

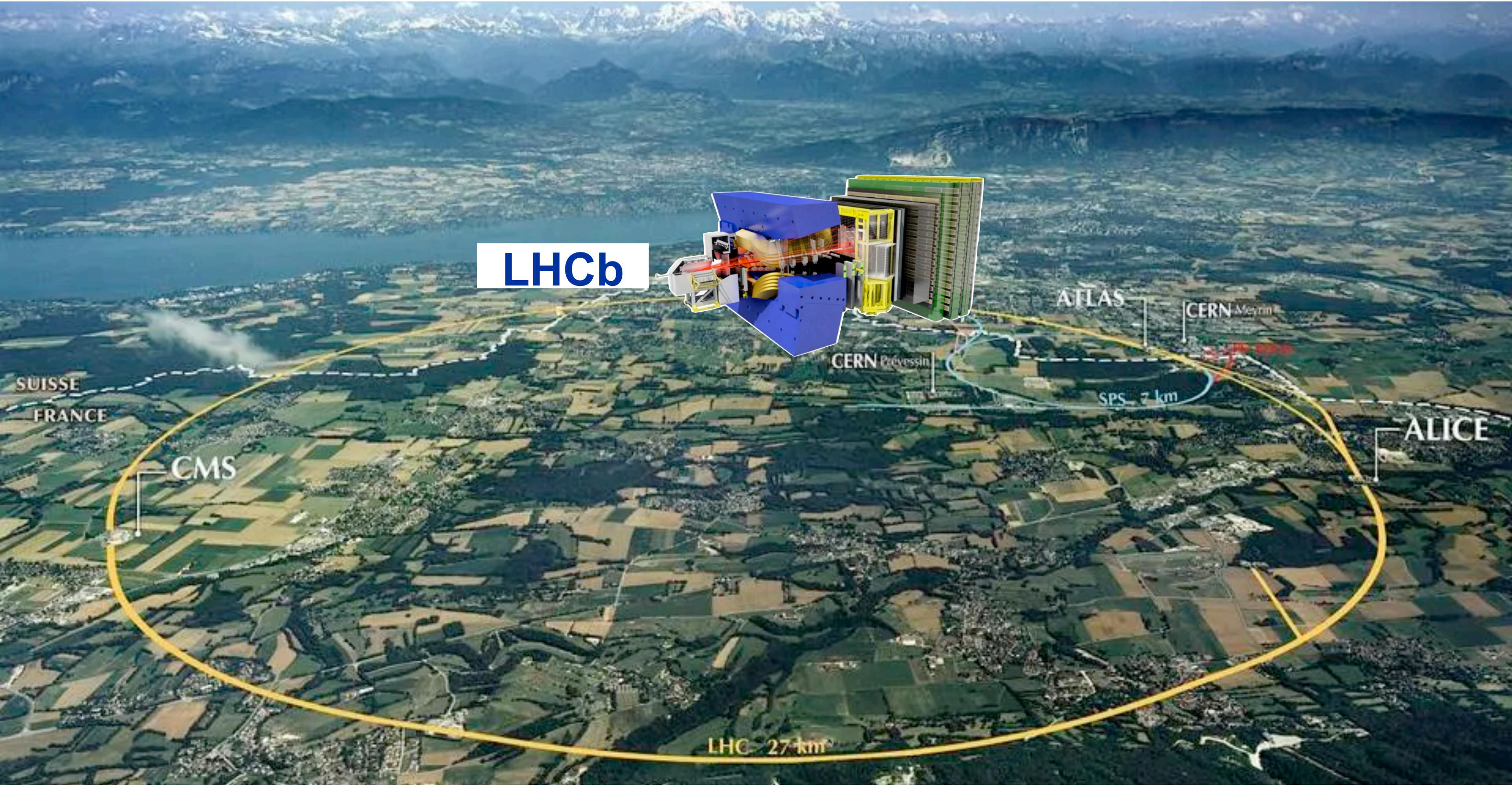


L'esperimento LHCb “in a nutshell”

Visita didattica al CERN, 26 Settembre 2026

Irene Celestino

L'esperimento LHCb a LHC



Standard Model of Elementary Particles

	three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
	I	II	III		
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
QUARKS	u up	c charm	t top	g gluon	H higgs
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
LEPTONS	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	

SCALAR BOSONS

GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS

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

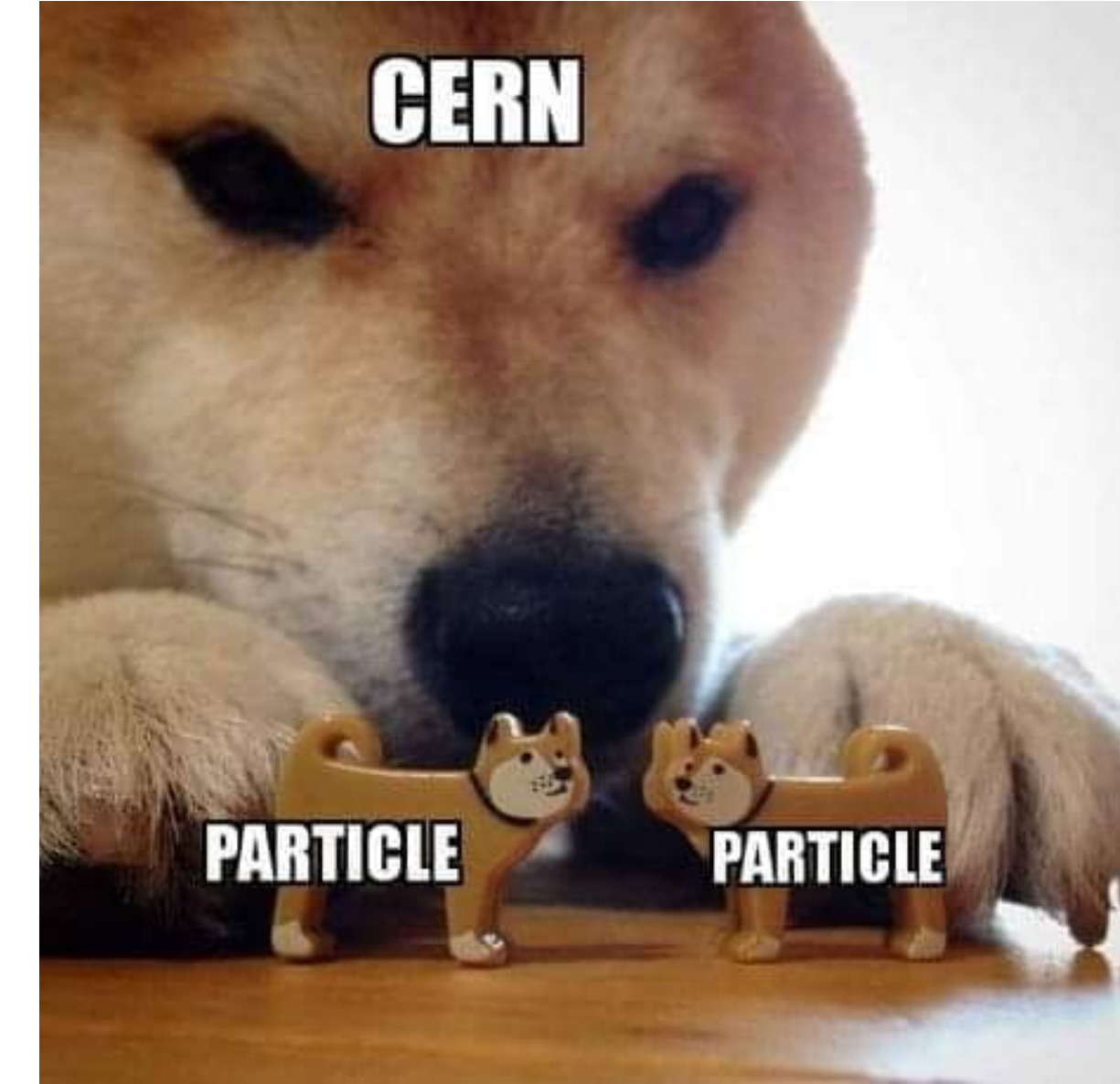
Superficie...



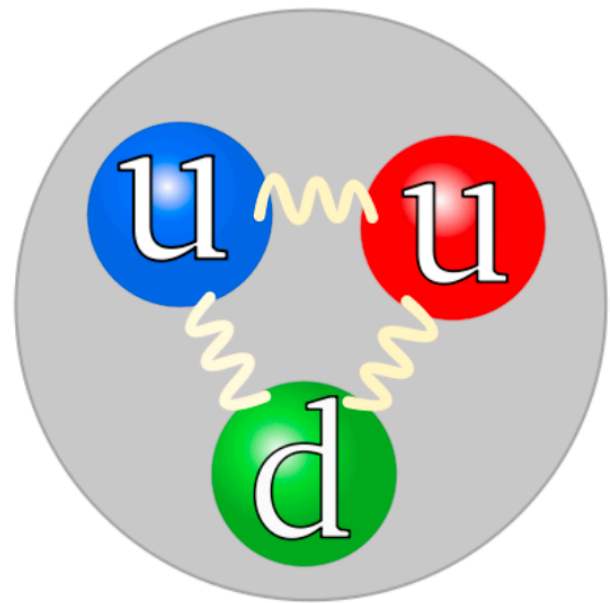
...sotto terra!

Produciamo particelle!

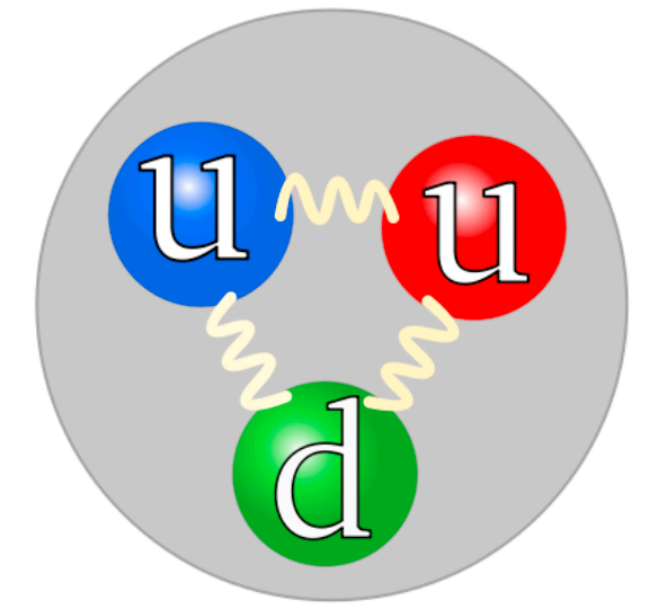
- Come facciamo?



protone

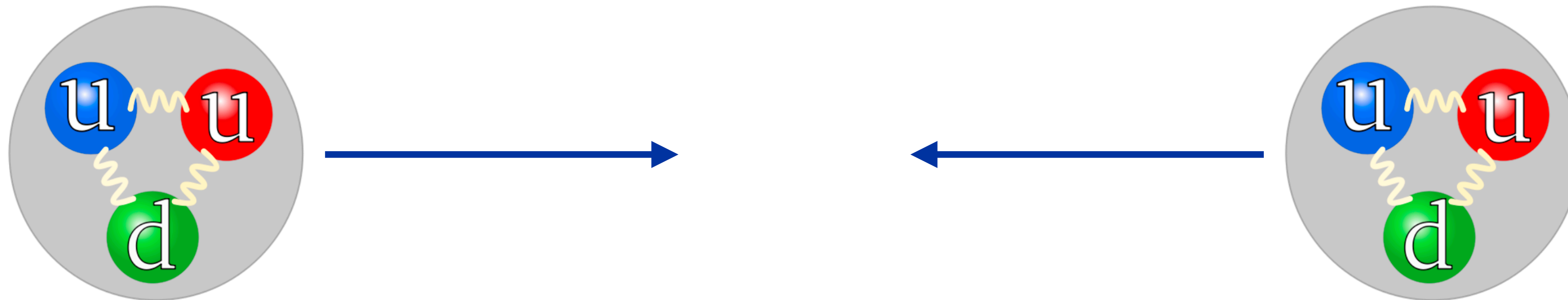
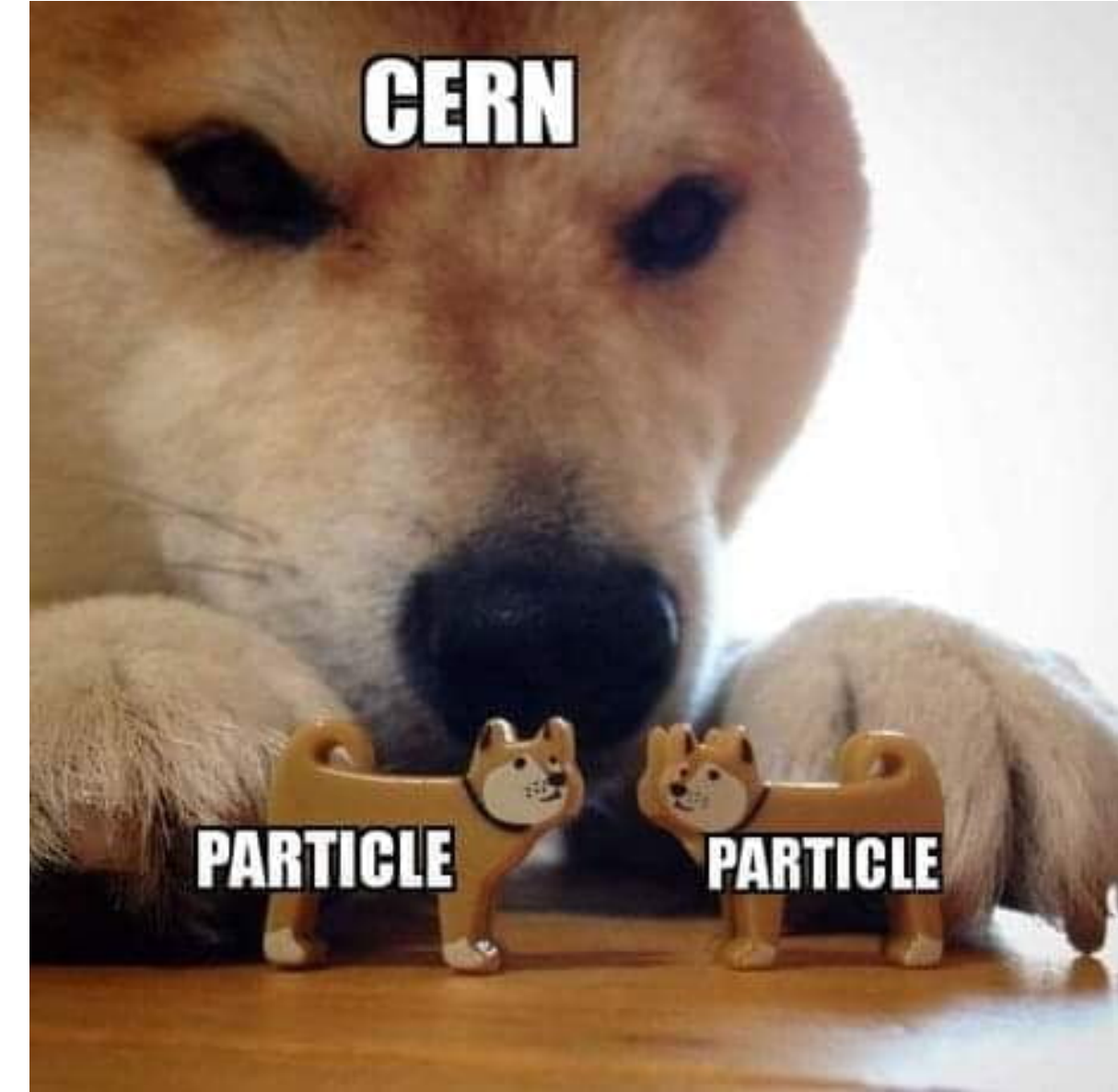


protone



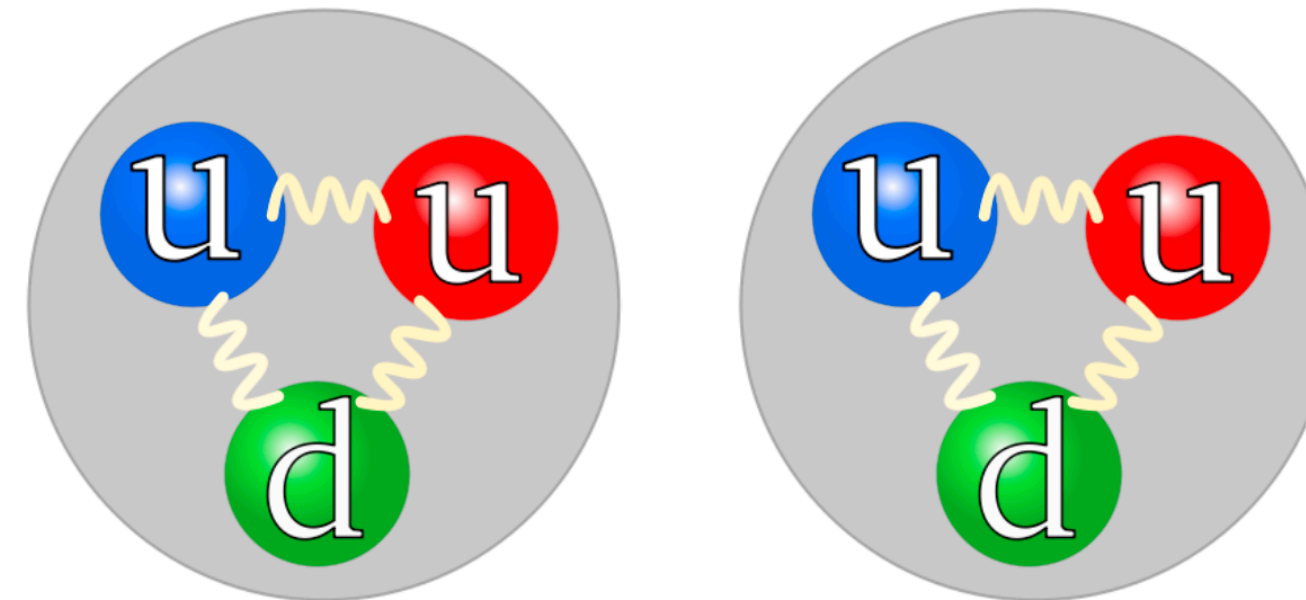
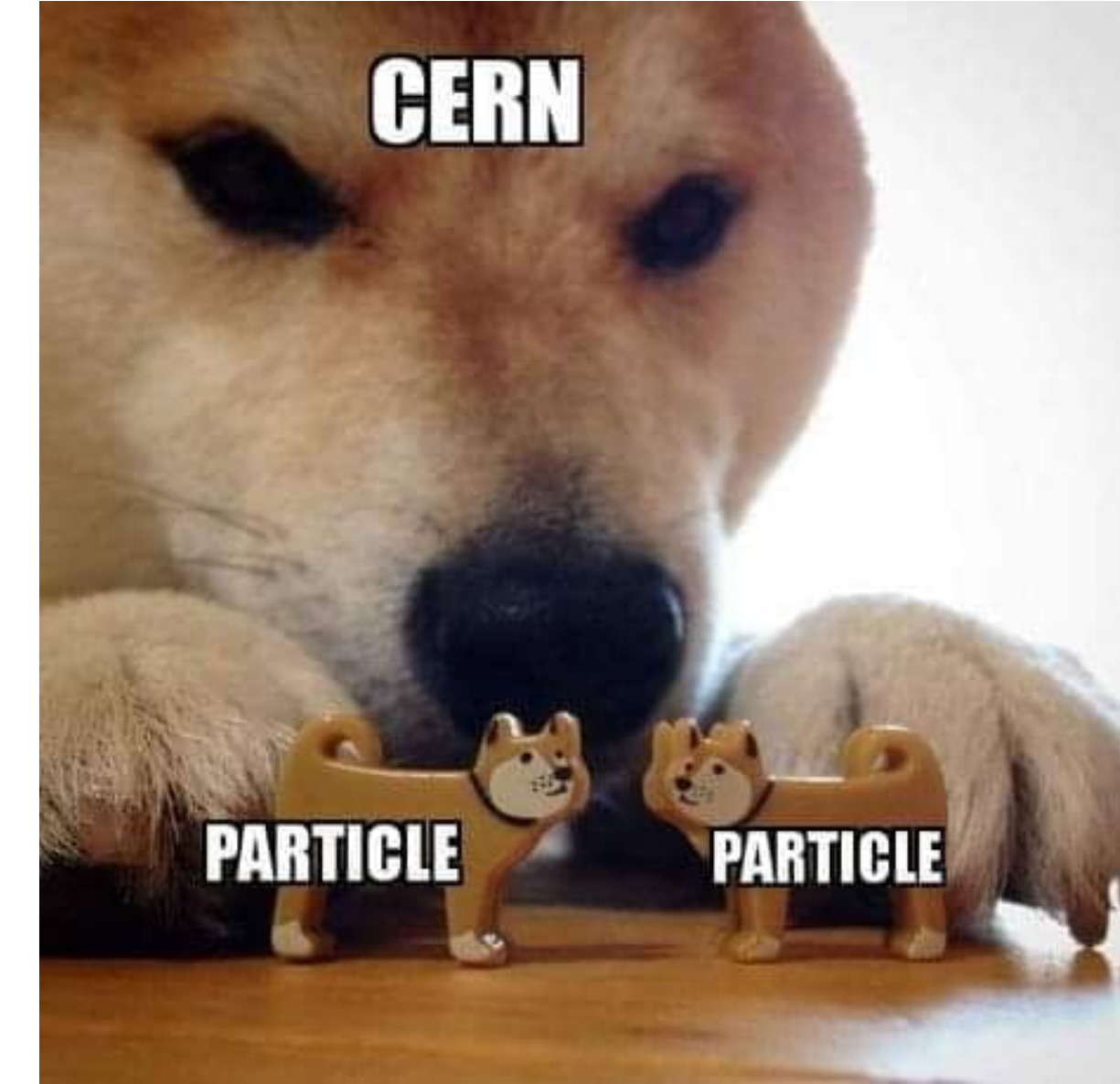
Produciamo particelle!

