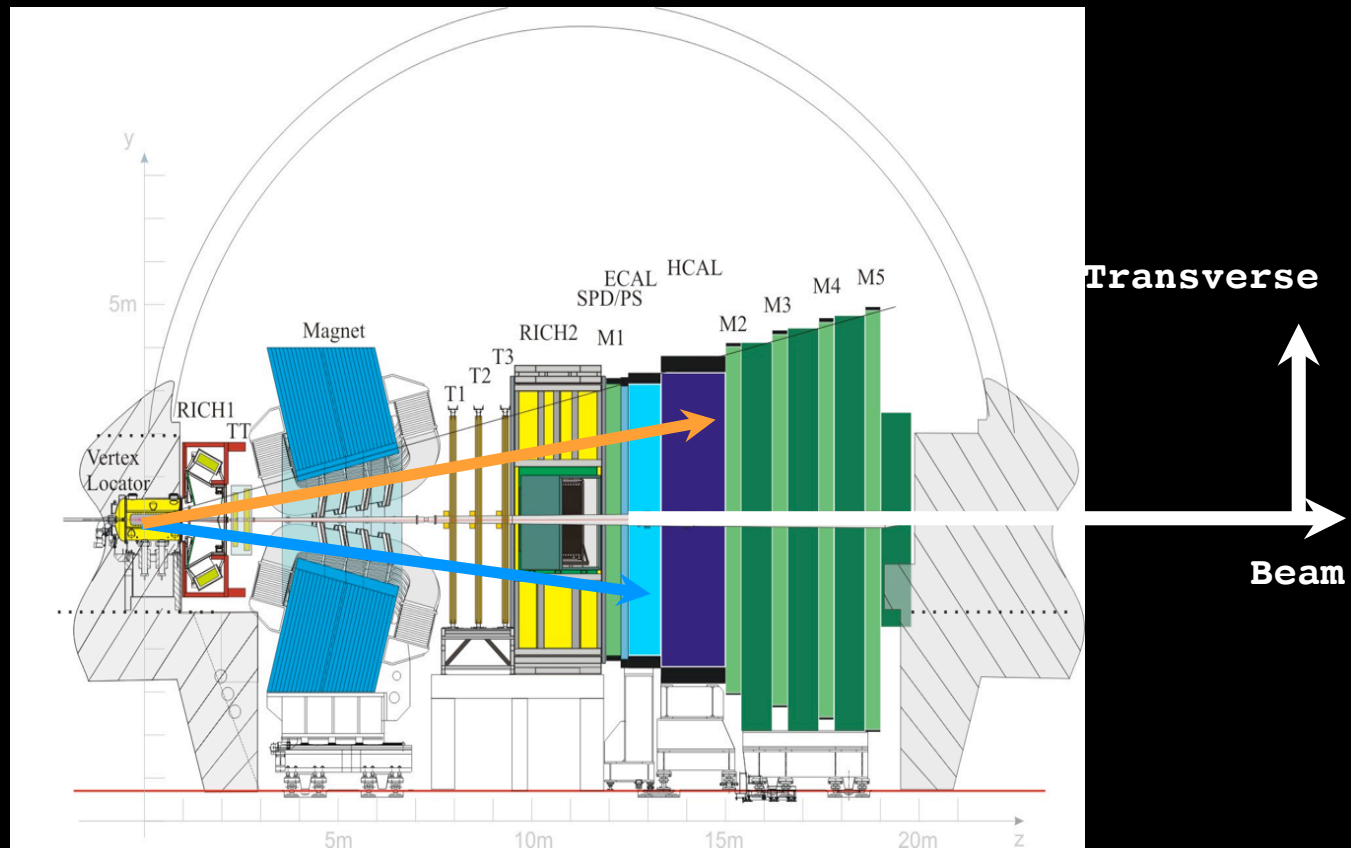
- ELETTRONI
- FOTONI



p_T = Quantità di moto trasversa
 E_T = Energia trasversa

LHCb @ LHC

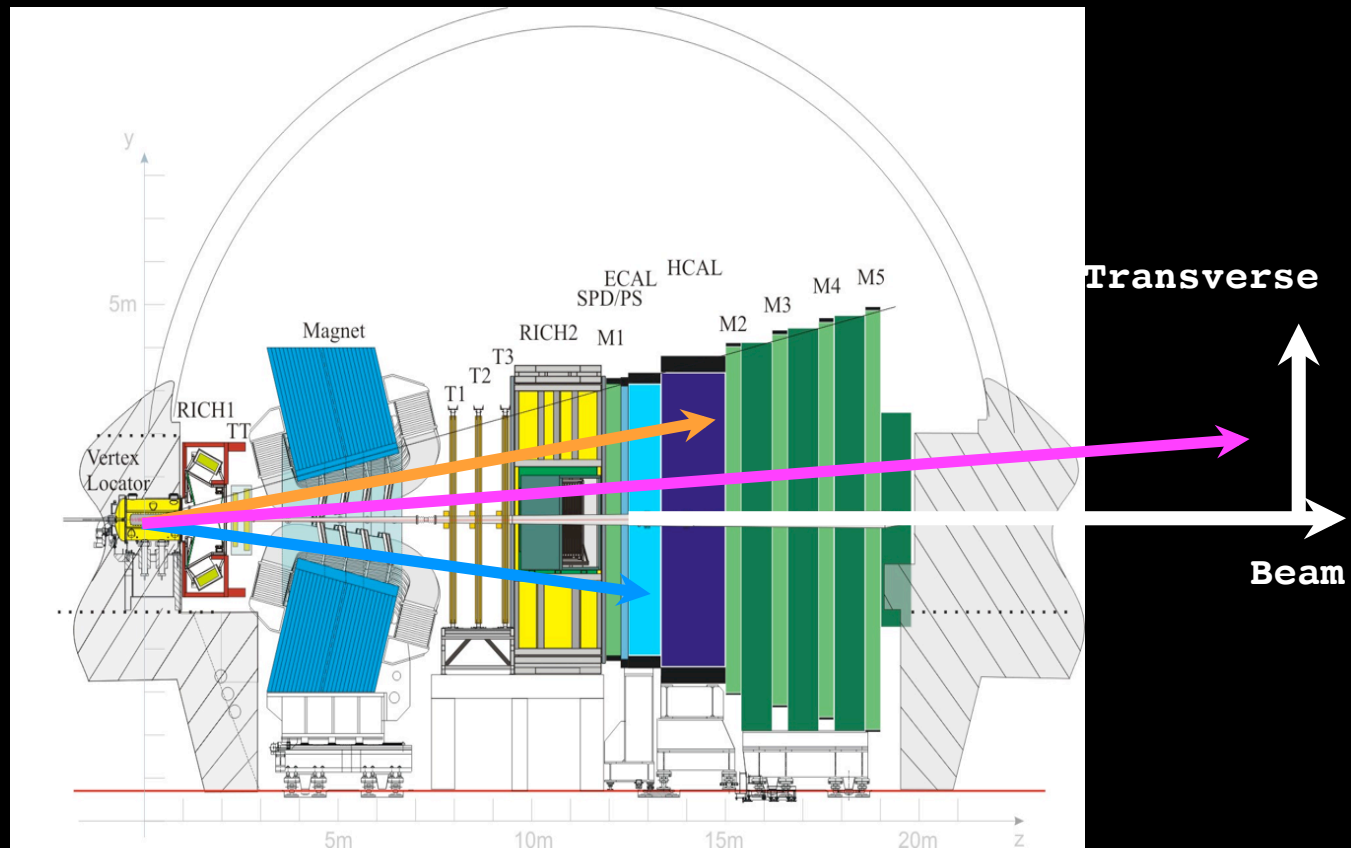
- ELETTRONI
- FOTONI
- ADRONI



p_T = Quantità di moto trasversa
 E_T = Energia trasversa

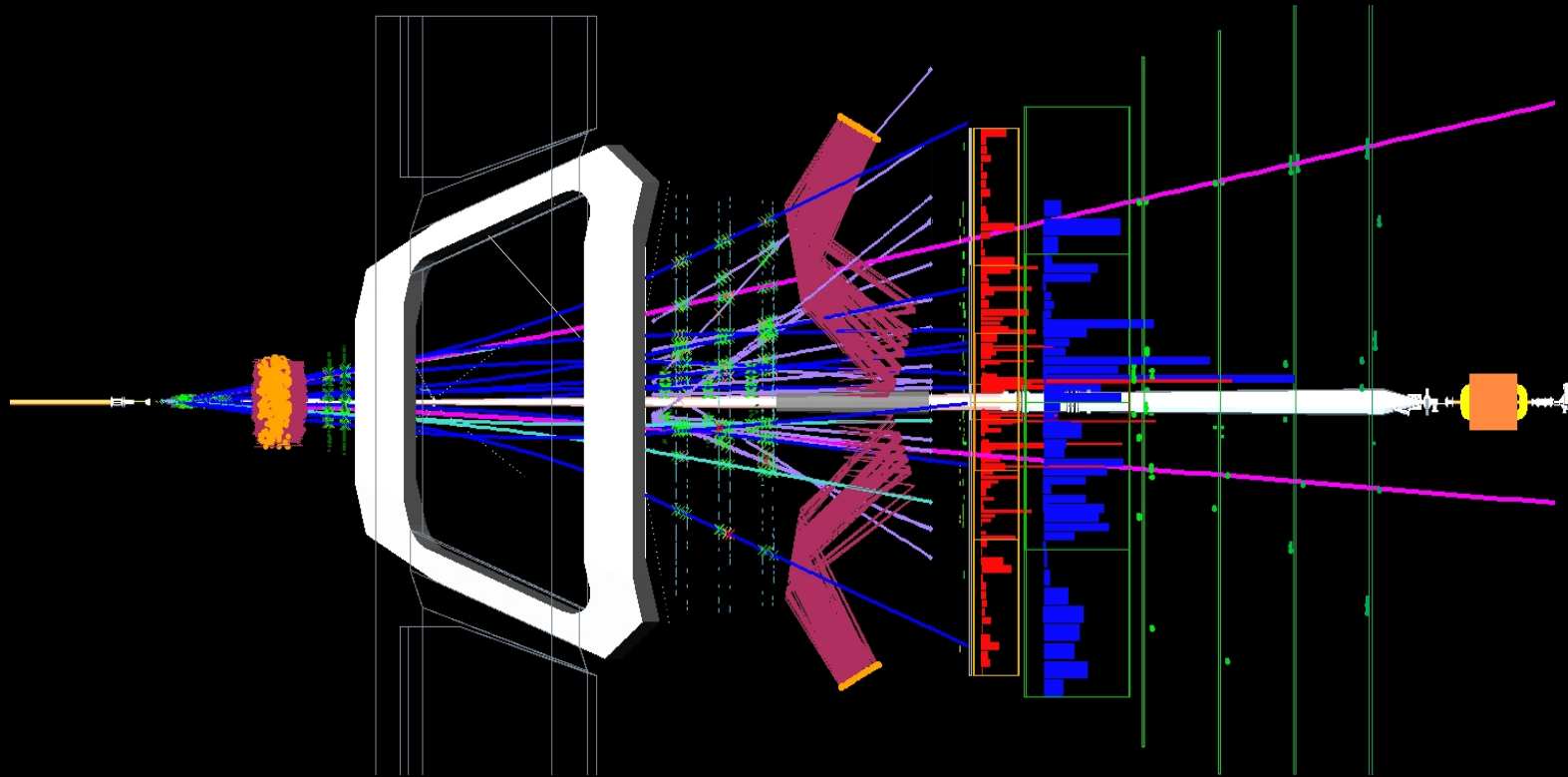
LHCb @ LHC

- ELETTRONI
- FOTONI
