



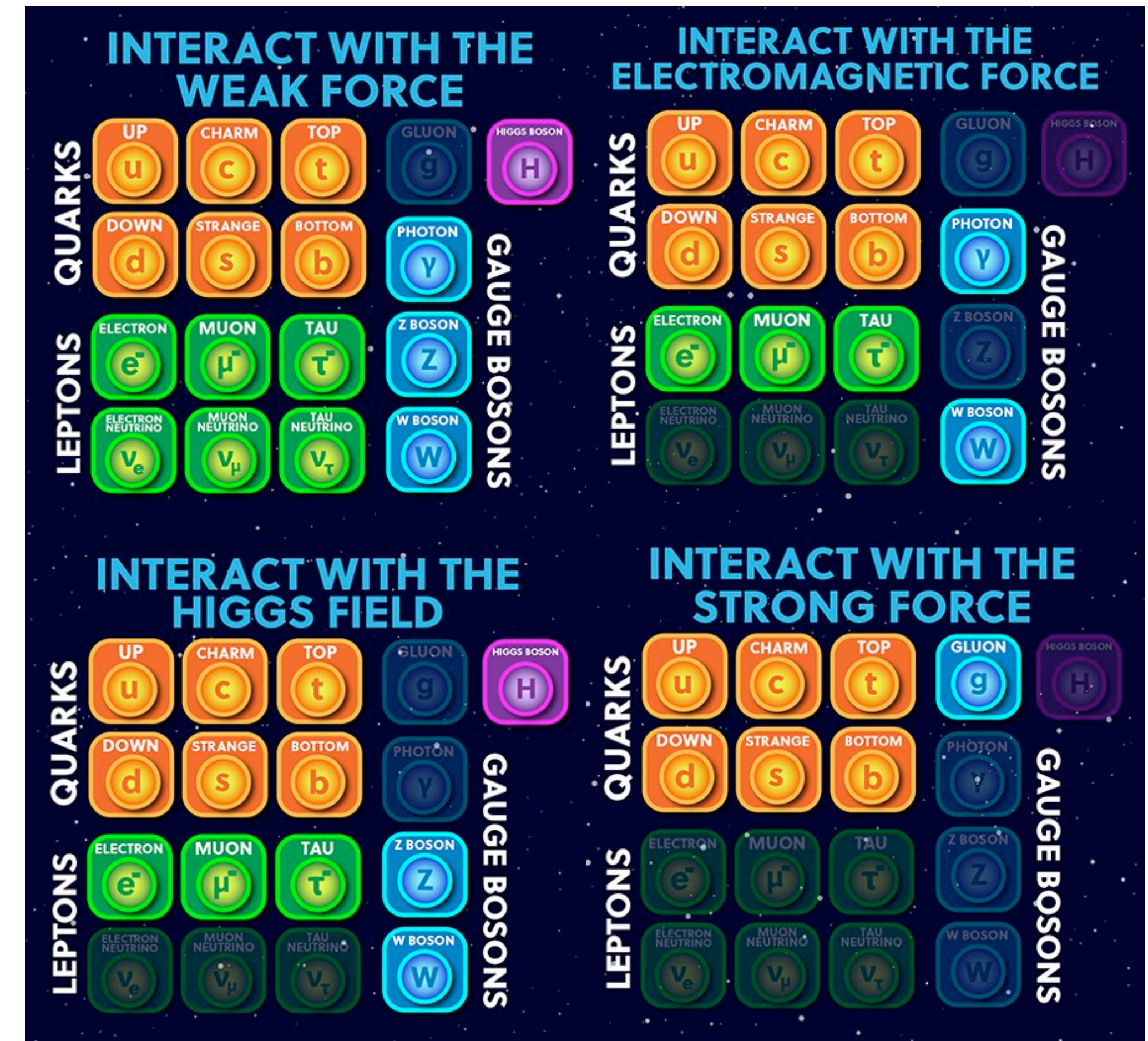
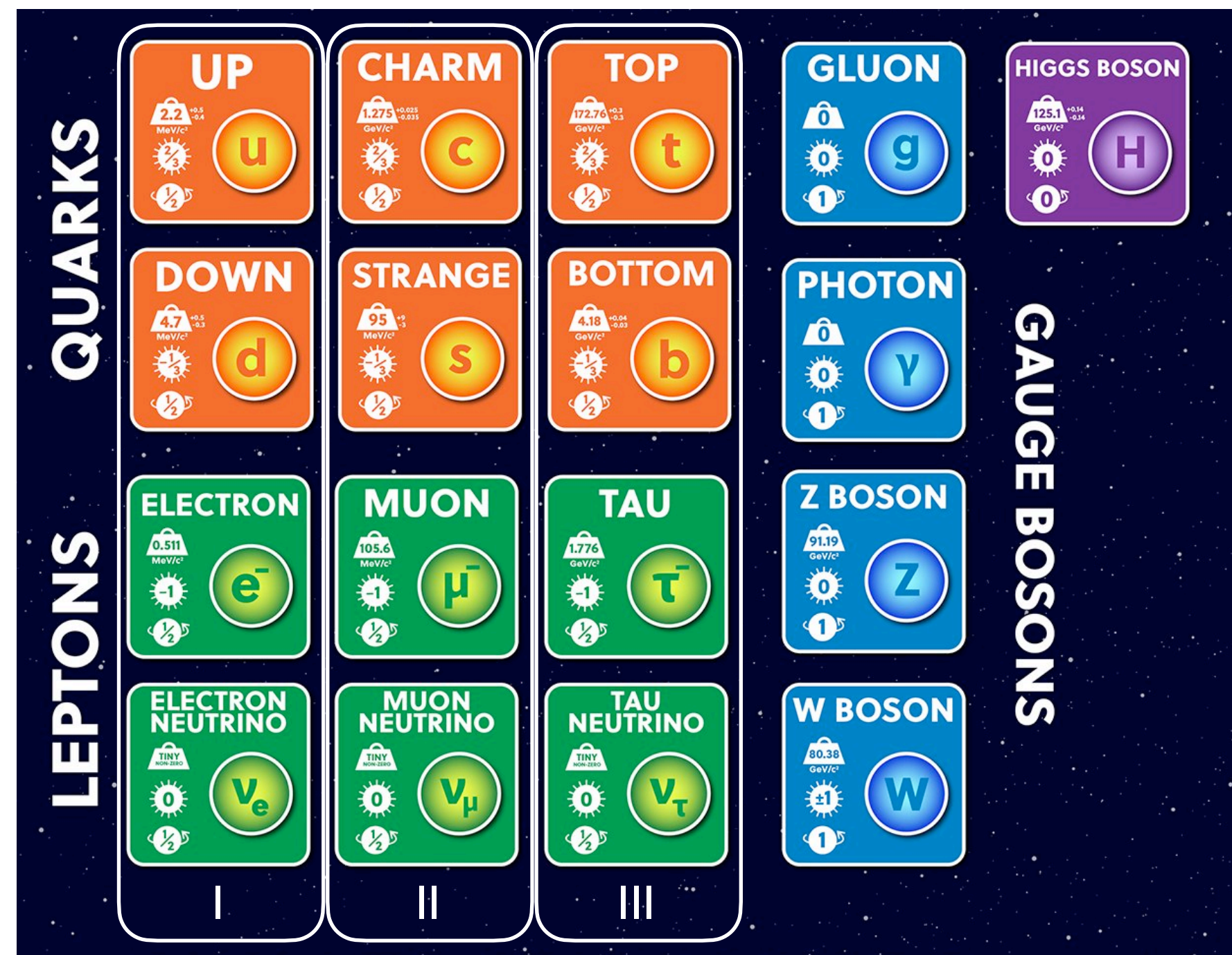
L'esperimento LHCb “in a nutshell”

Visita didattica al CERN, 19 Maggio 2025

Irene Celestino, Domenico Riccardi

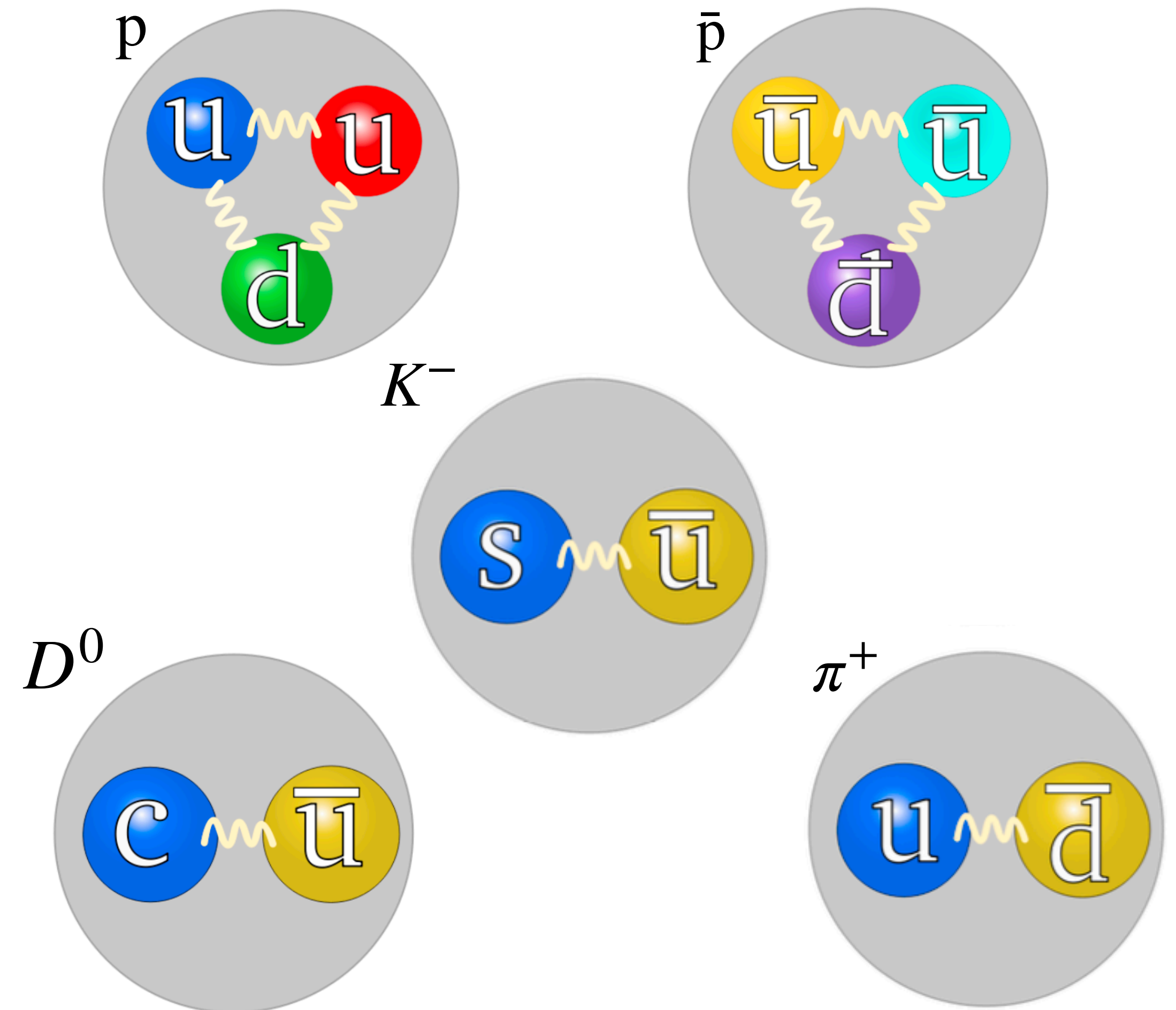
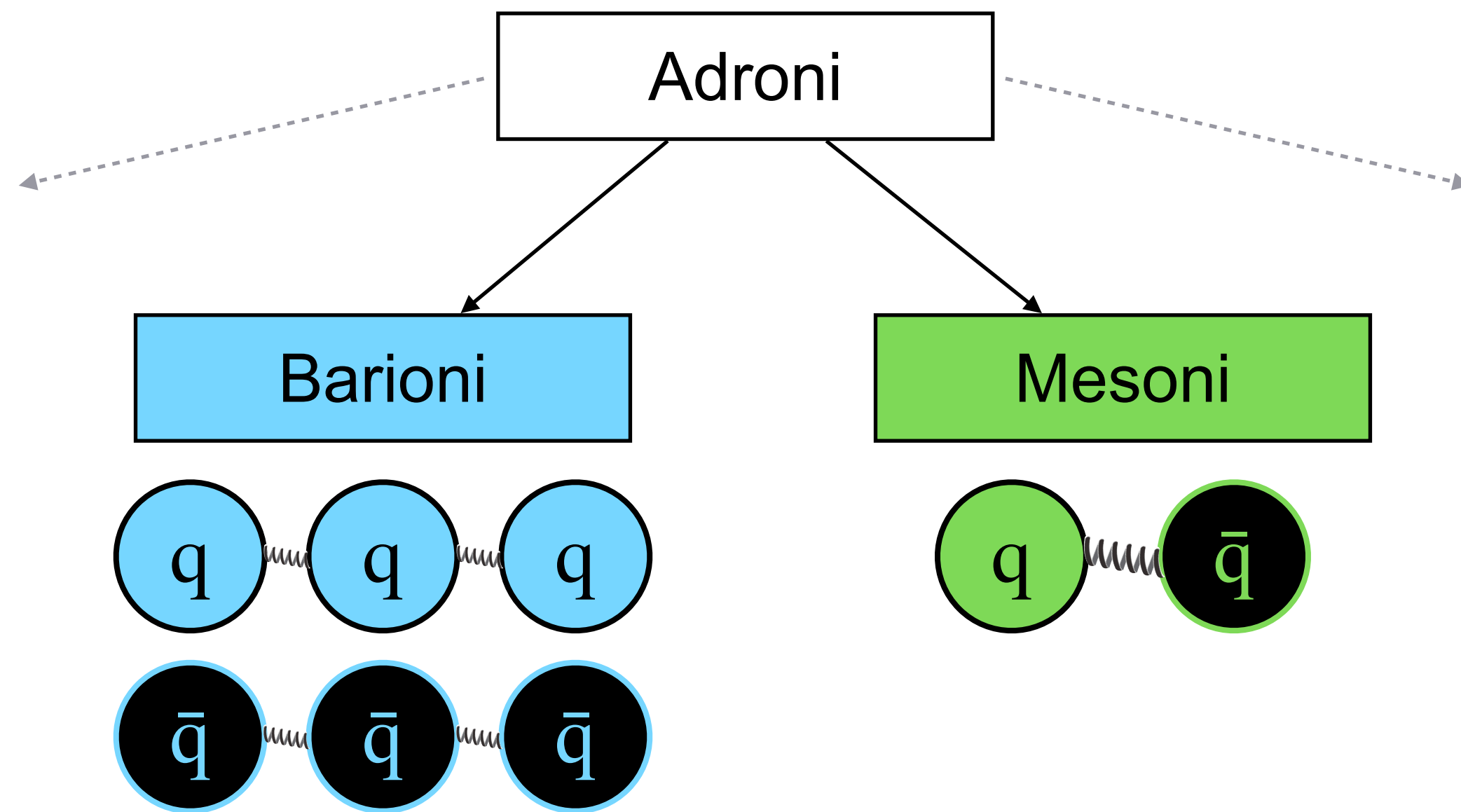
Riassunto del Modello Standard

- Il Modello Standard è la teoria che, ad oggi, meglio descrive l'universo in termini dei suoi **costituenti fondamentali** e delle **loro interazioni**
 - 3 generazioni di particelle elementari → **Fermioni** (**q**, **l**)
 - 4 mediatori delle interazioni → **Bosoni**

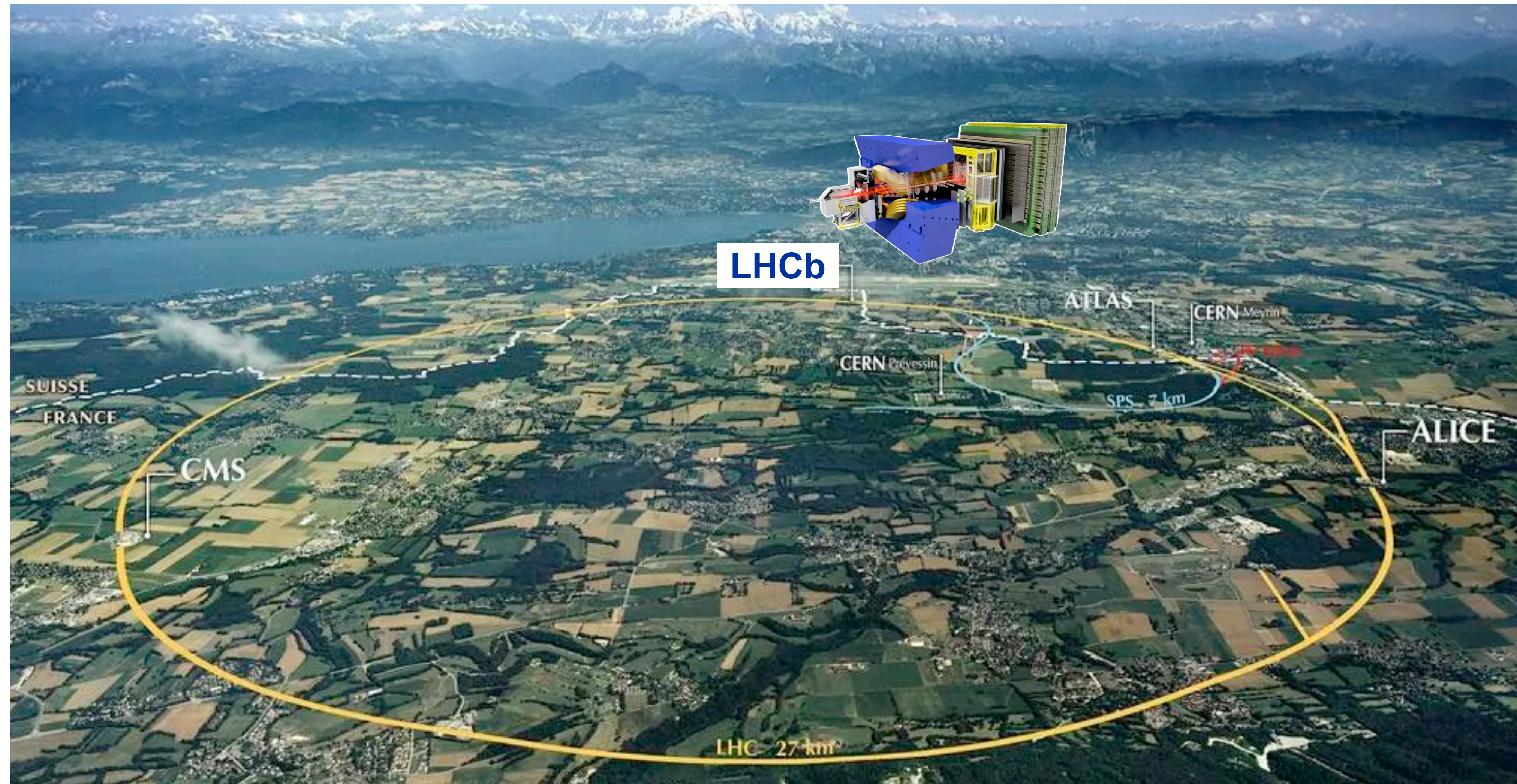


Come *costruiamo* particelle più complesse?