- Come facciamo?



Produciamo particelle!

- Come facciamo?



Produciamo particelle!

- Come facciamo?

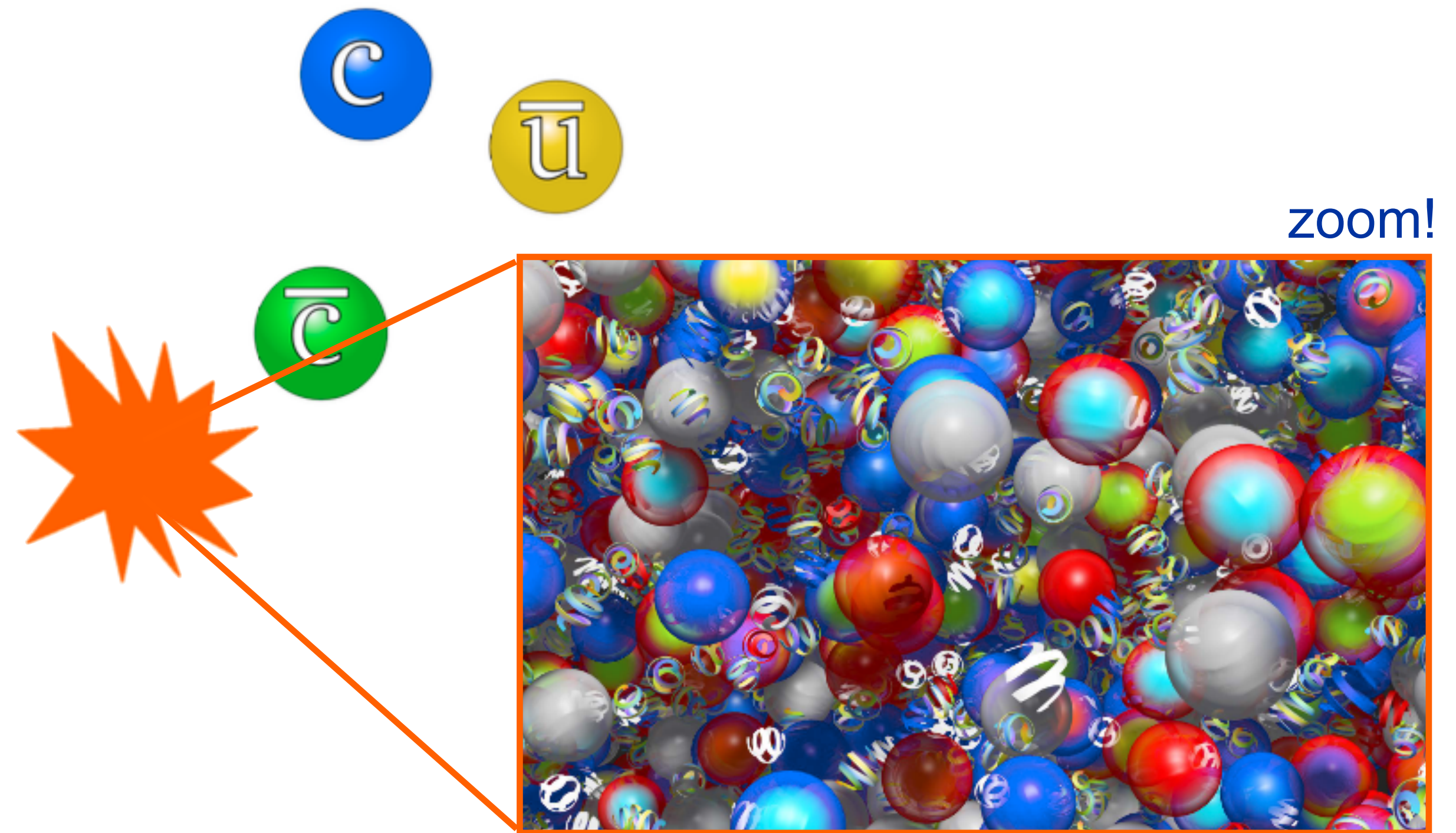
Collisione



Produciamo particelle!

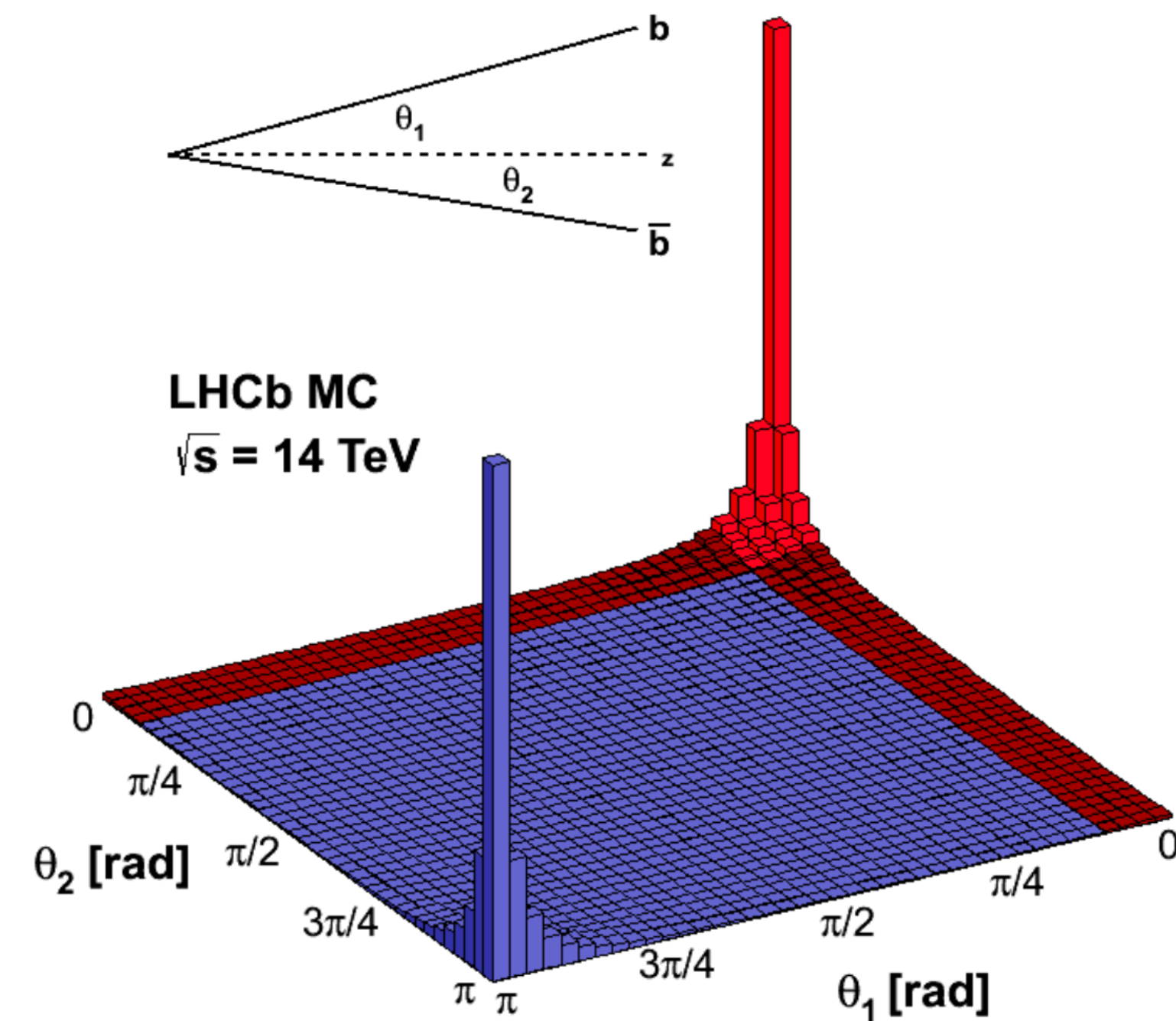
- Come facciamo?

Si producono una miriade di quark “liberi”,
di cui quark charm e quark beauty, che
vogliamo studiare!

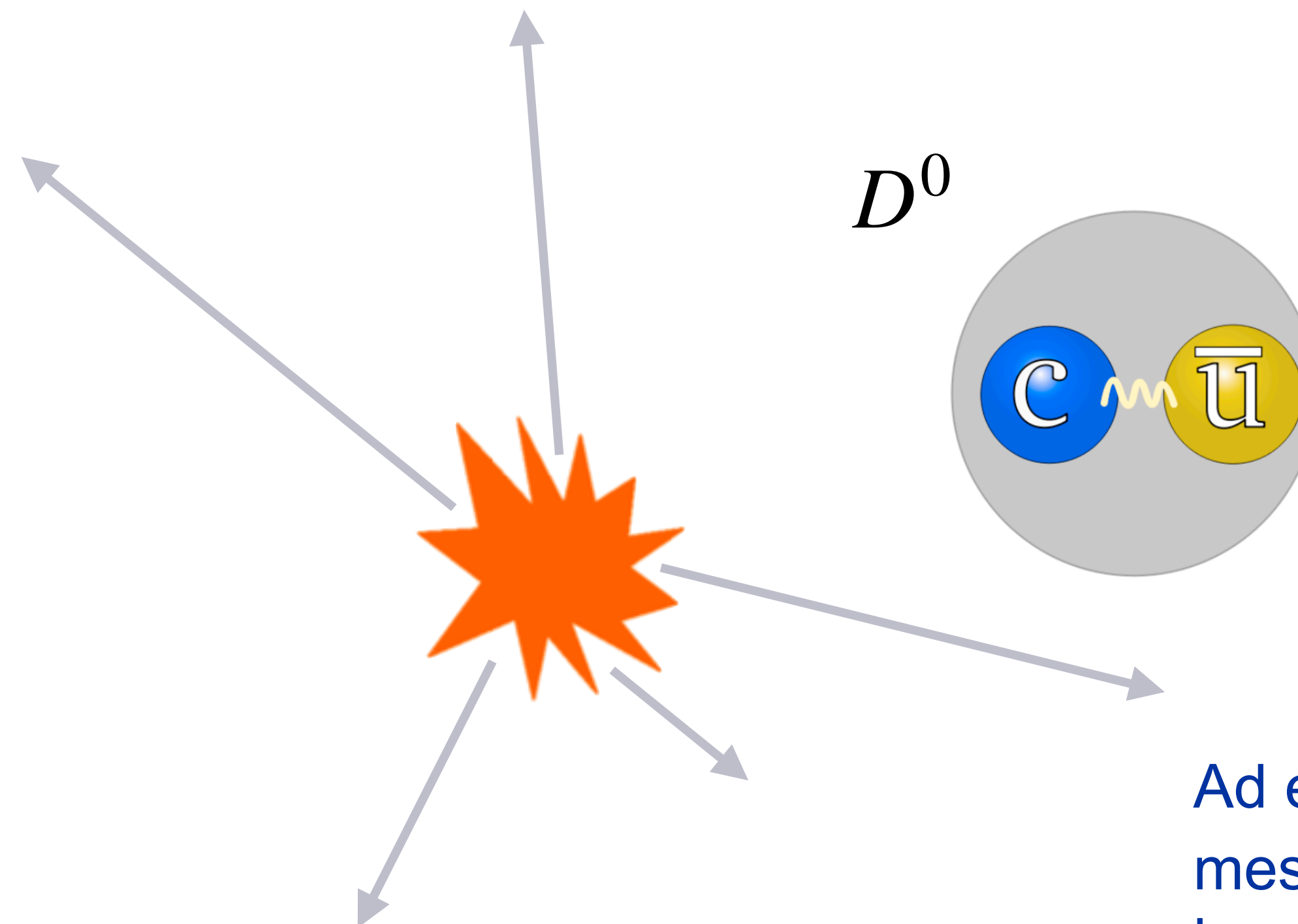


Produciamo particelle!

I quark beauty e charm tipicamente vengono emessi ad **angoli molto bassi** rispetto alla direzione dei protoni



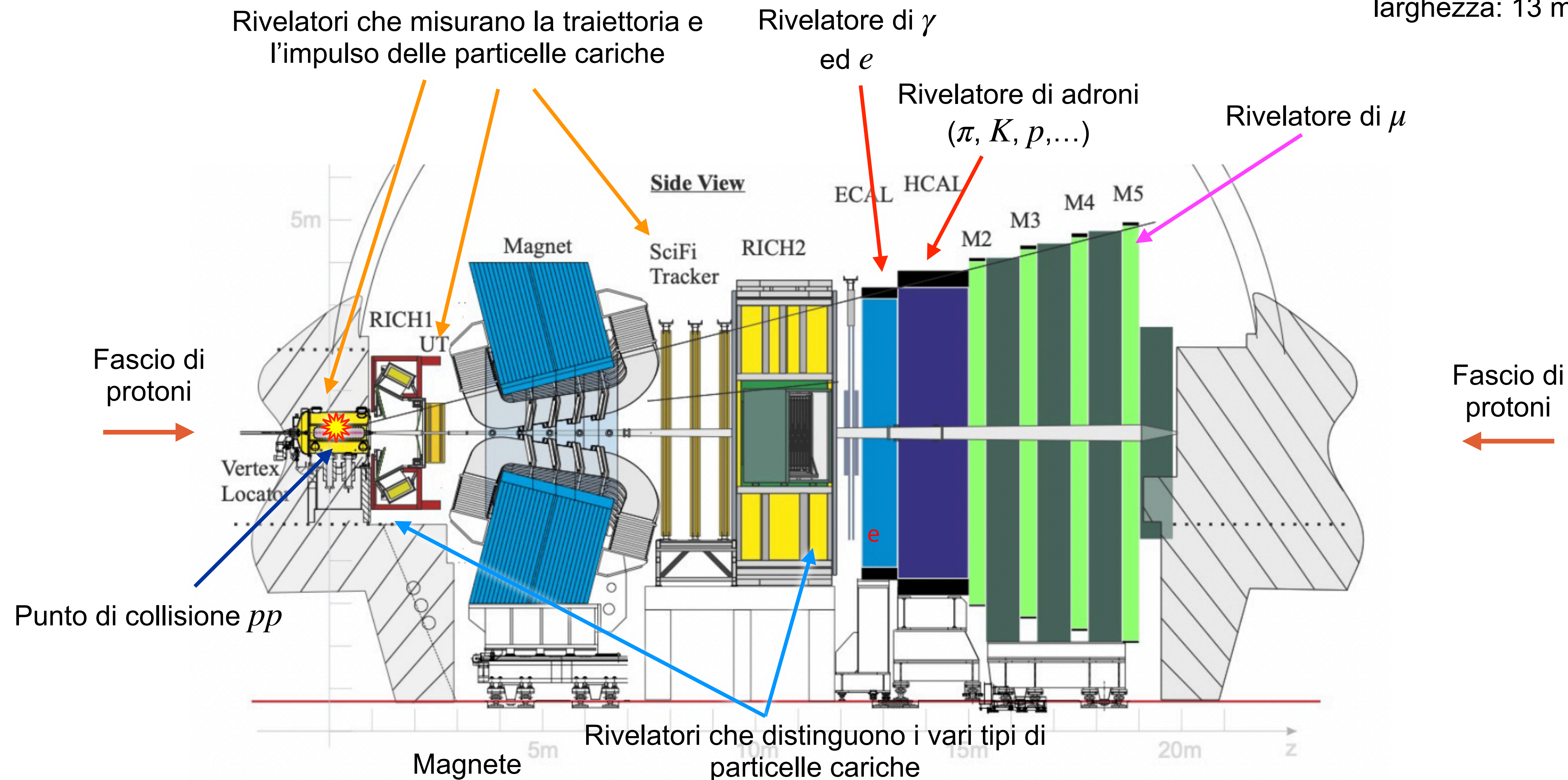
A causa della **forza forte** i quark si legano tra loro per formare mesoni, barioni, etc.



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

Il nostro rivelatore di particelle: LHCb

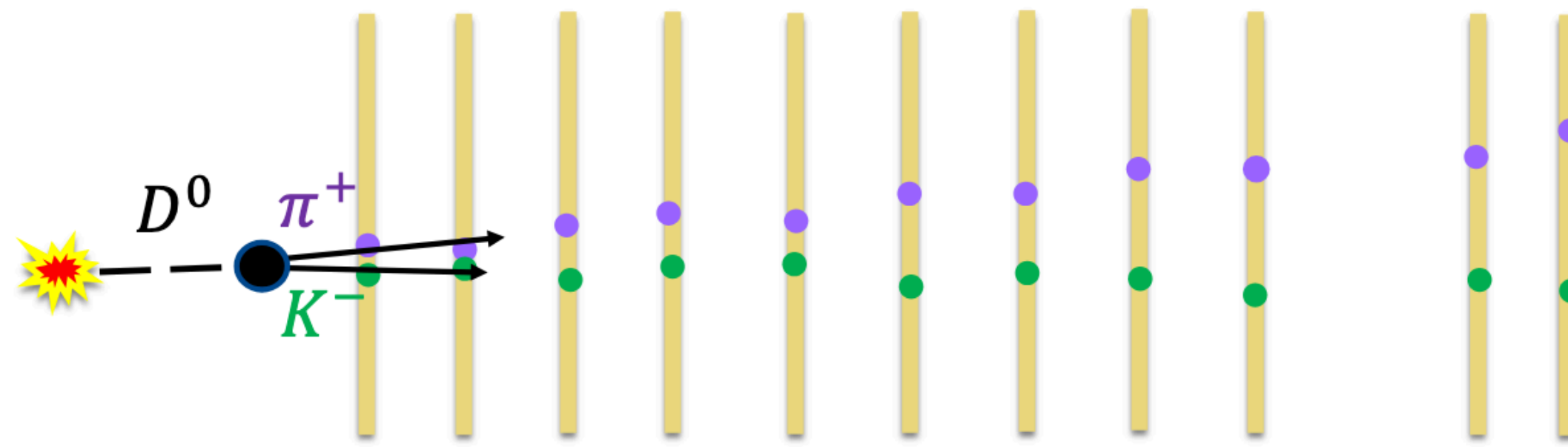
peso: 5600 tonnellate
lunghezza: 20 m
altezza: 10 m
larghezza: 13 m