- ADRONI
- MUONI



p_T = Quantità di moto trasversa
 E_T = Energia trasversa

Come appare una collisione



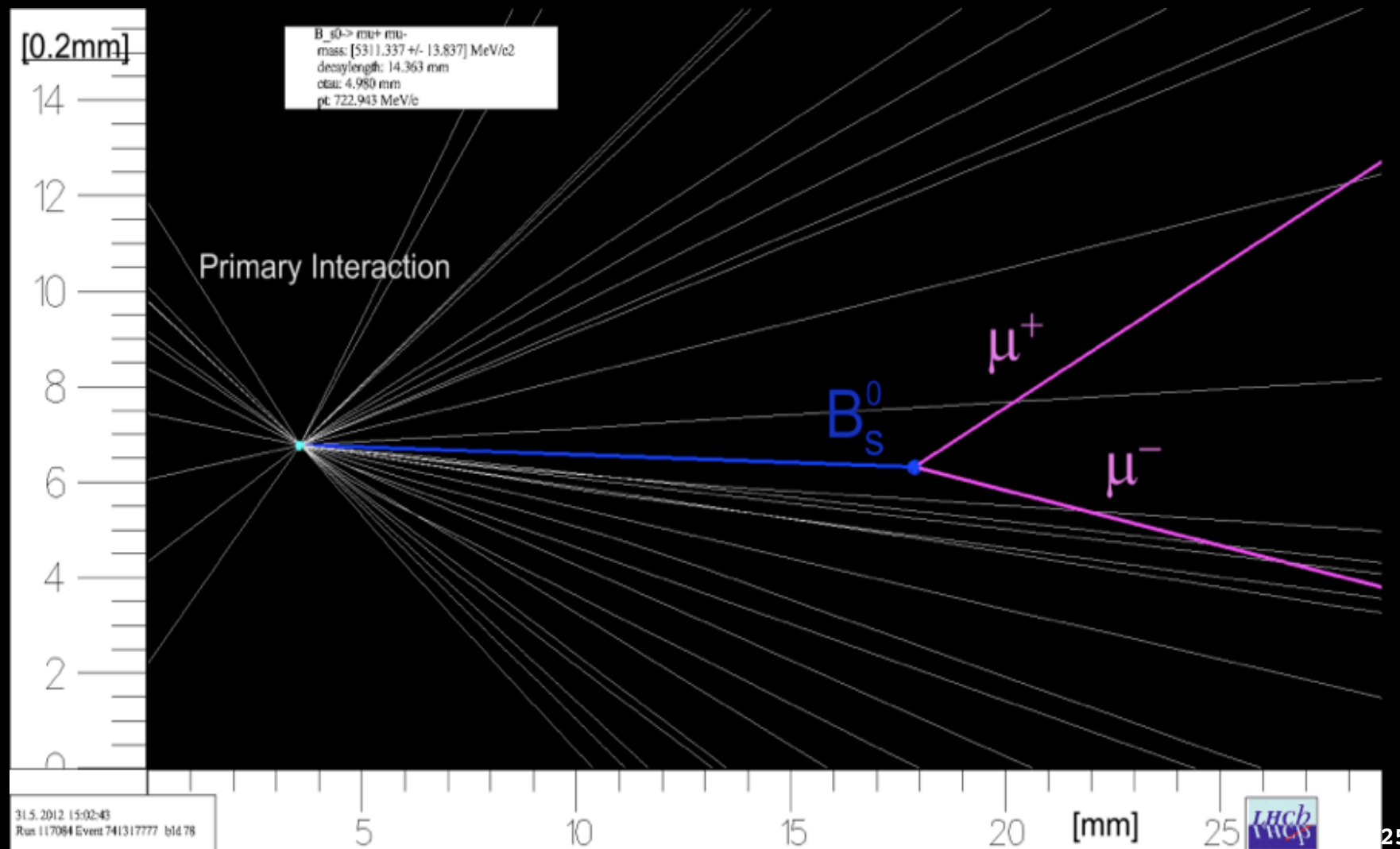
- ❖ La **traccia** è come una firma che la particella imprime nel rivelatore e va interpretata con opportuni strumenti di calcolo per permetterne l'identificazione e la misura delle **caratteristiche principali che sono l'energia e la direzione del moto**

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



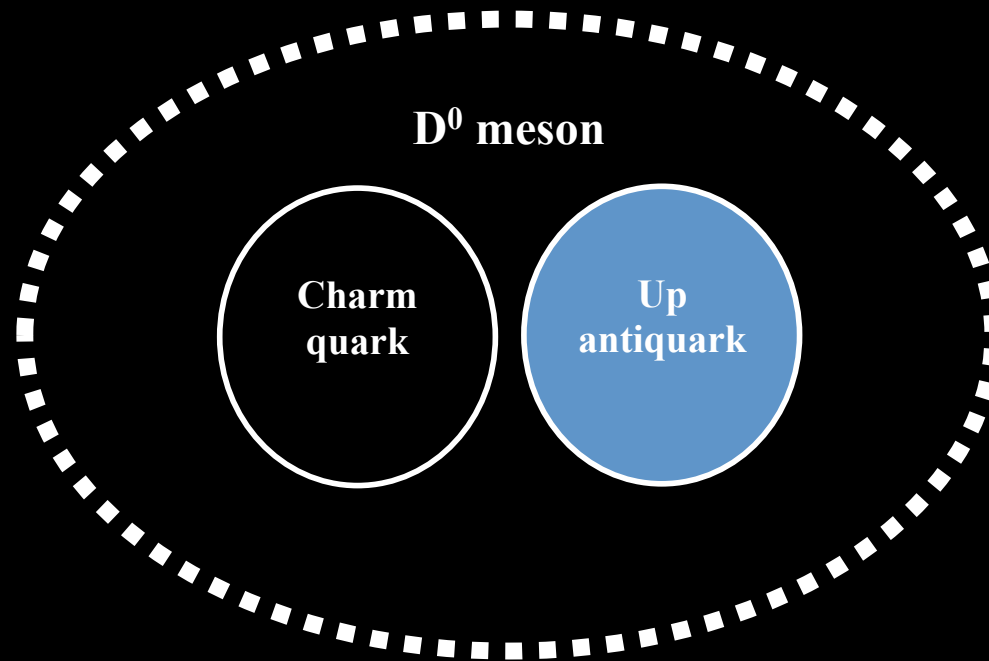
TRIGGER
decisione in 4 milionesimi di
secondo o i dati saranno persi!²⁴

Zoom al vertice dell'interazione



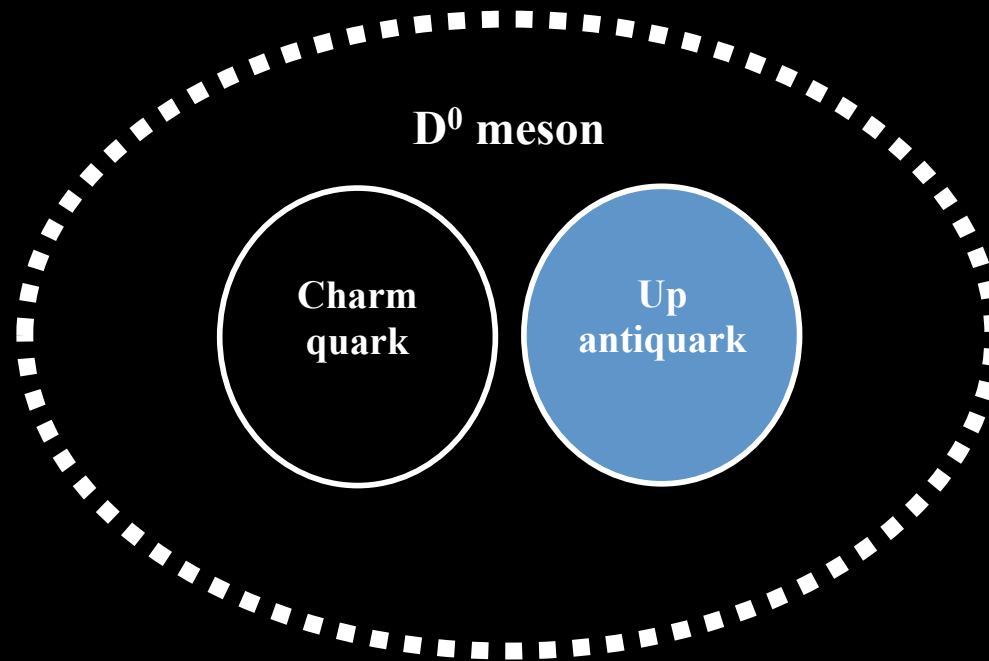
Che cosa misurerete oggi?

