

Masterclass 2023



Misura della vita media della particella D^0 dai dati raccolti all'acceleratore LHC dall'esperimento LHCb

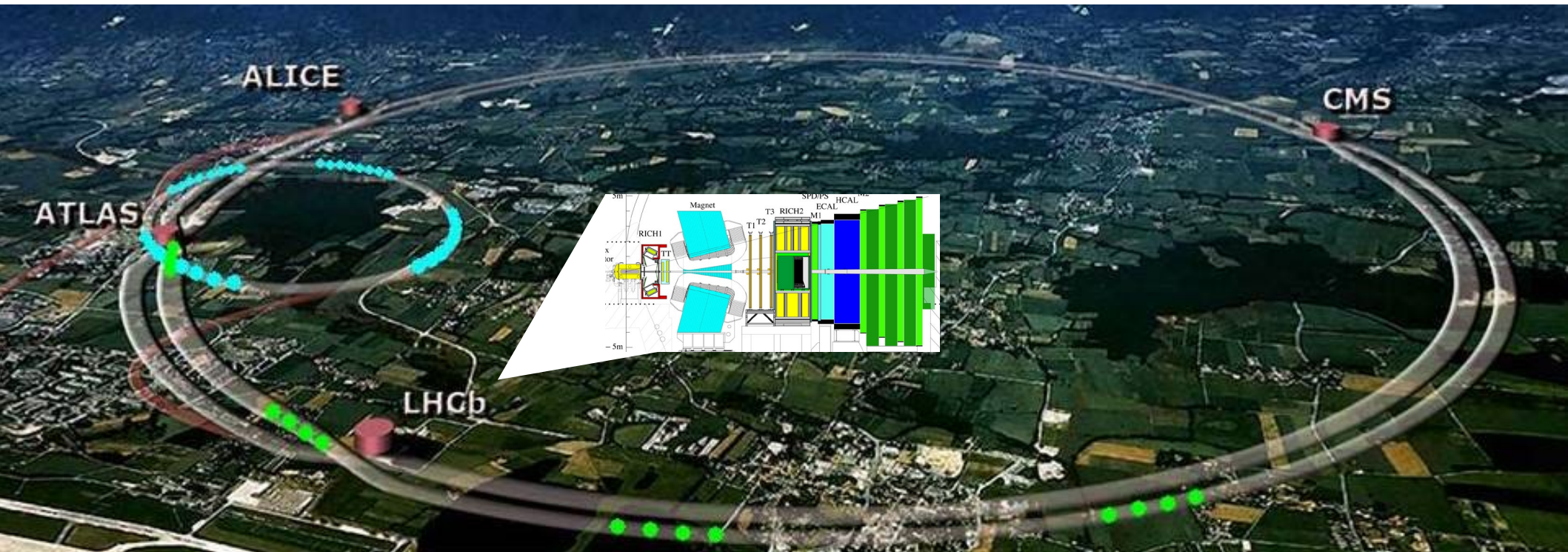
Paolo Carniti

Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Milano Bicocca e INFN

16 Febbraio 2023

L'esperimento LHCb

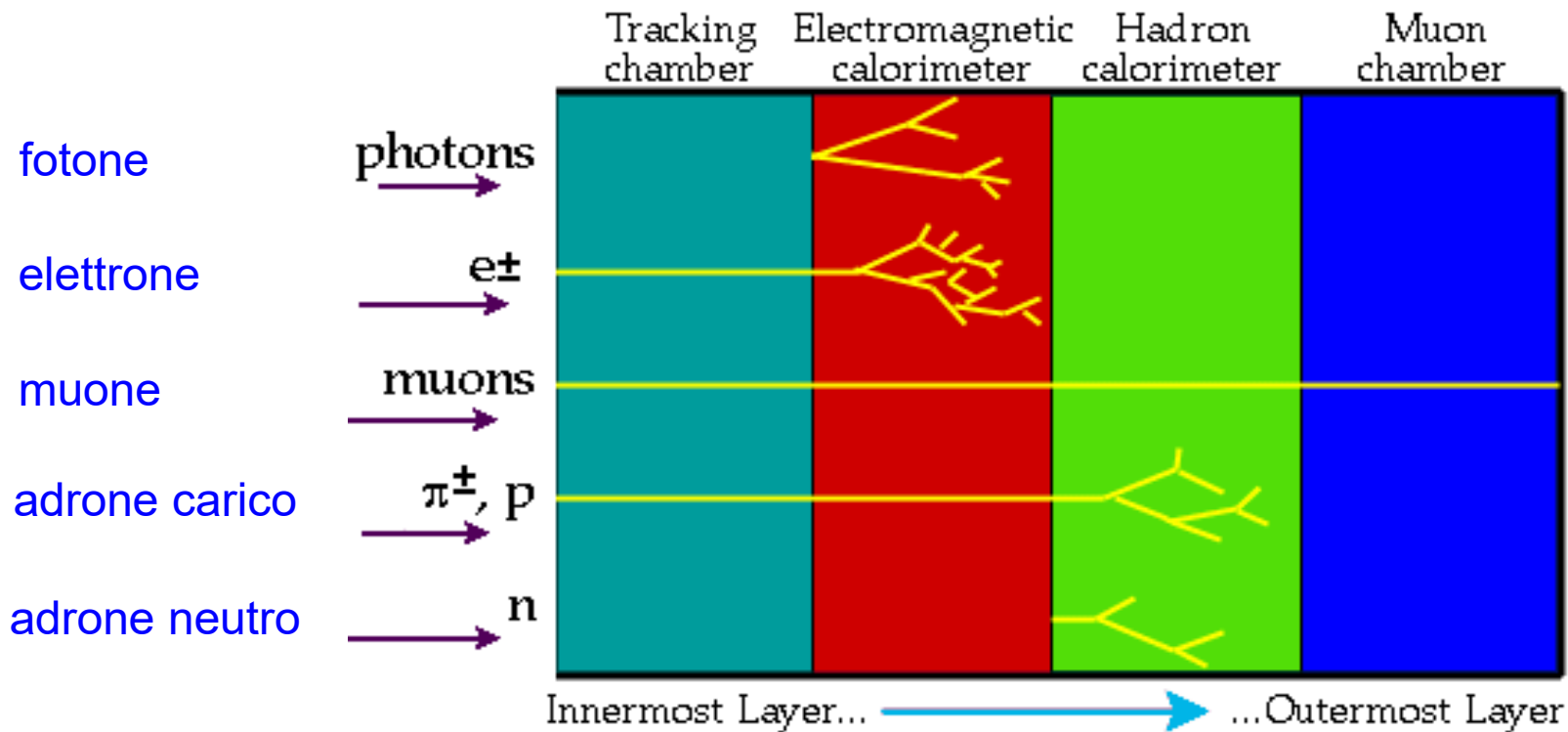
Large Hadron Collider beauty experiment



- L'esperimento LHCb è posto in uno dei 4 punti di interazione di LHC, **dove i due fasci di protoni si scontrano tra loro.**
- LHCb studia le **particelle prodotte nelle collisioni**, in particolare studia gli *adroni* contenenti il *quark beauty* o il *quark charm*.