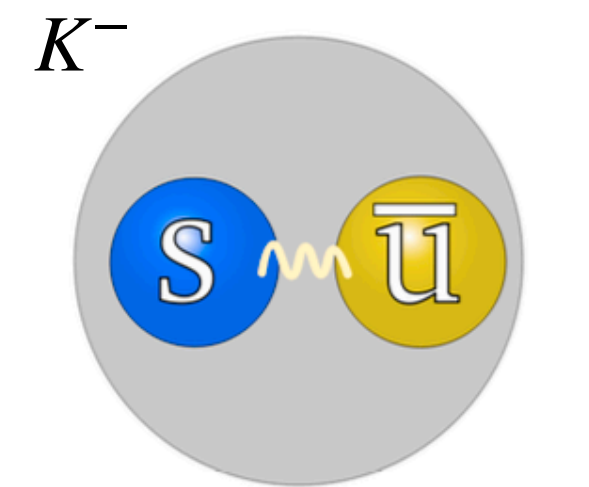
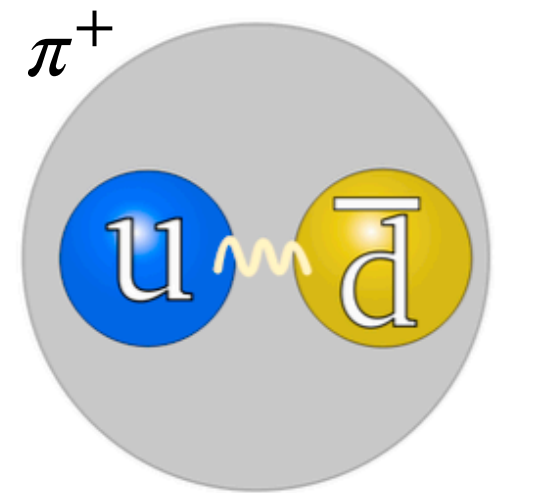
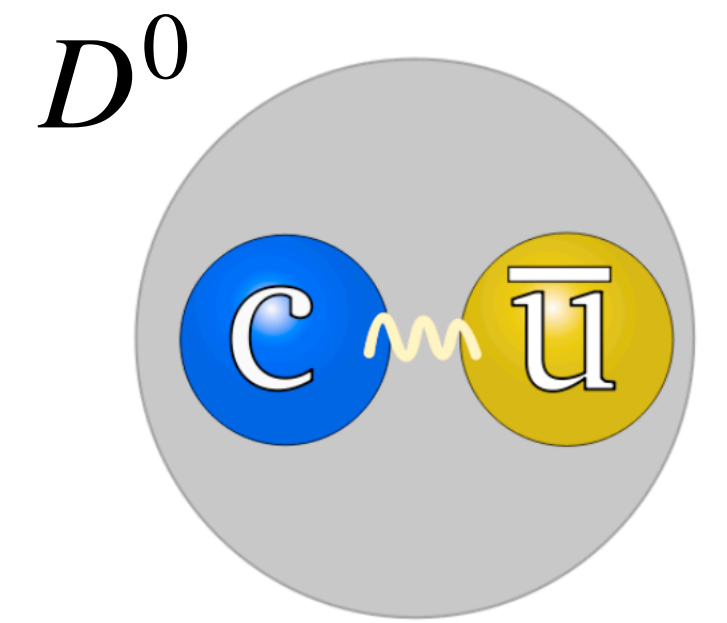
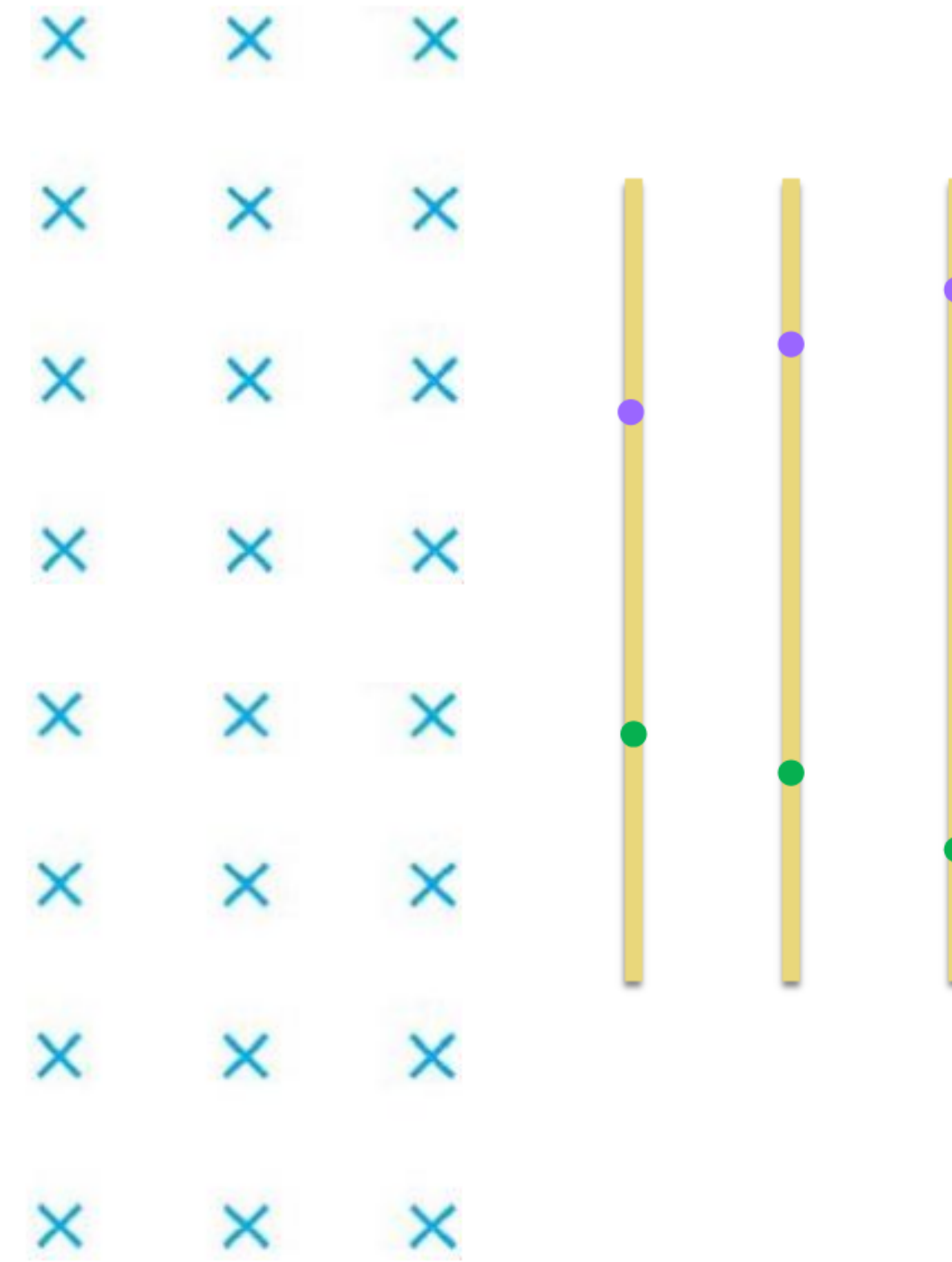
Tracciatore delle particelle cariche

- Vediamo come riusciamo a rivelare e studiare il mesone D^0 :
 - il D^0 decade dopo qualche mm in altre particelle più stabili, ad esempio $D^0 \rightarrow \pi^+ K^-$

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



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

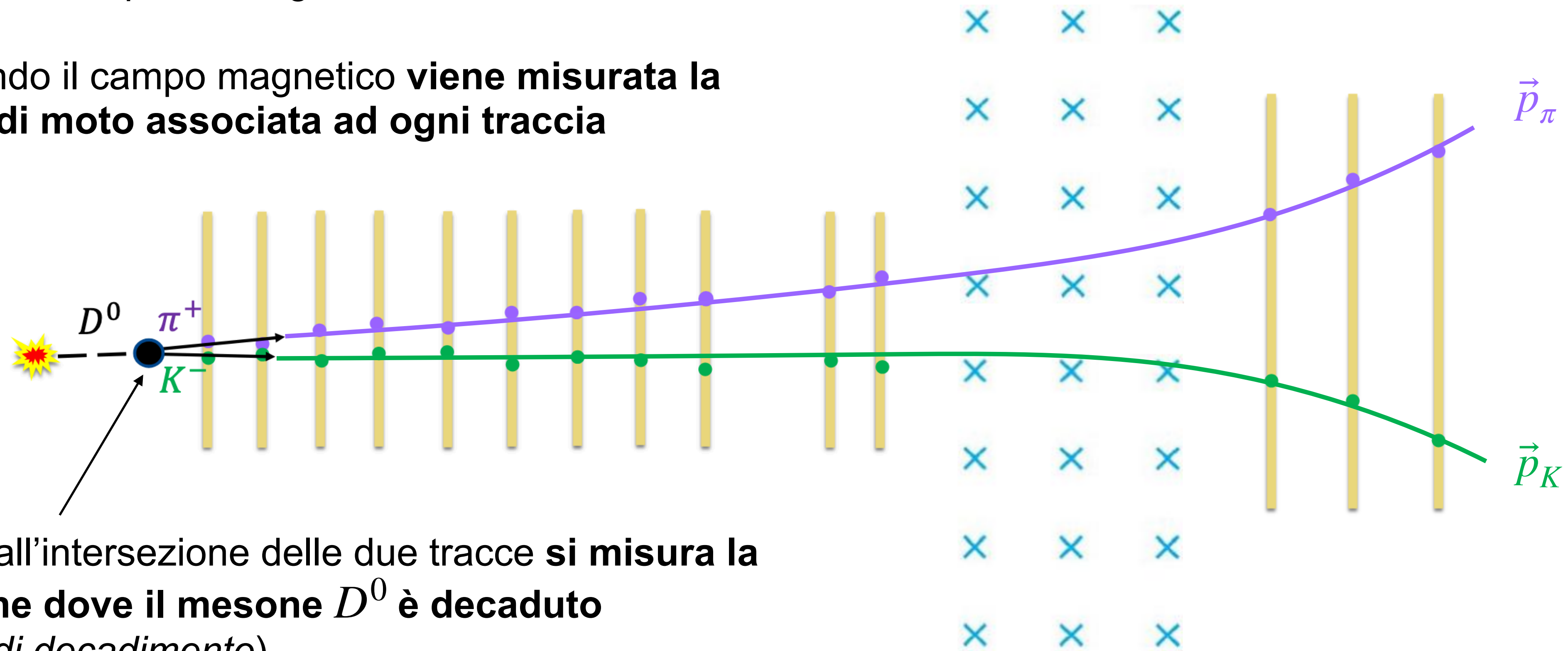


Campo $\vec{B}$ entrante nella pagina curva le particelle in base al loro impulso

Misura della quantità di moto e del vertice di decadimento

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

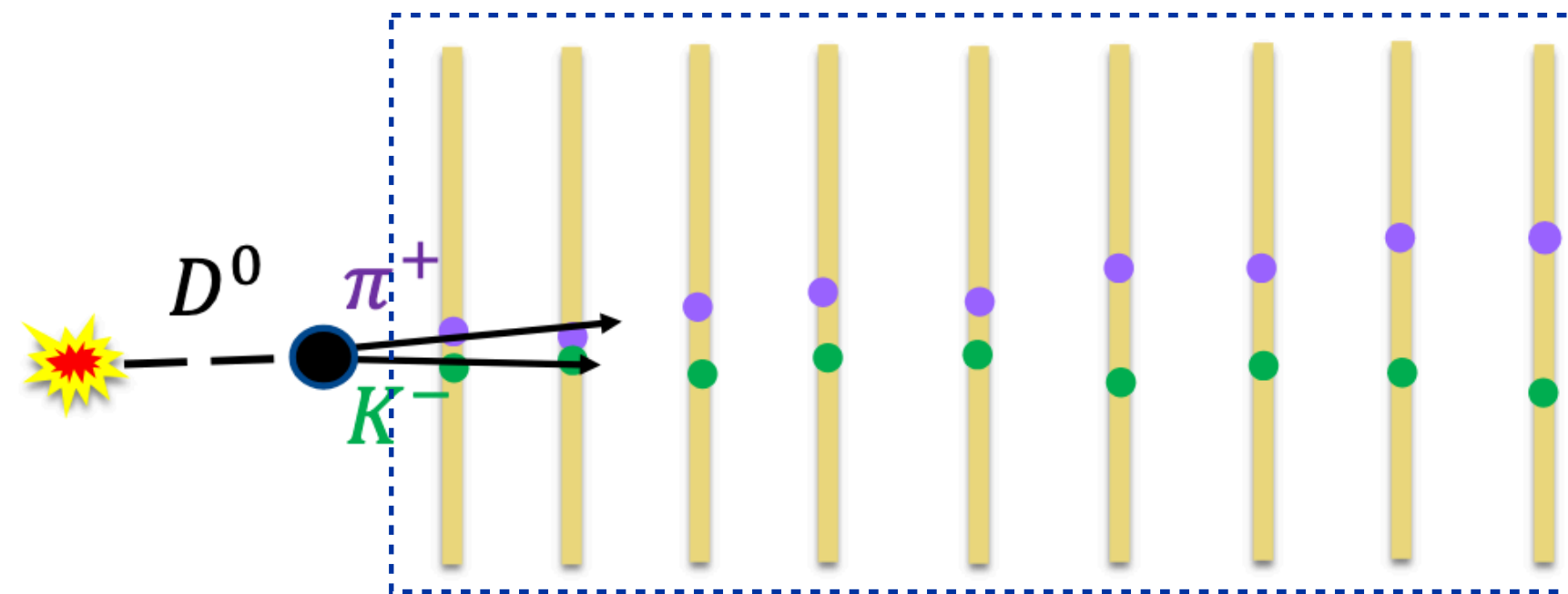
Conoscendo il campo magnetico **viene misurata la quantità di moto associata ad ogni traccia**



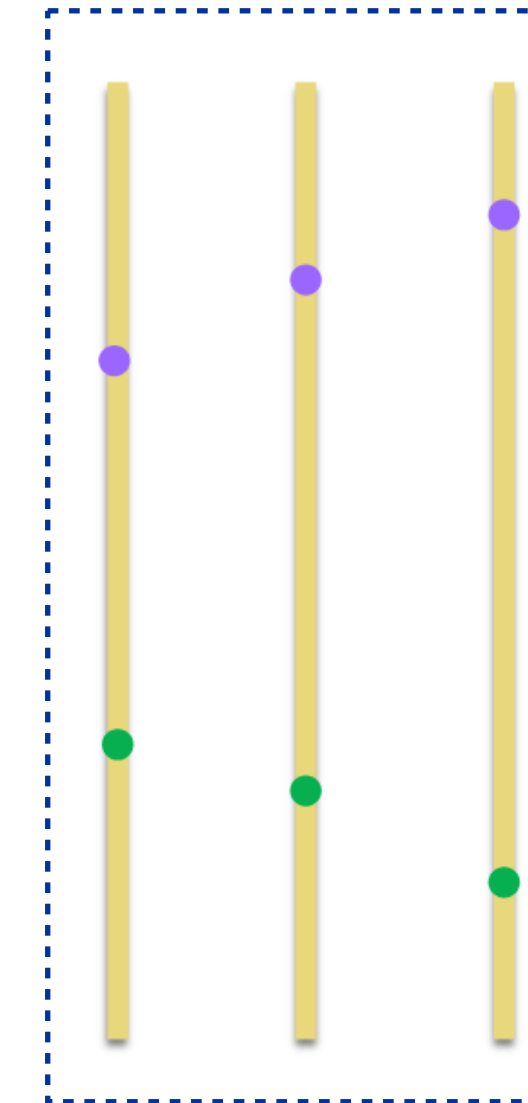
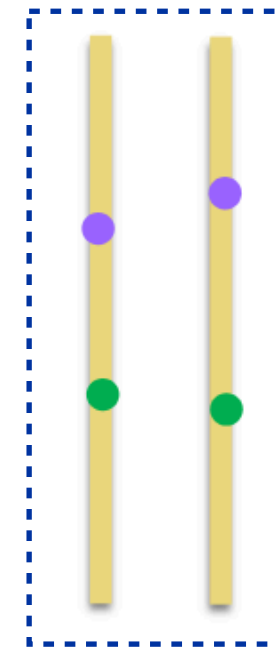
Inoltre dall'intersezione delle due tracce **si misura la posizione dove il mesone D^0 è decaduto** (*vertice di decadimento*)

Tracciatori di LHCb: VELO, UT, SciFi

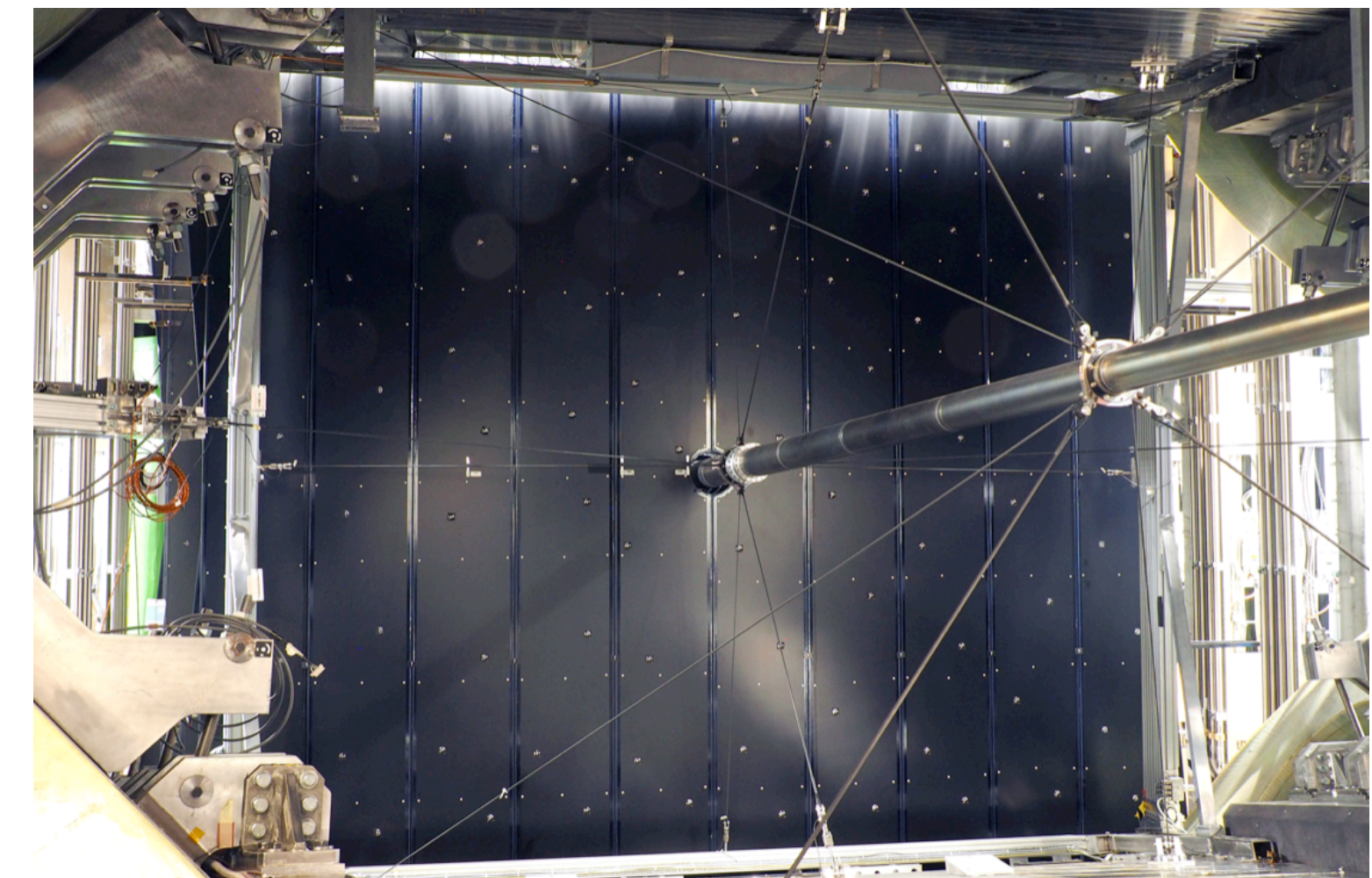
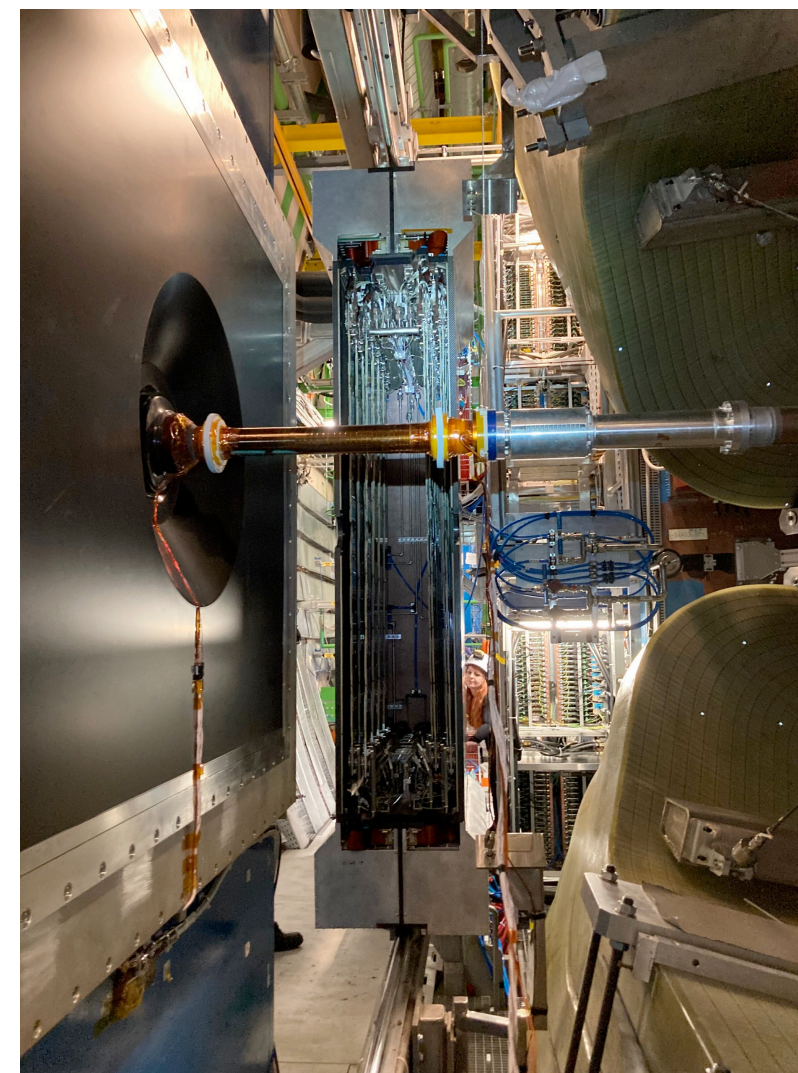
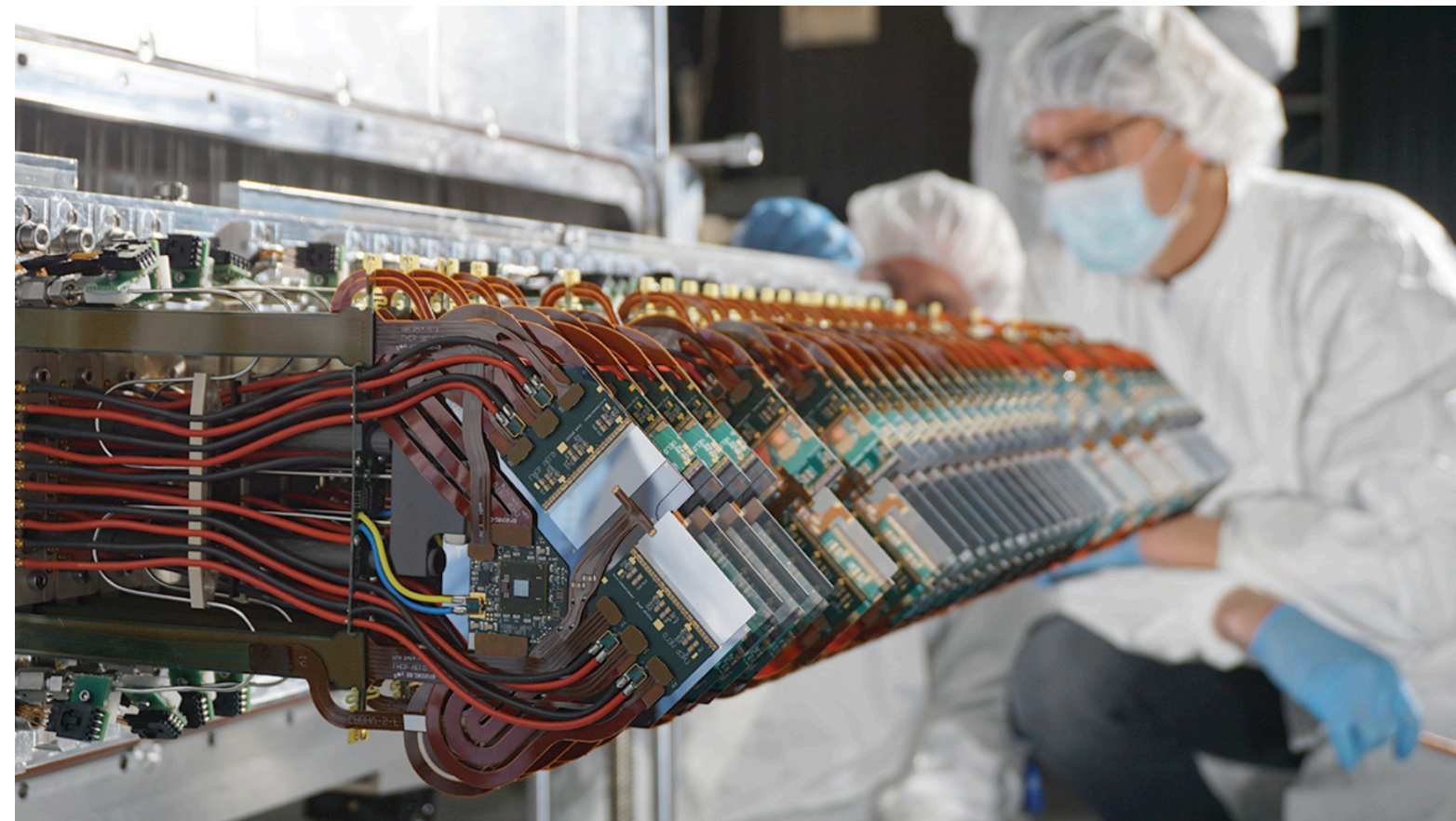
VELO: Vertex **L**Ocator