Che cosa misurerete oggi?

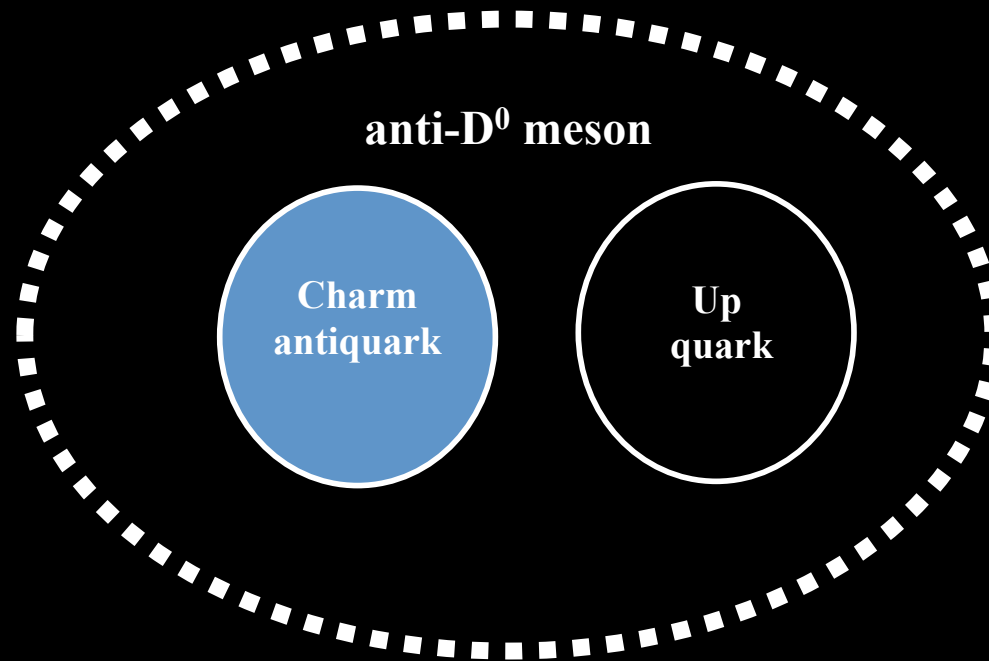


L'obiettivo dell'esercizio è quello di misurare la massa e la vita media di una particella chiamata D^0

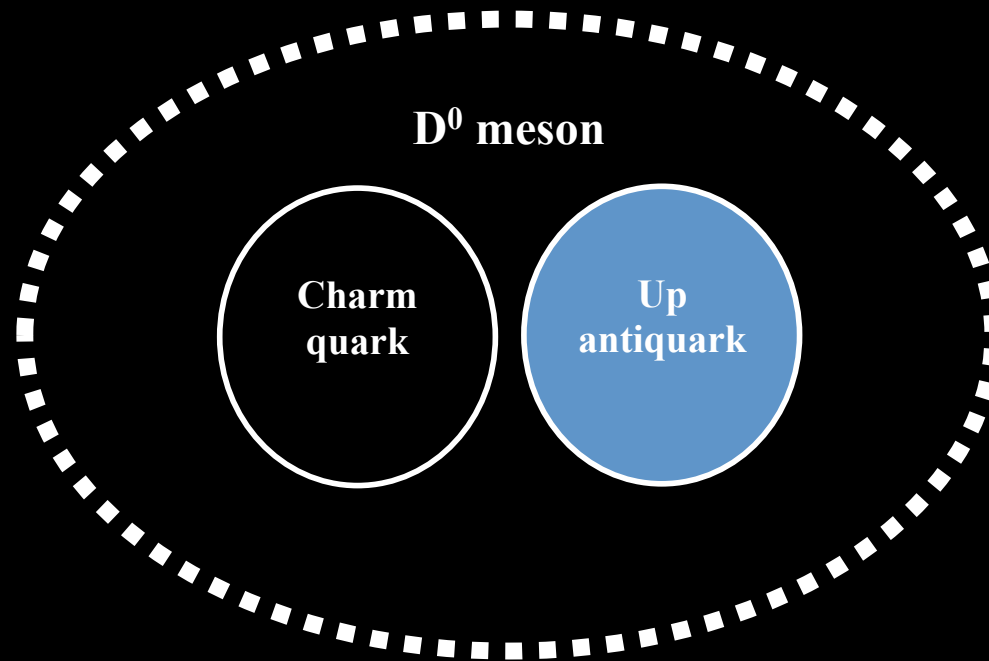
Perché il mesone D^0 è così speciale?



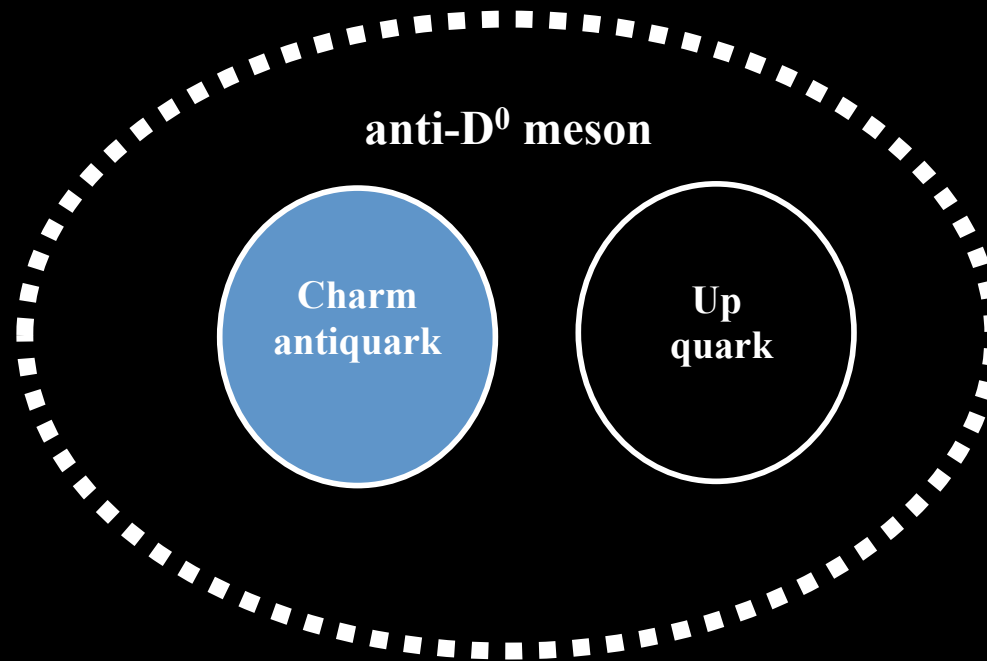
Perché il mesone D^0 è così speciale?