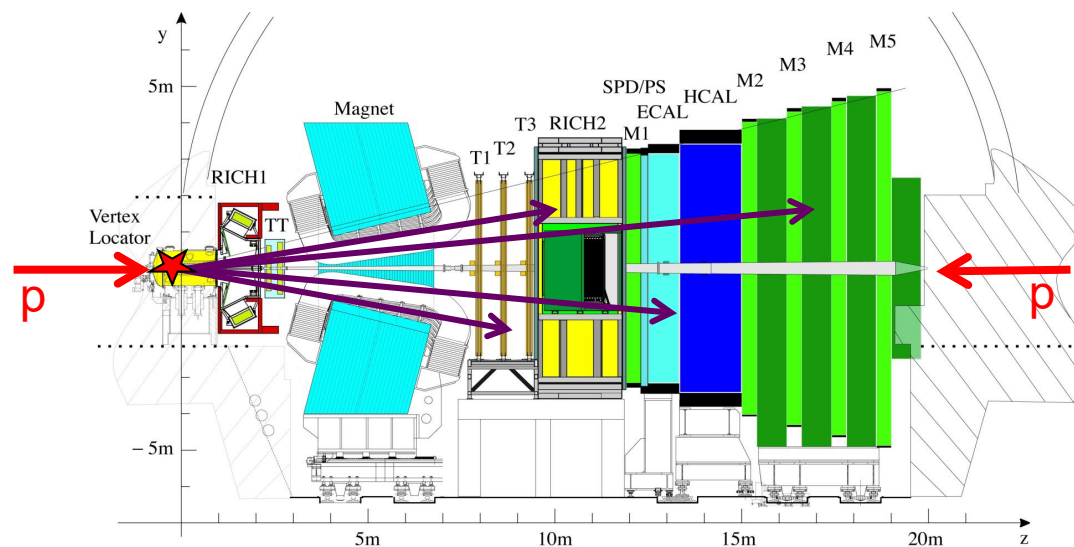
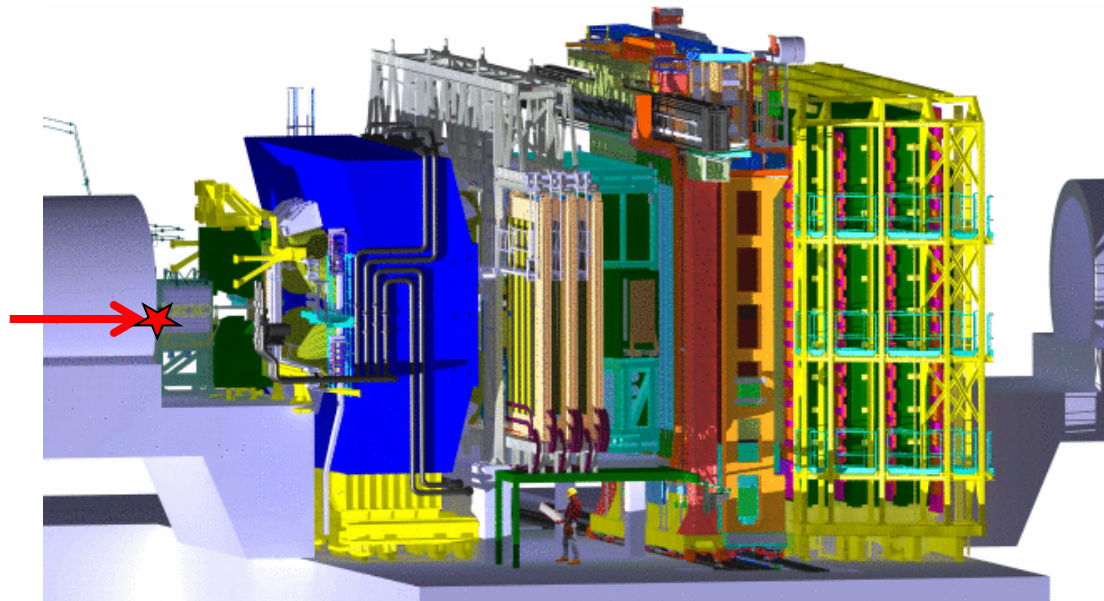
Come si rivelano le particelle?

- Le particelle *vengono rivelate e identificate* nei rivelatori di particelle, **grazie al loro diverso modo di interagire con la materia**.
- Un **rivelatore di particelle** è tipicamente costituito da diversi “sotto-rivelatori”, ciascuno *sensibile ad una particolare caratteristica* delle particelle che lo attraversano.
- È in grado di rivelare e distinguere tra loro particelle di tipo diverso e misurarne le proprietà.



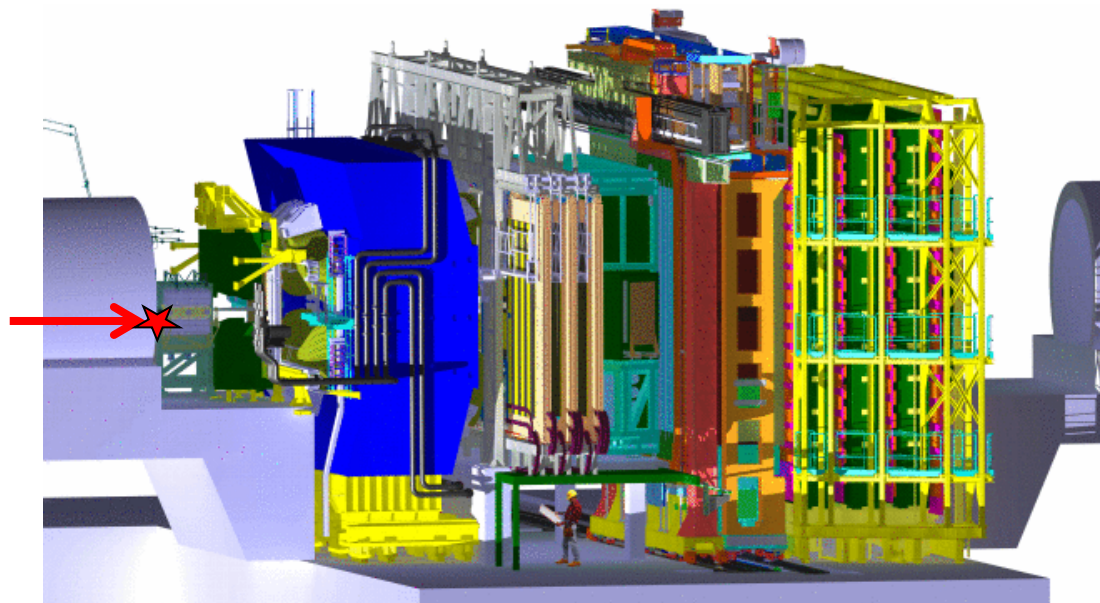
Il rivelatore LHCb

- LHCb è uno “spettrometro in avanti”
- Le collisioni tra protoni avvengono ad un estremo del rivelatore.
Si osserva il flusso di particelle che si propaga da un lato.