UT: Upstream **T**racker

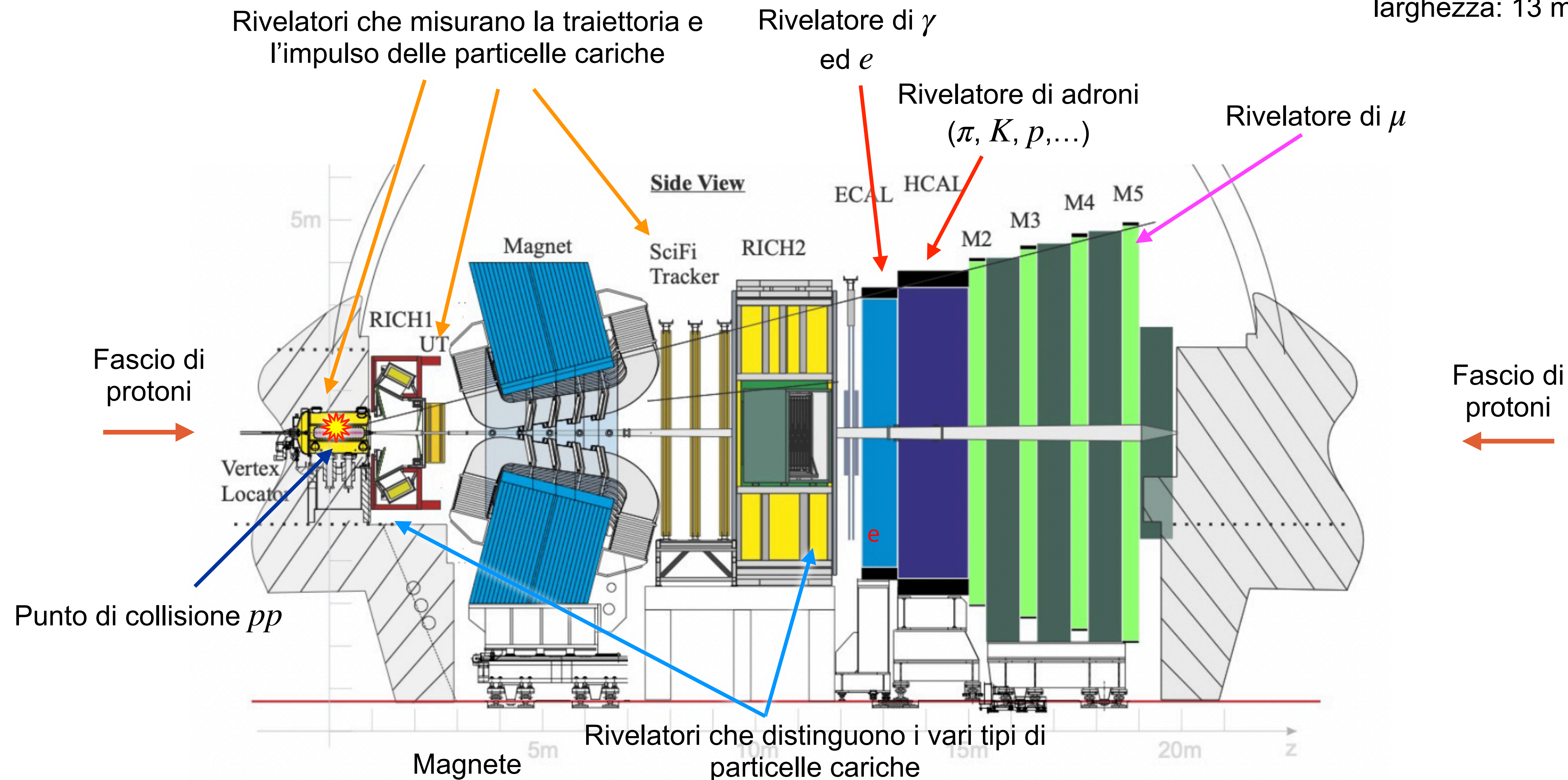


SciFi: Scintillating **F**iber **T**racker



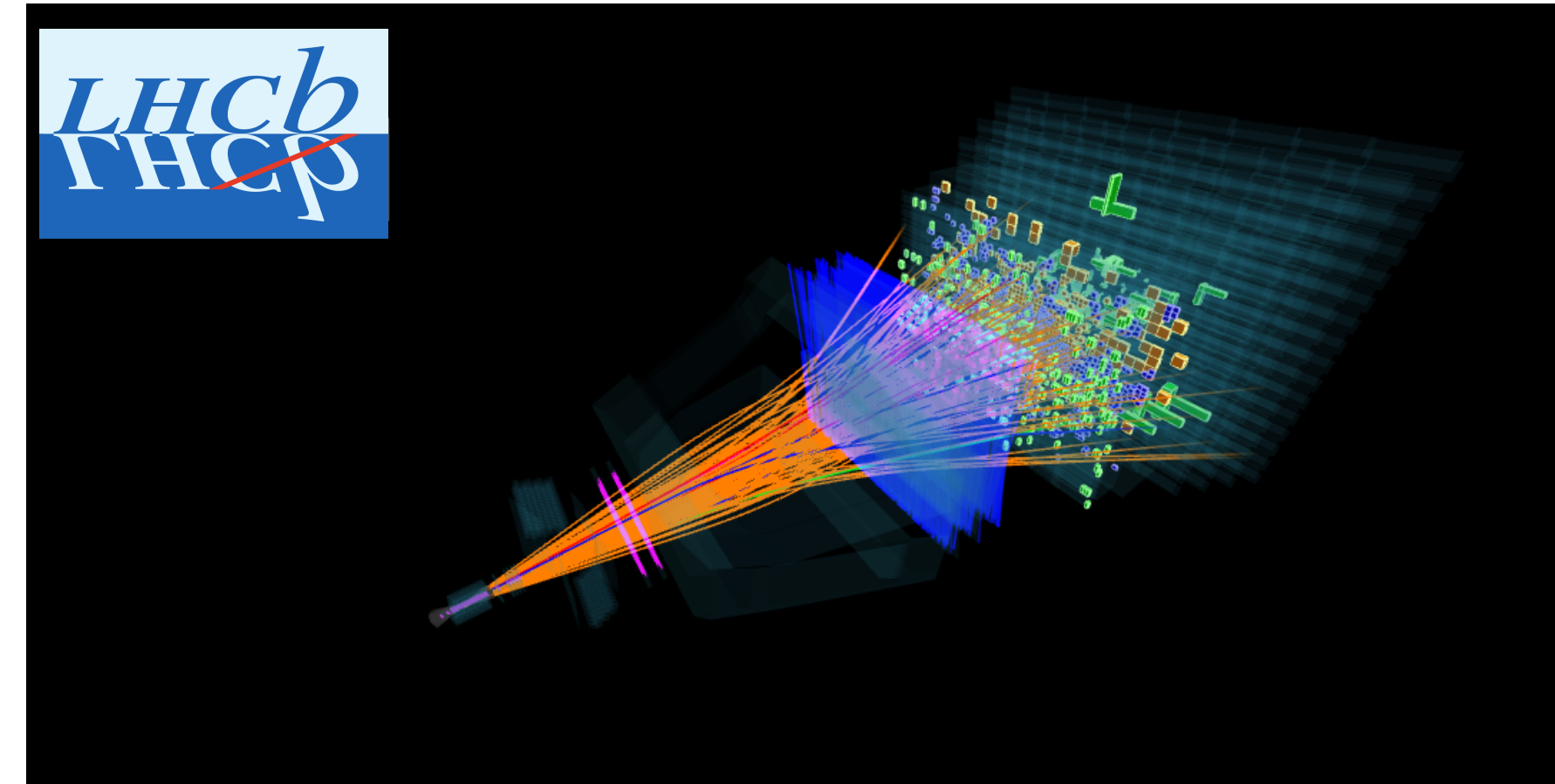
Il nostro rivelatore di particelle: LHCb

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



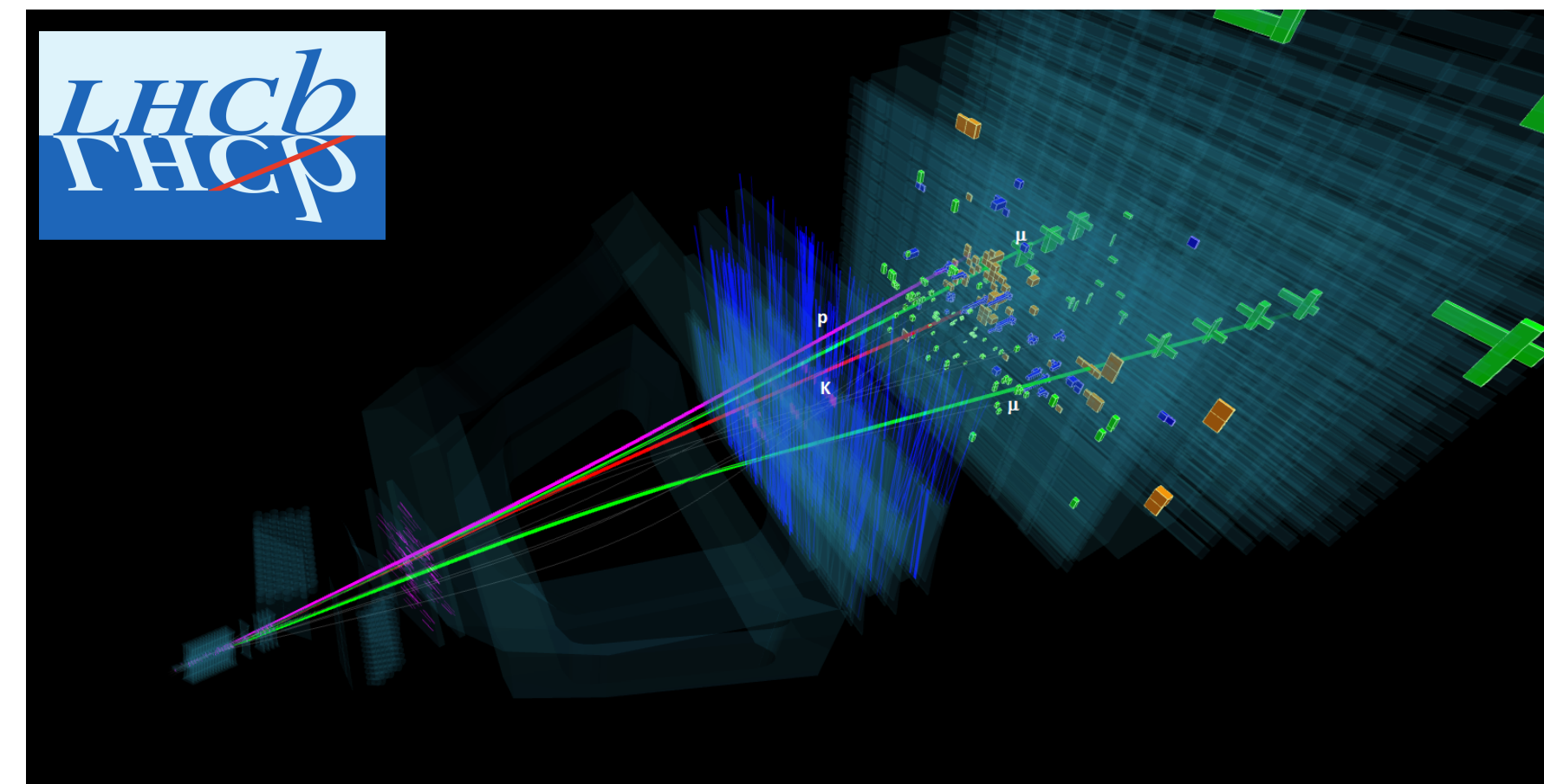
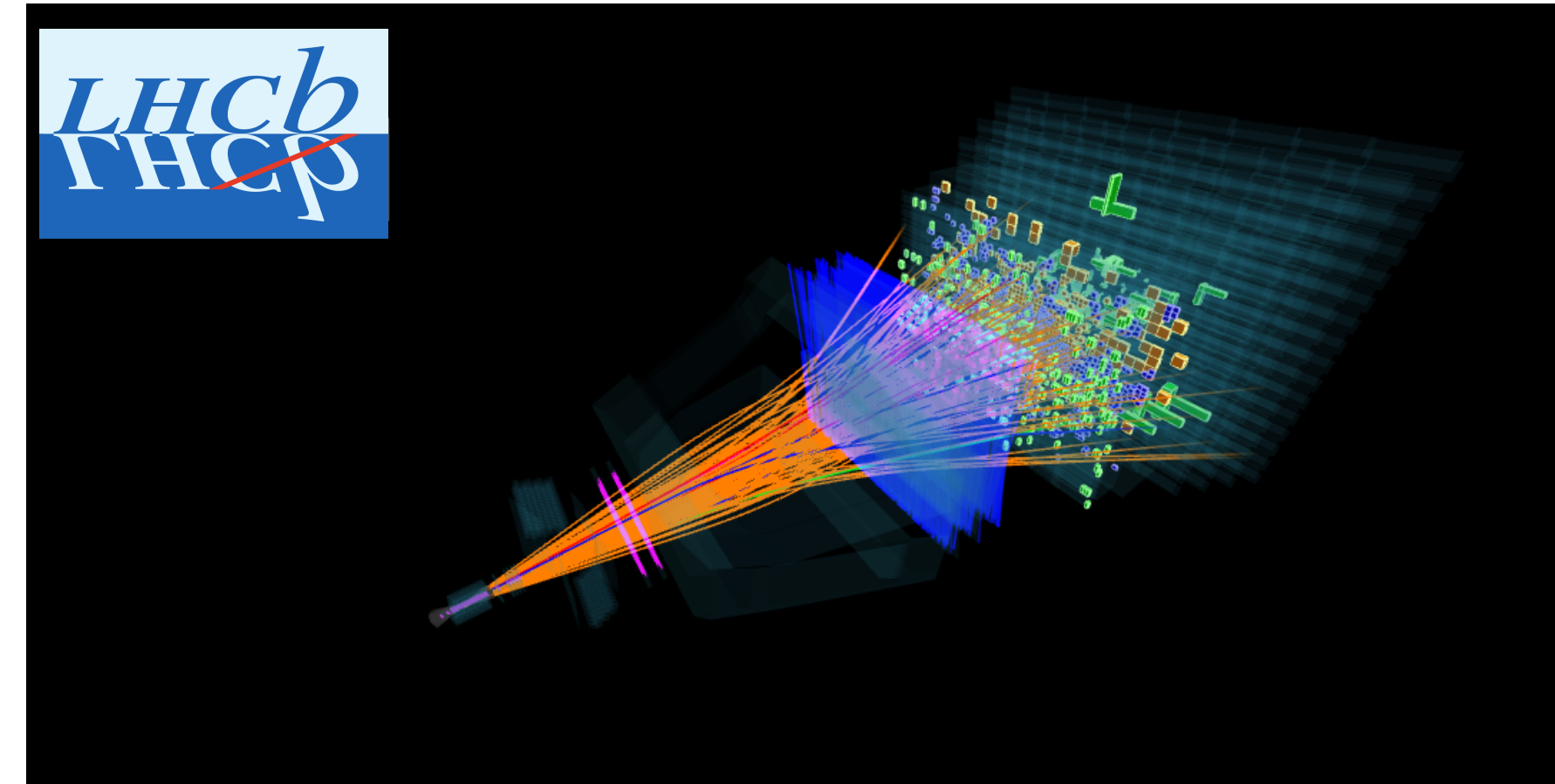
Il Trigger: come scegliere solo gli eventi interessanti

- Ma quanti dati dobbiamo salvare a LHCb?
 - LHC: collisioni protoni ogni 25 ns → 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



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**

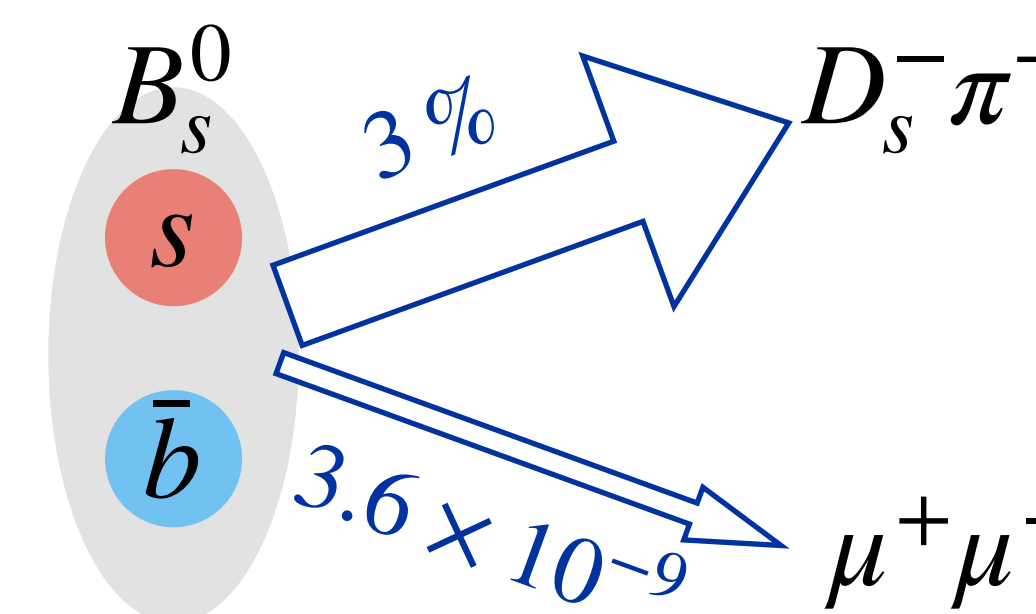
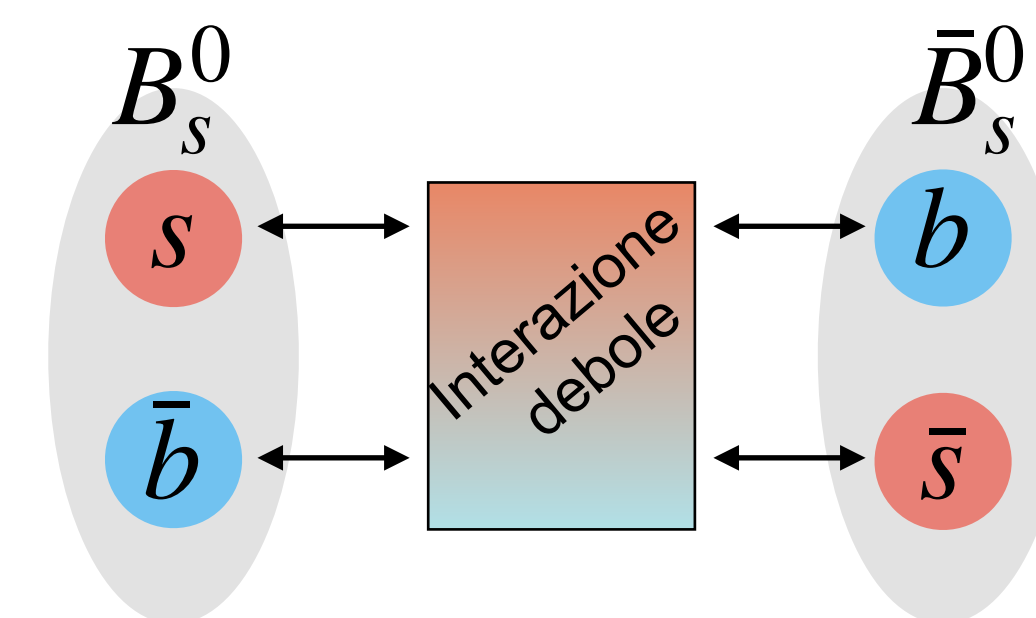
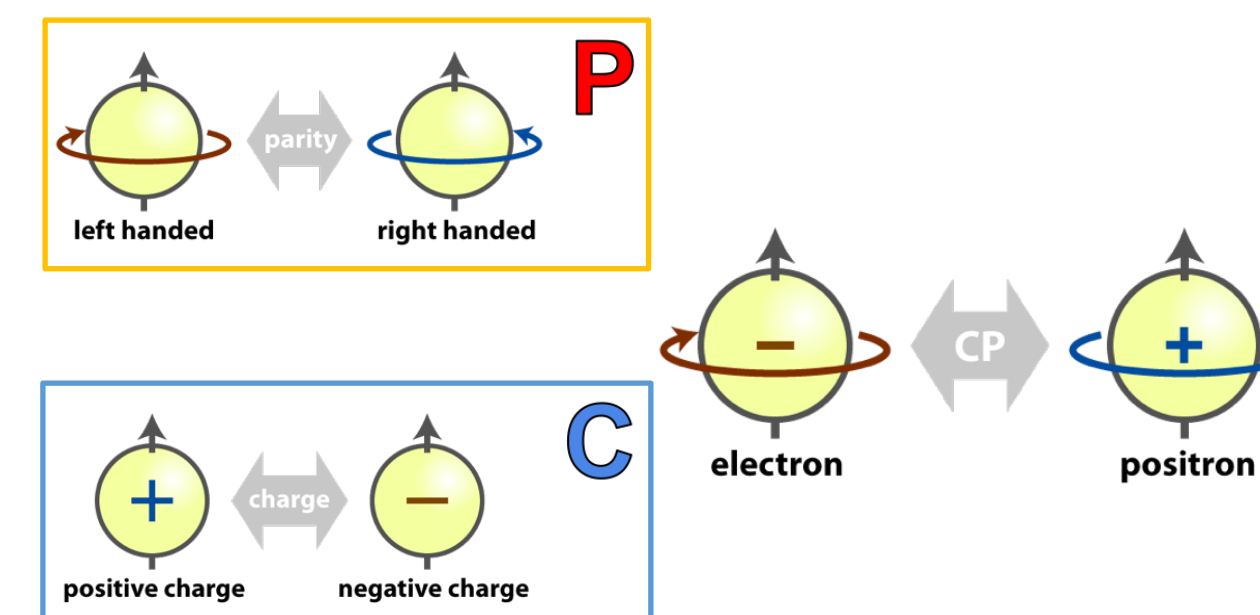
- ◆ Mesoni neutri con flavour: $K^0(d\bar{s})$, $D^0(u\bar{c})$, $B^0(d\bar{b})$, $B_s^0(s\bar{b})$
- ◆ Oscillazioni: particella $\leftrightarrow$ antiparticella