Perché il mesone D^0 è così speciale?

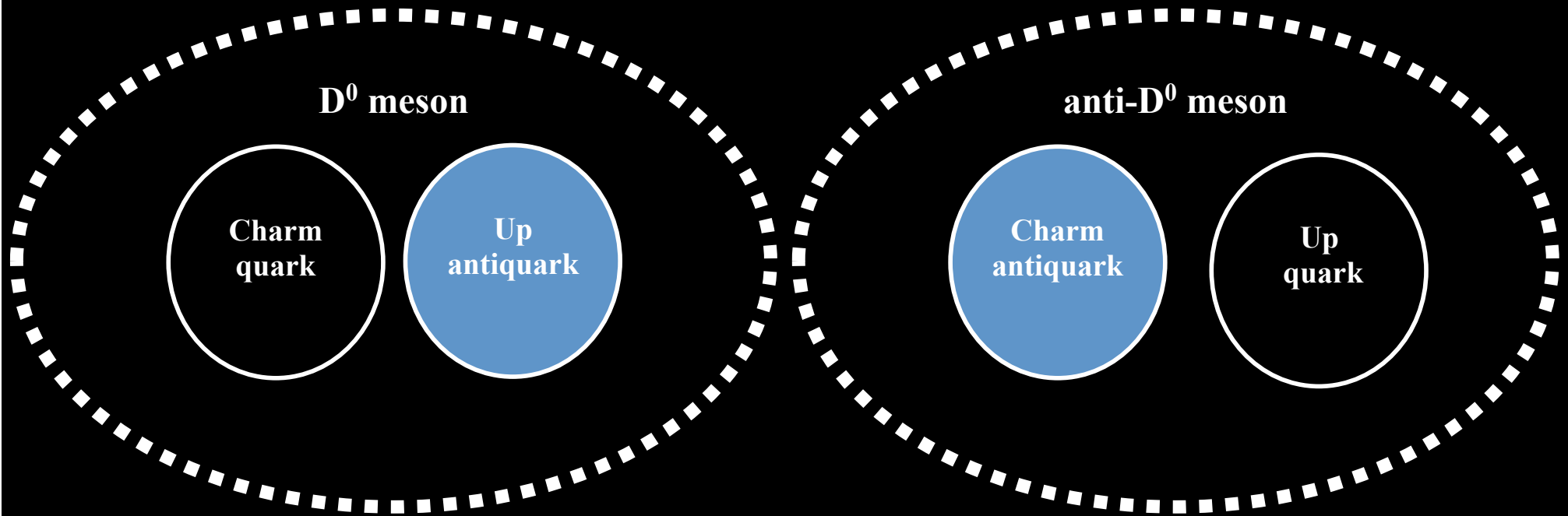


Oscilla!



Il D⁰ è una particella neutra: può oscillare fra gli stati di materia e di antimateria prima di decadere!

Oscilla!



Il D^0 è una particella neutra: può oscillare fra gli stati di materia e di antimateria prima di decadere!

Queste particelle e il loro comportamento possono dare vita a piccole asimmetrie fra materia e antimateria

Quali sono i valori tipici delle vite medie?

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	μ^- / μ^+	105.7	2.2×10^{-6} seconds
	Tau lepton / Antitau	τ^- / τ^+	1777	2.9×10^{-13} seconds
Meson	Neutral Pion	π^0	135	8.4×10^{-17} seconds
	Charged Pion	π^+ / π^-	139.6	2.6×10^{-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!

$D_0 :$

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

Come si misura una vita media piccola?

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

Come si misura una vita media piccola?

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

Se viaggiasse alla velocità della luce, quanto spazio percorrerebbe in media prima di decadere?

Come si misura una vita media piccola?

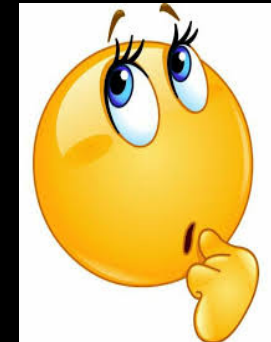
Per esempio consideriamo una particella con **vita media di 10^{-12} secondi**

Se viaggiasse alla velocità della luce, quanto spazio percorrerebbe in media prima di decadere?

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

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

Non è una distanza molto lunga...



Come si misura una vita media piccola?

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

Se viaggiasse alla velocità della luce, quanto spazio percorrerebbe in media prima di decadere?

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

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



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!

Come si misura una vita media piccola?

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

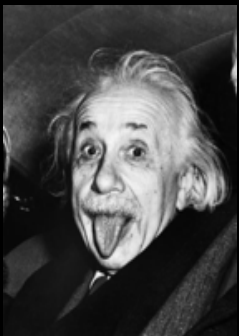
Se viaggiasse alla velocità della luce, quanto spazio percorrerebbe in media prima di decadere?

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

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



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:

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

Come si misura una vita media piccola?

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

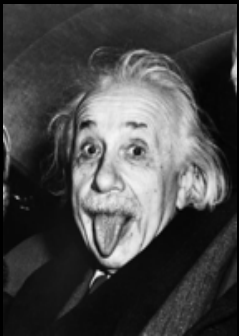
Se viaggiasse alla velocità della luce, quanto spazio percorrerebbe in media prima di decadere?

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

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



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!

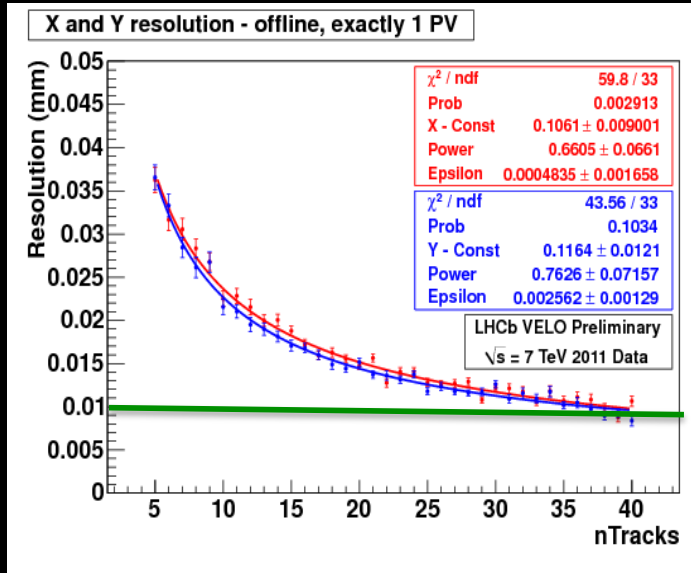


Le particelle vivono di più a causa della dilatazione del tempo:

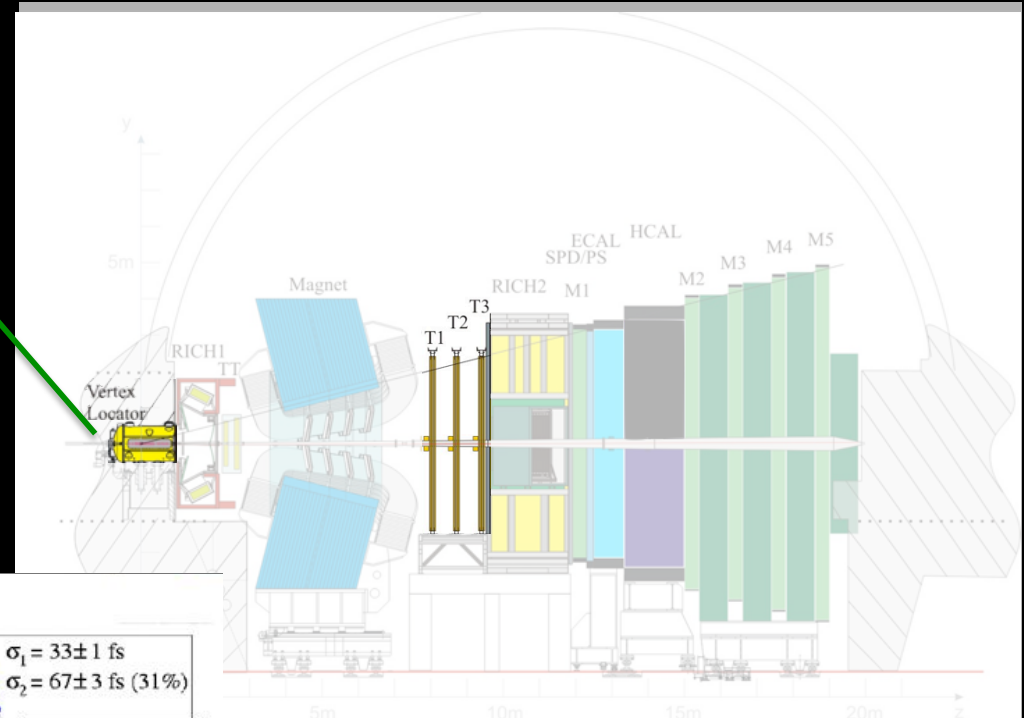
$$t' = t / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

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

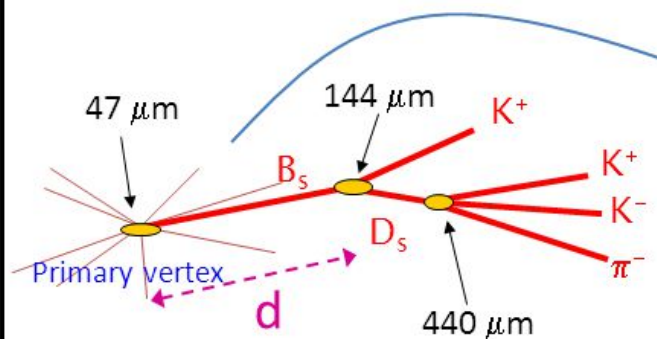
Prestazioni di LHCb



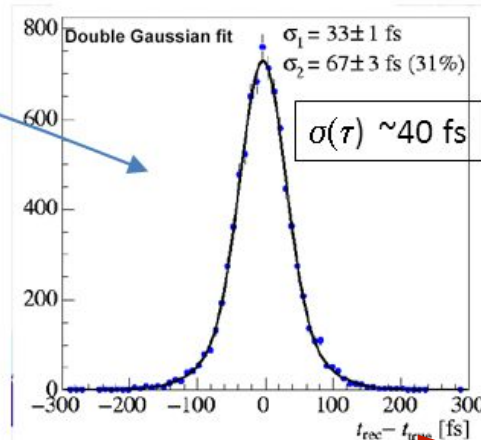
Risoluzione
fino a
1/100 di mm



Example: $B_s \rightarrow D_s K$



Decay time resolution = 40 fs

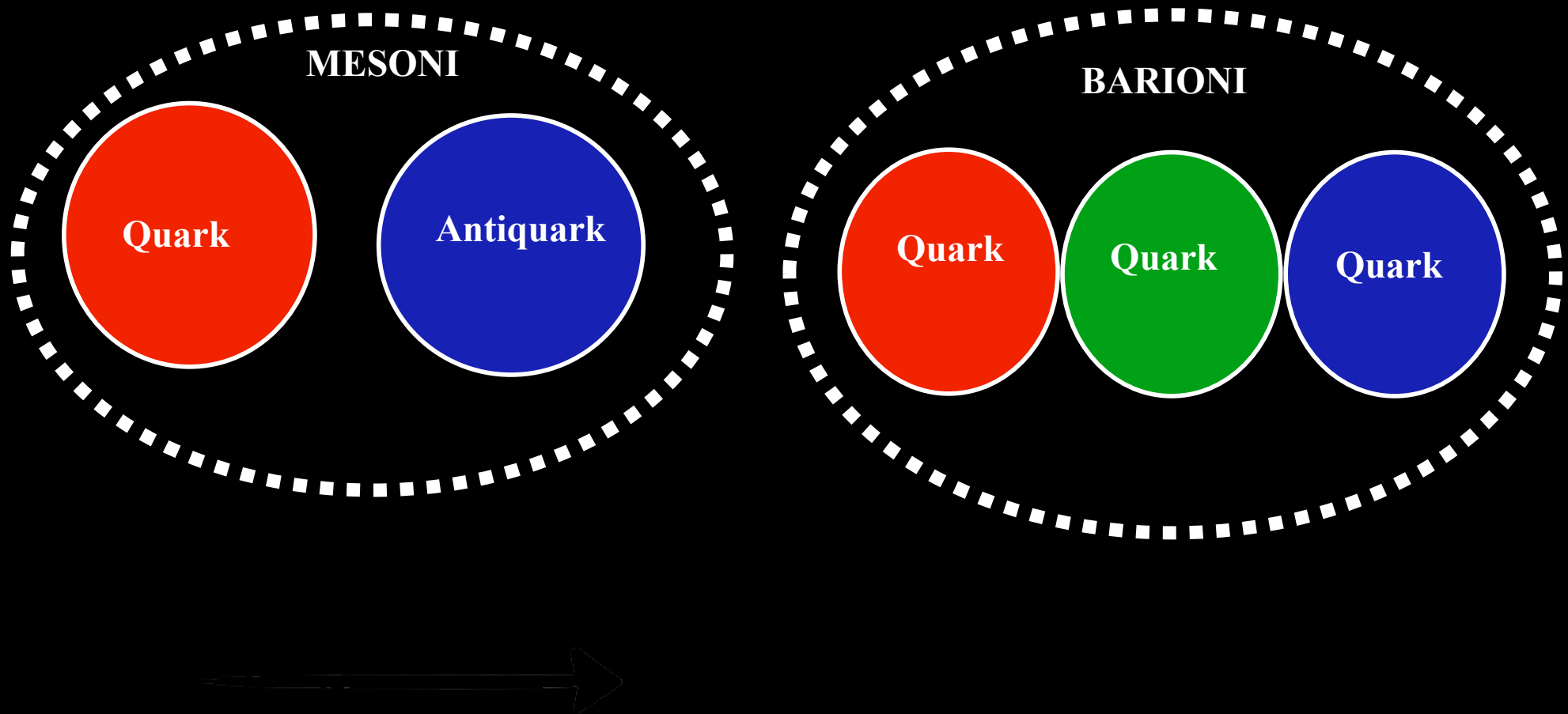


$1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$
(1 milionesimo di miliardesimo di secondo)