- Quark e anti-quark possono combinarsi per formare particelle composte dette **adroni**
- Tra gli adroni abbiamo **barioni** e **mesoni**
 - **Barioni**: composti da 3 quark o 3 anti-quark
 - **Mesoni**: composti da 1 quark e 1 anti-quark



L'esperimento LHCb a LHC



LHCb dal vivo

- LHCb si trova **in una caverna sotterranea a 100 metri di profondità**, in corrispondenza di uno dei punti del LHC in cui i protoni vengono fatti collidere

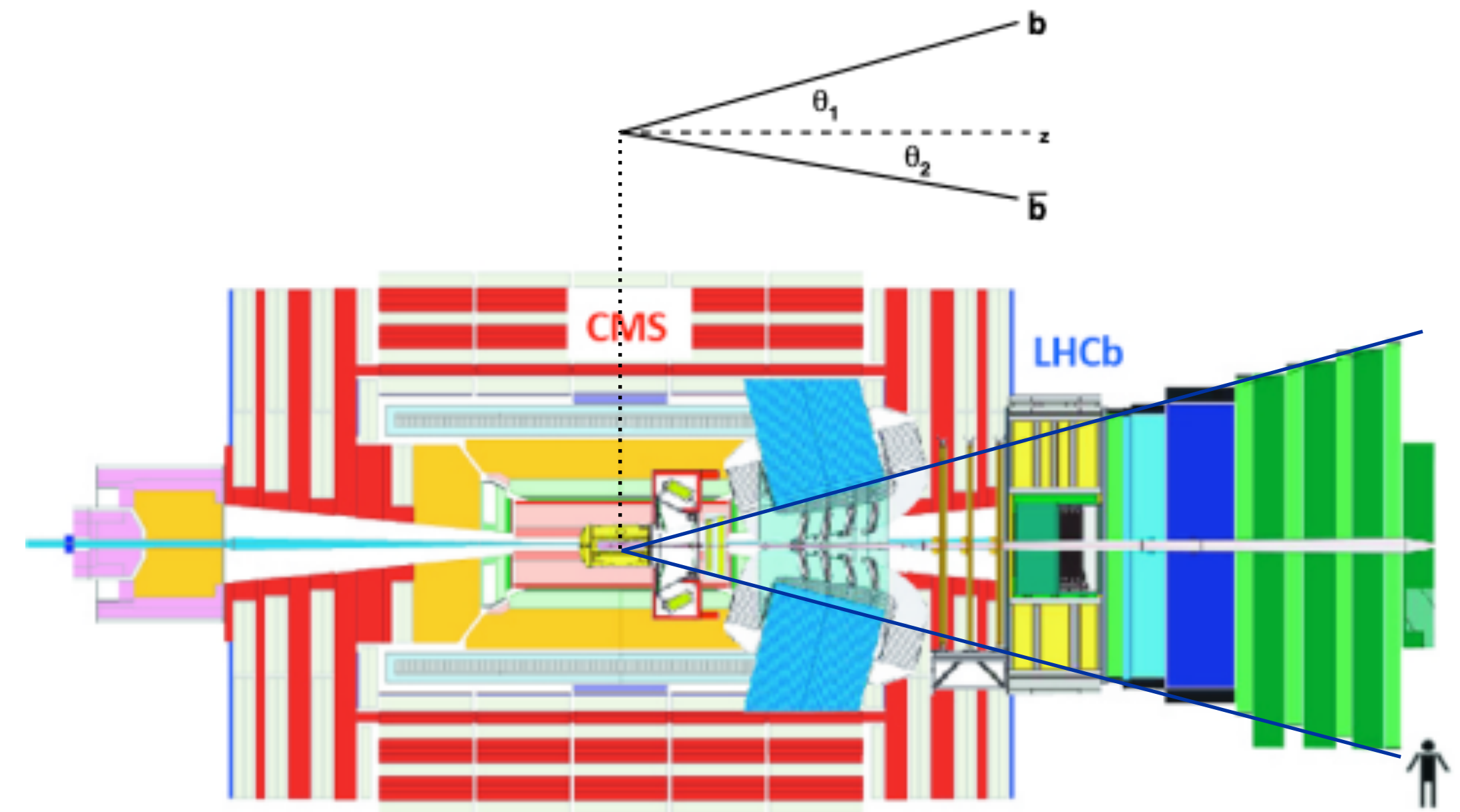
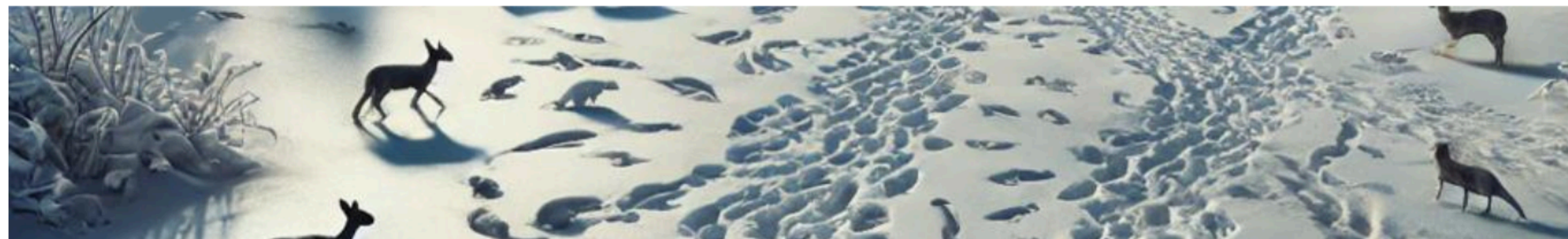
Superficie...



...sotto terra!

Il *nostro* rivelatore di particelle

- Il detector LHCb è una complessa macchina progettata per **tracciare e identificare** le particelle, prodotte nelle collisioni tra protoni, con una **geometria unica!**
 - Spettrometro *forward* → massimizza la raccolta di $b\bar{b}$
- **Principio di funzionamento:** la particella, attraversando il rivelatore, lascia una «traccia» del suo passaggio

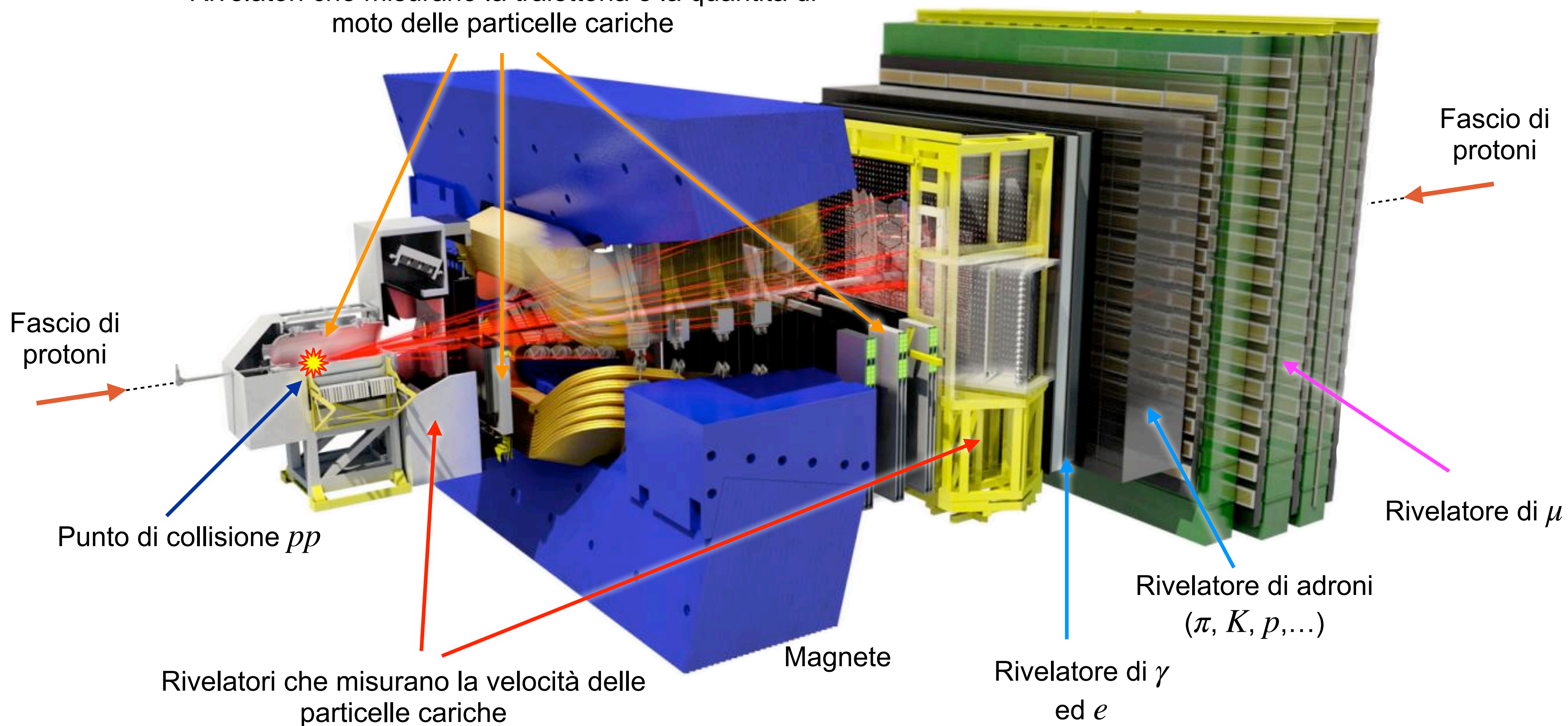


- Il rivelatore è progettato in modo da:
 - Riconoscere che tipo di particella ha prodotto una certa traccia
 - Ricostruire la traiettoria e misurare la quantità di moto di ogni particella (se possibile)
 - Tutto questo 40 milioni di volte al secondo

Il *nostro* rivelatore di particelle

peso: 5600 tonnellate
lunghezza: 20 m
altezza: 10 m
larghezza: 13 m

Rivelatori che misurano la traiettoria e la quantità di moto delle particelle cariche



Produciamo particelle!

- Come facciamo?

Produciamo particelle!



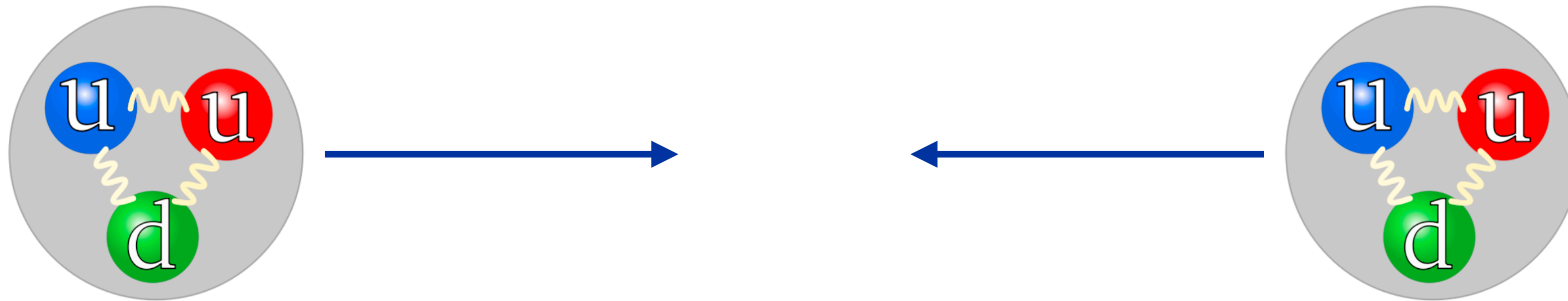
Produciamo particelle!

- Come facciamo?



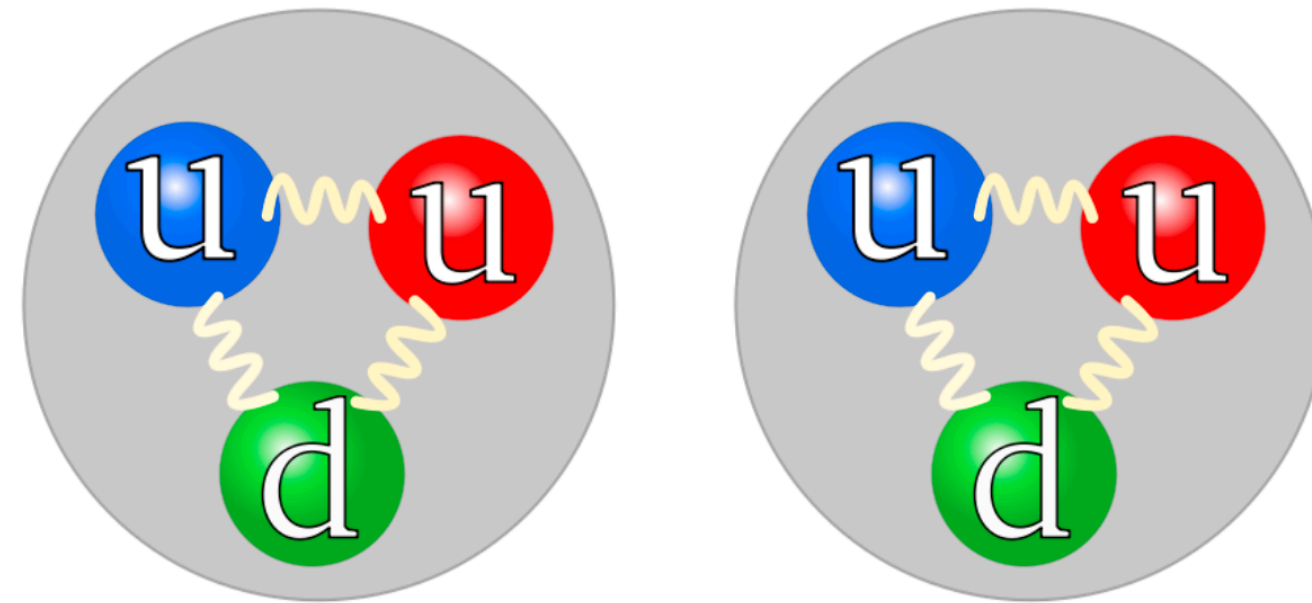
Produciamo particelle!

- Come facciamo?



Produciamo particelle!

- Come facciamo?



Produciamo particelle!

- Come facciamo?

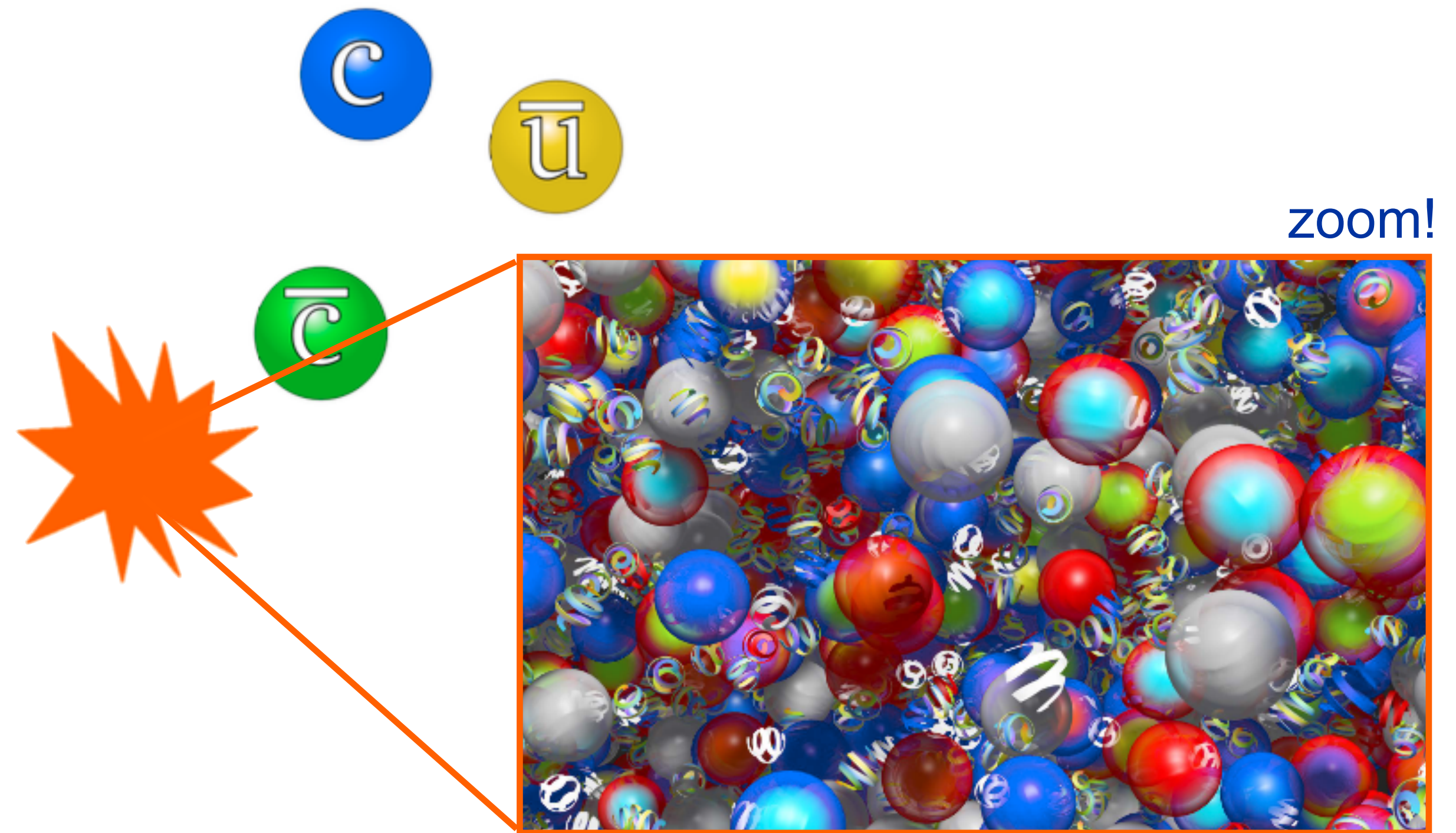
Collisione



Produciamo particelle!

- Come facciamo?

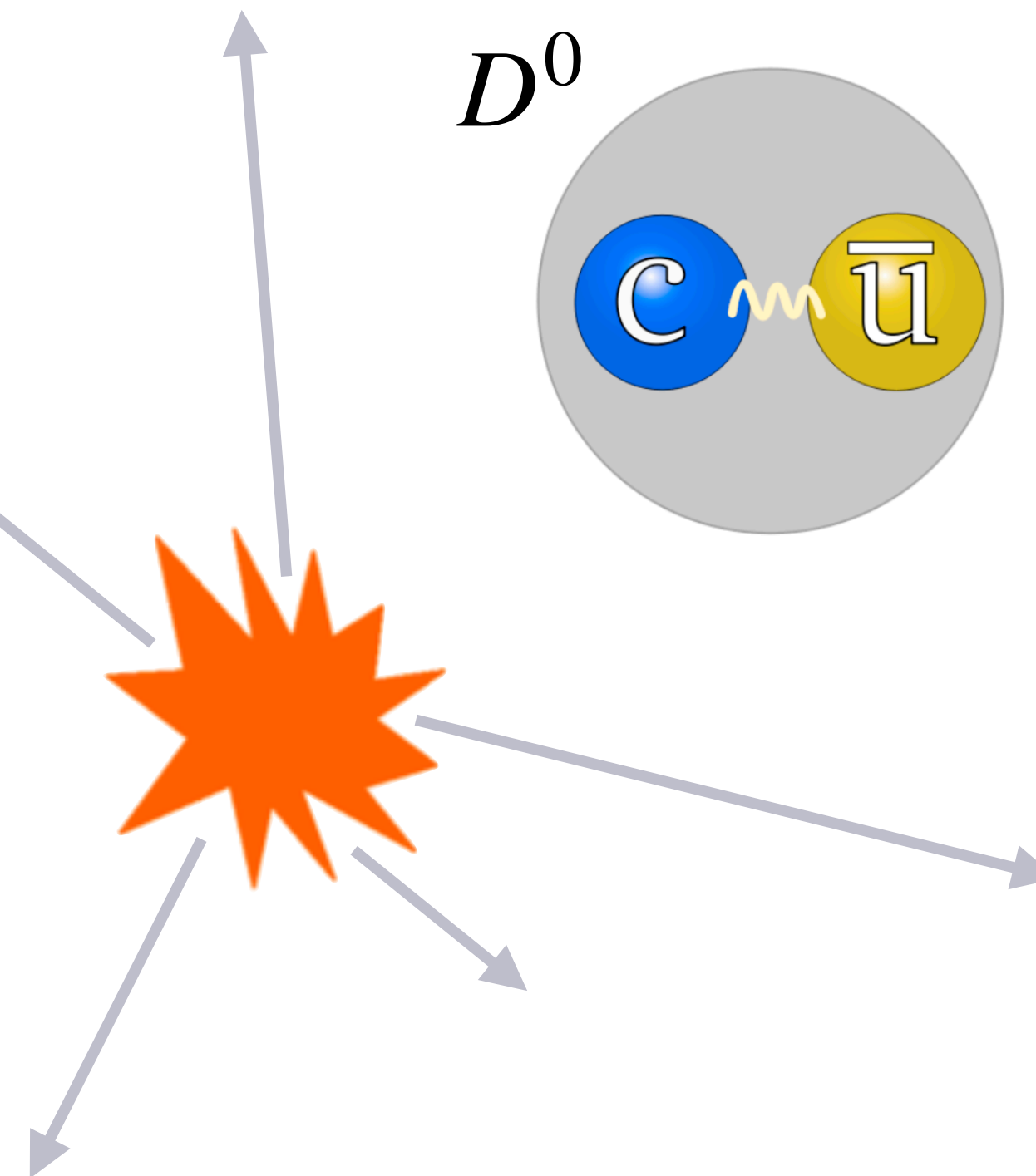
Si producono una miriade di quark “liberi”



Produciamo particelle!