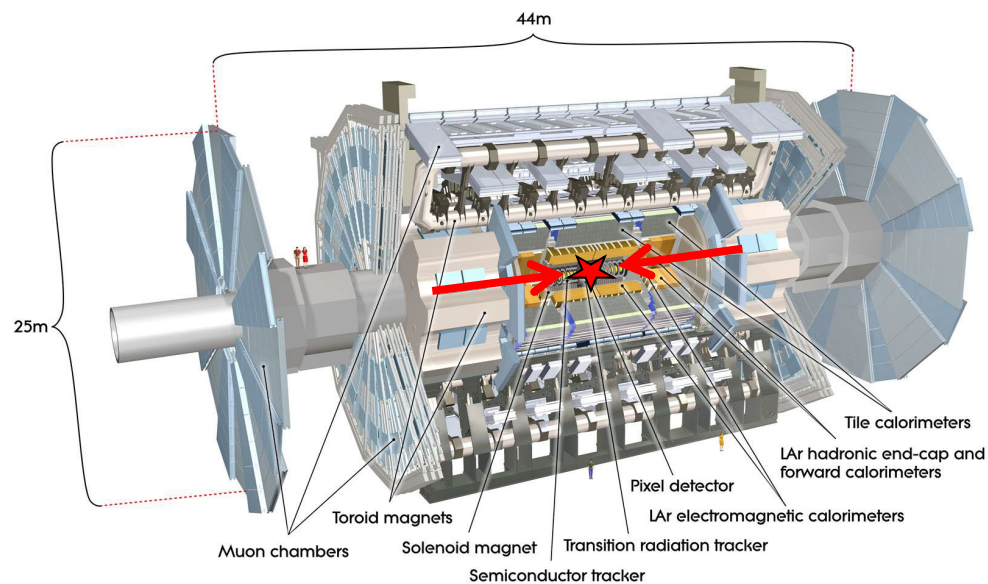


Il rivelatore LHCb

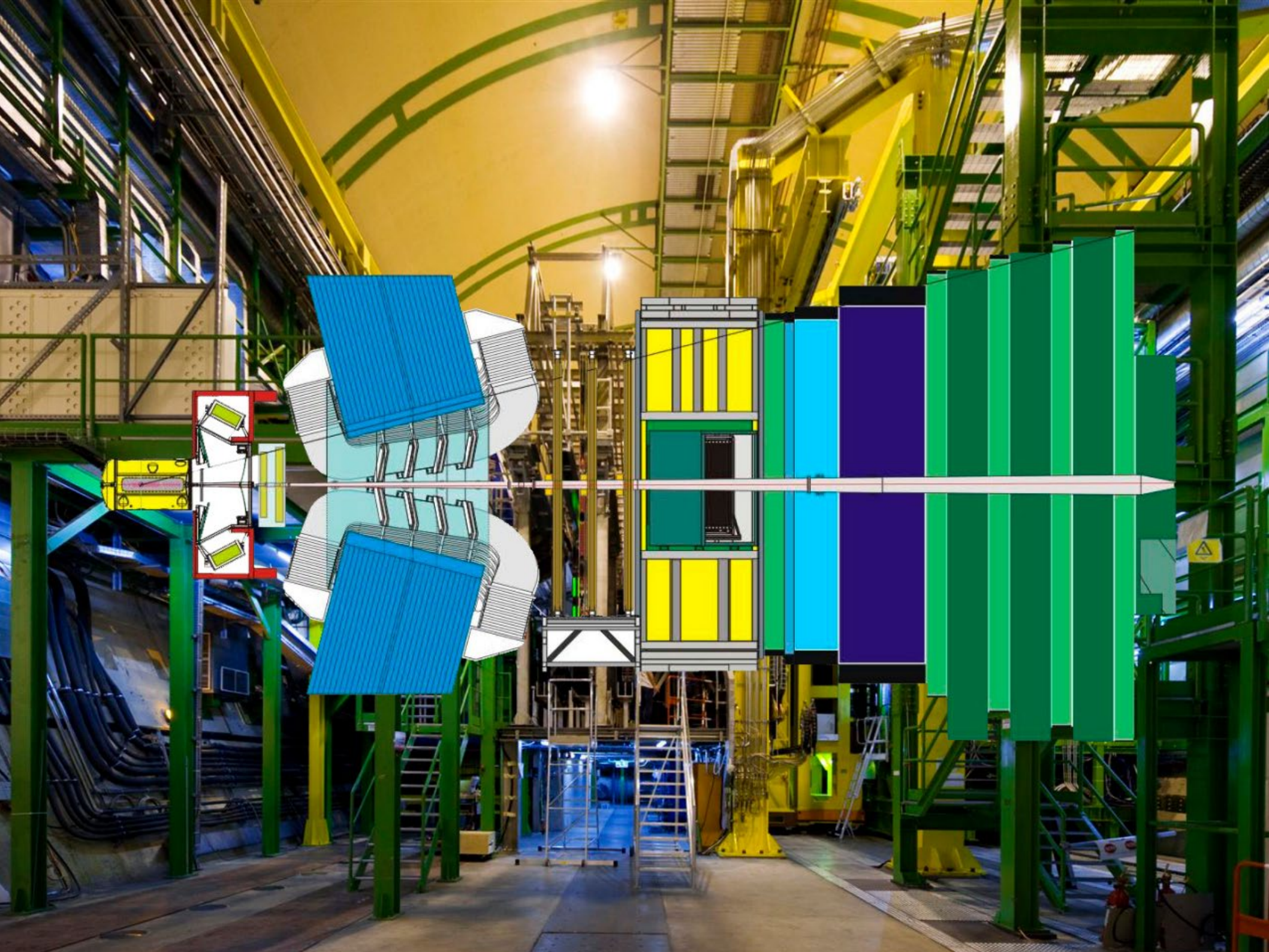
LHCb



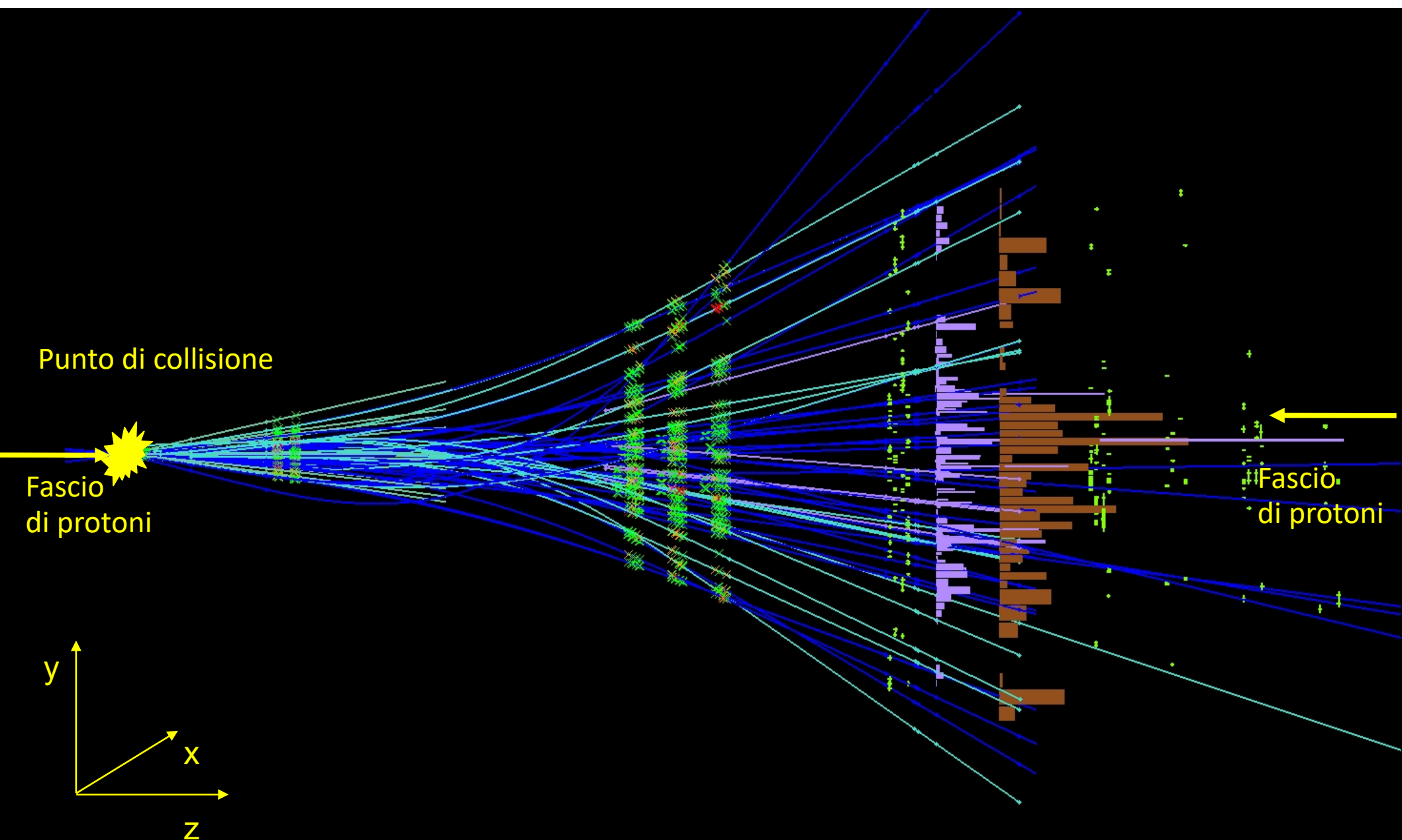
ATLAS
(CMS, ALICE)