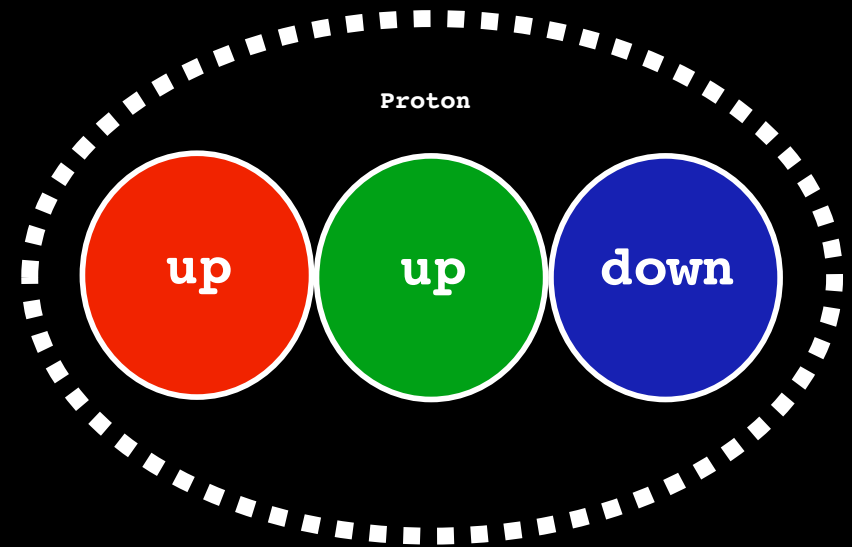
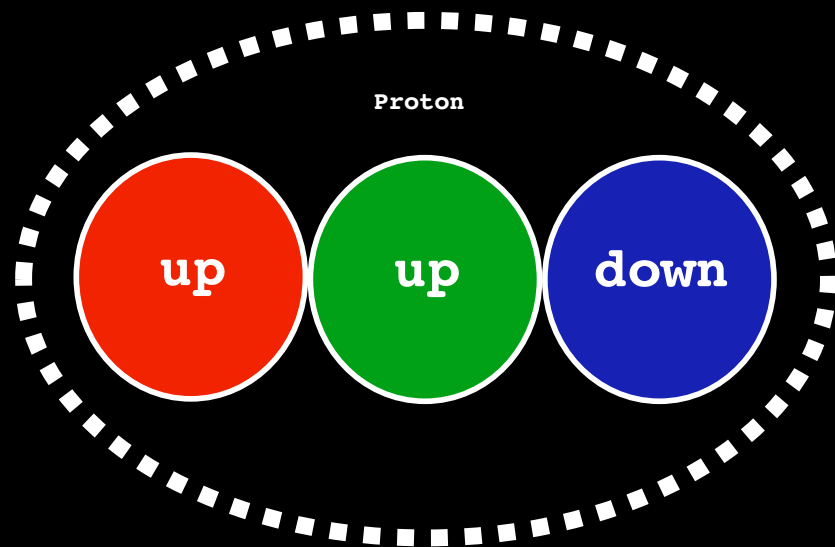
**Possiamo misurare vite medie
fino a $\sim 10^{-14}$ secondi**

Recap:

gli adroni sono formati da combinazioni di quarks



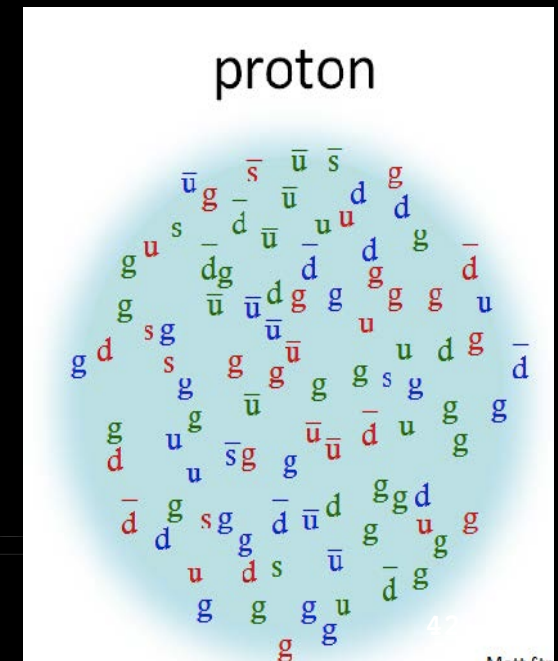
Protoni...