- Come facciamo?

A causa della **forza forte** i quark si legano tra loro per formare mesoni, barioni, etc.



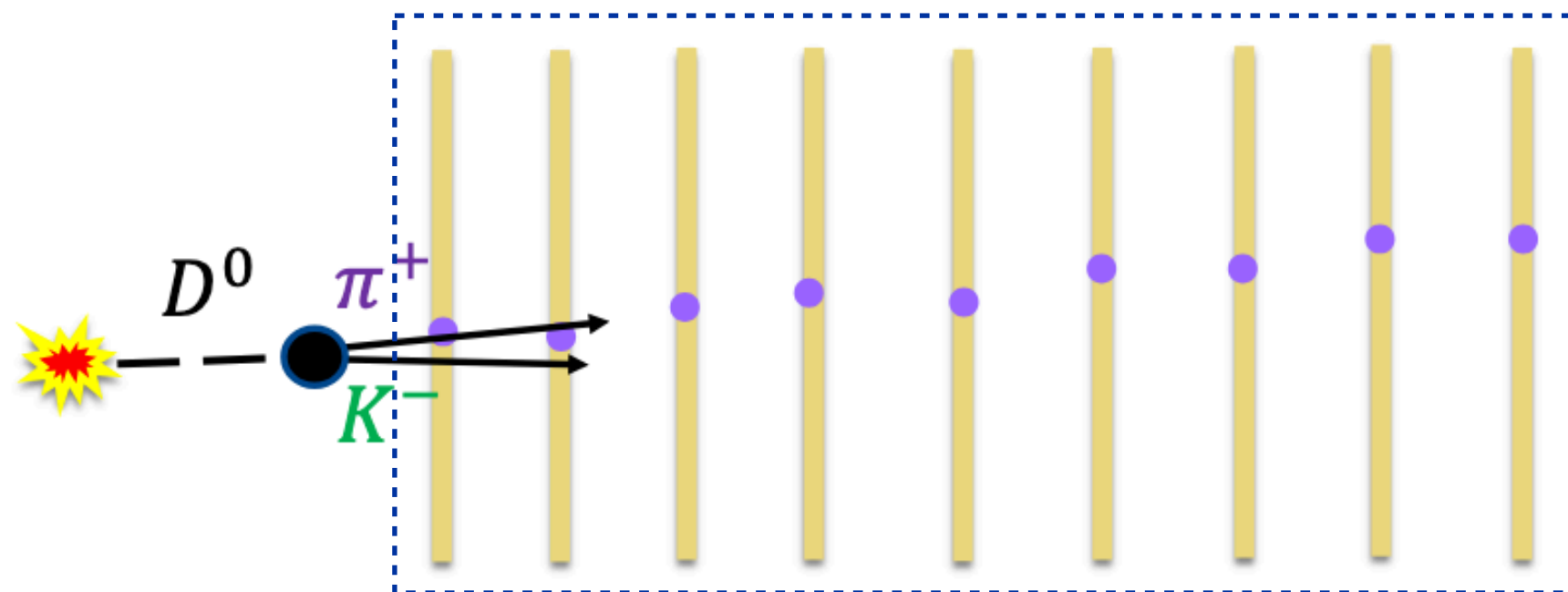
Ad esempio, possiamo avere un mesone D^0 tra i prodotti della collisione

Tracciatore delle particelle cariche

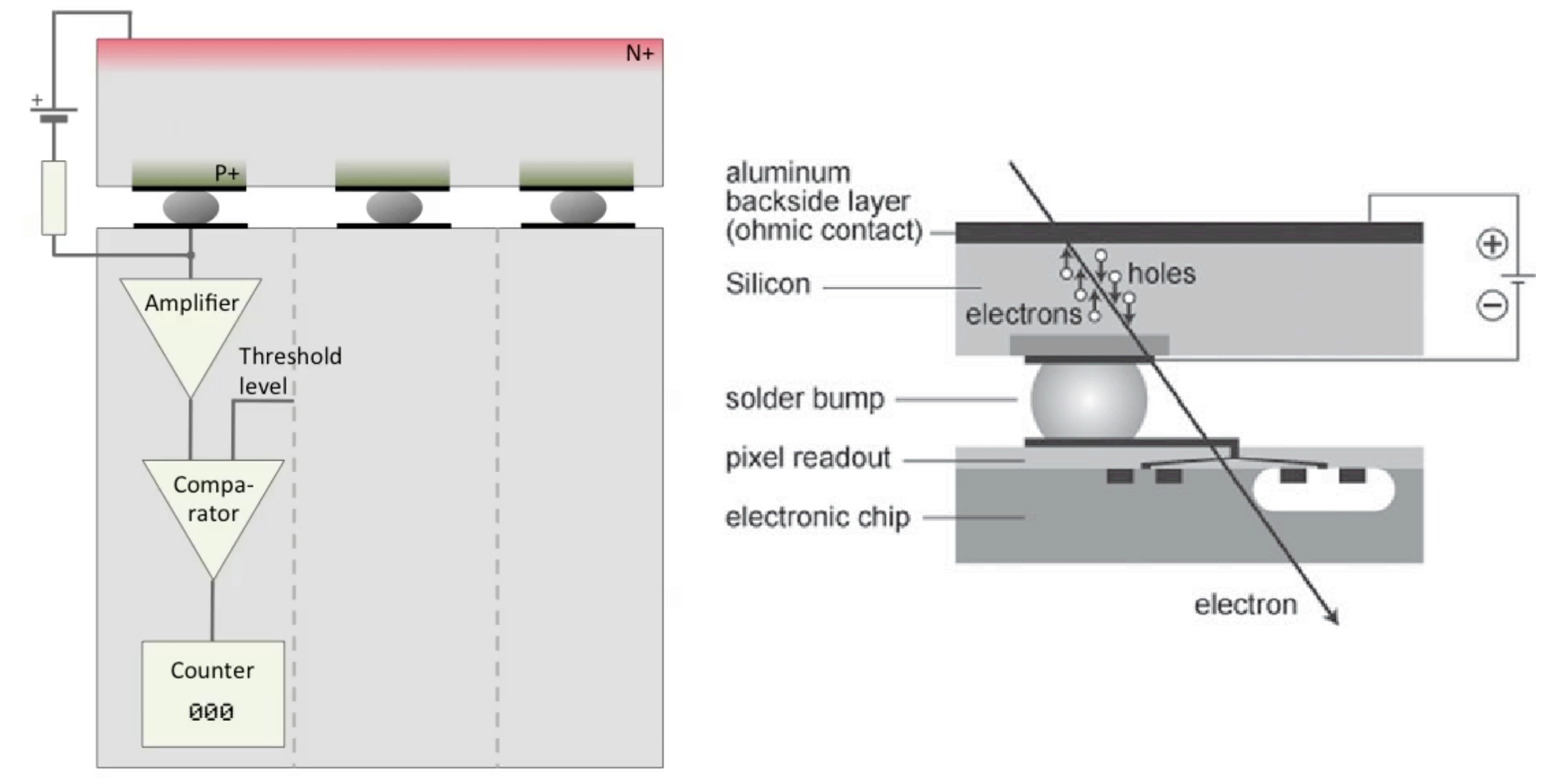
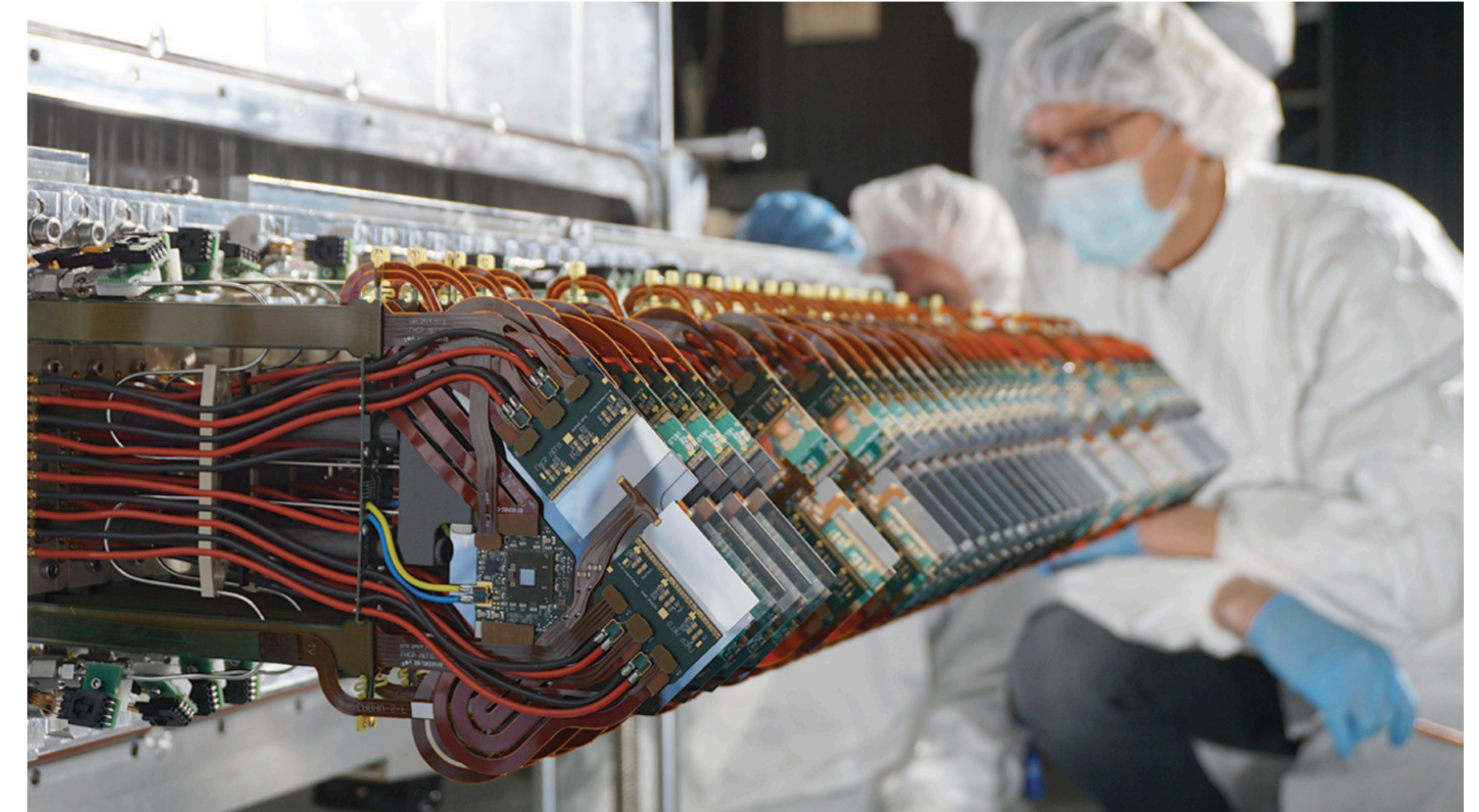
- Facciamo un esempio sul funzionamento del tracciatore considerando un decadimento del mesone D^0 :
 - $D^0 \rightarrow \pi^+ K^-$

Tracciatore delle particelle cariche: VELO

Il **pione** attraversa gli strati del tracciatore lasciando un segnale in corrispondenza del suo passaggio

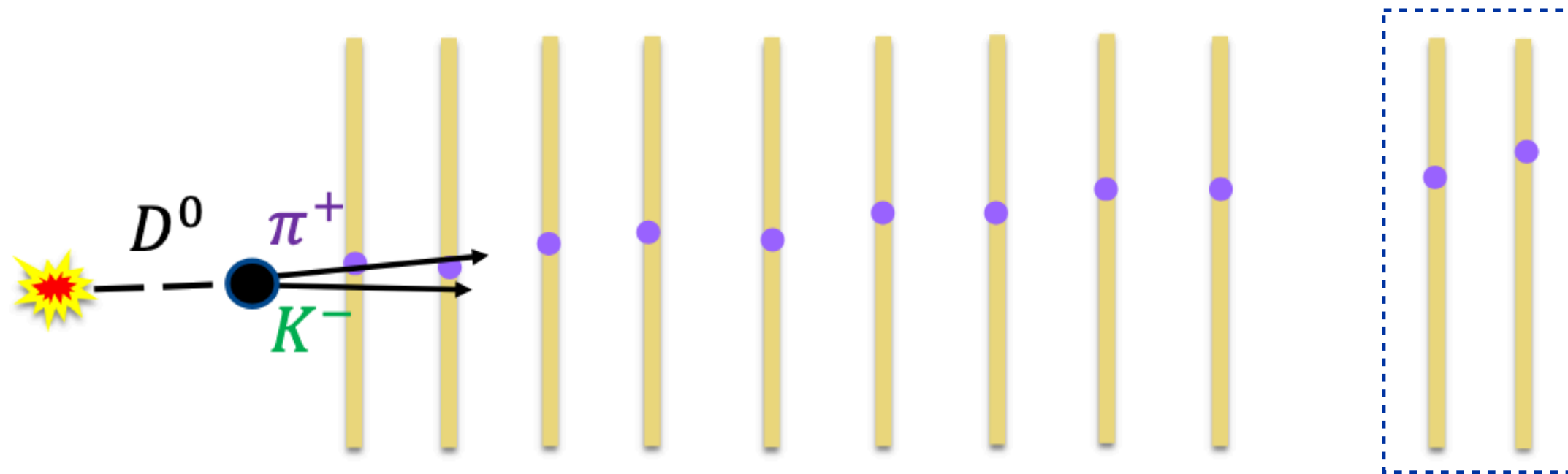


VELO: Vertex **L**Ocator

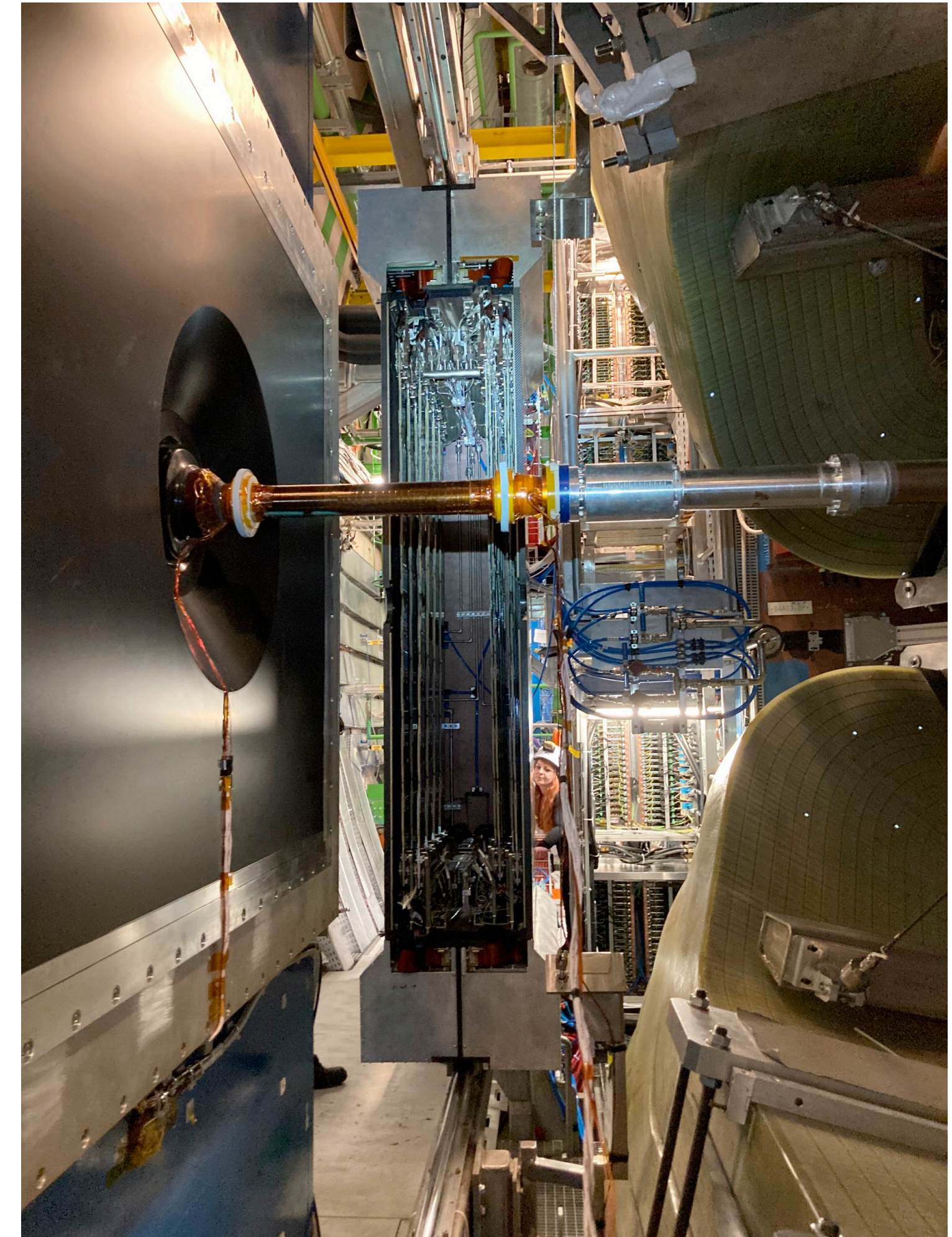


Tracciatore delle particelle cariche: UT

Il **pione** attraversa gli strati del tracciatore lasciando un segnale in corrispondenza del suo passaggio