✿ 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!



Il logo non è a caso!



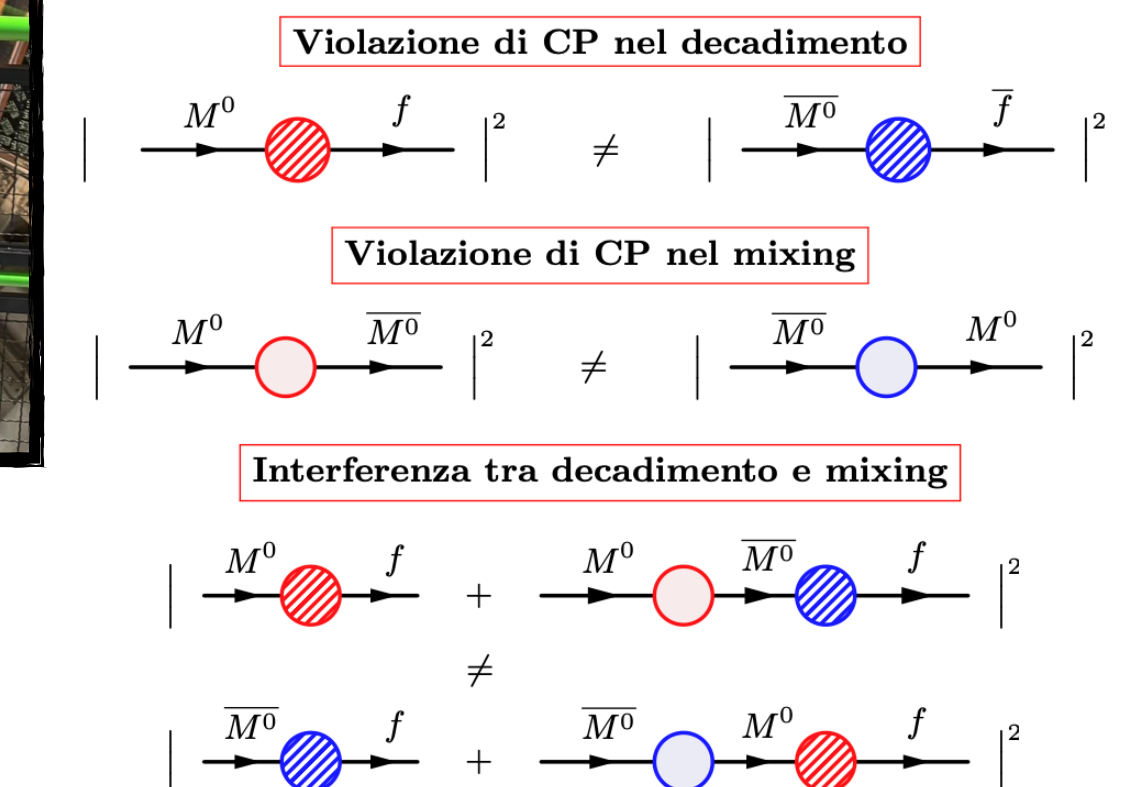
E ora la visita!

Le guide: Irene

- Sono una dottoranda del secondo anno in SNS, lavoro nel gruppo di LHCb Pisa da tre anni
- Mi occupo principalmente di misure di **violazione di CP** in decadimenti di mesoni che contengono il quark charm
- Sono di Pisa e ho sempre studiato a Pisa
 - nel 2022 sono entrata in Normale al quarto anno, e ho continuato con PhD nel 2024
 - ho appena iniziato un anno al CERN, come Doctoral Student
- Sono entrata nel mondo di LHCb per il colloquio del quarto anno, con il prof. Morello
 - argomento: misura dell'asimmetria di CP a LHCb nel decadimento $D^0 \rightarrow K^+ K^-$, $A_{CP}(KK)$

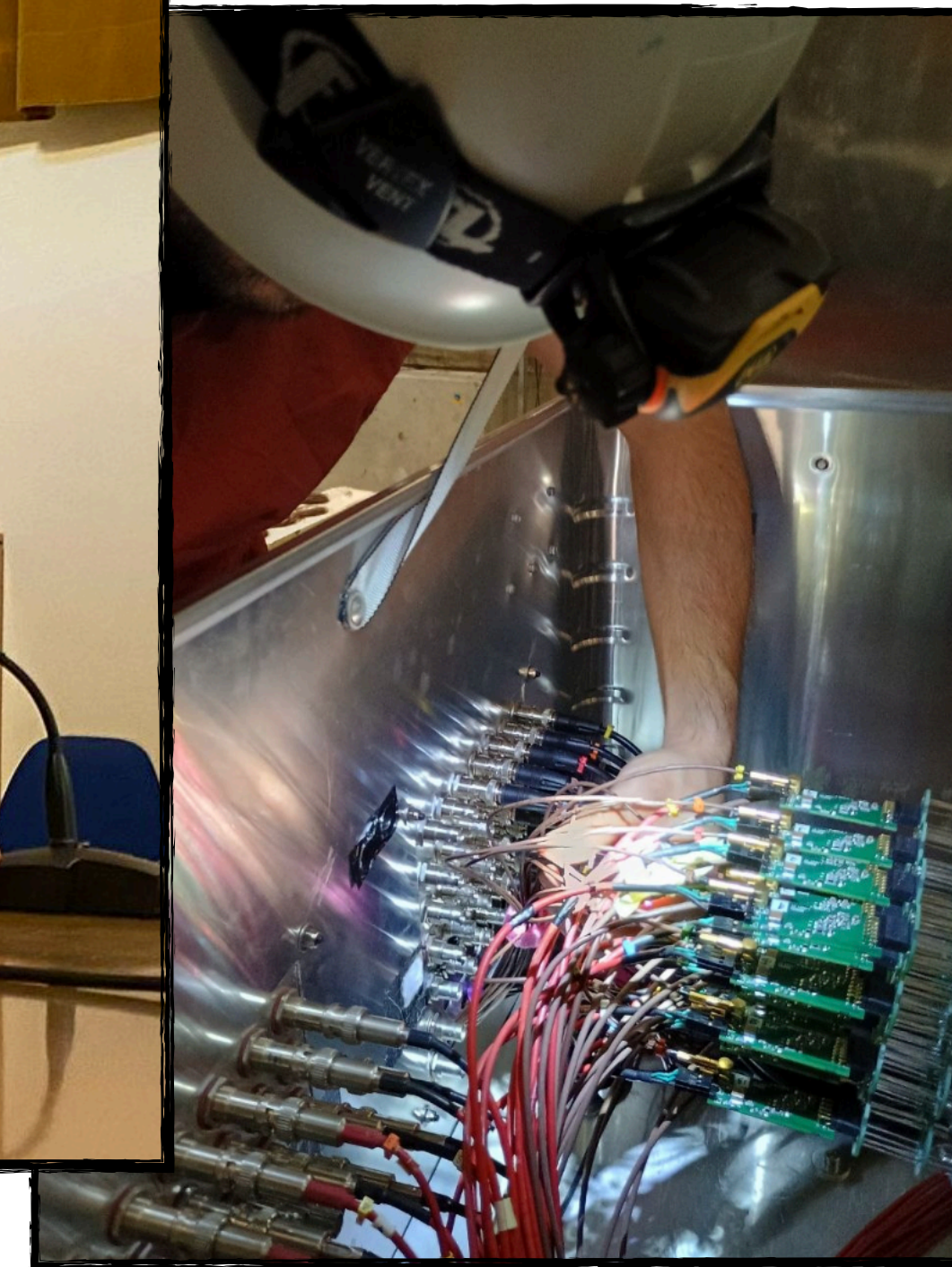


tipi di violazione di CP per i decadimenti $M^0 \rightarrow f$



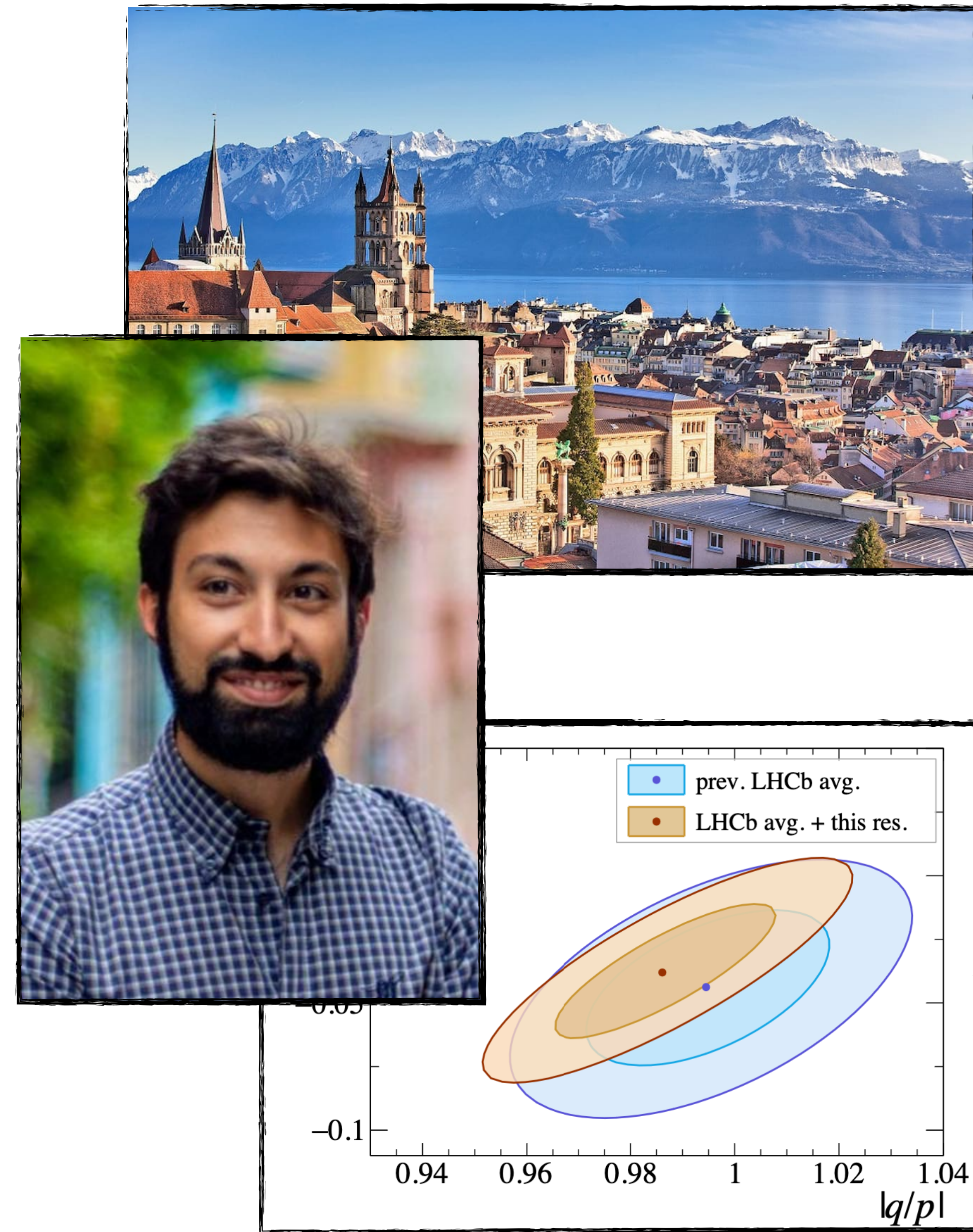
Le guide: Marco

- Dottorando del secondo anno all'Università di Bologna
 - triennale e magistrale al Collegio Superiore dell'università di Bologna
 - tesi triennale e tesi magistrale sull'analisi di dati di LHCb
 - ha appena iniziato anche lui un anno al CERN come Doctoral Student
- Attività principale misure di **violazione di CP** in decadimenti di mesoni che contengono il quark beauty
 - side project: lavoro hardware sul nuovo calorimetro di LHCb, PicoCal



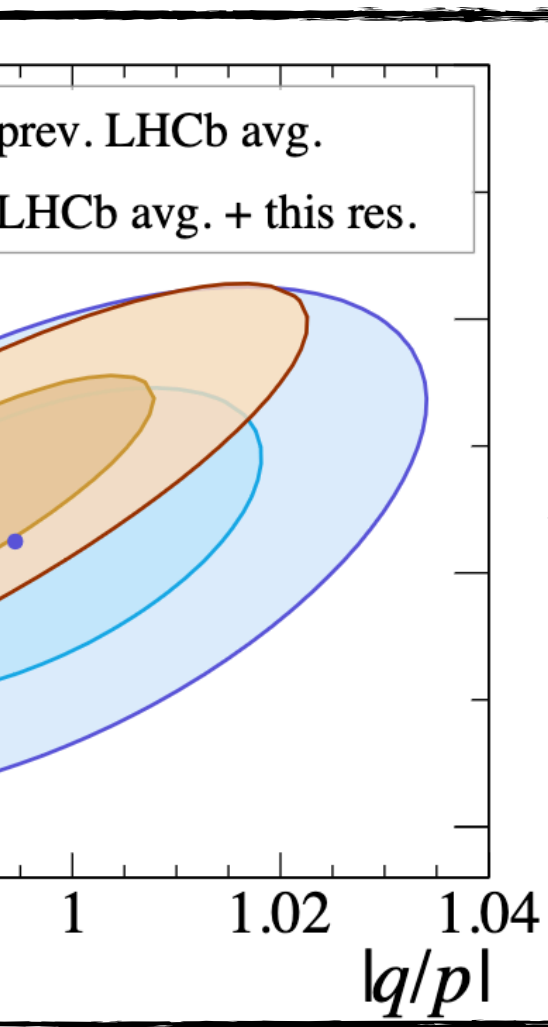
Le guide: Roberto

- Post-doc all'EPFL di Losanna da due anni, con il gruppo LHCb
- Allievo ordinario e PhD in SNS, dottorato nel 2024
 - tesi magistrale e dottorato con il prof. Morello
 - durante il dottorato, ha passato anche lui un anno al CERN come Doctoral Student
- Attività principale misure di **mixing e di violazione di CP** in decadimenti di mesoni che contengono il quark charm



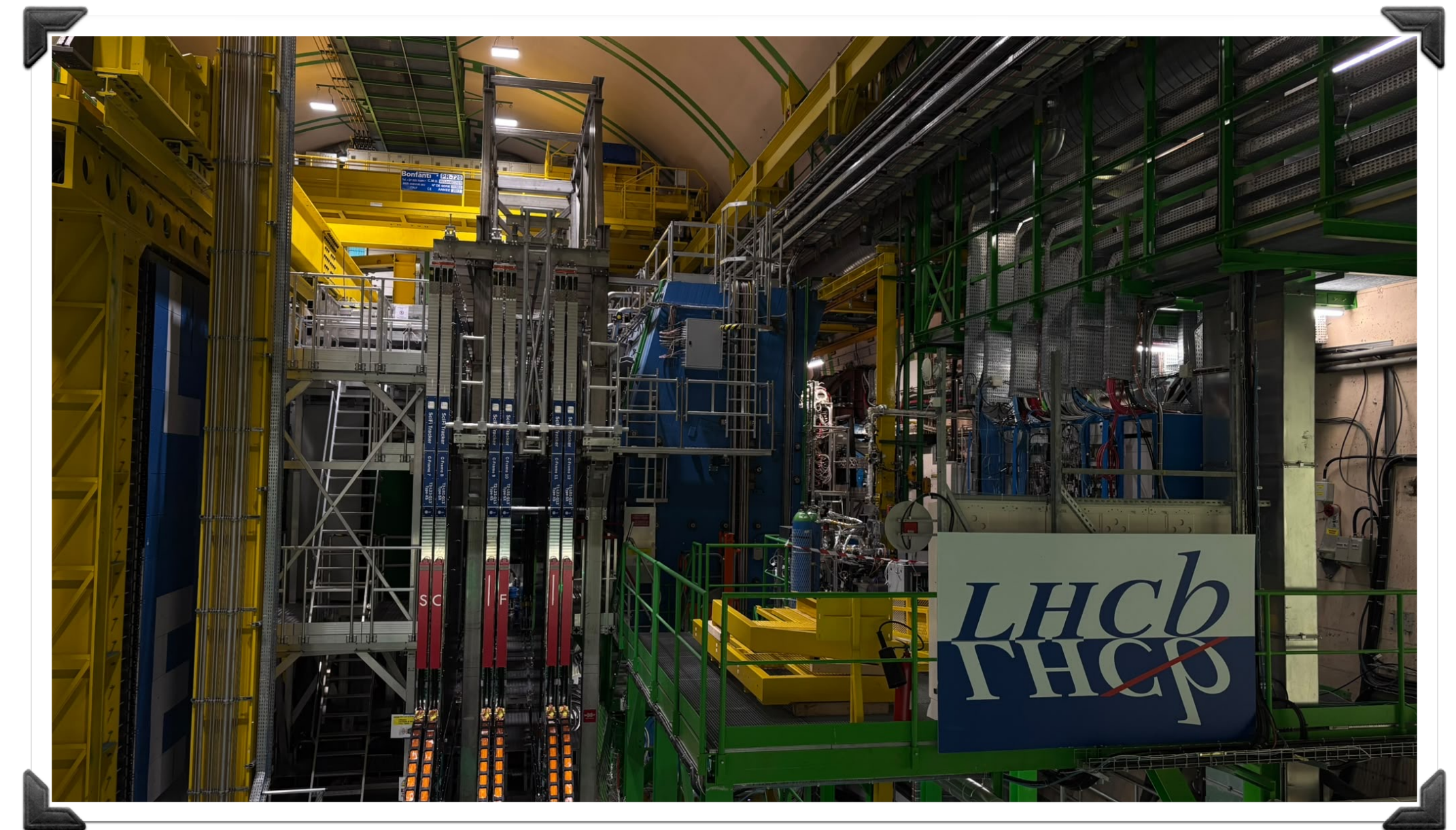
Le guide: Roberto (10 anni fa)