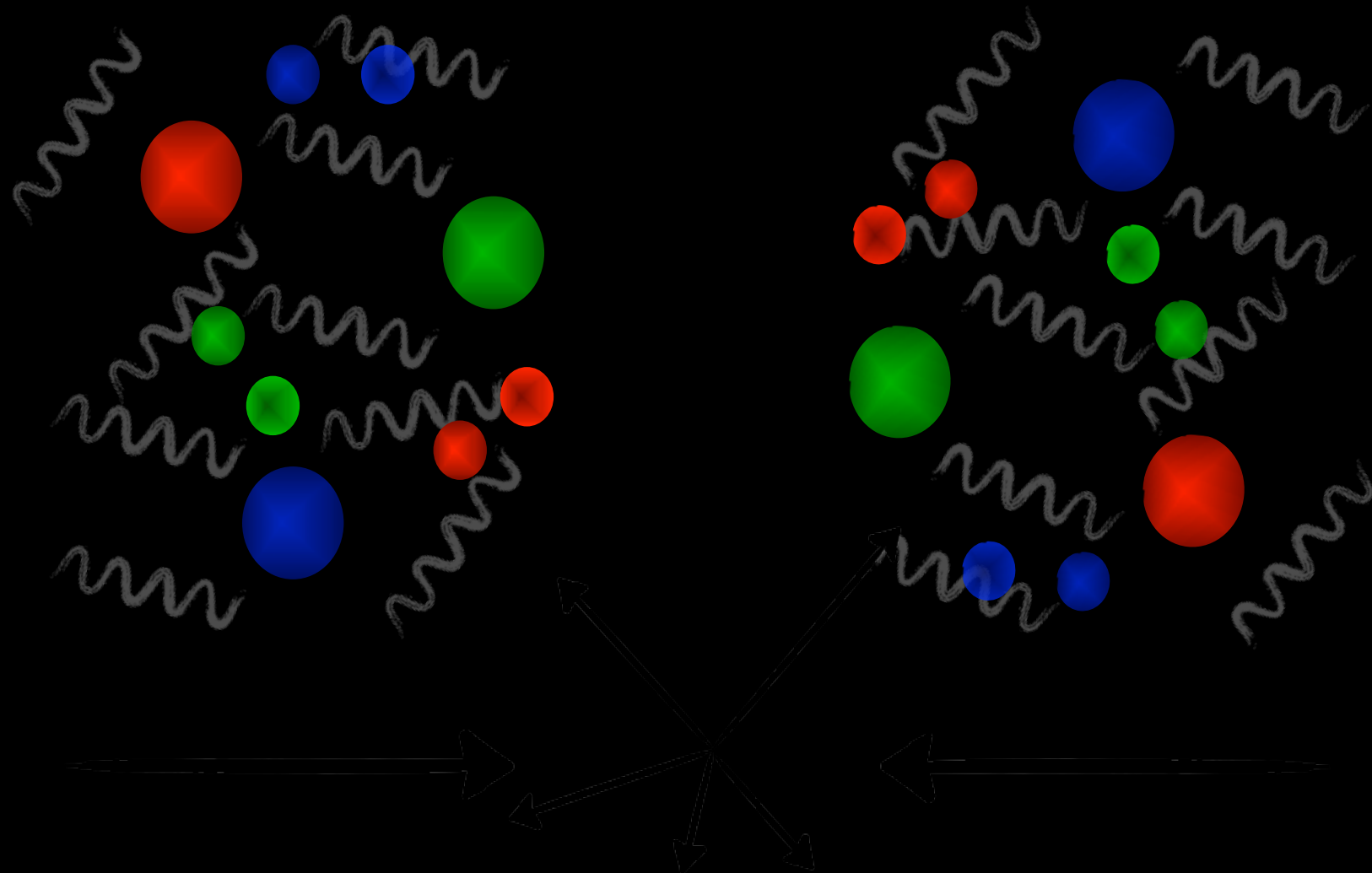
Se sommiamo la massa dei tre quark costituenti (u,u,d) troviamo **meno di 1% della massa totale del protone!**

Il protone non è propriamente un oggetto statico. Oltre ai tre quark costituenti ci sono **molte gluoni e coppie quark-antiquark** che continuamente si creano e si annichilano

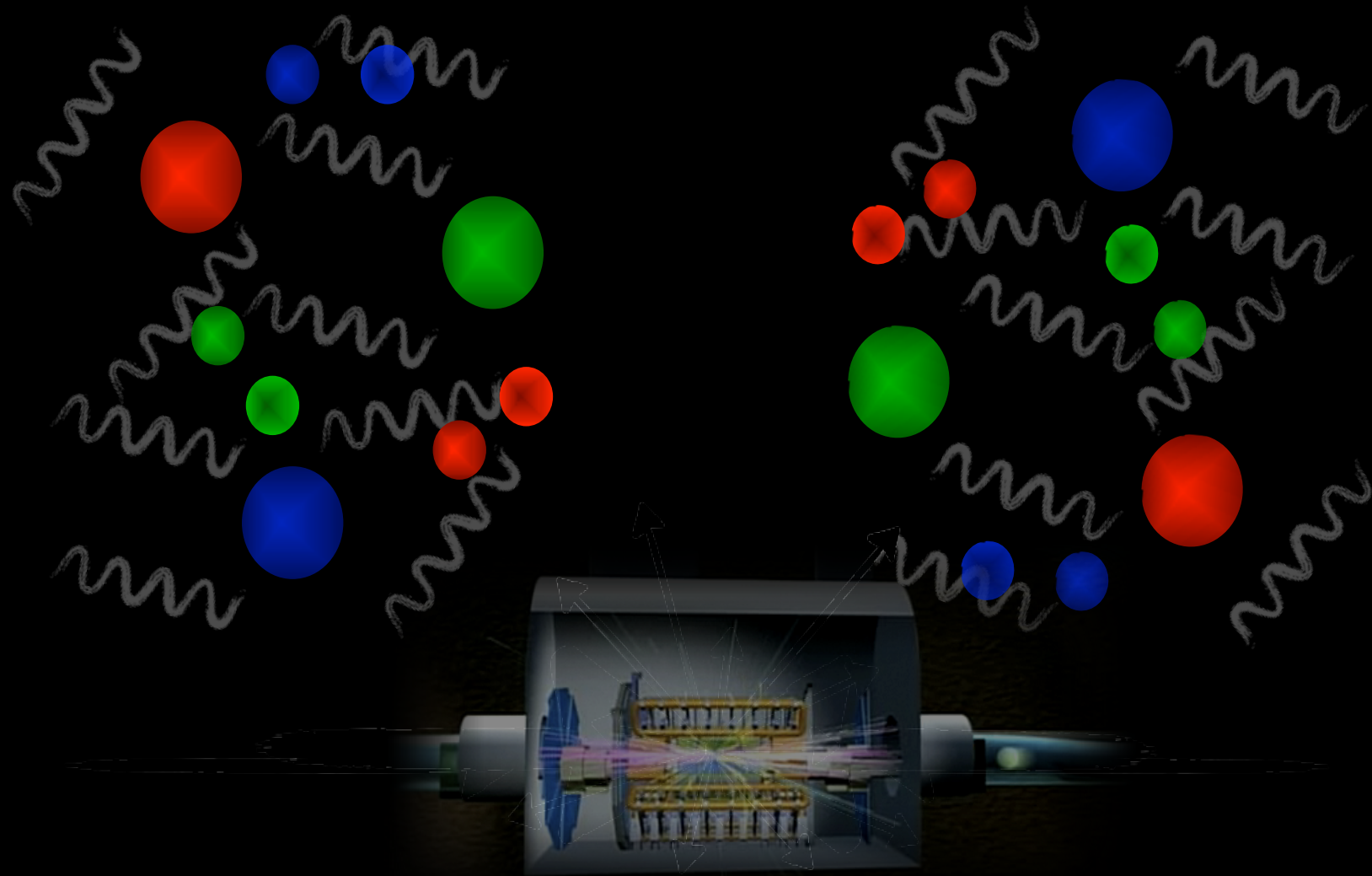
Tutta la **restante massa è dovuta all'energia** del “ribollire” di gluoni e quark $\rightarrow E = mc^2$



Collisioni tra protoni...



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**

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.....