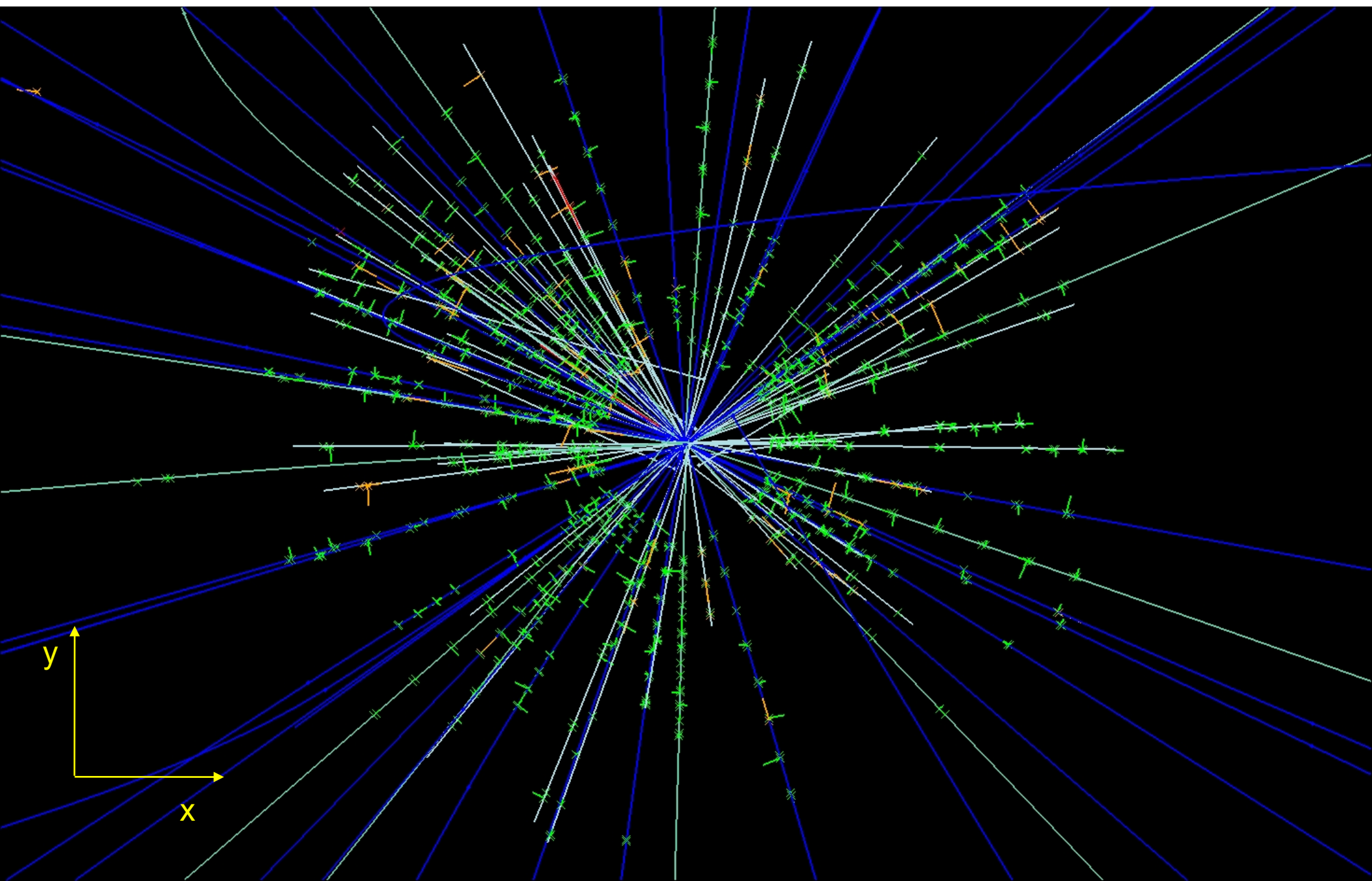




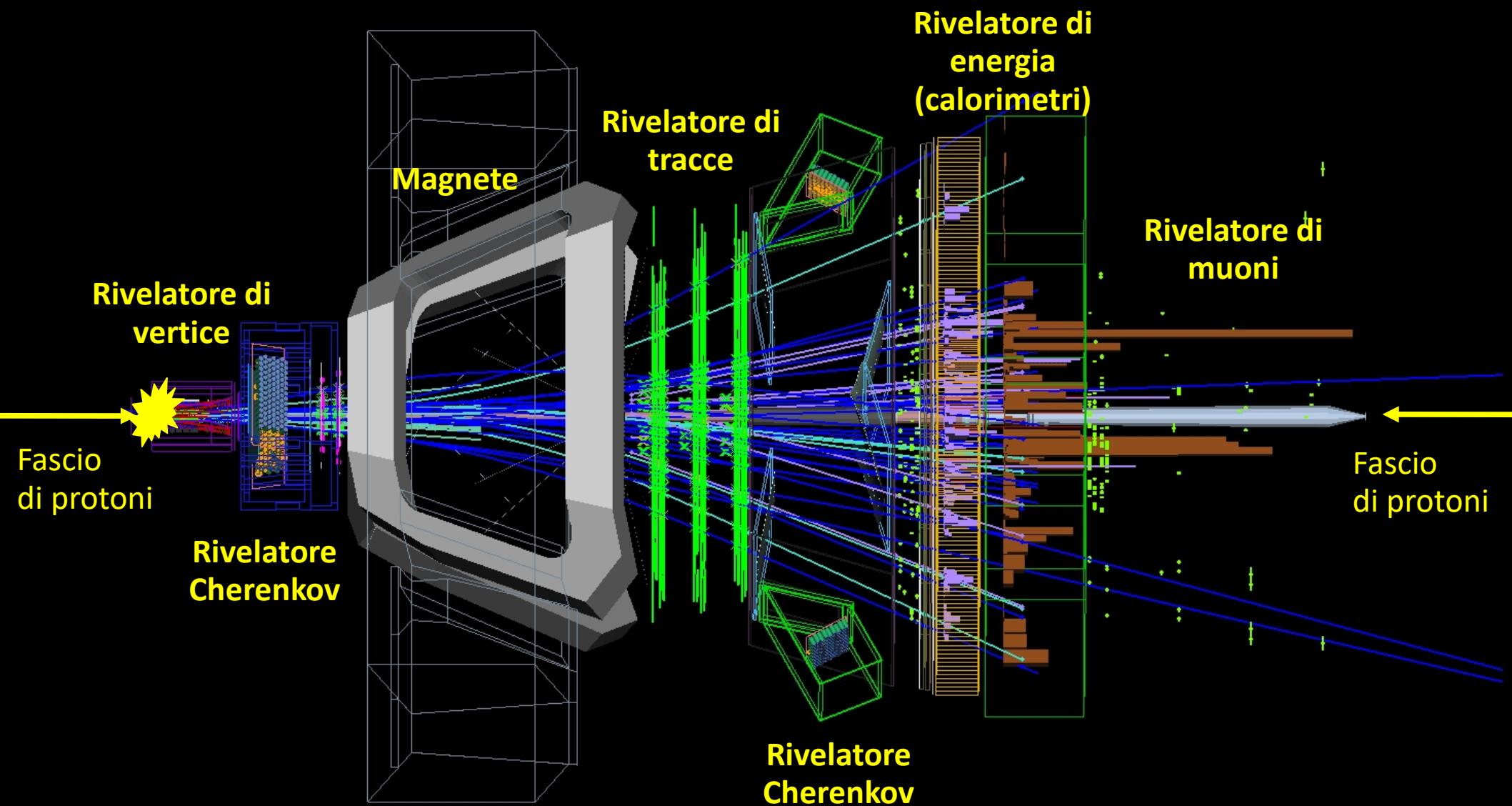
Una collisione in LHCb