- Post-do
- Allievo c
- tesi m
- durant
- come
- Attività p
- decadim

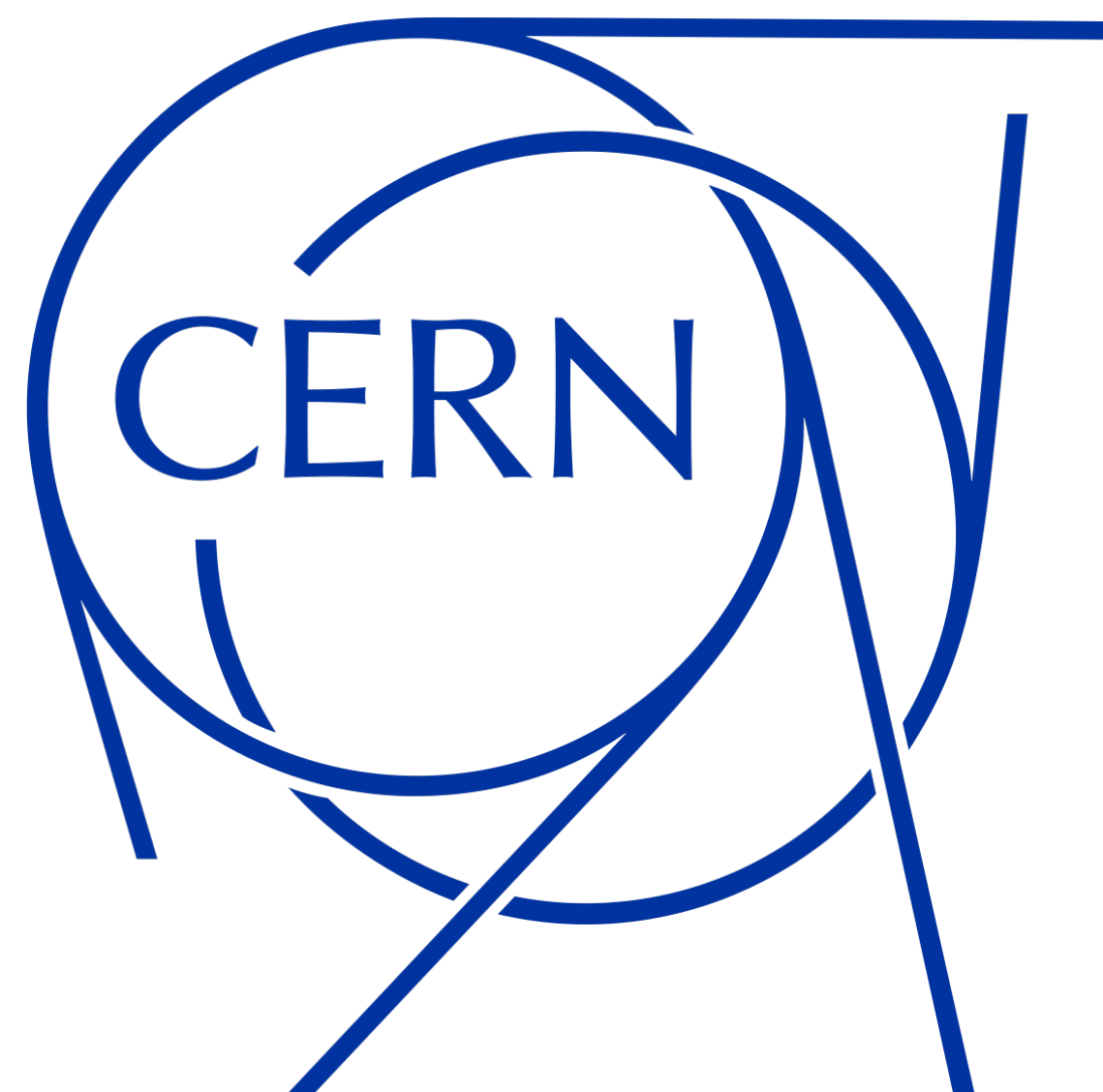


La visita di oggi

- **Visita underground di LHCb**
 - durata $\sim$ 30 minuti
 - divisa in due parti: visita di DELPHI e visita di LHCb
- **Visita superficiale di LHCb**
 - durata $\sim$ 30 minuti
 - divisa in due parti: esposizione dei vari sub detector e control room
- **Ci divideremo in 3 gruppi**, di circa 10 persone l'uno: A, B, C
 - prima parte: gruppi A e B scendono in caverna e gruppo C visita la superficie
 - seconda parte: swap

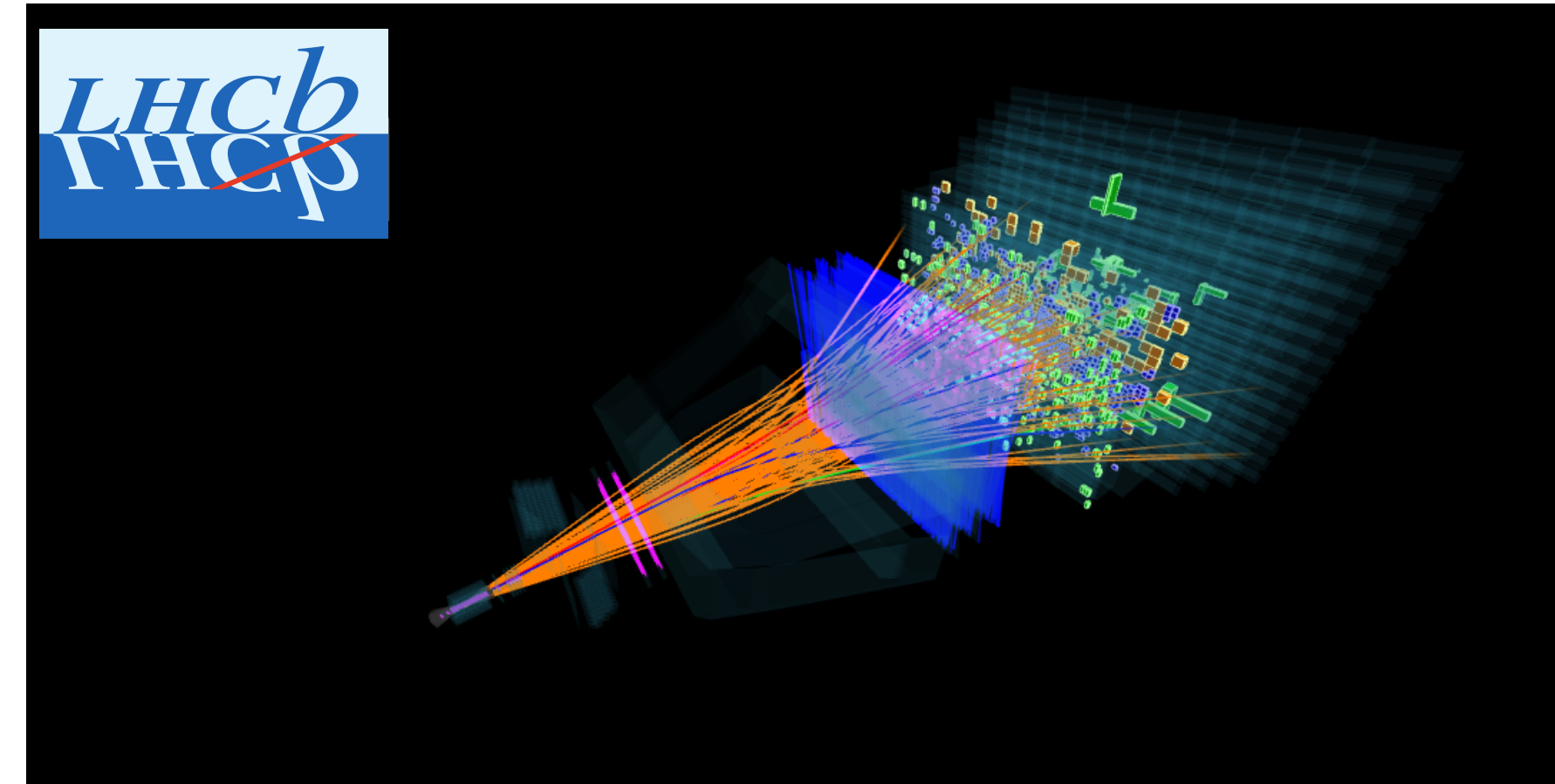


Domande? Curiosità?



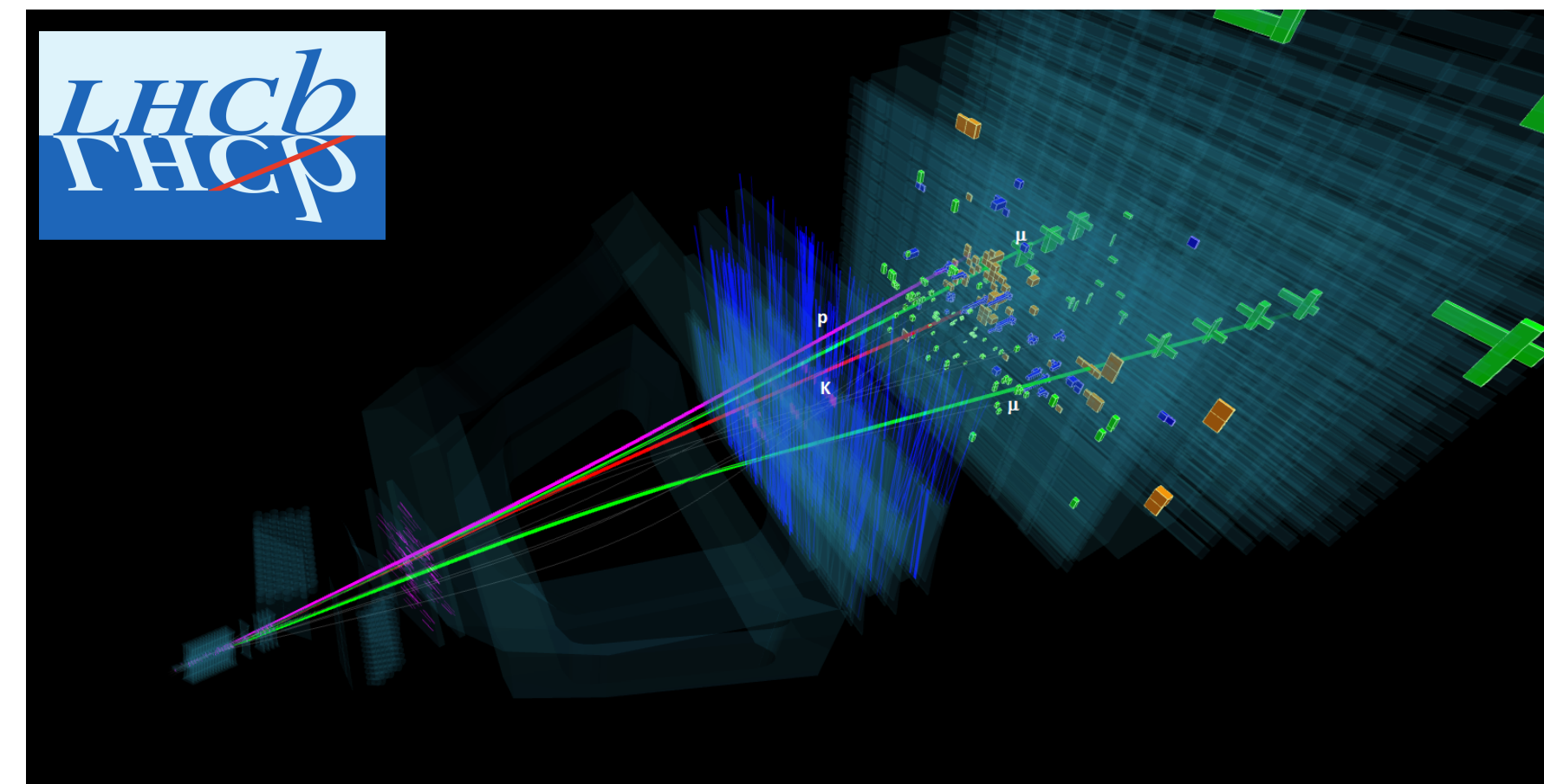
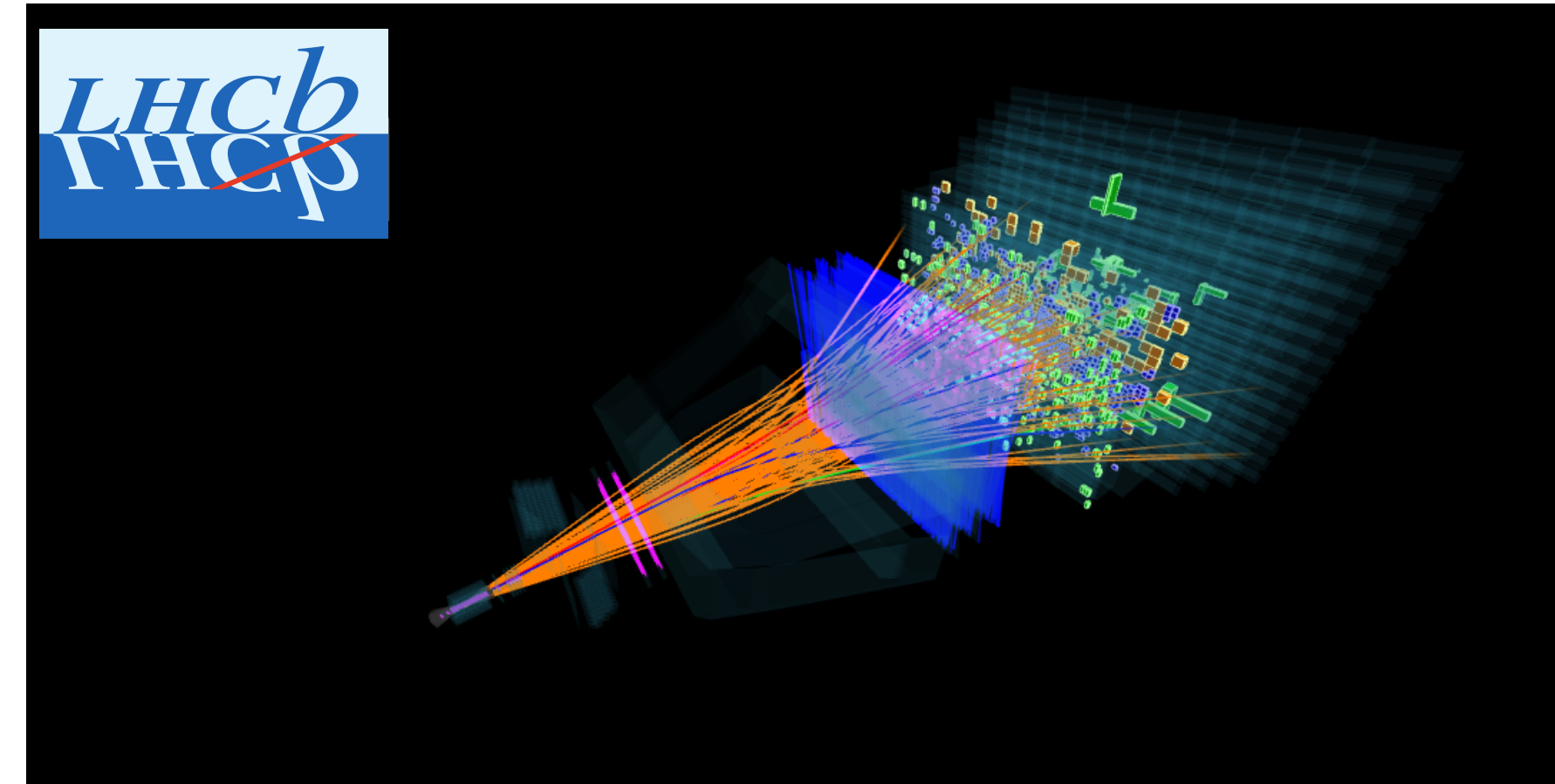
Il Trigger: come scegliere solo gli eventi interessanti

- Ma quanti dati dobbiamo salvare a LHCb?
 - LHC: collisioni protoni ogni 25 ns → 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

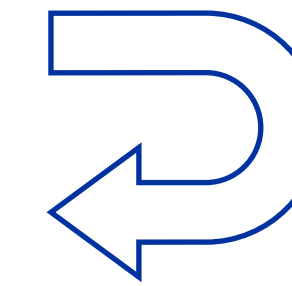
- Ma quanti dati dobbiamo salvare a LHCb?
 - LHC: collisioni protoni ogni 25 ns $\rightarrow$ circa 40 milioni di eventi al secondo!
 - Ogni collisione produce 100 kB di dati
 - $100 \text{ kB} \times 40 \text{ MHz} = 4 \text{ TB/s}$
- ⚠ La capacità di LHCb è di 10 GB/s : impossibile salvare tutto
 -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



Violazione di CP

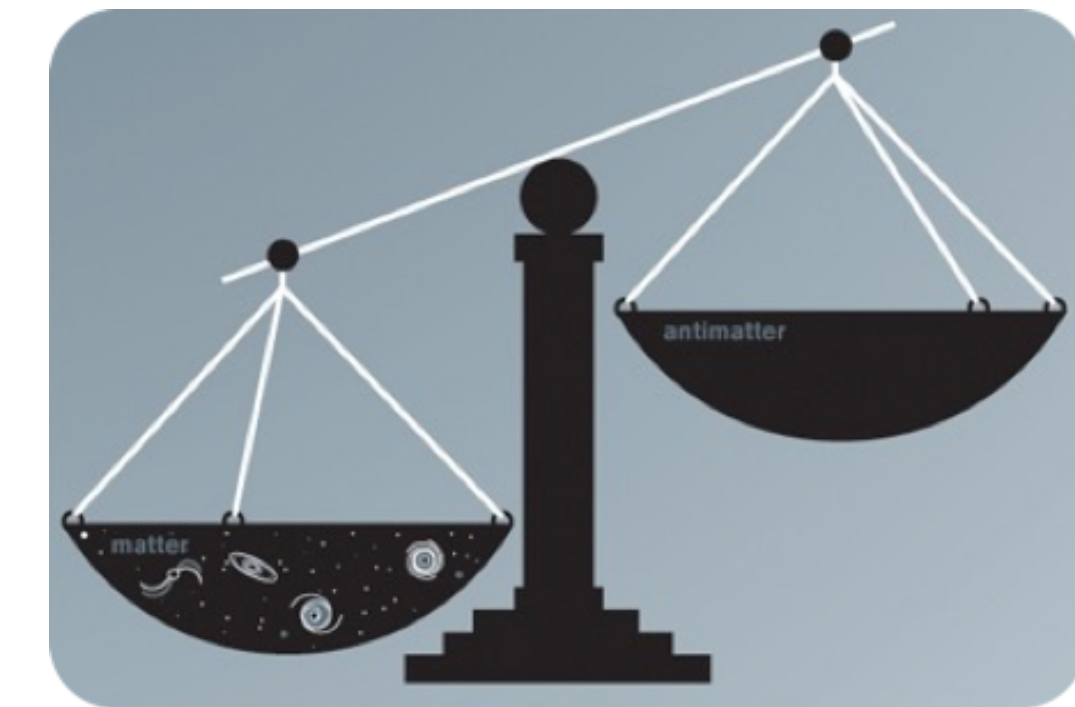


Il logo non è a caso!



- 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?

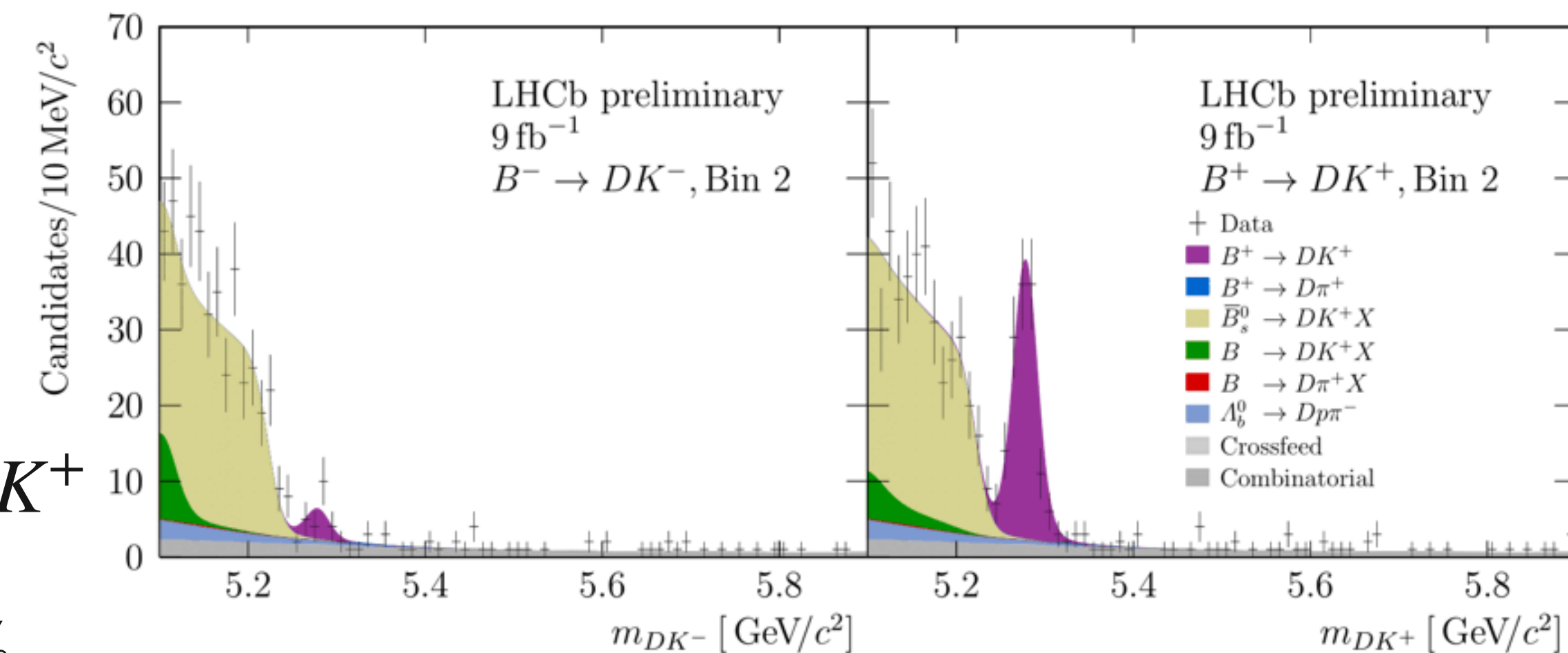
- Semplice: *contiamo* il numero di decadimenti di particelle e antiparticelle e vediamo quanto sono diversi.