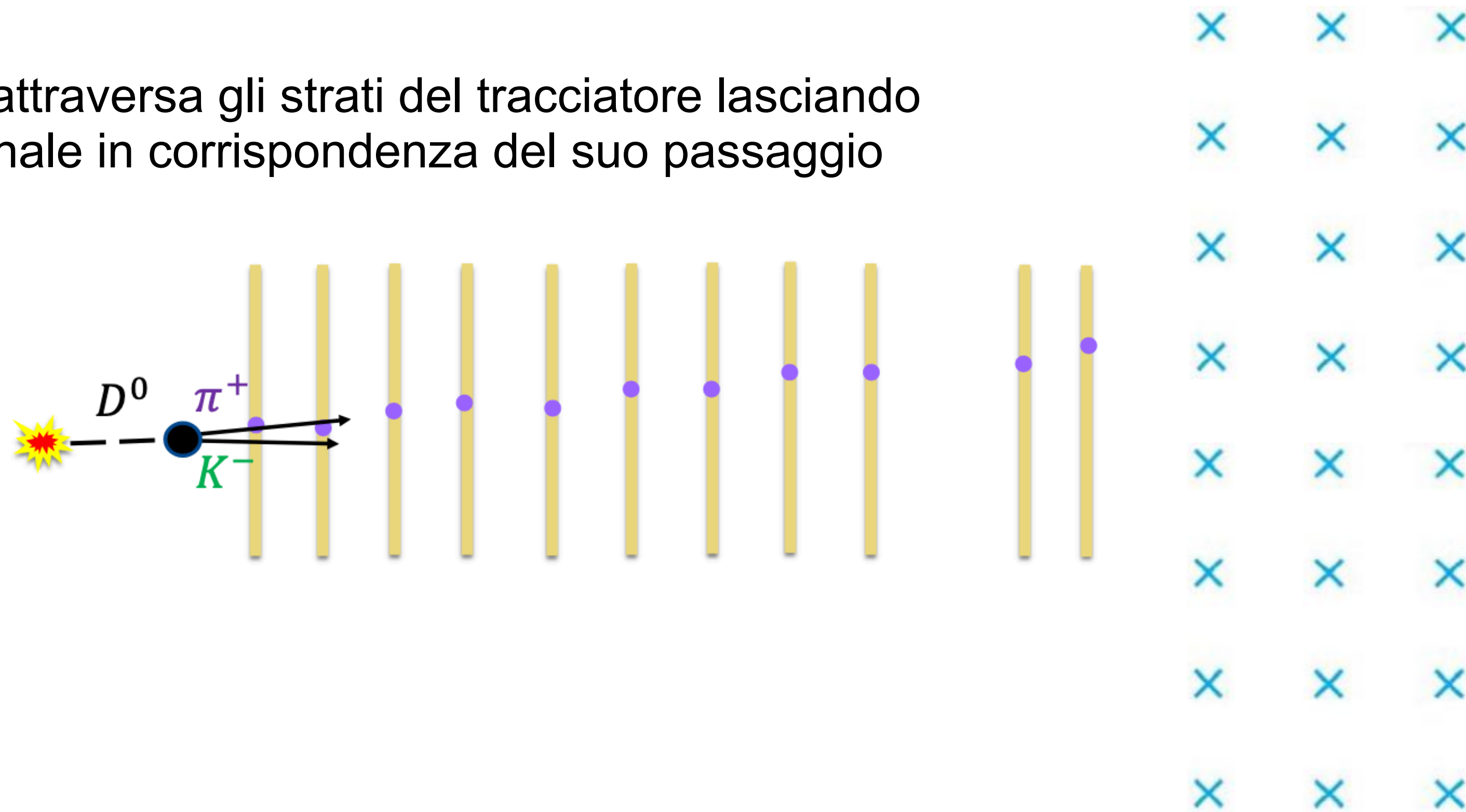
UT: Upstream Tracker



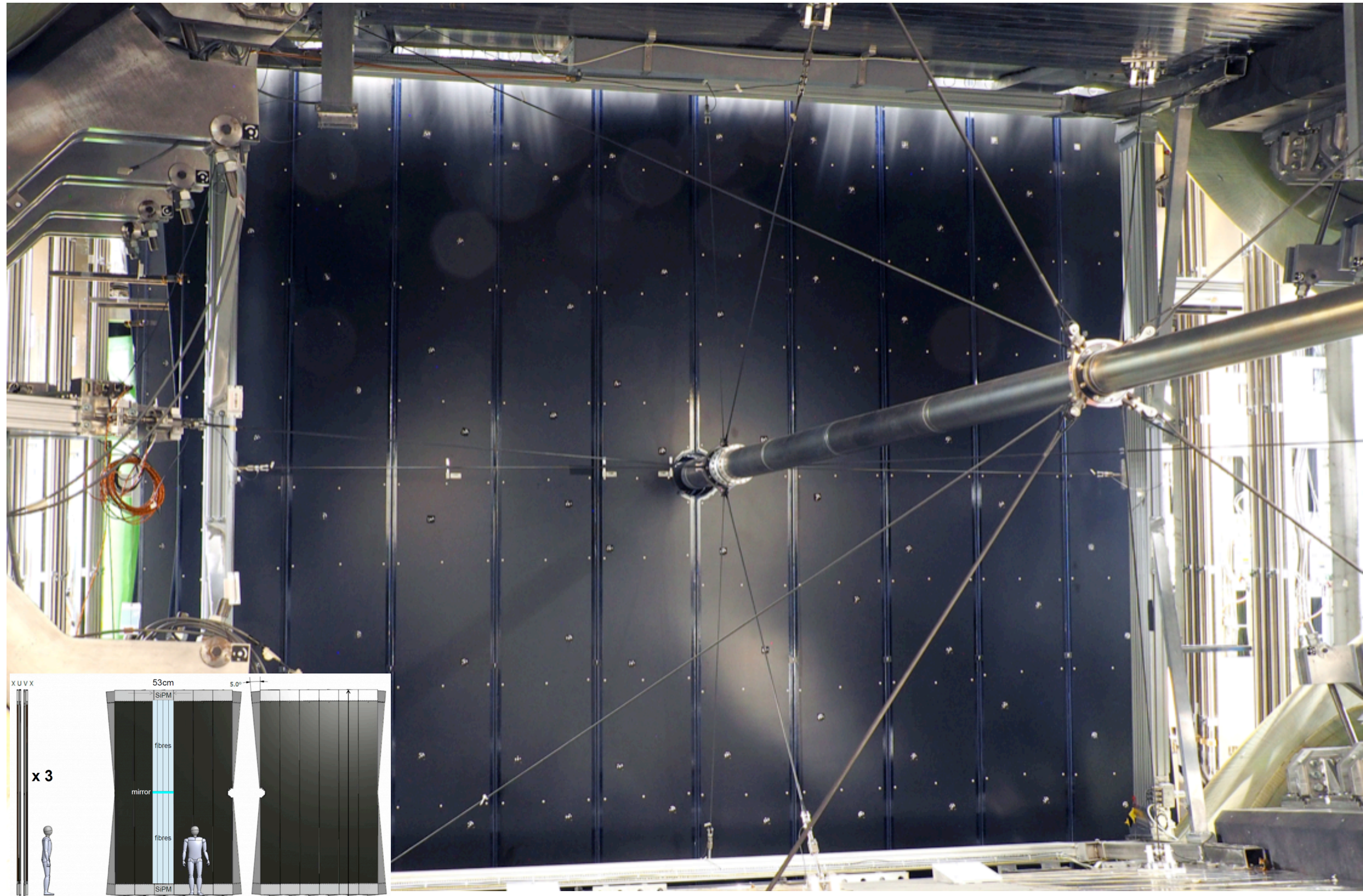
Tracciatore delle particelle cariche: magnete

Campo $\vec{B}$ entrante nella pagina

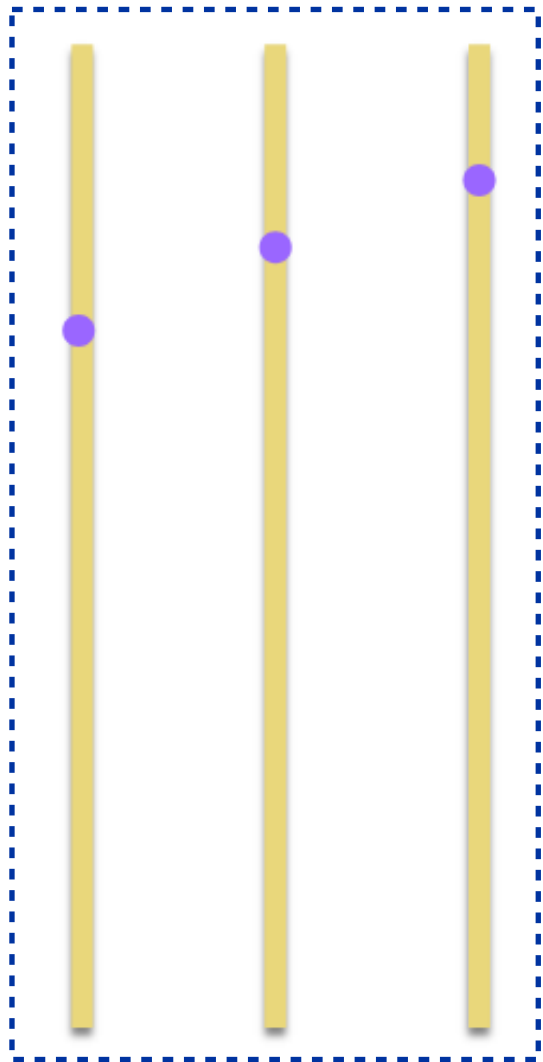
Il **pione** attraversa gli strati del tracciatore lasciando un segnale in corrispondenza del suo passaggio



Tracciatore delle particelle cariche: SciFi

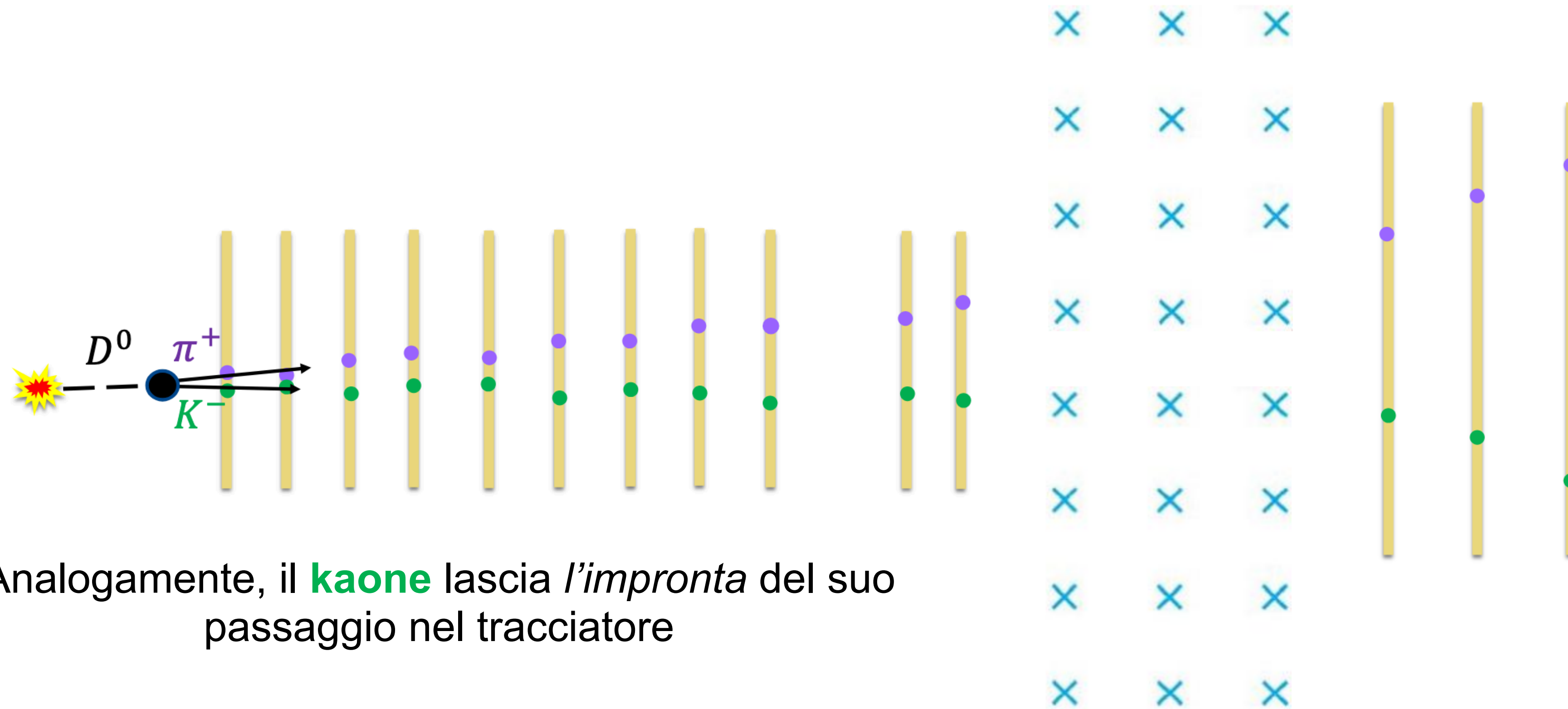


SciFi: Scintillating Fiber Tracker



Il campo magnetico devia la traiettoria

Tracciatore delle particelle cariche

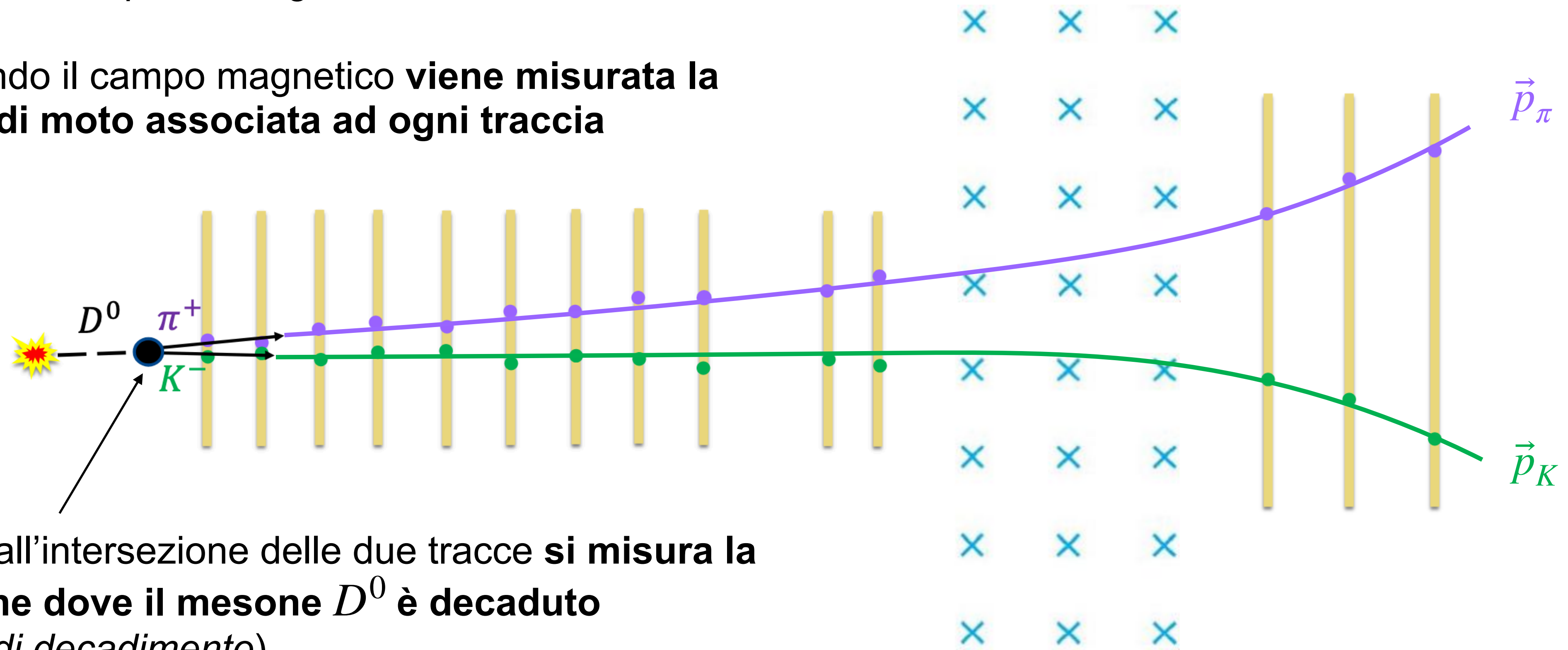


Analogamente, il **kaone** lascia l'impronta del suo passaggio nel tracciatore

Misura della quantità di moto e del vertice di decadimento

Con appositi **algoritmi** vengono ricostruite le tracce delle particelle a partire dagli *hits* misurati

Conoscendo il campo magnetico **viene misurata la quantità di moto associata ad ogni traccia**