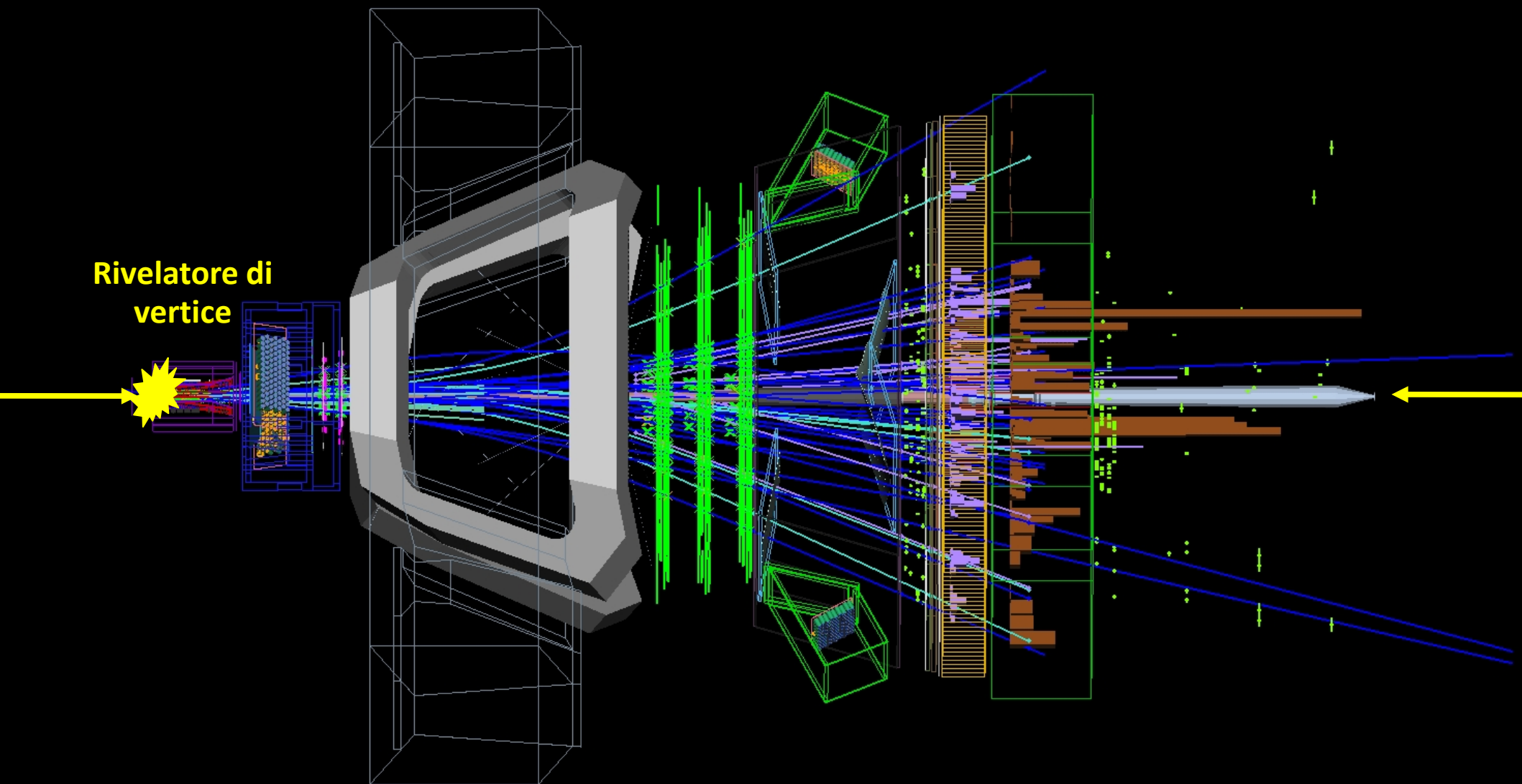
Una collisione in LHCb



Come vede le particelle il rivelatore LHCb?