- **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?

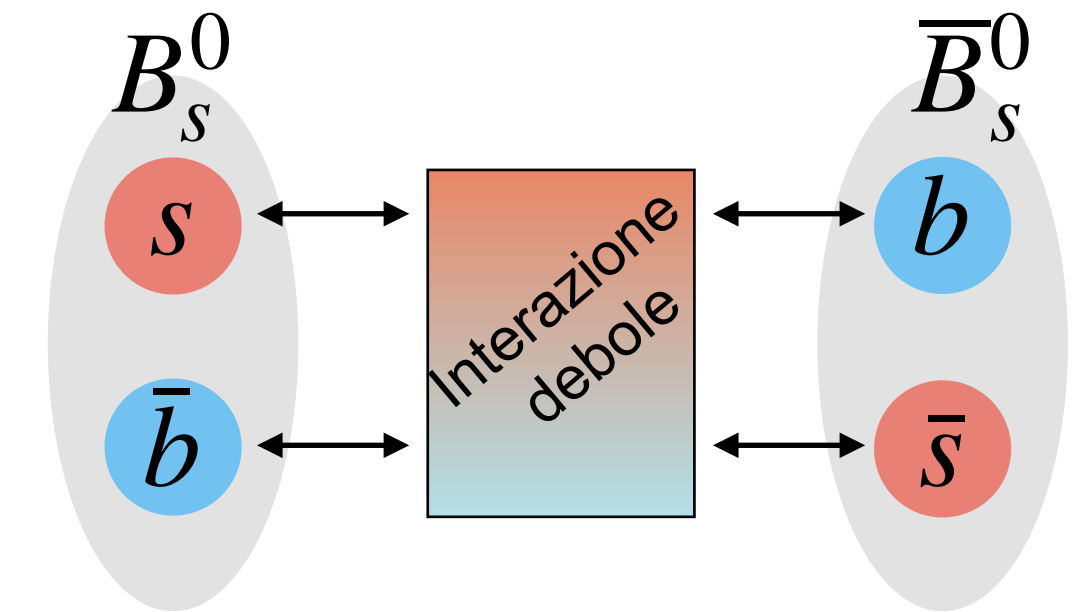
- Oscillare = trasformarsi spontaneamente nella propria antiparticella
- Probabilità di oscillare e di non oscillare:

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

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

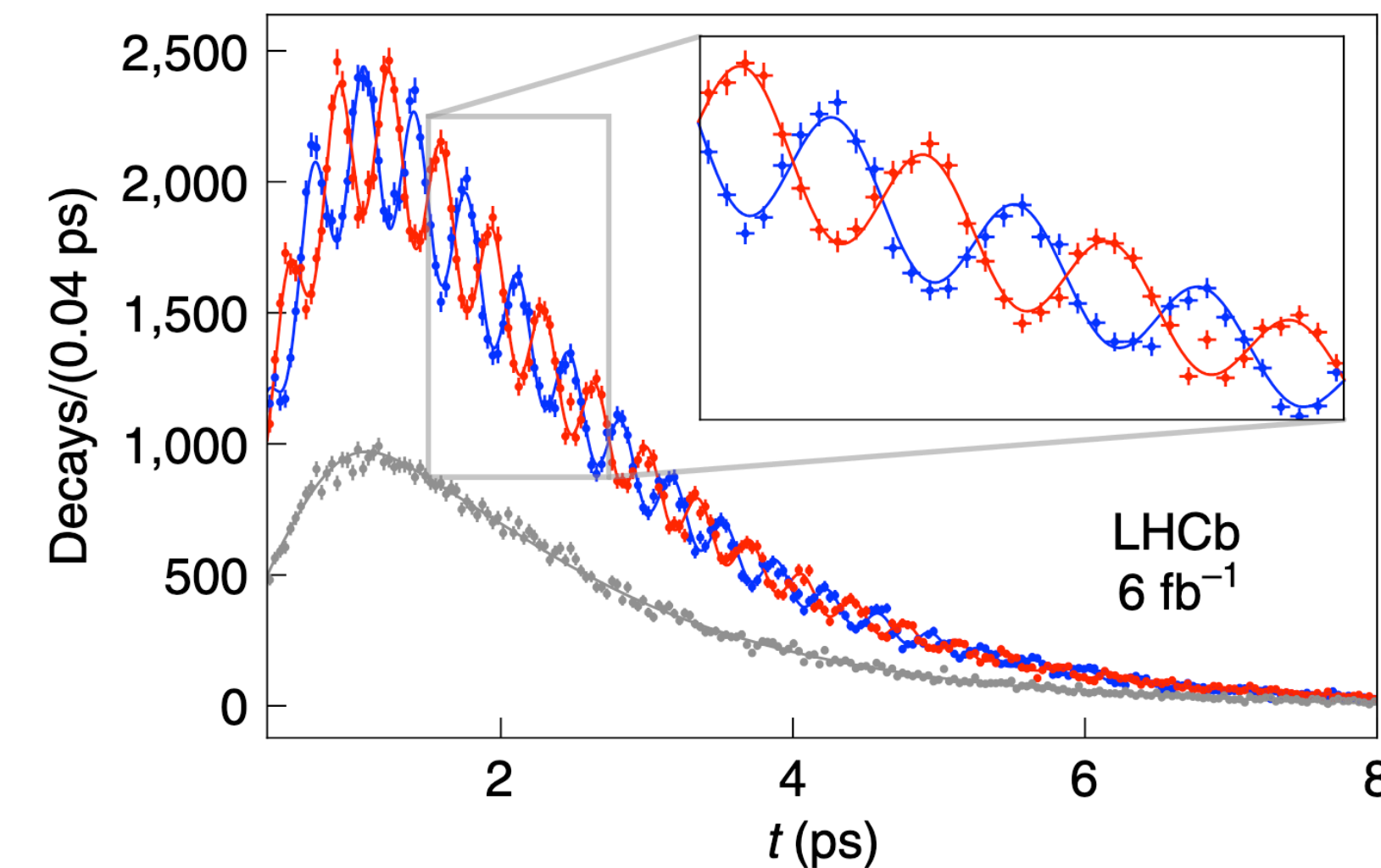
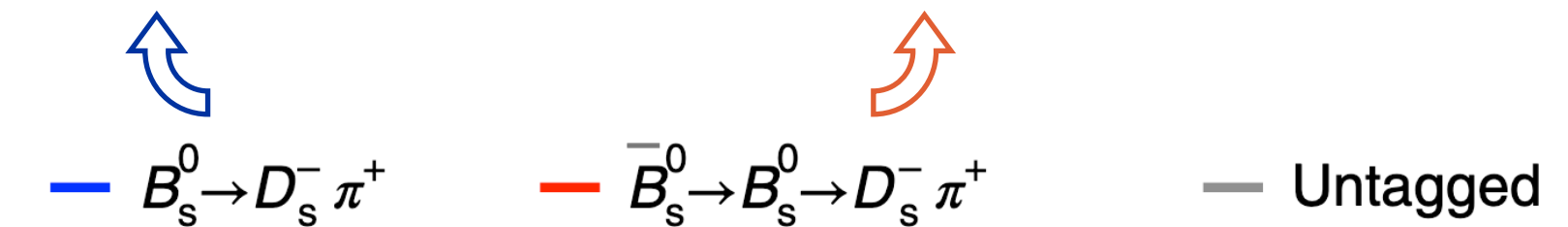
- Cosa misuriamo?

- 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**
($T \sim 0.35 \text{ ps}$)



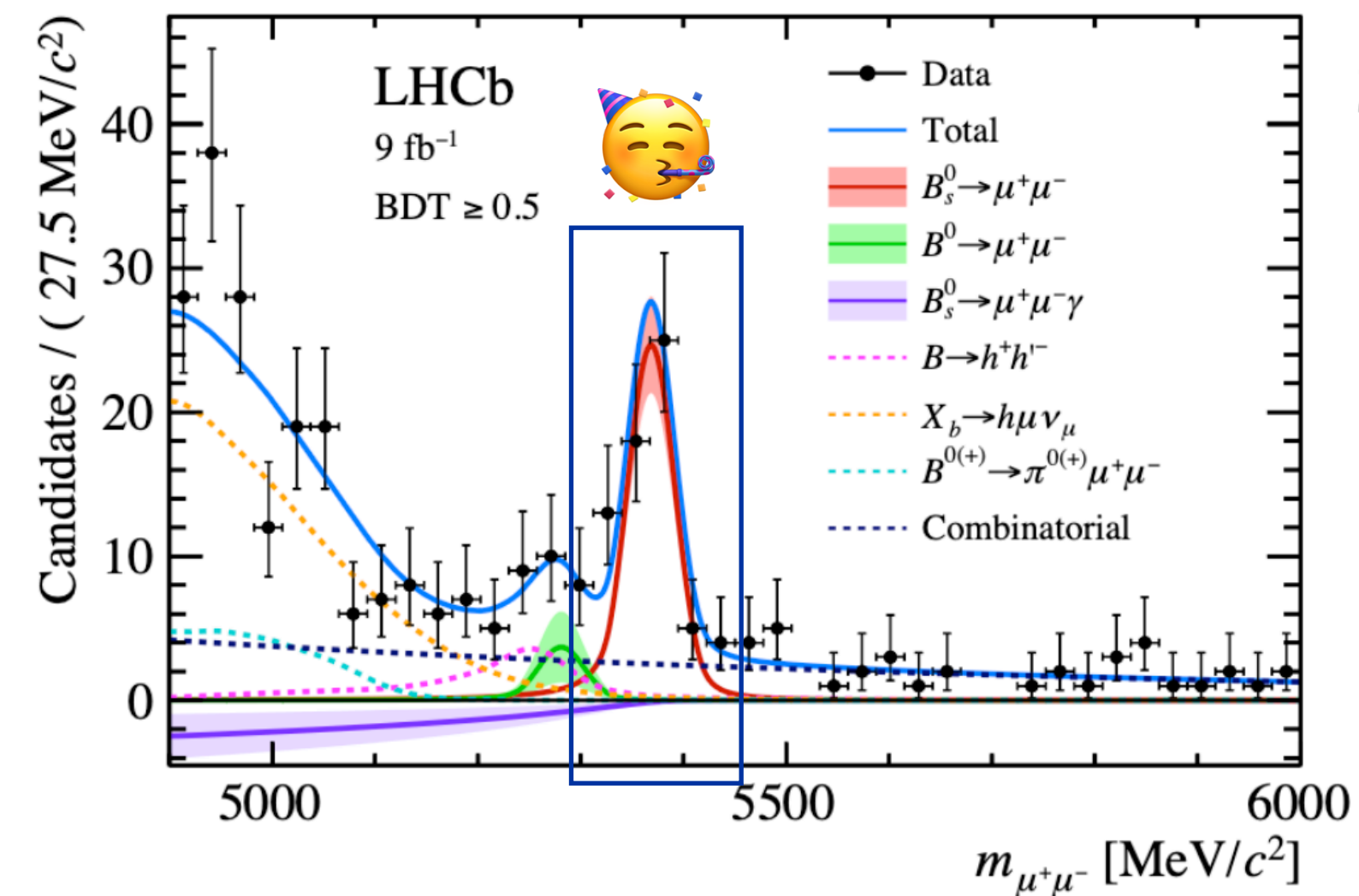
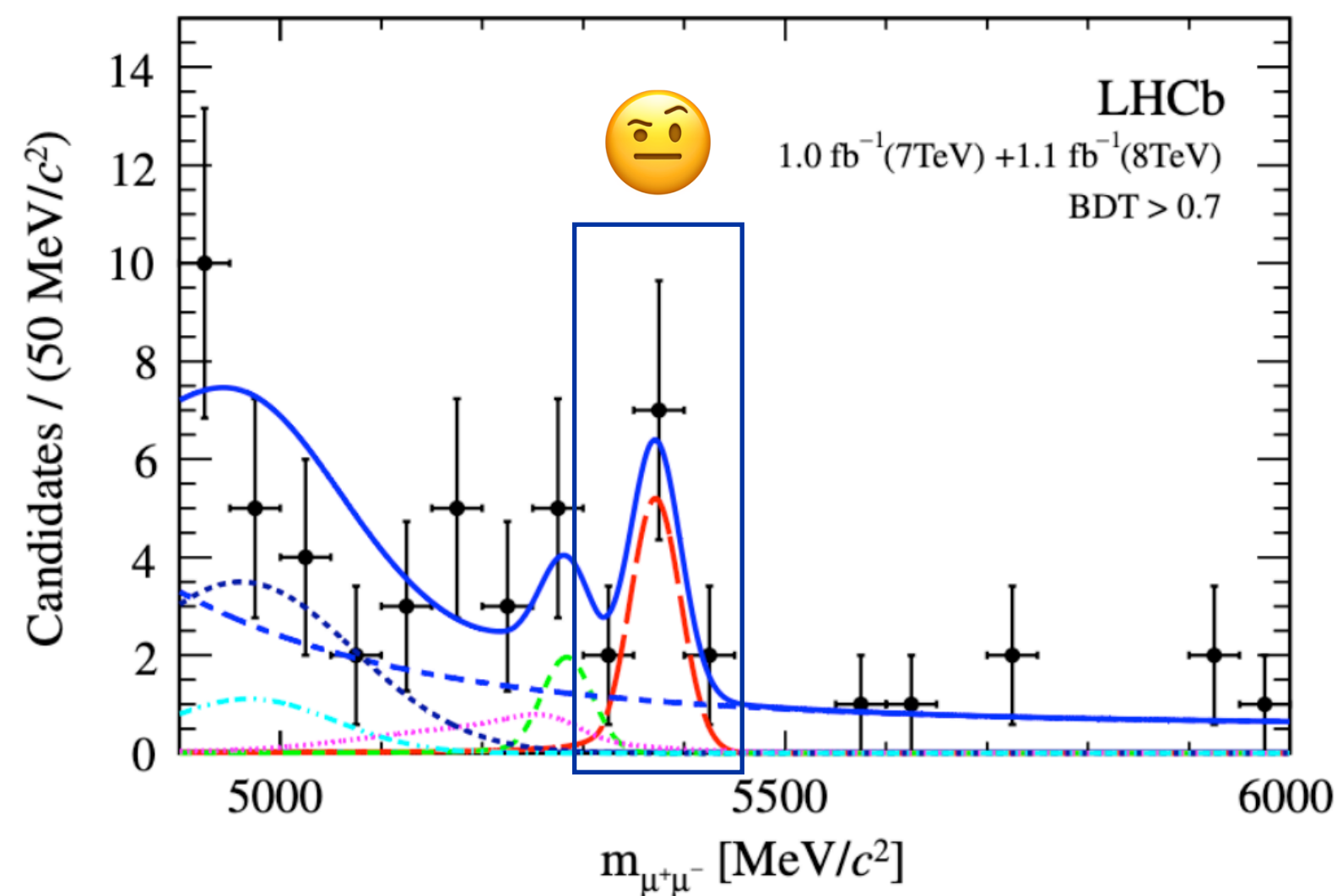
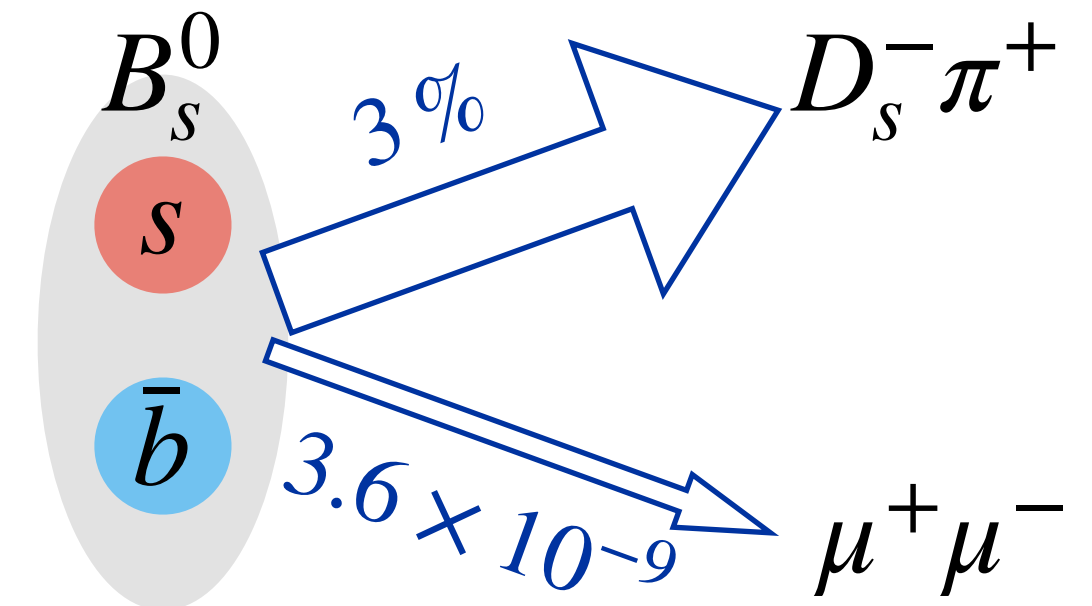
non hanno oscillato

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

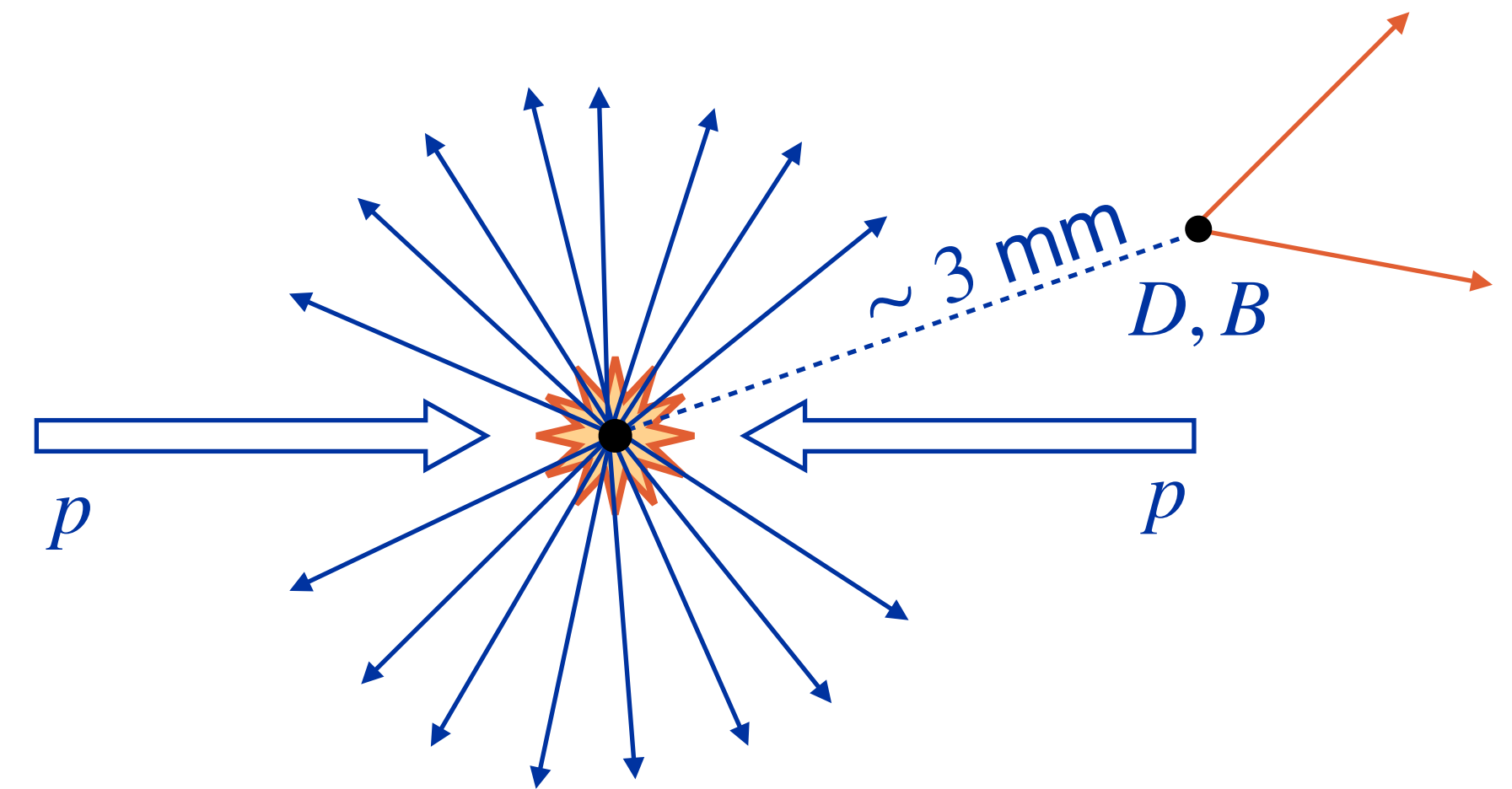


Trigger di LHCb: obiettivo

- 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!