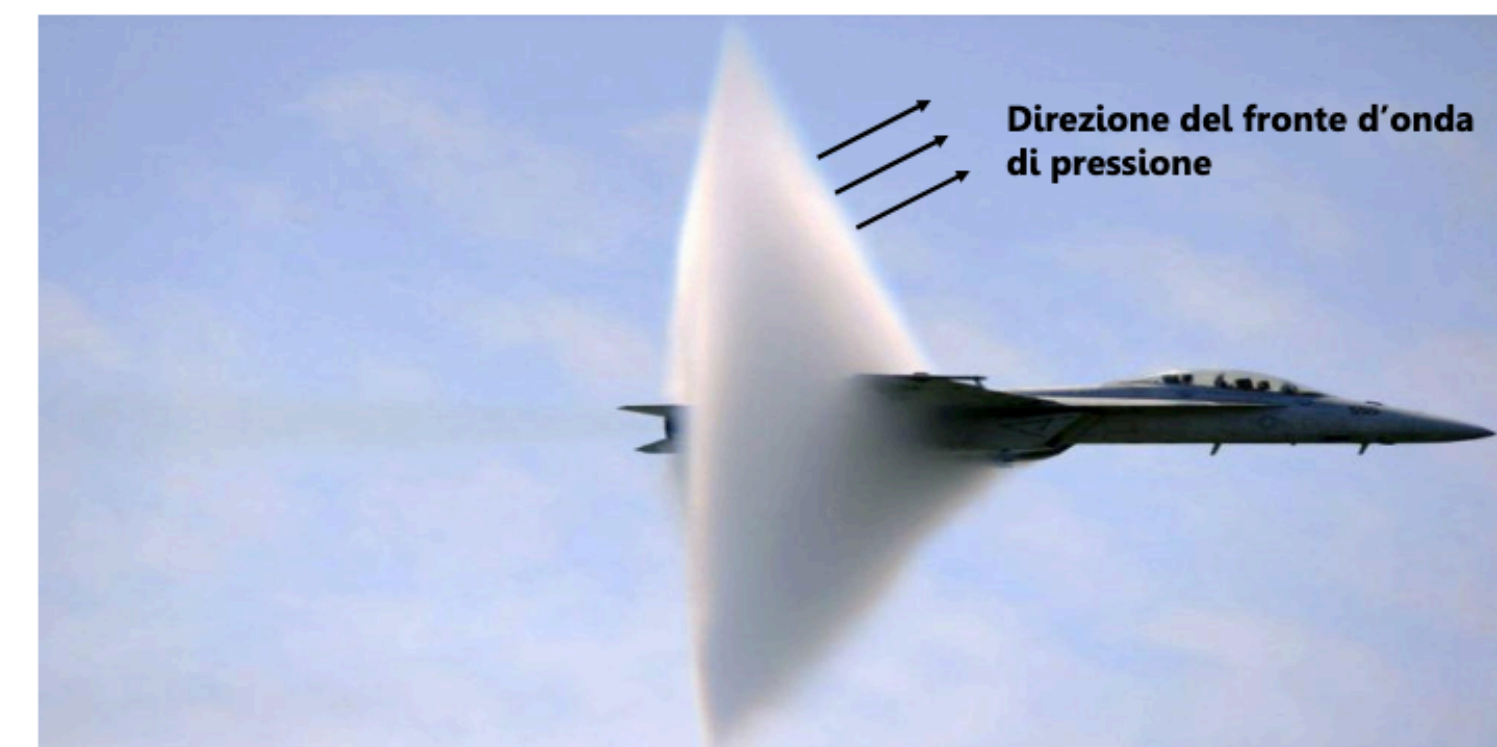
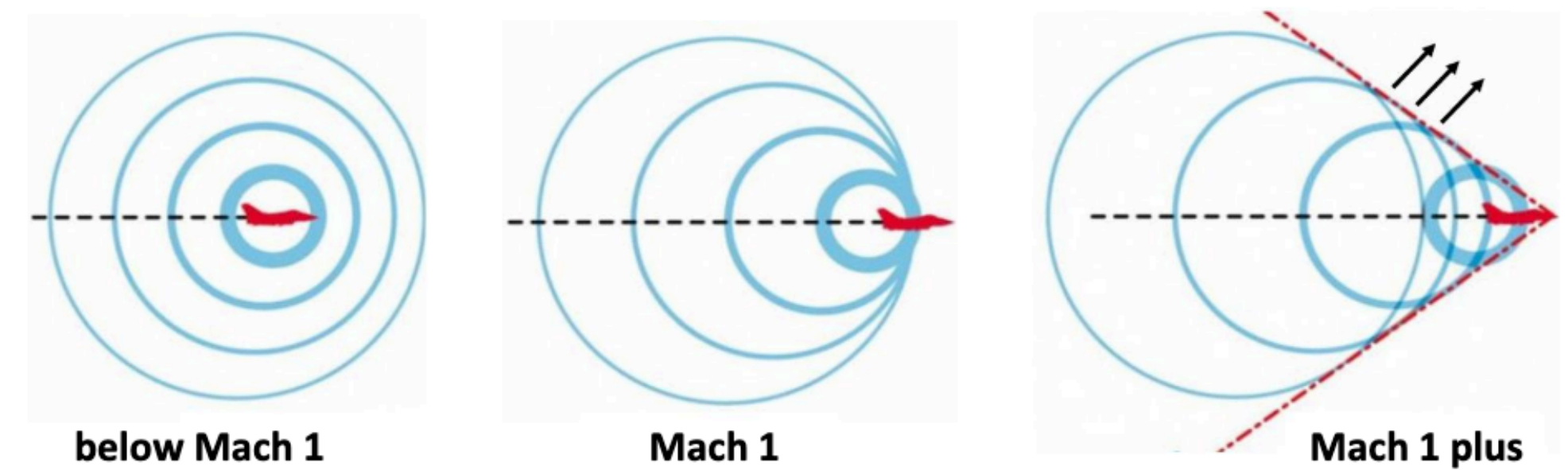
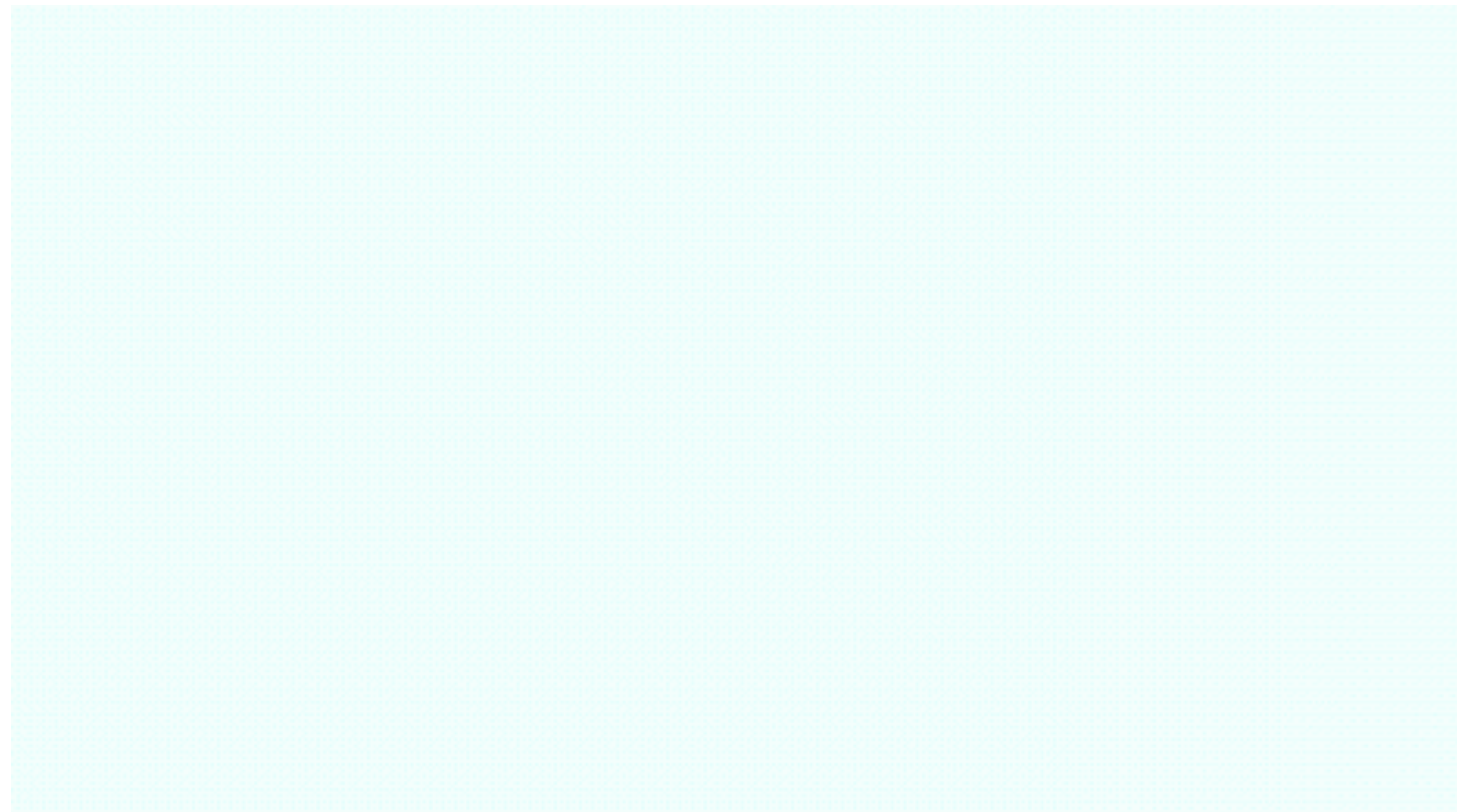
Inoltre dall'intersezione delle due tracce **si misura la posizione dove il mesone D^0 è decaduto** (*vertice di decadimento*)

Identificazione del tipo di particella

- Abbiamo visto come misurare la quantità di moto delle particelle cariche
- Ma come sapere se una traccia appartiene ad un pione, ad un kaone o ad altro?

Identificazione del tipo di particella

- Abbiamo visto come misurare la quantità di moto delle particelle cariche
- Ma come sapere se una traccia appartiene ad un pione, ad un kaone o ad altro? **Misurando la massa**
- Quando una **particella carica** attraversa un certo mezzo (un gas o acqua) con una velocità maggiore della velocità della luce in quel mezzo, emette radiazione elettromagnetica → **luce Cherenkov**



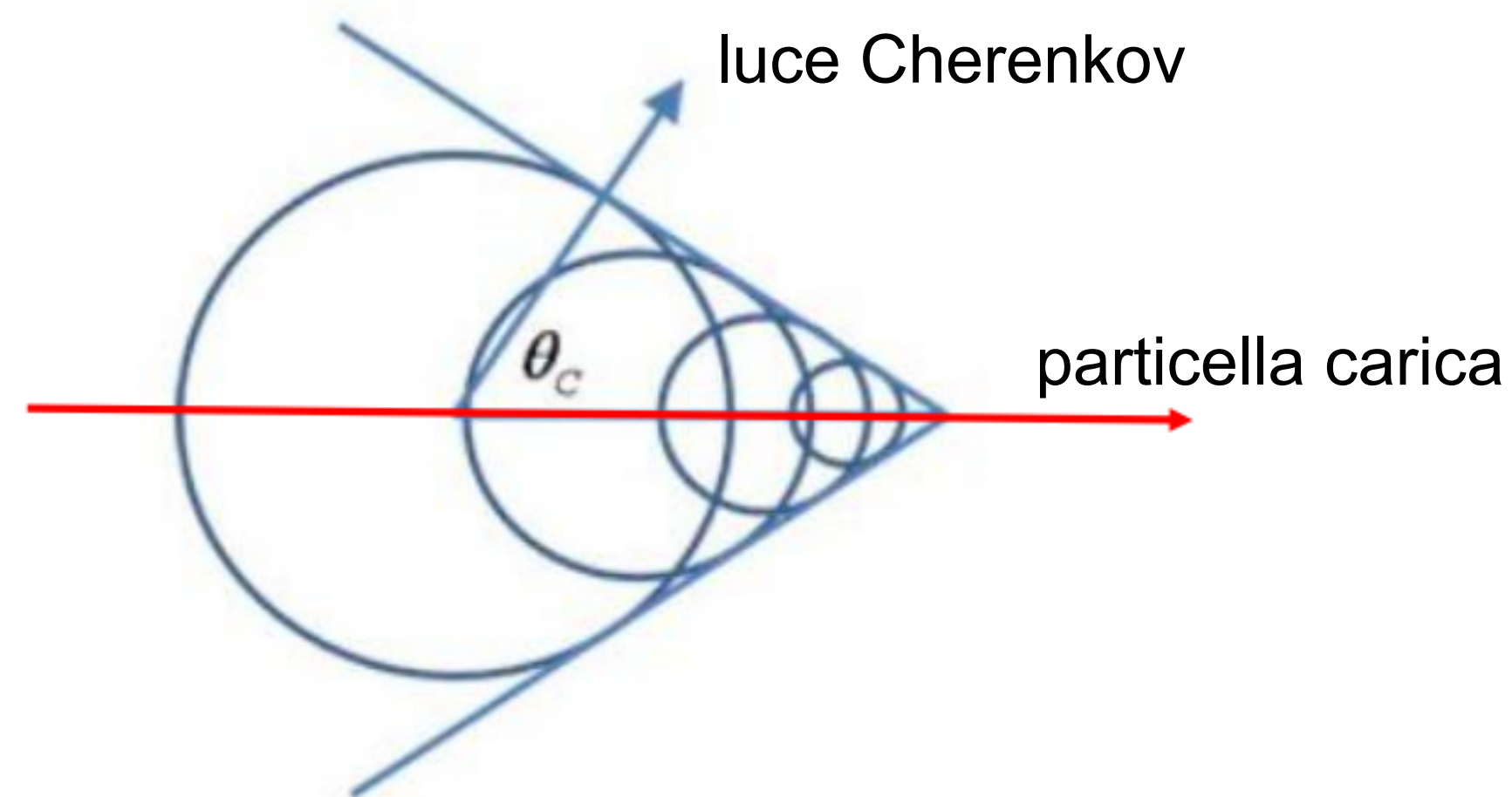
Analogia con il bang supersonico dei jets

La luce viene emessa con un angolo dato da

$$\cos \theta_C = \frac{c}{nv}$$

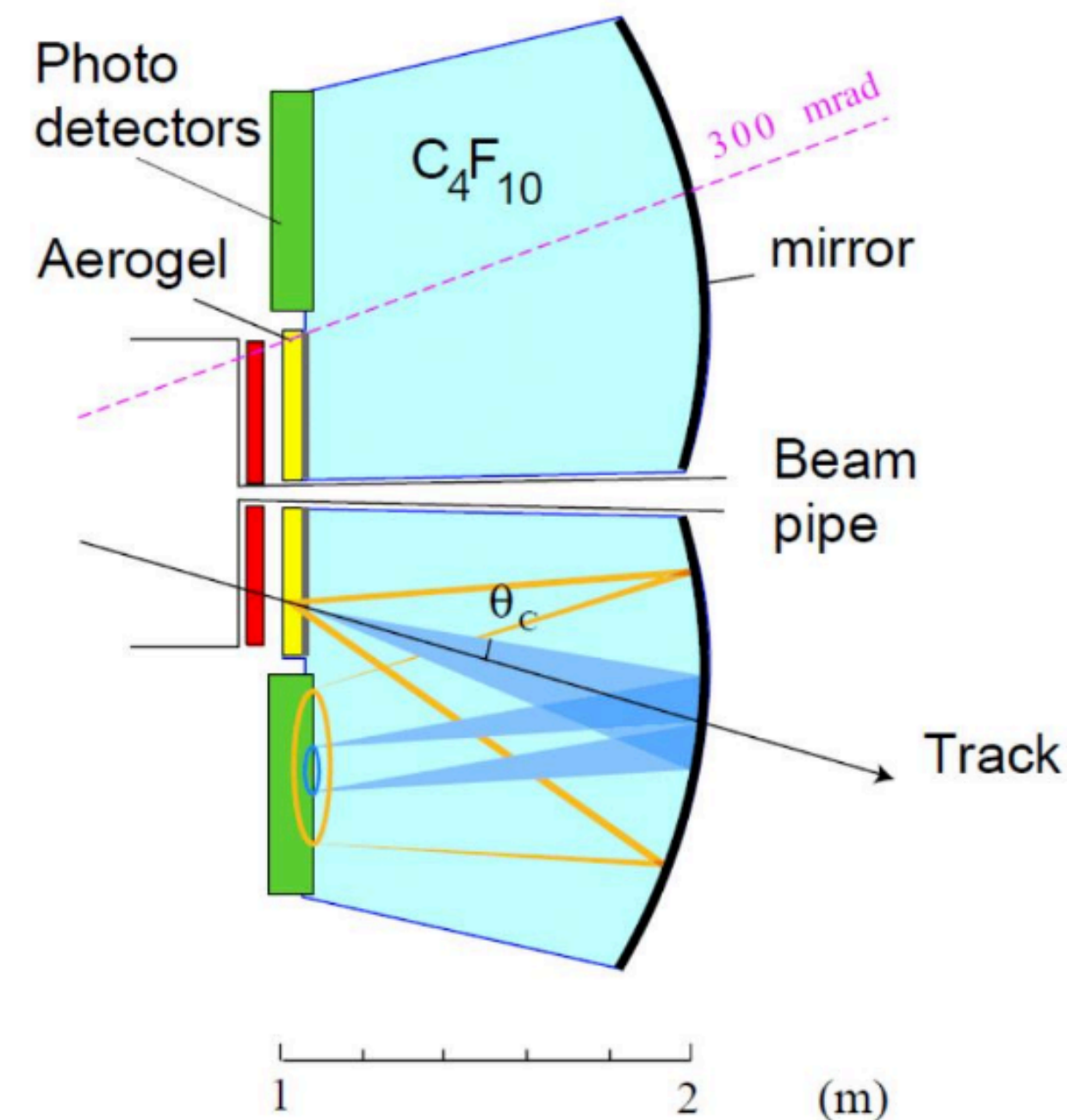
Identificazione del tipo di particella: RICH

- Abbiamo visto come misurare la quantità di moto delle particelle cariche
- Ma come sapere se una traccia appartiene ad un pione, ad un kaone o ad altro? **Misurando la massa**
- Quando una **particella carica** attraversa un certo mezzo (un gas o acqua) con una velocità maggiore della velocità della luce in quel mezzo, emette radiazione elettromagnetica → **luce Cherenkov**



La luce viene emessa con un angolo dato da

$$\cos \theta_c = \frac{c}{nv}$$



RICH: Ring Imaging Cherenkov detectors

Identificazione del tipo di particella

- Abbiamo visto come misurare la quantità di moto delle particelle cariche
- Ma come sapere se una traccia appartiene ad un pione, ad un kaone o ad altro? Misurando la massa
- Quando una particella carica attraversa un certo mezzo (un gas o acqua) con una velocità maggiore della velocità della luce in quel mezzo, emette radiazione elettromagnetica → luce Cherenkov
- Dalla misura della **quantità di moto e della velocità** si misura **la massa** e quindi si **identificano le particelle**

Identificazione del tipo di particella

- Abbiamo visto come misurare la quantità di moto delle particelle cariche
- Ma come sapere se una traccia appartiene ad un pione, ad un kaone o ad altro? Misurando la massa
- Quando una particella carica attraversa un certo mezzo (un gas o acqua) con una velocità maggiore della velocità della luce in quel mezzo, emette radiazione elettromagnetica → luce Cherenkov
- Dalla misura della **quantità di moto e della velocità** si misura **la massa** e quindi si **identificano le particelle**
- Questo non funziona per tutte le particelle e bisogna usare le informazioni da altri sub-detectors!