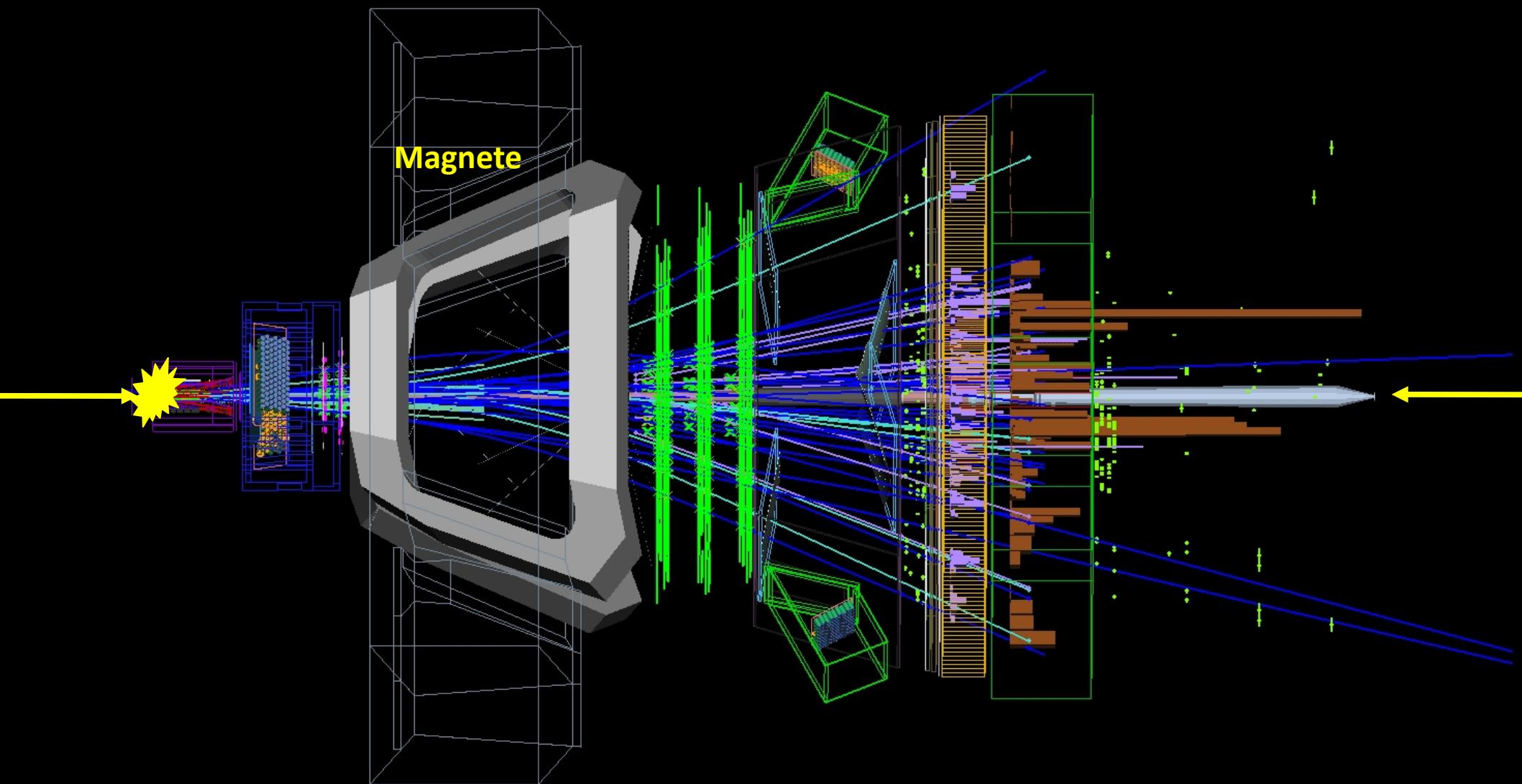


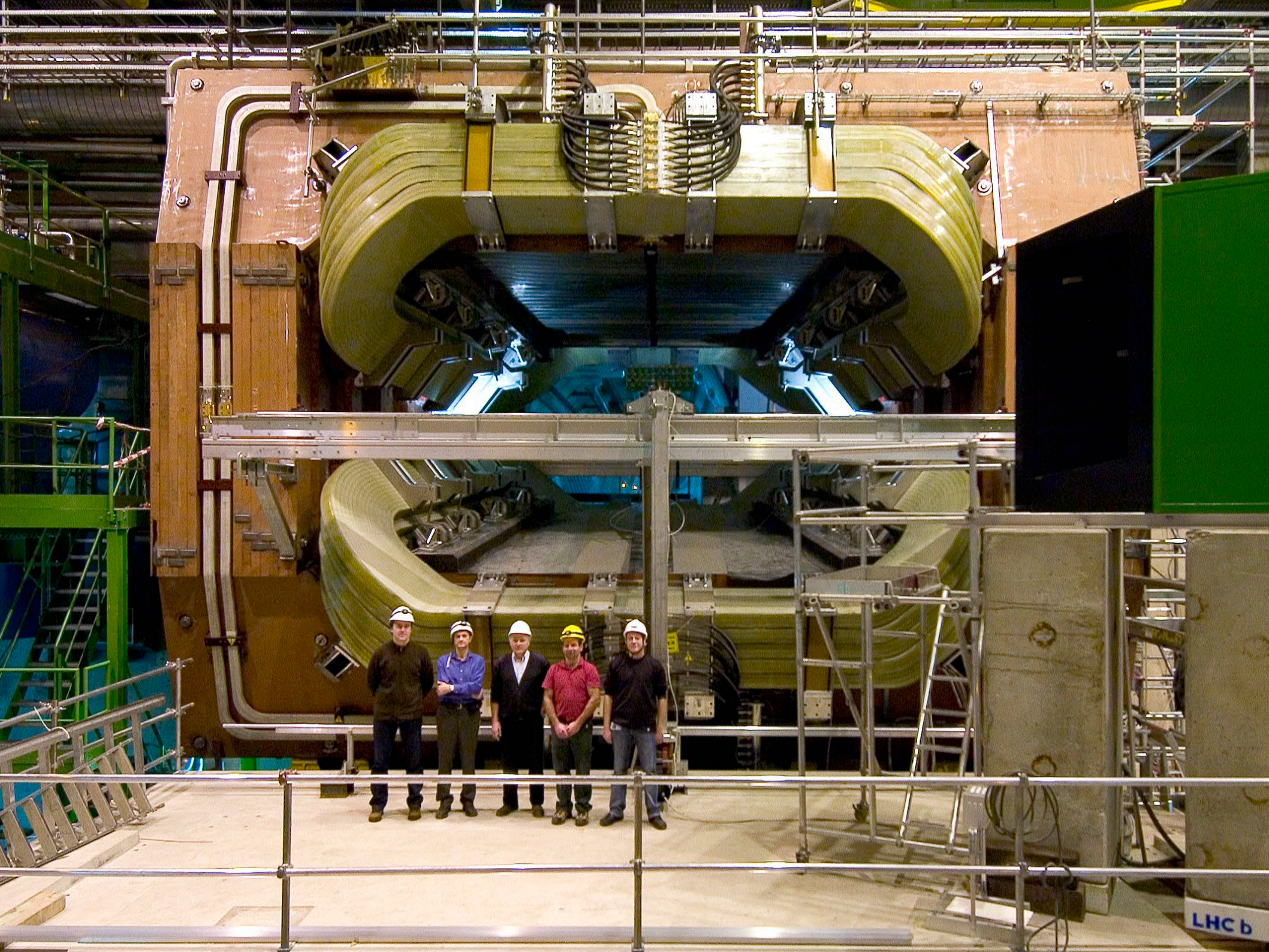
Come vede le particelle il rivelatore LHCb?





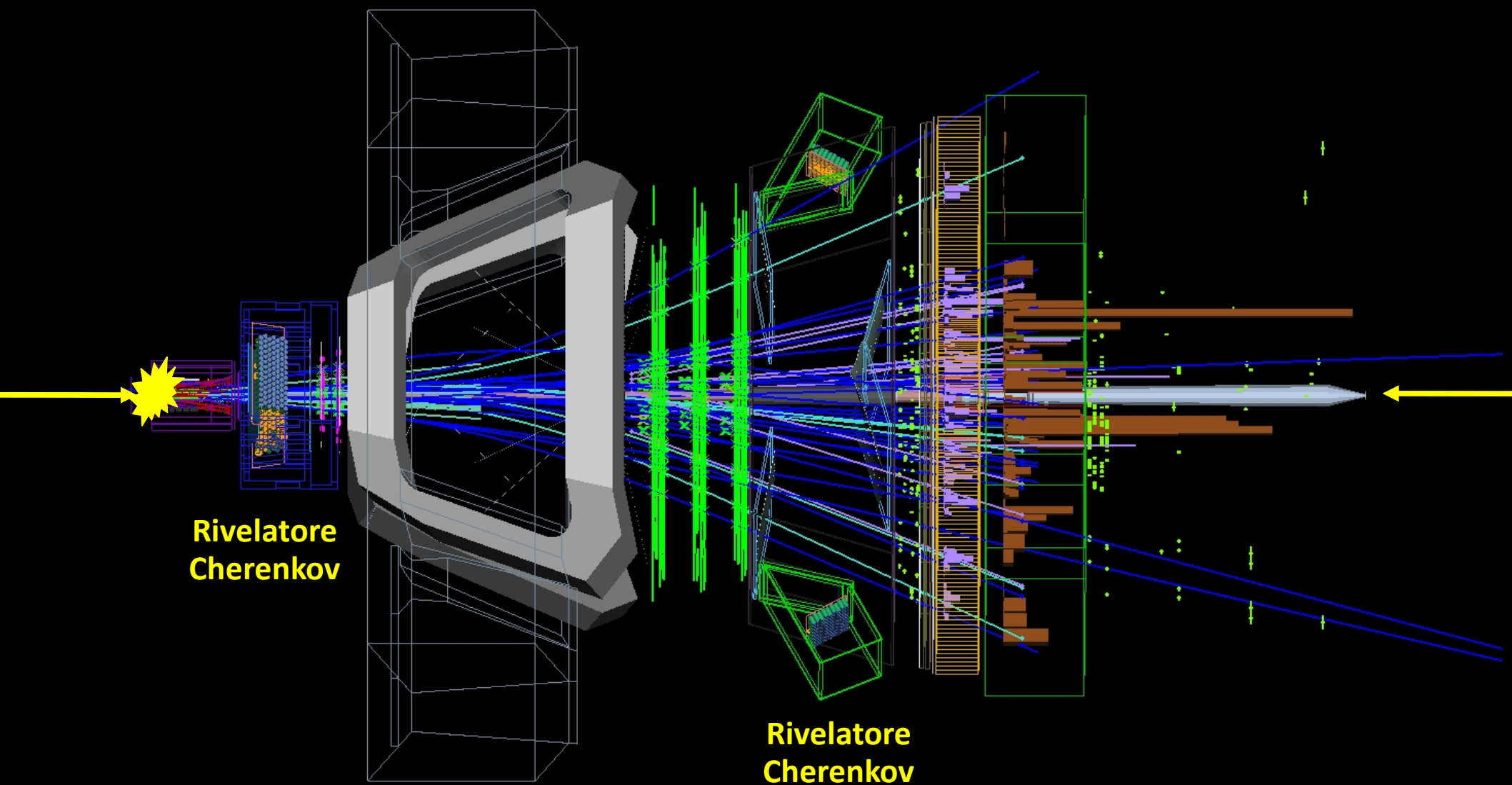
Come vede le particelle il rivelatore LHCb?