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

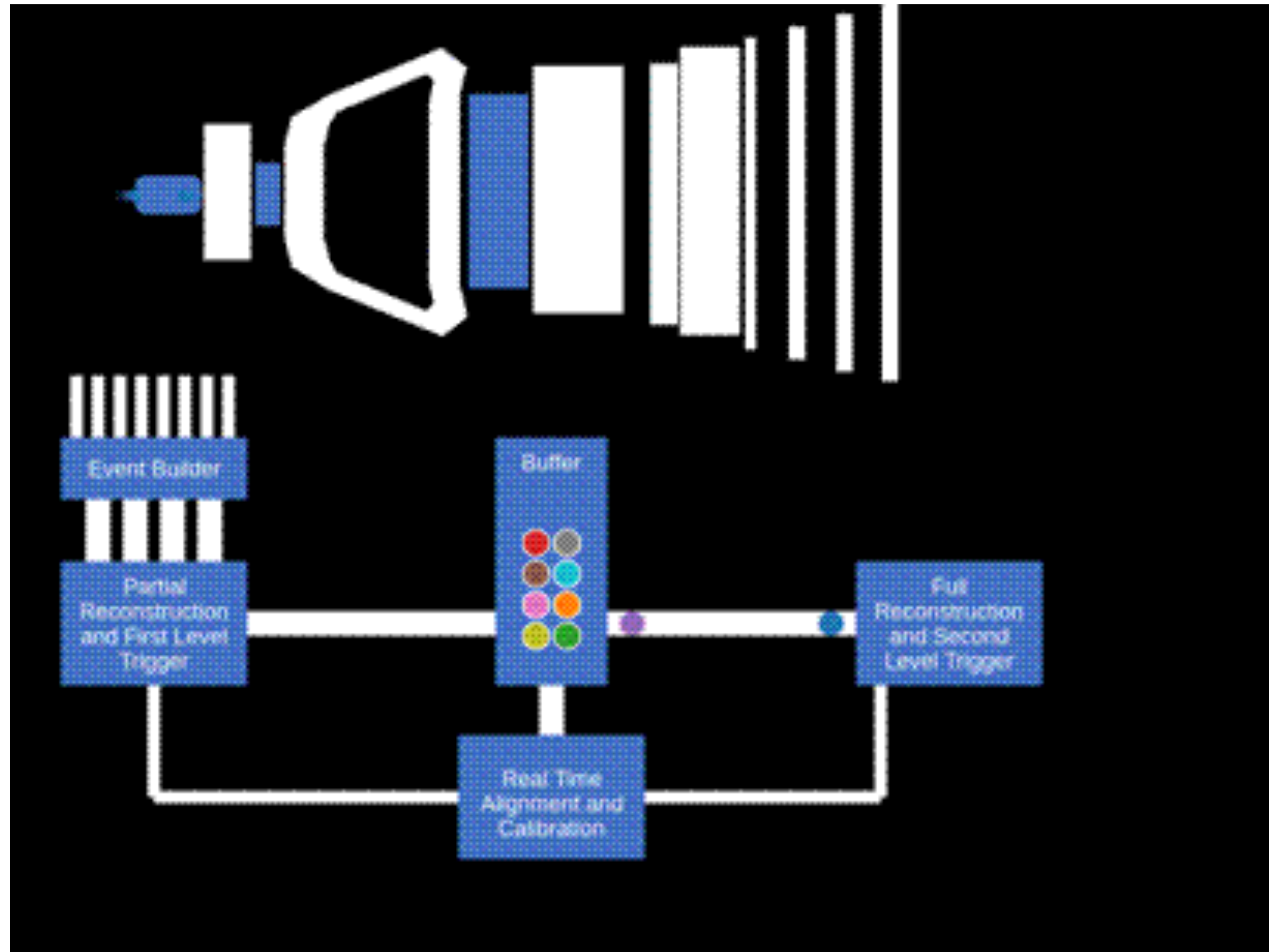
- Come facciamo a selezionare solo questi eventi?
 - Cerchiamo particelle prodotte **lontano** dal punto di interazione pp
 - Chiediamo che abbiano **energie e impulsi** nel range giusto



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

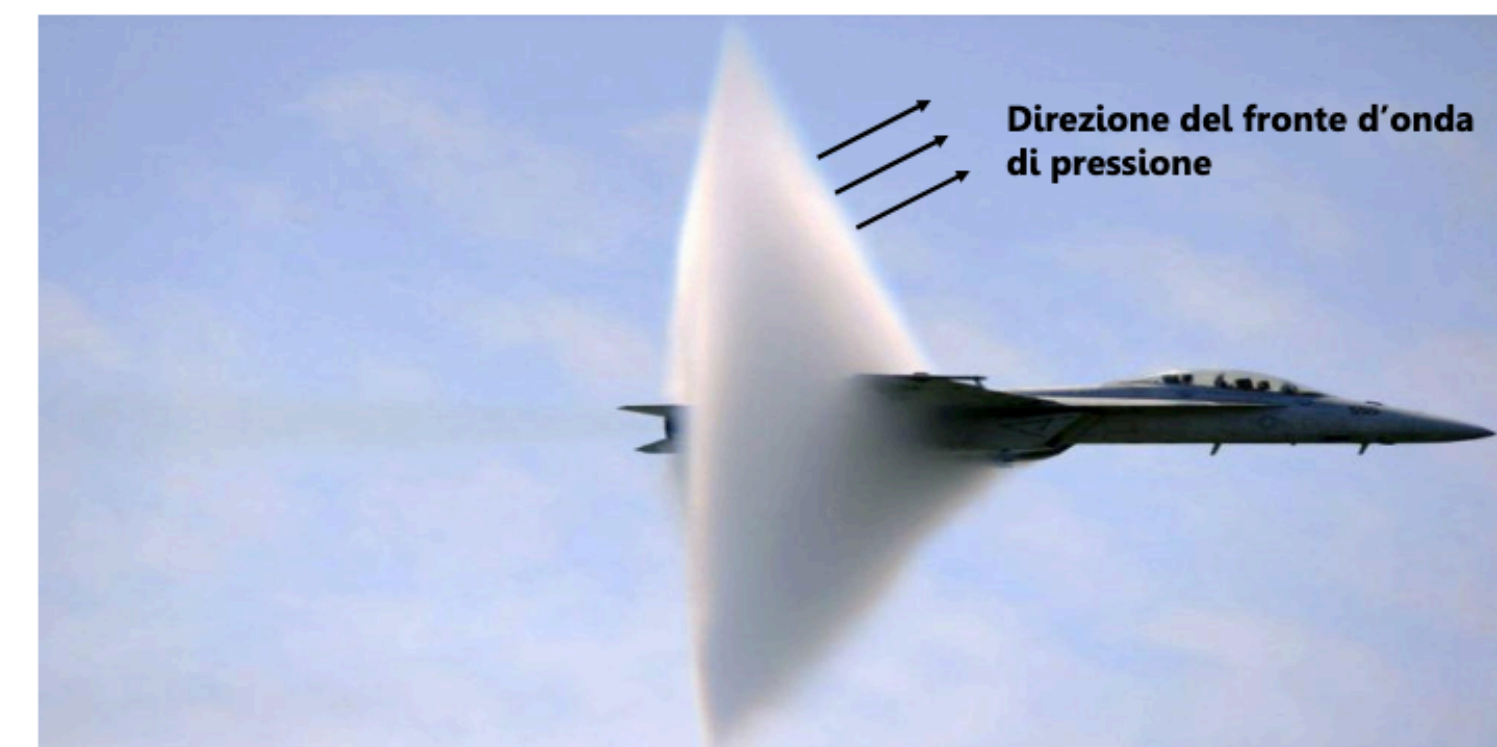
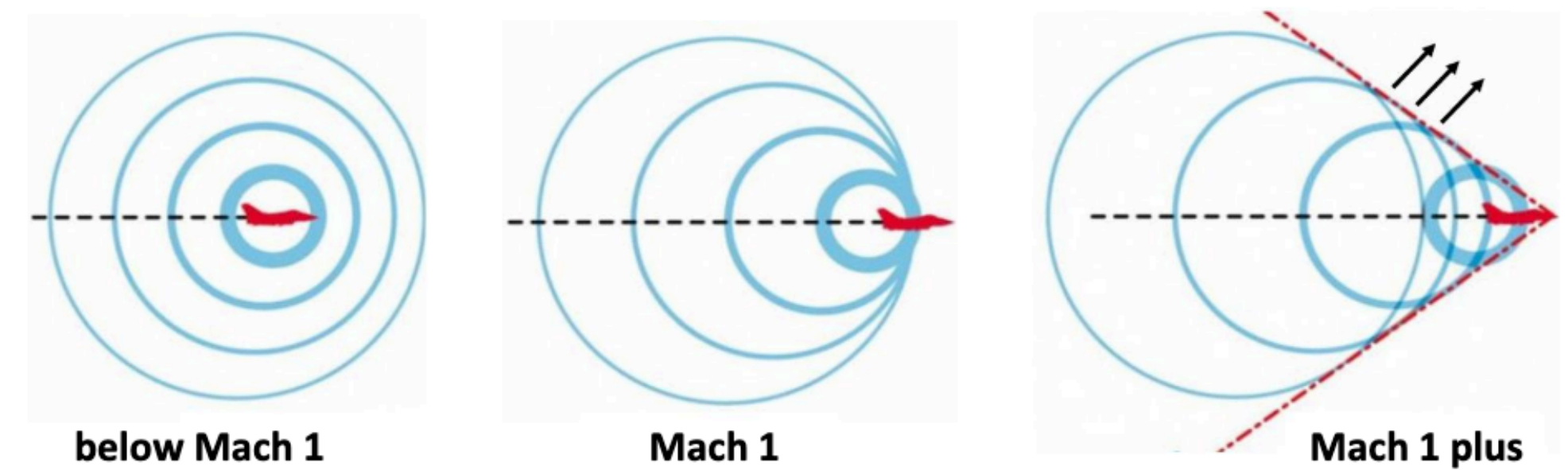
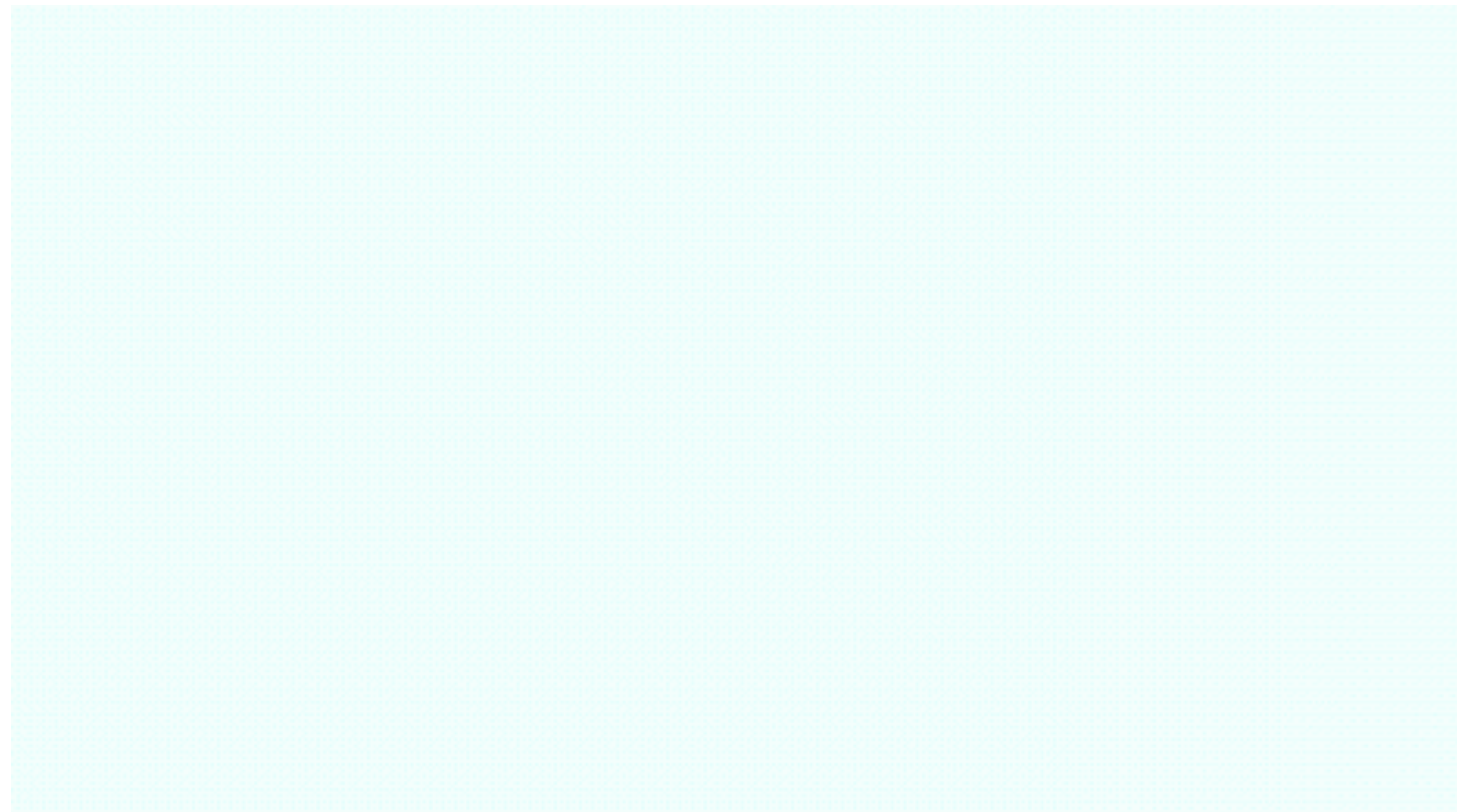
Output: dati salvati su disco per analisi

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**



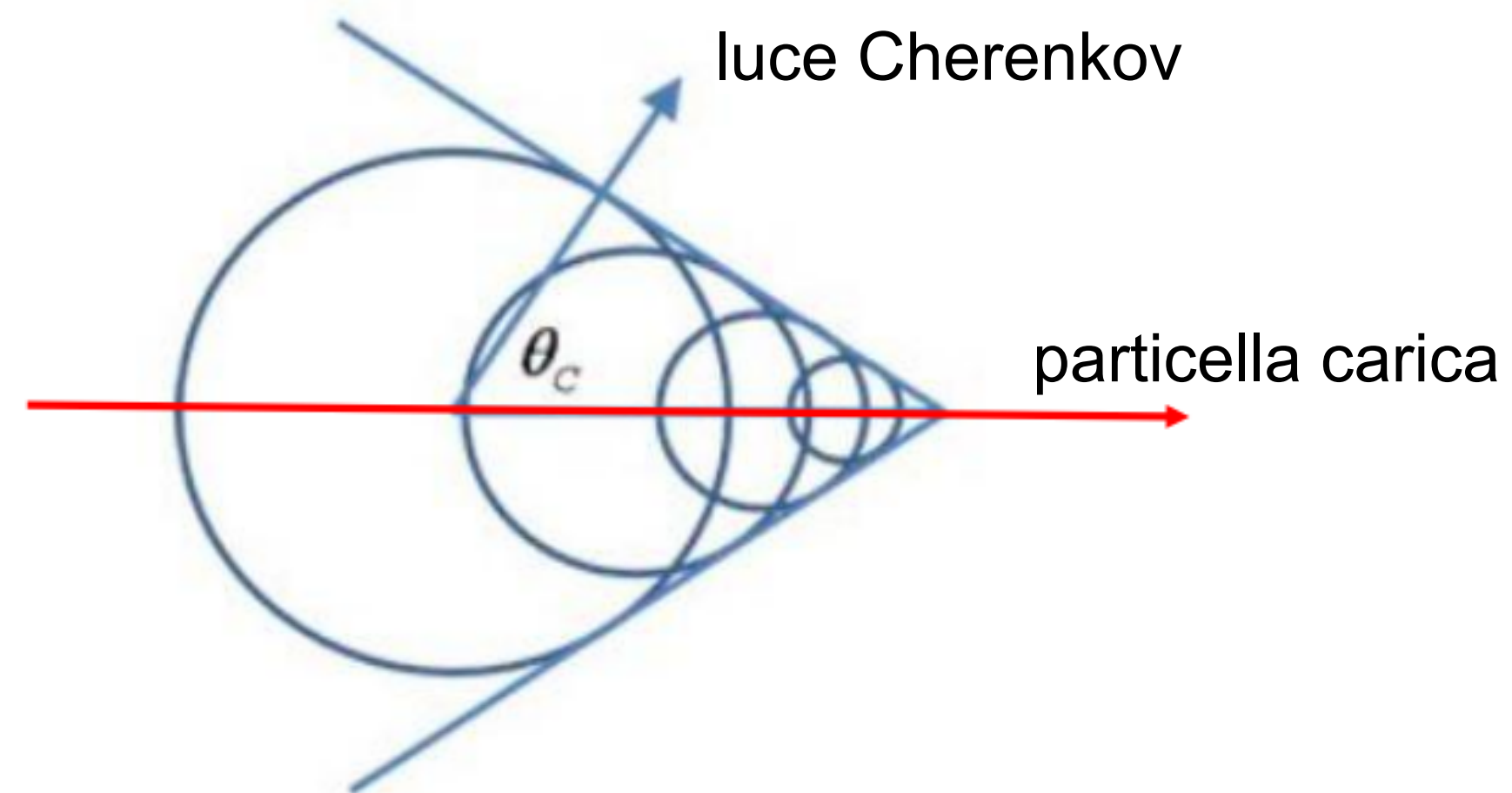
Analogia con il bang supersonico dei jets

La luce viene emessa con un angolo dato da

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

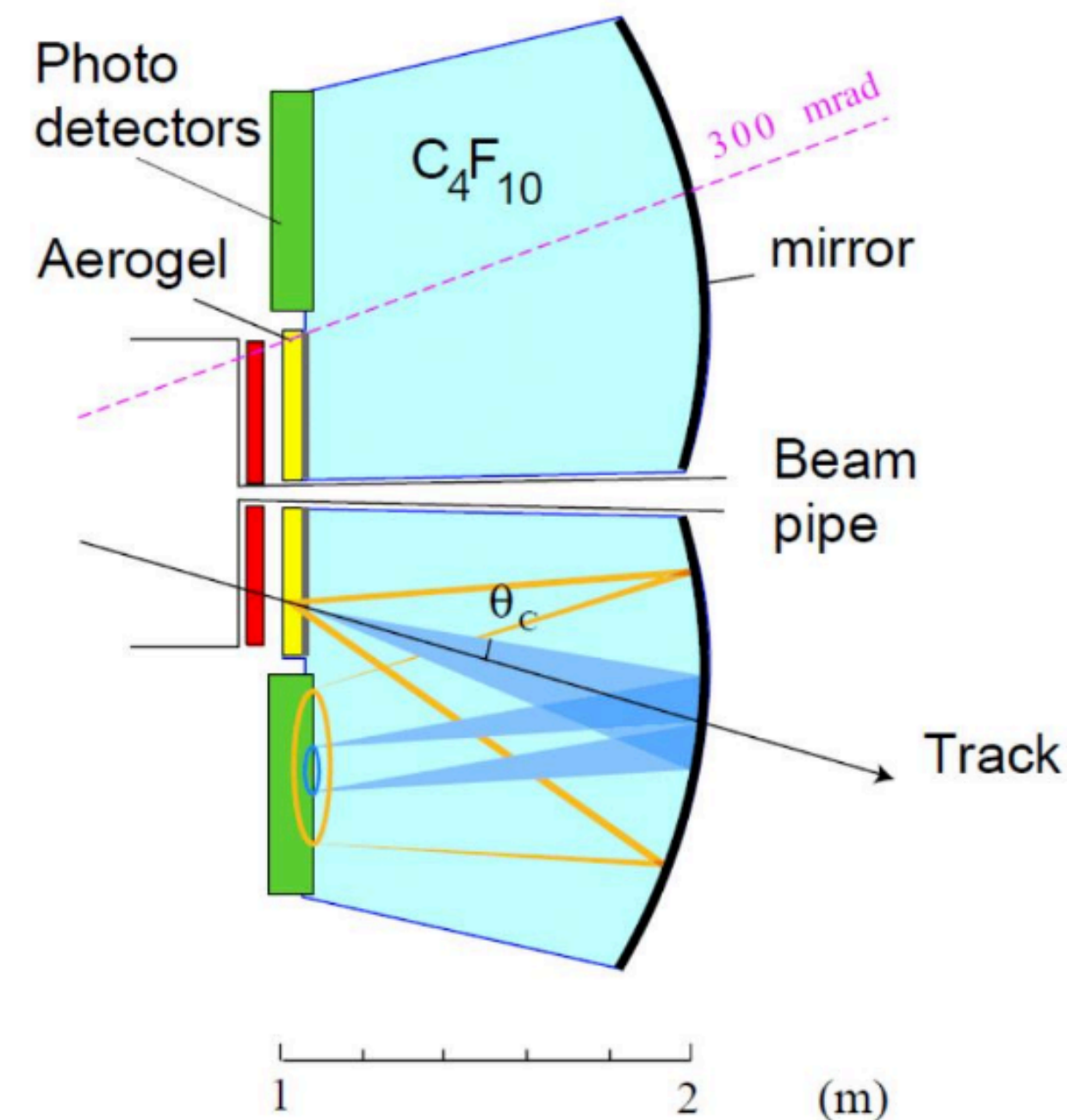
Identificazione del tipo di particella: RICH

- 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)