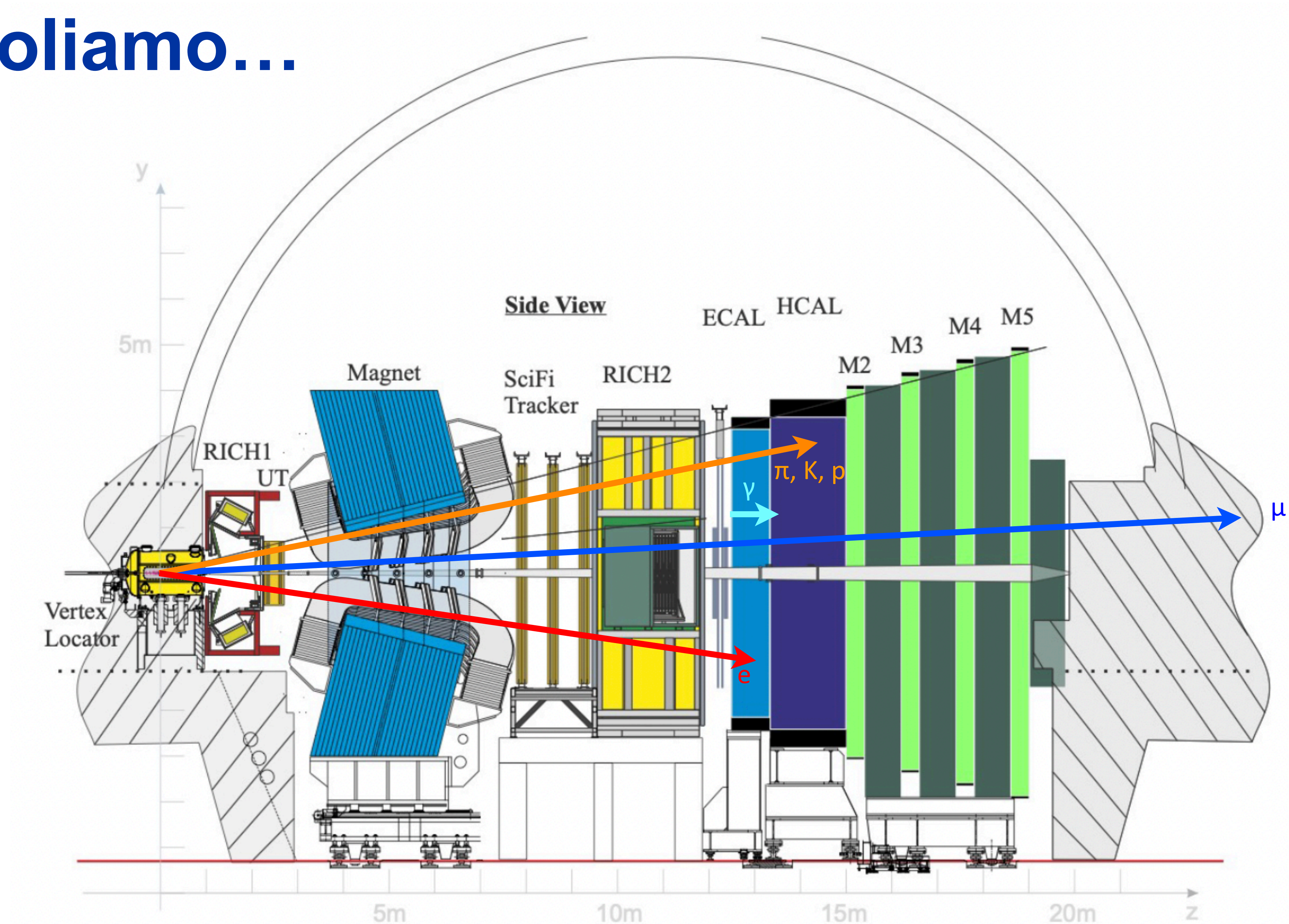


ECAL: Electromagnet CALorimeter



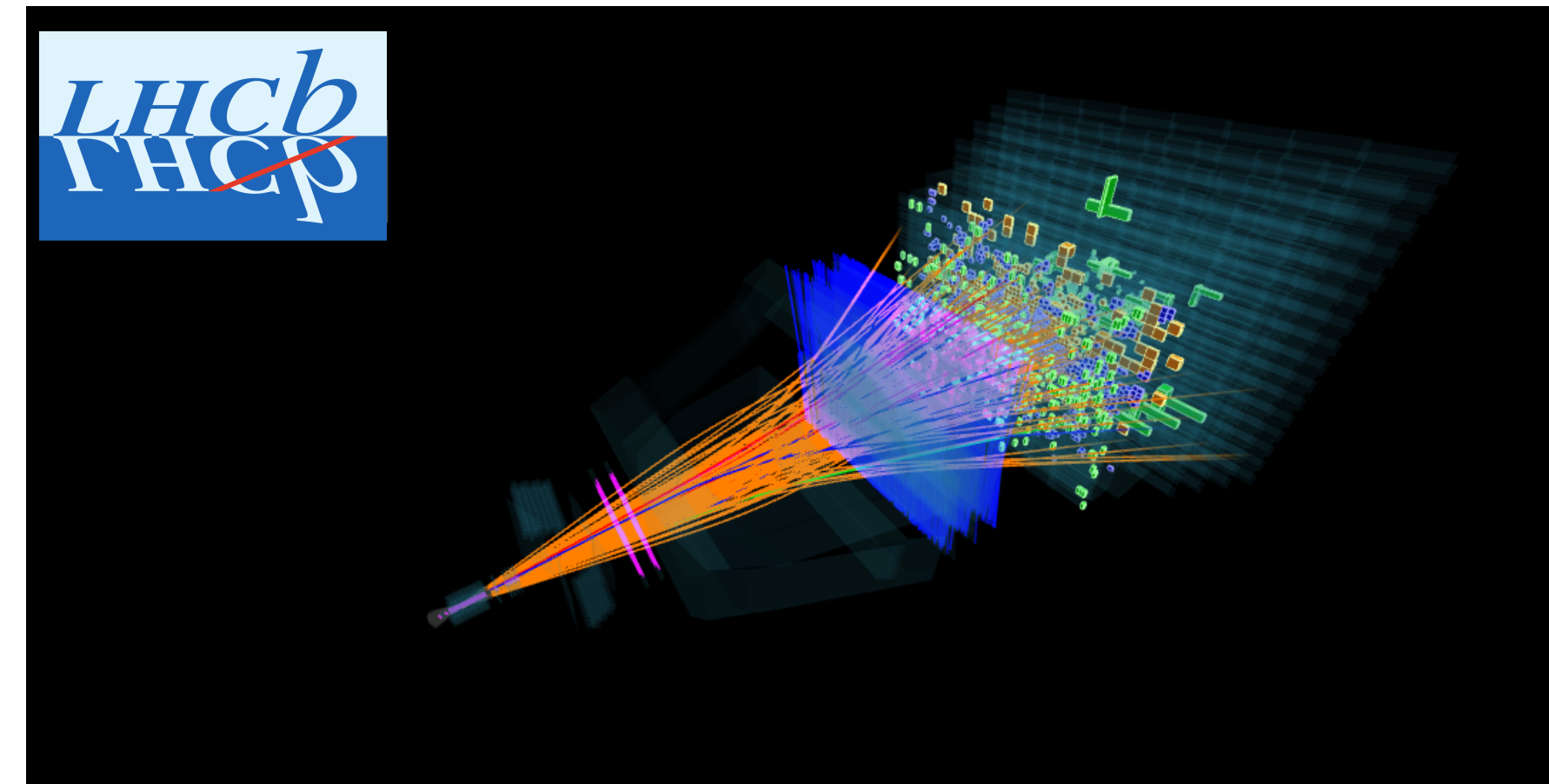
Muon detector (M2 e M3)

Ricapitoliamo...



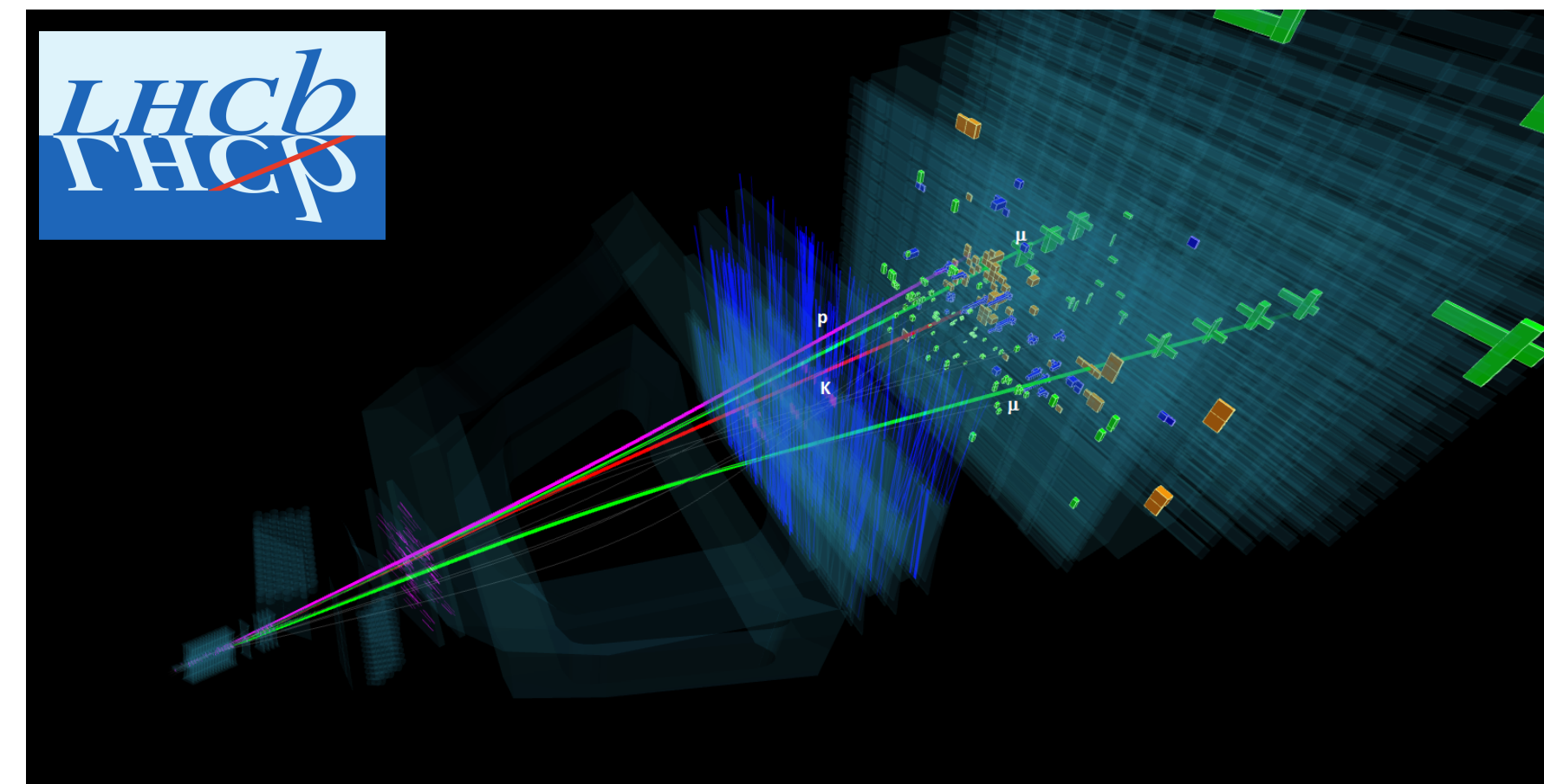
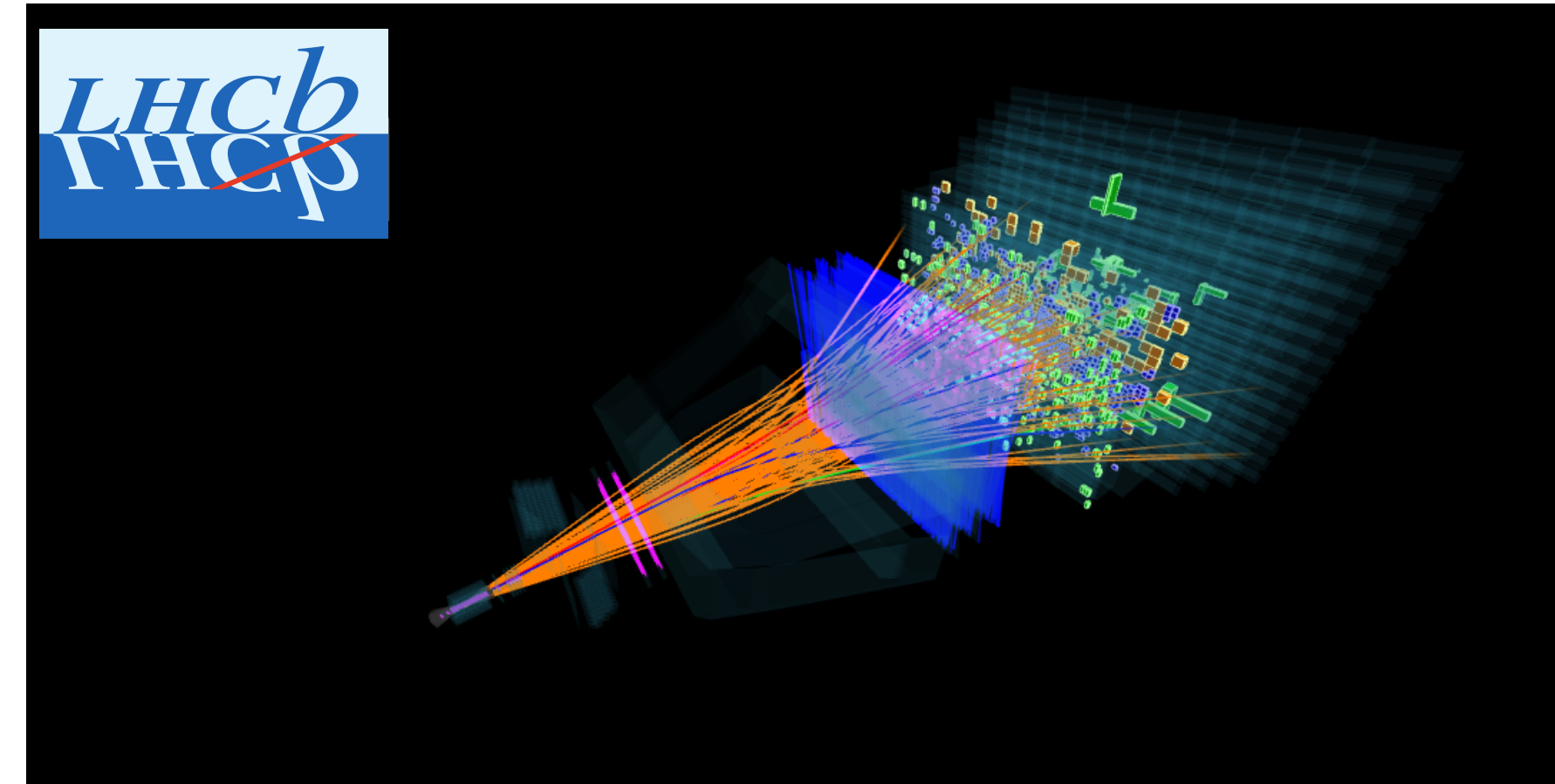
Il Trigger: come scegliere solo gli eventi interessanti

- Ma quanti dati dobbiamo salvare a LHCb?
 - LHC: collisioni protoni ogni 25 ns $\rightarrow$ circa 40 milioni di eventi al secondo!
 - Ogni collisione produce 100 kB di dati
 - $100 \text{ kB} \times 40 \text{ MHz} = 4 \text{ TB/s}$
- ⚠ La capacità di LHCb è di 10 GB/s : impossibile salvare tutto
 - bisogna selezionare solo gli **eventi interessanti**



Il Trigger: come scegliere solo gli eventi interessanti

- Ma quanti dati dobbiamo salvare a LHCb?
 - LHC: collisioni protoni ogni 25 ns $\rightarrow$ circa 40 milioni di eventi al secondo!
 - Ogni collisione produce 100 kB di dati
 - $100 \text{ kB} \times 40 \text{ MHz} = 4 \text{ TB/s}$
- ⚠ La capacità di LHCb è di 10 GB/s : impossibile salvare tutto
 - bisogna selezionare solo gli **eventi interessanti**
- Ma come faccio a scegliere gli eventi interessanti?
 - Grande sfida: i dati scartati sono persi per sempre
 - Grande potenza di calcolo: arrivano nuovi dati ogni 25 ns!
 - Strategia: devo capire come sono fatti gli eventi interessanti **prima** che l'esperimento inizi la presa dati e costruire un **algoritmo** di trigger

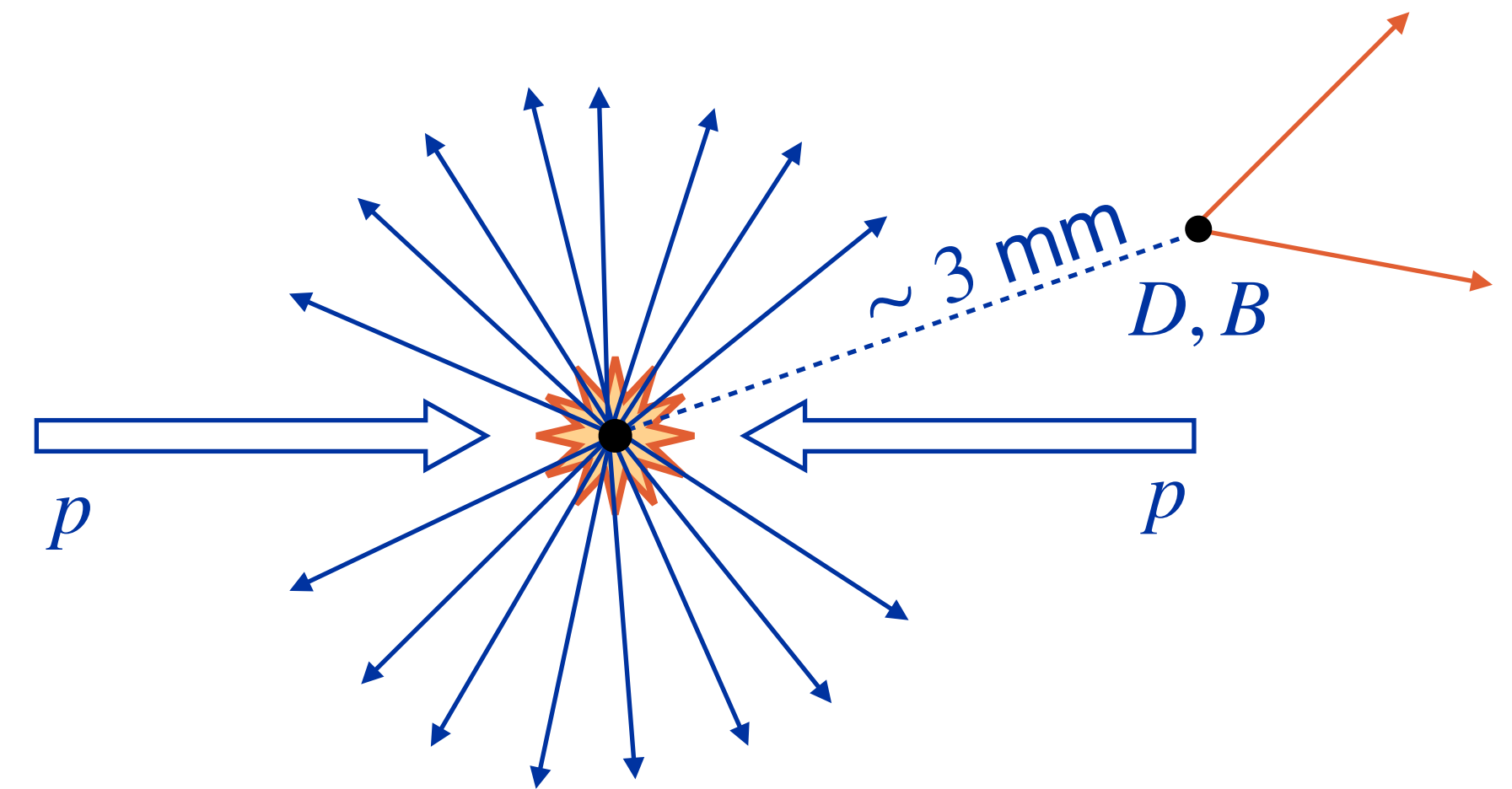


Trigger di LHCb: obiettivo

- Quali sono gli eventi interessanti per LHCb?
 - Particelle contenenti quark *beauty* (b) e *charm* (c)
 - Hanno “lunghe” vite medie $\tau \sim \text{ps}$ (10^{-12} s) : viaggiano un po' prima di decadere!

$$\beta\gamma c\tau \sim 10 \times 3 \cdot 10^{10} \frac{\text{cm}}{\text{s}} \times 10^{-12} \text{ s} \sim 3 \text{ mm}$$

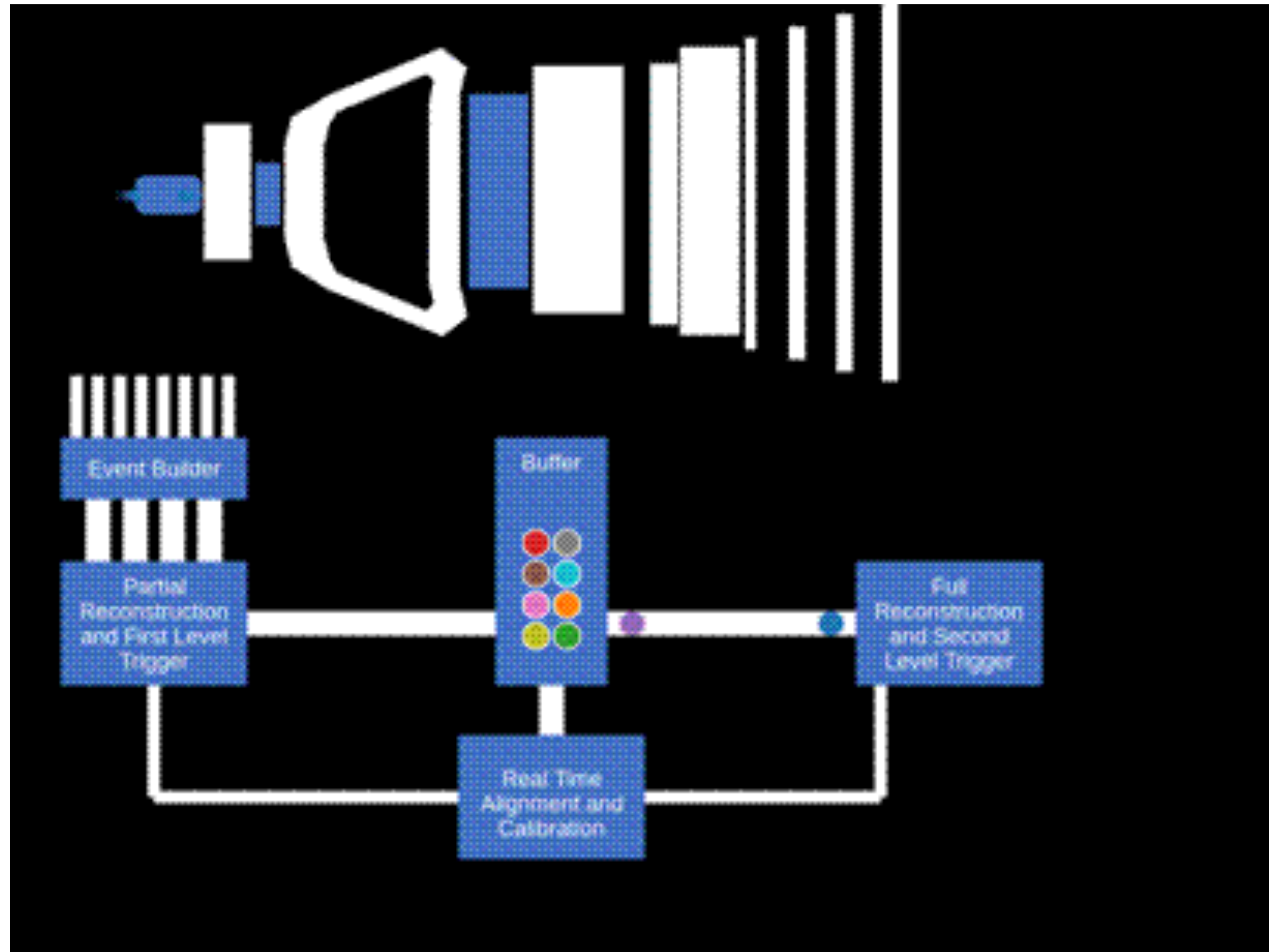
- Come facciamo a selezionare solo questi eventi?
 - Cerchiamo particelle prodotte **lontano** dal punto di interazione pp
 - Chiediamo che abbiano **energie e impulsi** nel range giusto



Problema

Per accedere a queste informazioni serve prima un po' di **ricostruzione**: come facciamo a fare tutto in 25 ns??