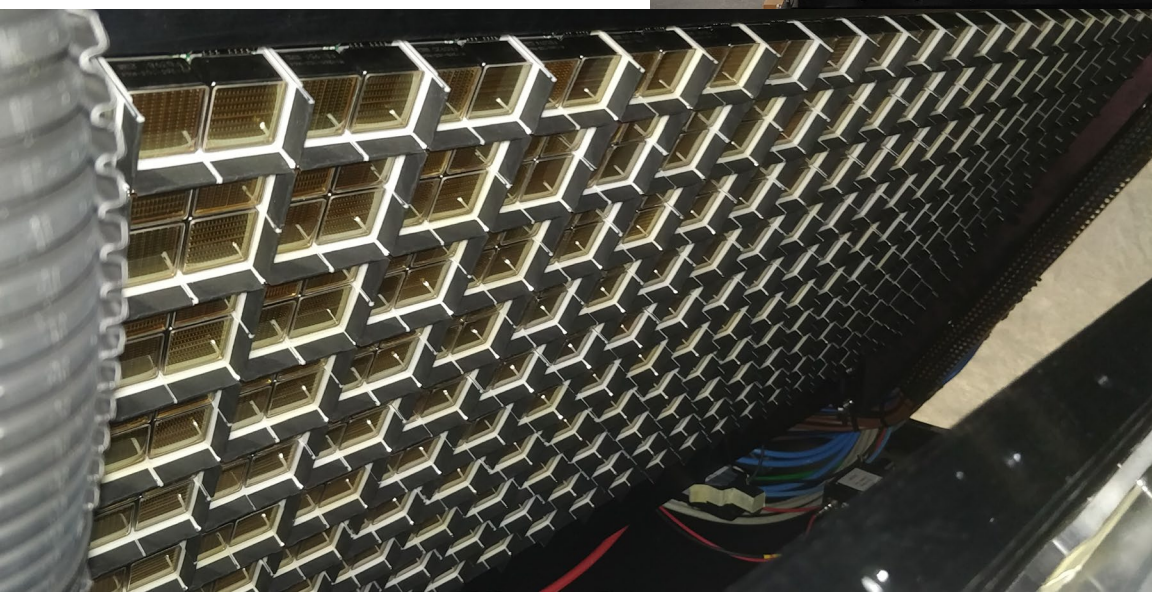


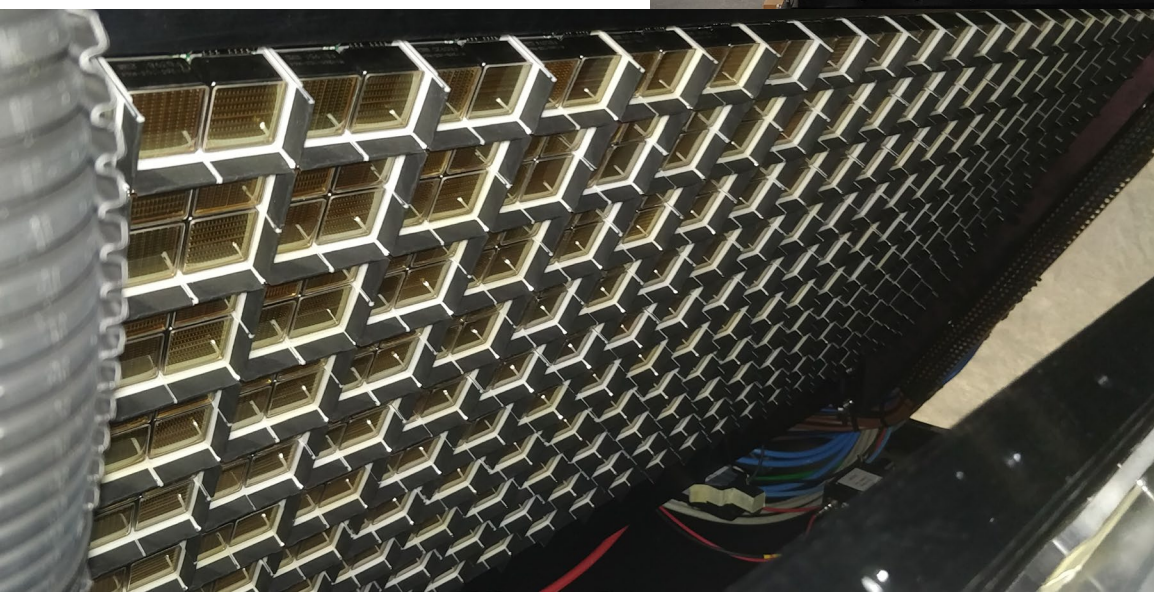


LHCb

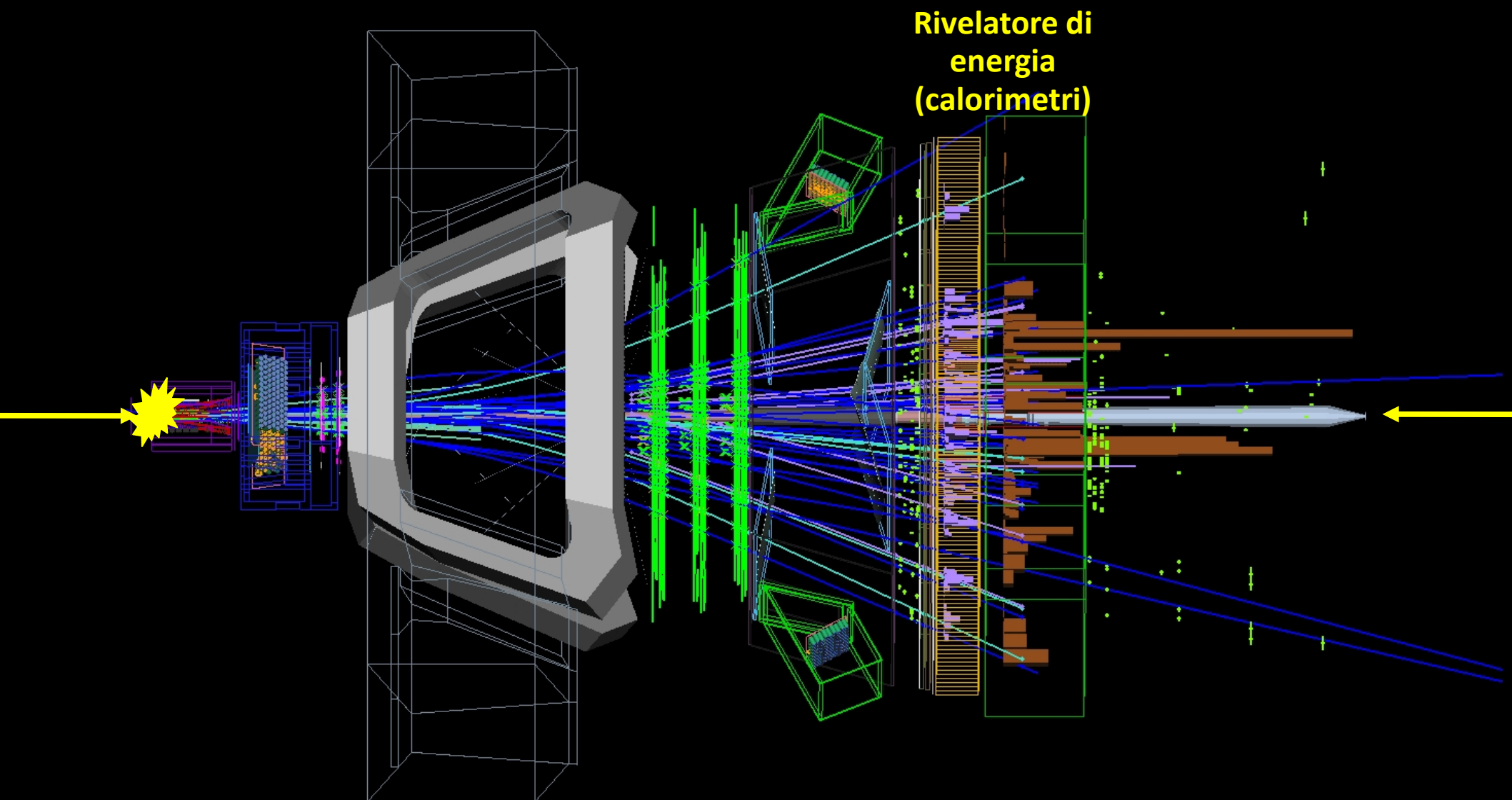
Come vede le particelle il rivelatore LHCb?