Il Trigger di LHCb



Input: collisioni pp

4 TB/s
40 MHz

HLT1 (GPU farm)
Ricostruzione parziale
e selezione di tracce interessanti

100 GB/s
1.5 MHz

HLT2 (CPU farm)
Ricostruzione completa
e selezione di processi interi

10 GB/s
250 kHz

Output: dati salvati su disco per analisi

Ma alla fine... cosa misuriamo?

Programma di fisica di LHCb

✿ Asimmetria Materia - Antimateria: **Violazione di CP**

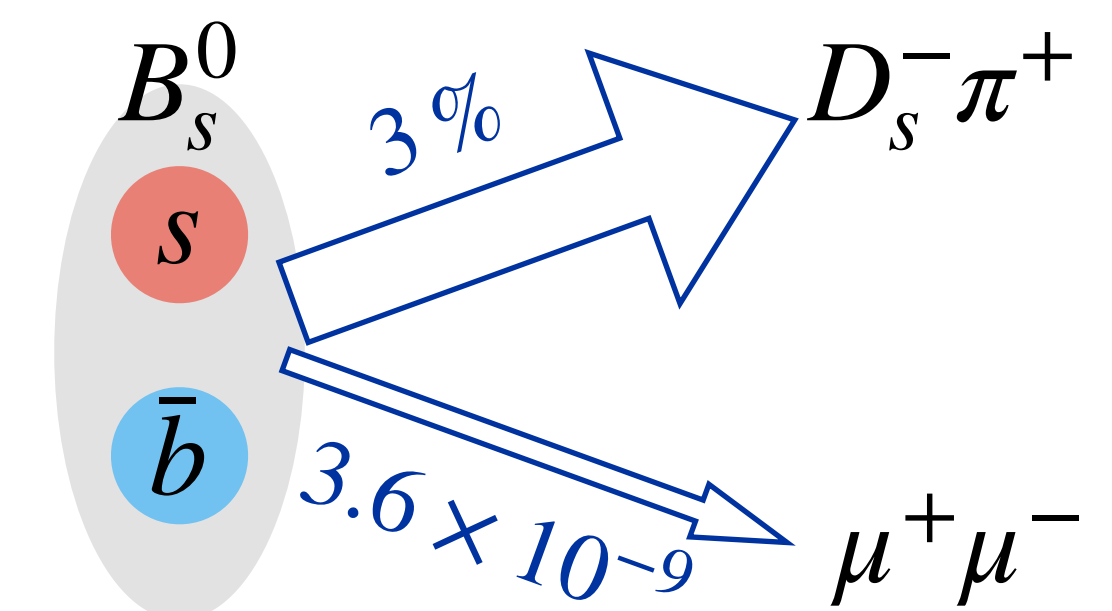
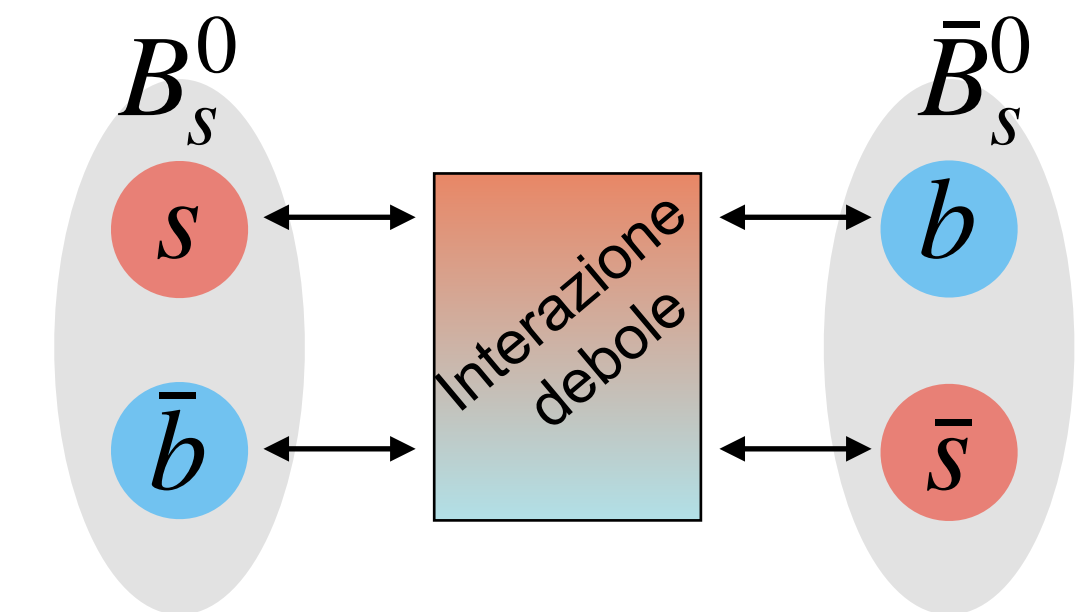
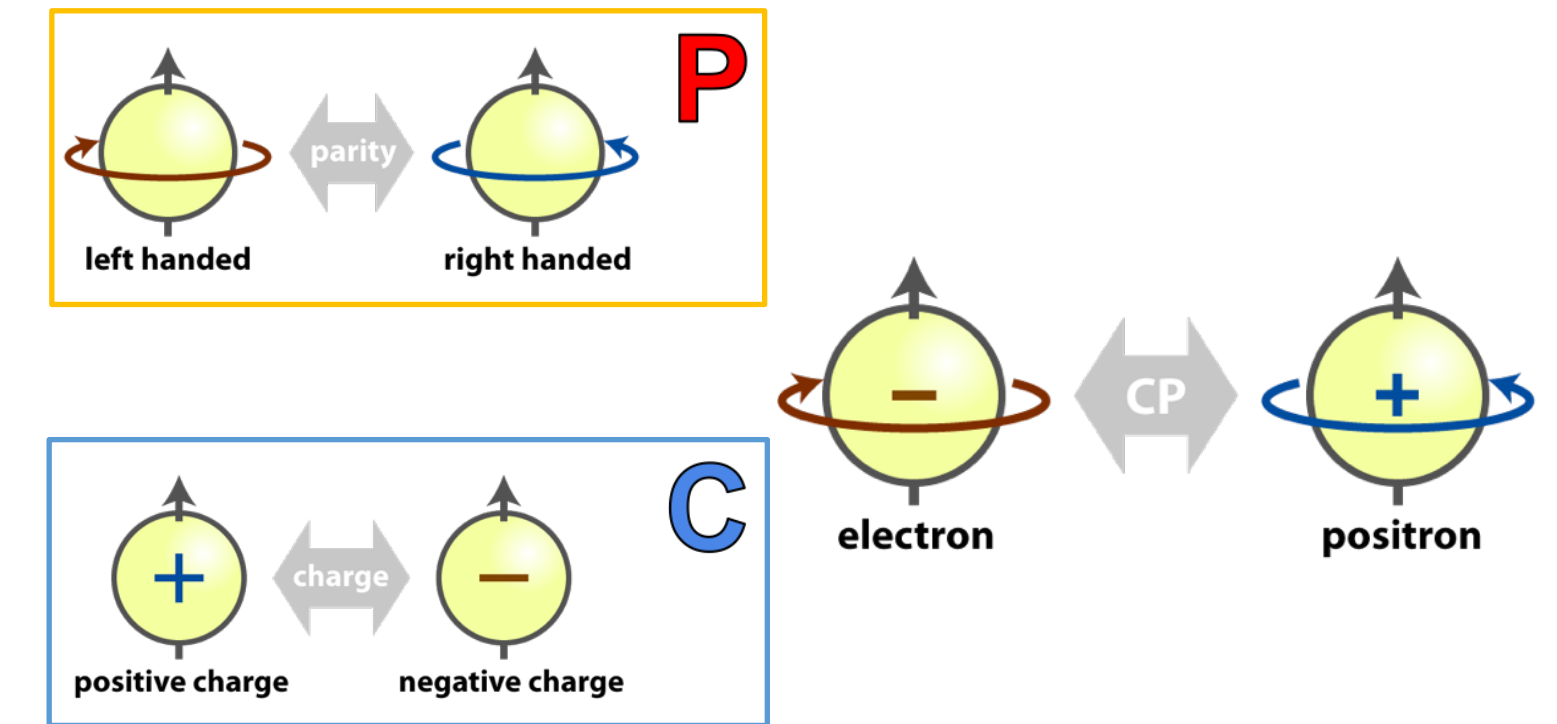
- ◆ CP: trasformazione particella $\leftrightarrow$ antiparticella
- ◆ CP non è una simmetria $\Leftrightarrow$ materia $\neq$ antimateria

✿ Mesoni con quark beauty e charm: **Oscillazioni di flavour**

- ◆ Mesoni neutri con flavour: $K^0(d\bar{s})$, $D^0(u\bar{c})$, $B^0(d\bar{b})$, $B_s^0(s\bar{b})$
- ◆ Oscillazioni: particella $\leftrightarrow$ antiparticella

✿ Ricerca di **canali di decadimento rari**

- ◆ Decadimenti rari nel Modello Standard: probabilità $\lesssim 10^{-8}$
- ◆ Interessanti: se ne osserviamo più del previsto è Nuova Fisica !



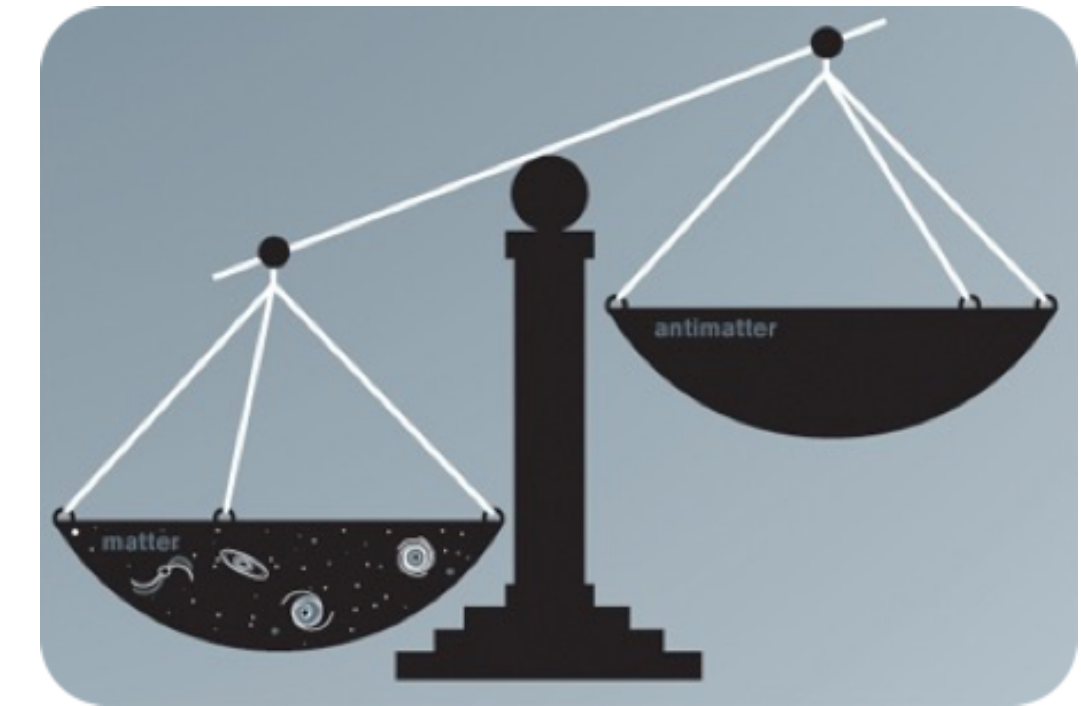
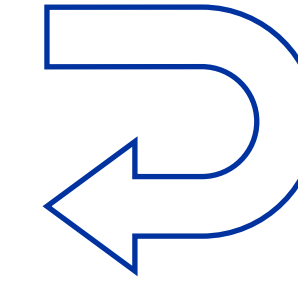
Violazione di CP

- Perché è importante studiarla?

- L'universo oggi è dominato dalla materia, ma al momento del Big Bang non abbiamo motivo di supporre che ci fosse più materia che antimateria ...
- Ci deve essere qualche interazione che **distingue** materia e antimateria!



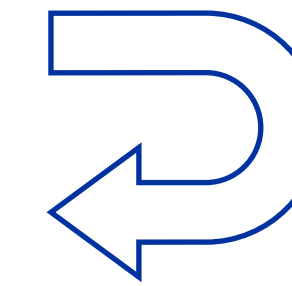
Il logo non è a caso!



Violazione di CP

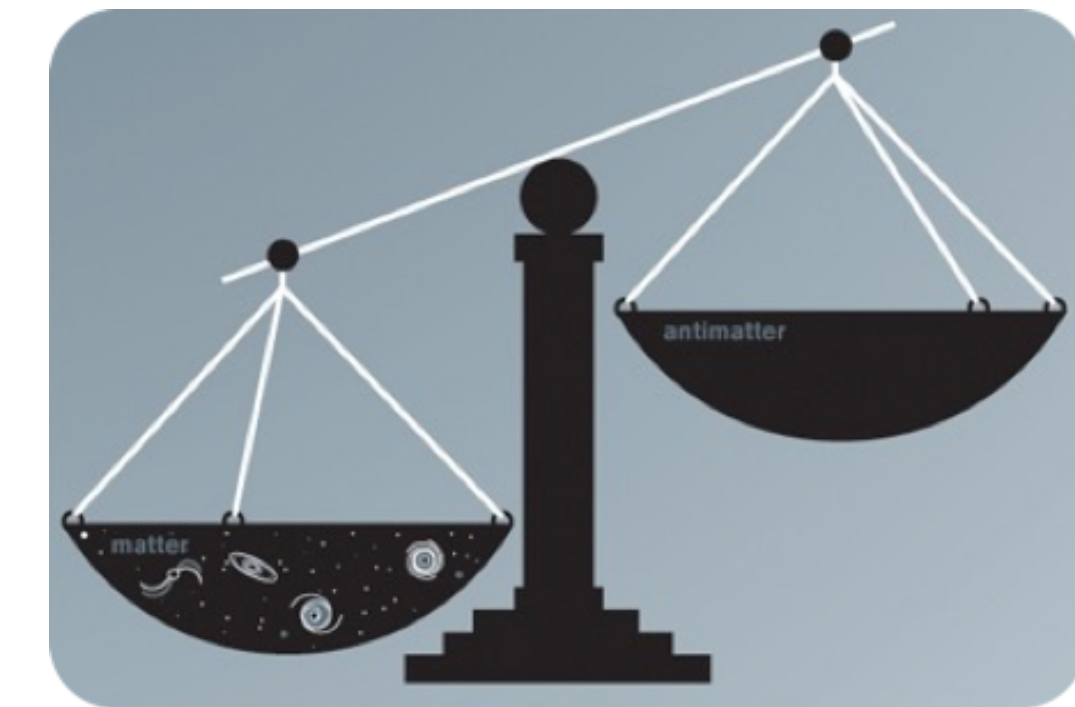


Il logo non è a caso!



- Perché è importante studiarla?

- L'universo oggi è dominato dalla materia, ma al momento del Big Bang non abbiamo motivo di supporre che ci fosse più materia che antimateria ...
- Ci deve essere qualche interazione che **distingue** materia e antimateria!



- Ma come misuriamo la violazione di CP?

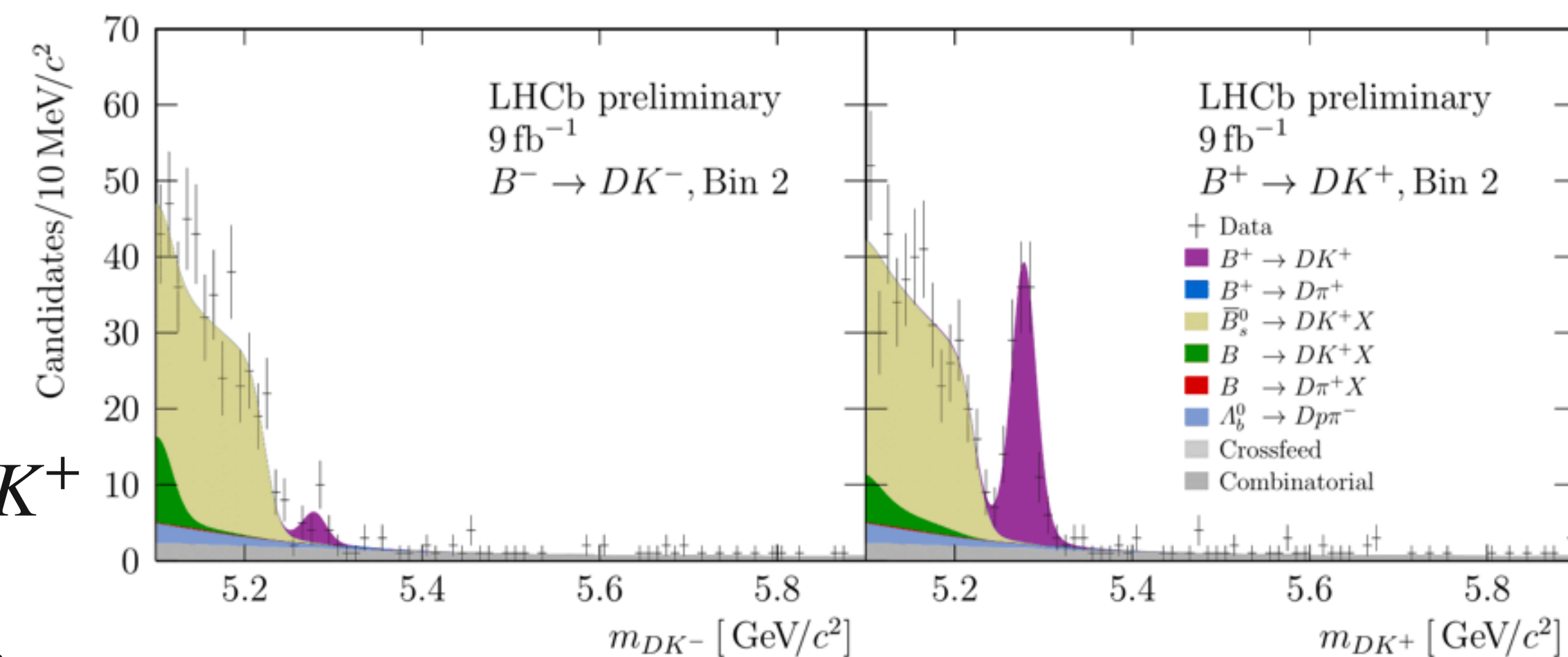
- Semplice: *contiamo* il numero di decadimenti di particelle e antiparticelle e vediamo quanto sono diversi.

- **Esempio facile:** $B^+ \rightarrow DK^+ \neq B^- \rightarrow DK^- \sim 85\%$

😋 ci sono pochissimi $B^- \rightarrow DK^-$ e tantissimi $B^+ \rightarrow DK^+$

- **Esempio difficile:** $D^0 \rightarrow \pi^+\pi^- \neq \bar{D}^0 \rightarrow \pi^-\pi^+ \sim 0.23\%$

😊 la differenza è impercettibile e devo tenere sotto controllo tantissimi effetti



Oscillazioni di flavour - B_s^0

- Cosa succede?

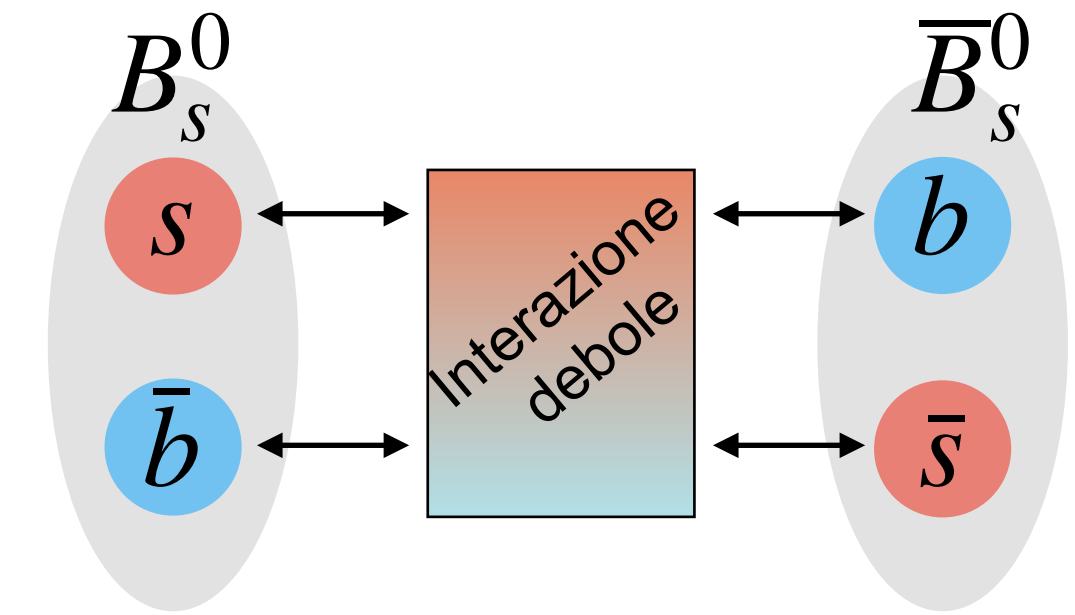
- Oscillare = trasformarsi spontaneamente nella propria antiparticella
- Probabilità di oscillare e di non oscillare:

$$P(B_s^0 \rightarrow \bar{B}_s^0, t) \approx (1 - \cos(\Delta m \cdot t)) \cdot e^{-t/\tau}$$

$$P(B_s^0 \rightarrow B_s^0, t) \approx (1 + \cos(\Delta m \cdot t)) \cdot e^{-t/\tau}$$

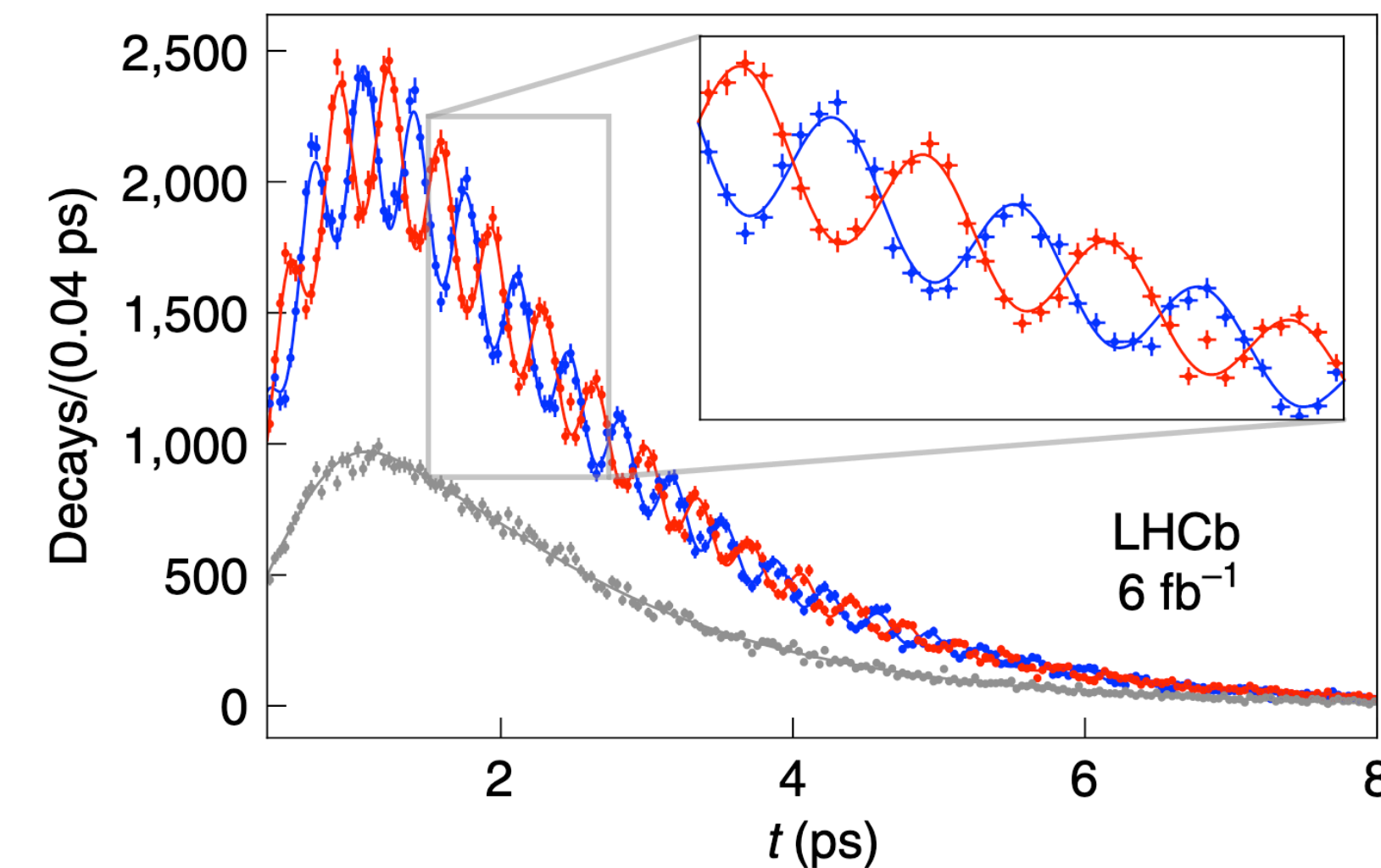
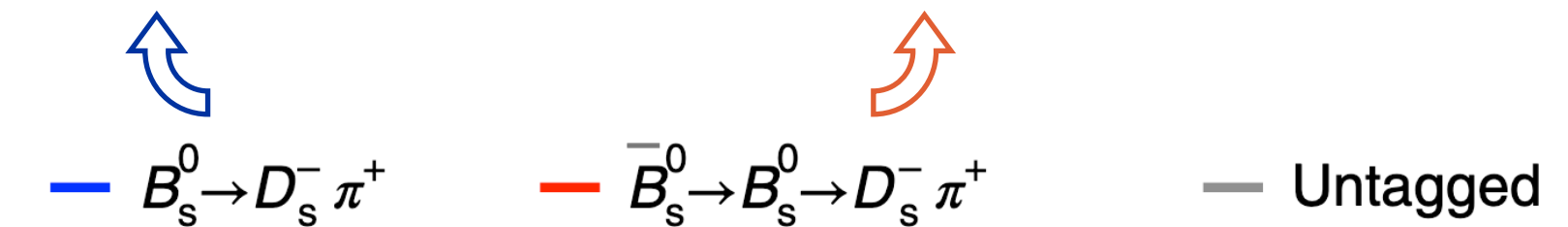
- Cosa misuriamo?

- Scopo: misurare la frequenza di oscillazione Δm
- Conto quanti B_s^0 hanno oscillato e non hanno oscillato al variare del tempo di decadimento
- Risultato: $\Delta m = 17.768 \pm 0.006 \text{ ps}^{-1}$: oscillazioni **velocissime**
($T \sim 0.35 \text{ ps}$)



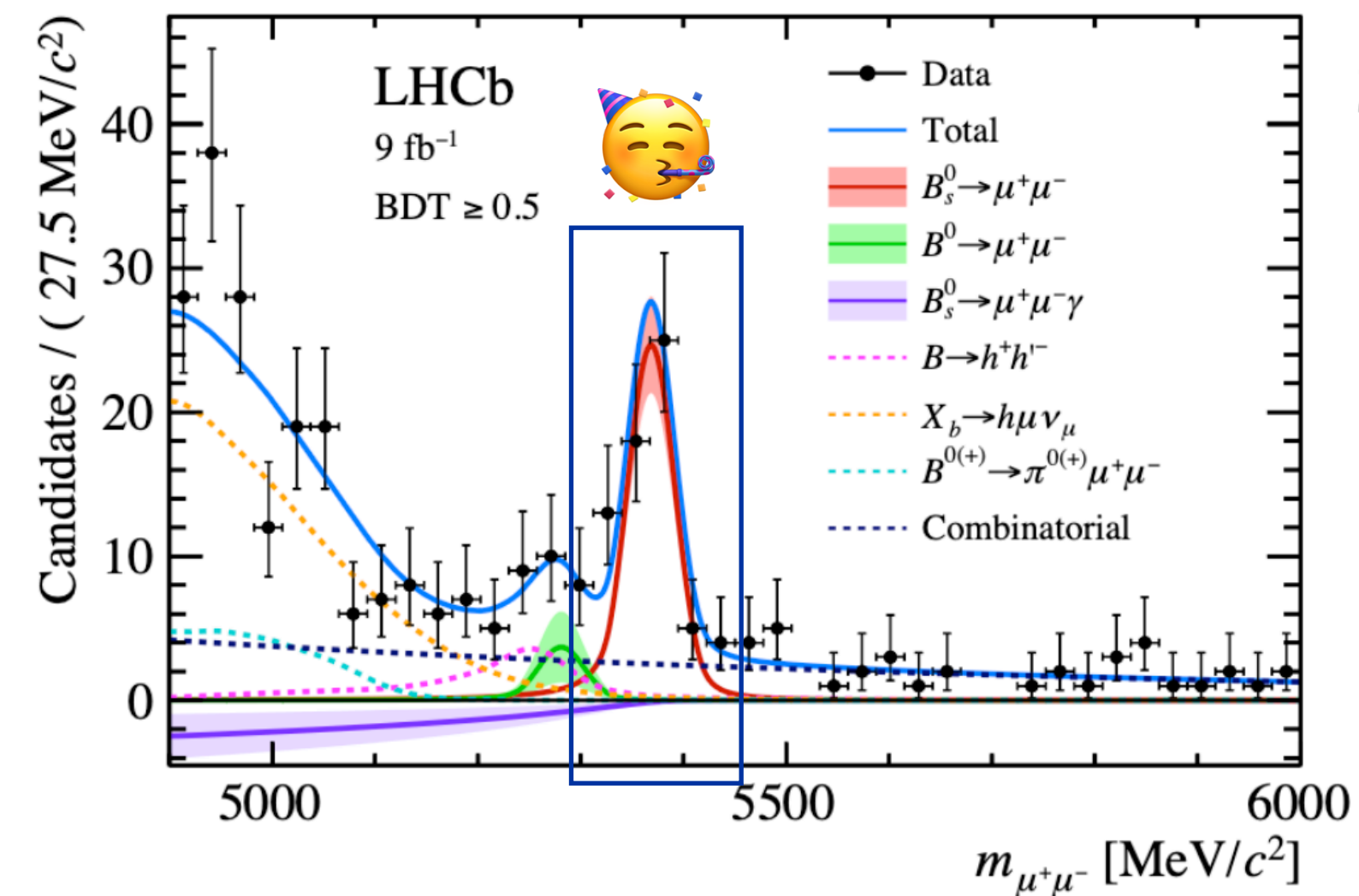
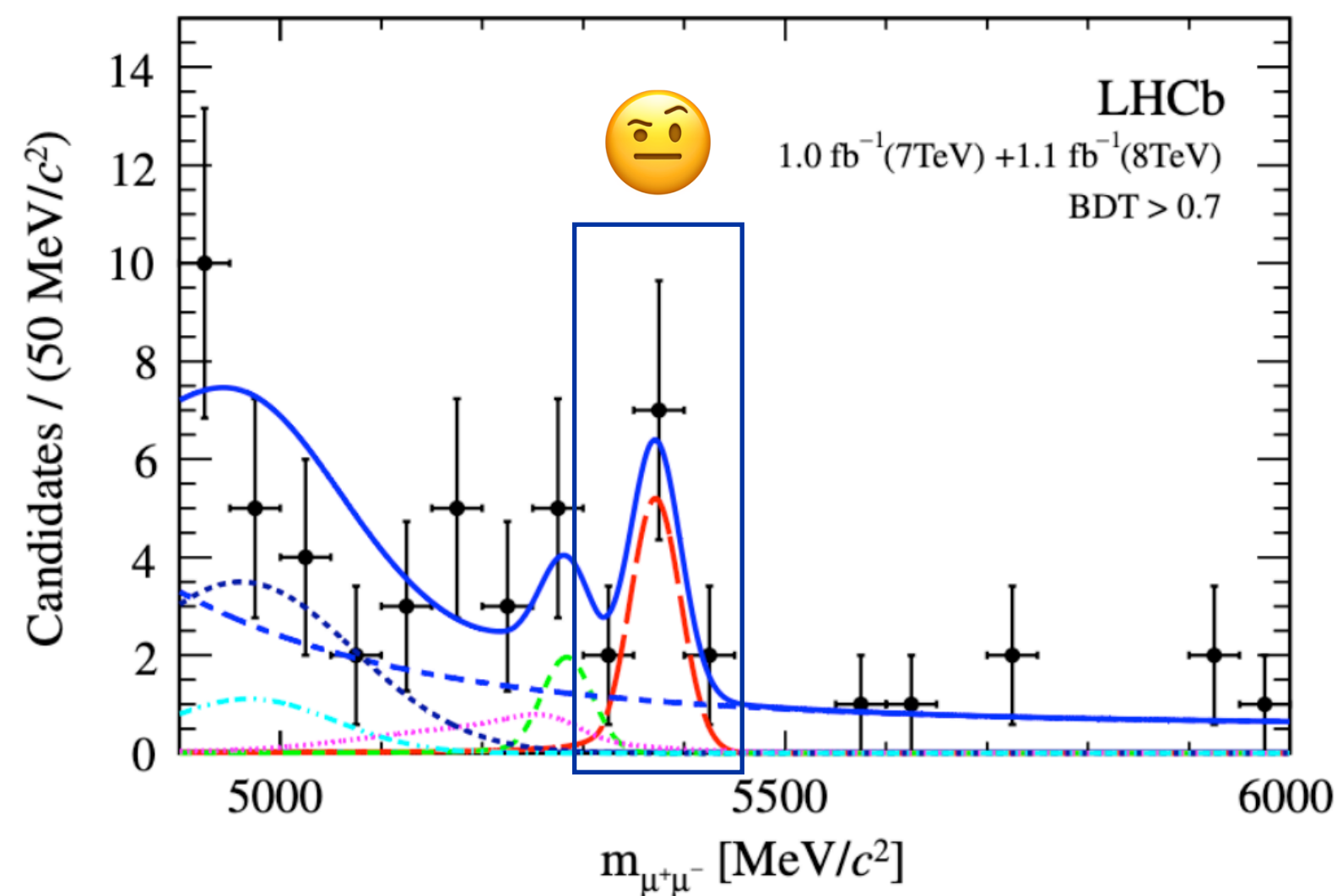
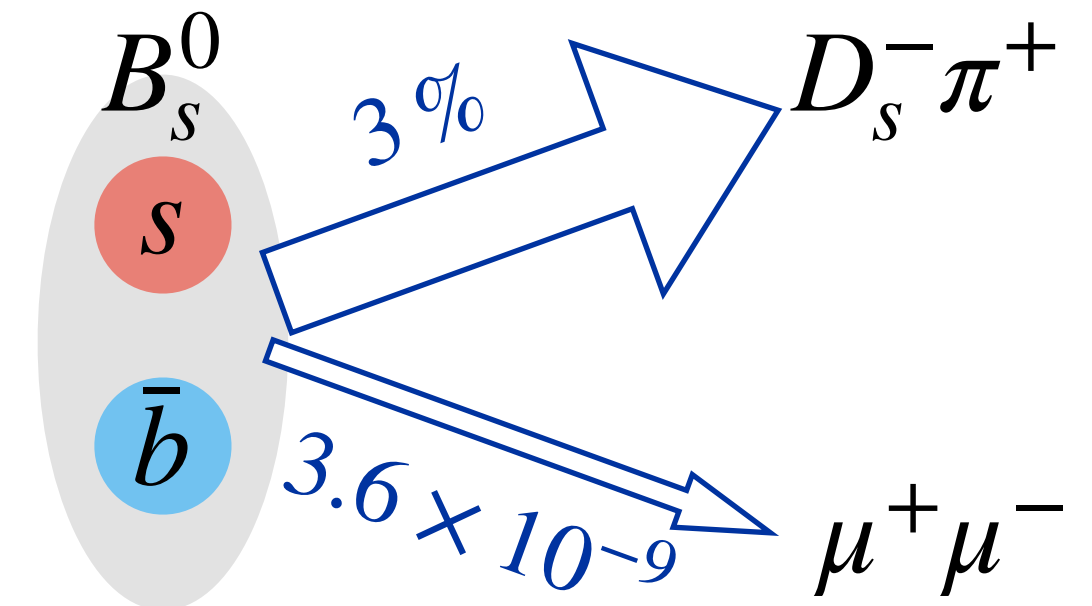
non hanno oscillato

hanno oscillato



Decadimenti rarissimi per cercare Nuova Fisica

- **Decadimenti rari nel Modello Standard:** probabilità $\lesssim 10^{-8}$
 - Esempio: un B_s^0 decade in $\mu^+\mu^-$ circa 3 volte ogni *miliardo*
- **Perché è interessante cercare questi canali così rari?**
 - Potrebbero essere prodotti anche da *nuovi processi* non previsti dal Modello Standard
- **Come facciamo a rivelare questi canali così rari?**
 - Raccogliendo *tanta tanta* statistica per distinguere il segnale dal fondo



Ma noi cosa facciamo tutti i giorni?

Conclusioni

- Con l'**esperimento LHCb** proviamo a rispondere a grandi domande! Ad esempio:
 - *Perché l'universo è fatto di materia e non di antimateria?*
 - *Esiste nuova fisica oltre il Modello Standard?*
- **La ricerca è un viaggio affascinante**, fatto di collaborazione, passione e *tanta* pazienza
 - Problemi complicati da risolvere
- La fisica delle particelle non è qualcosa di distante: è costruita da menti curiose... proprio come la vostra. Magari un giorno ci sarà anche il vostro nome tra i suoi protagonisti

Ci vediamo in Control Room