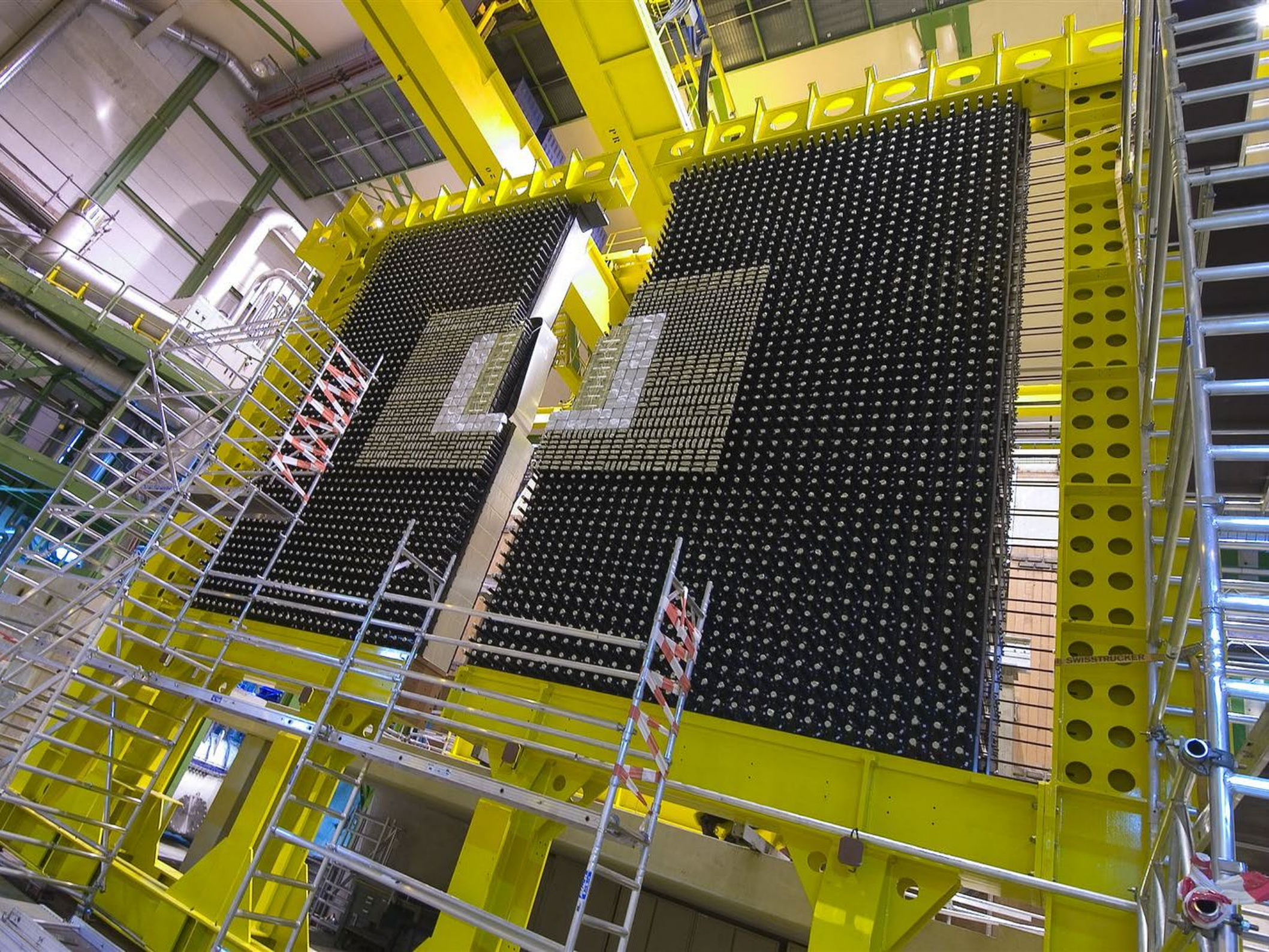




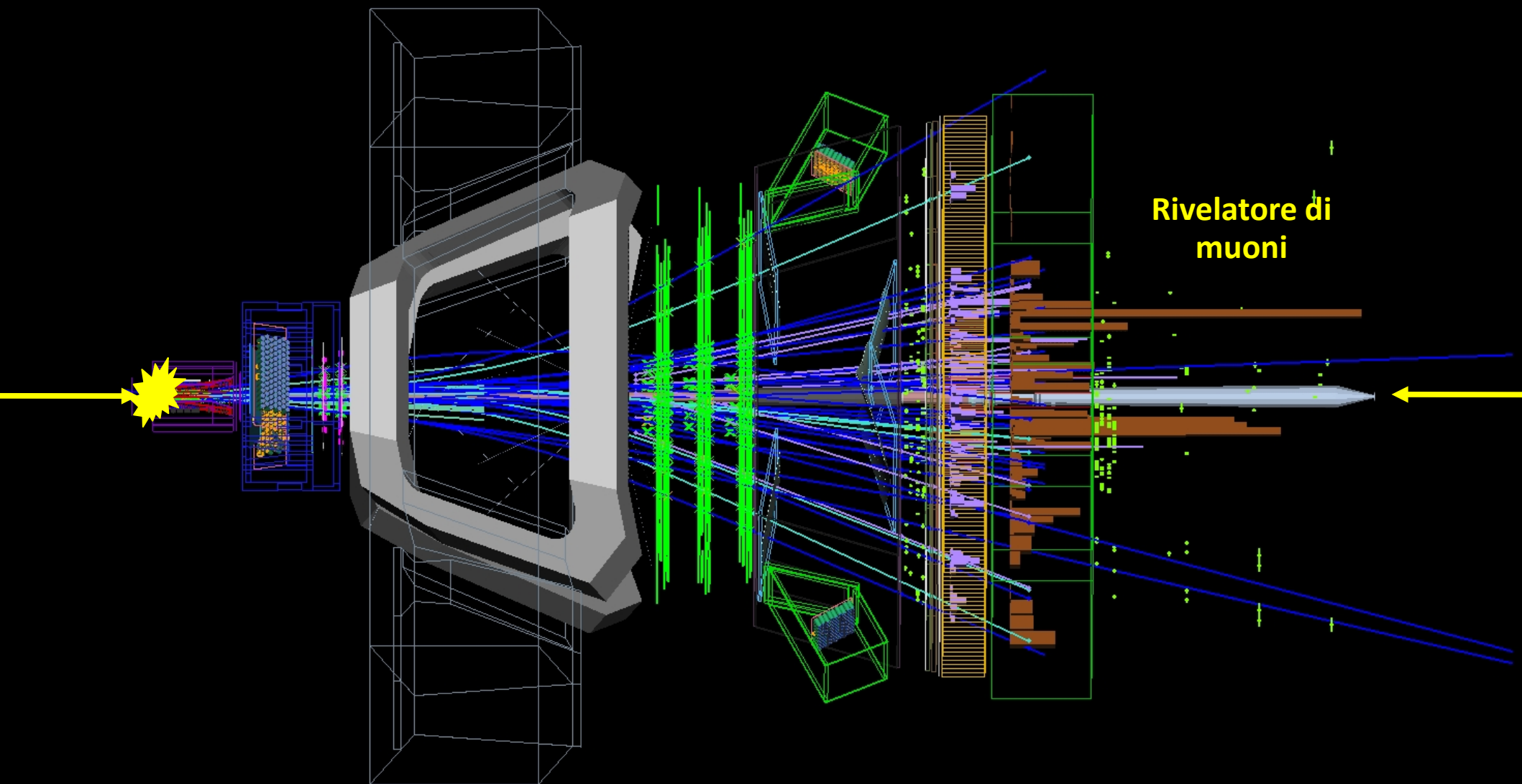


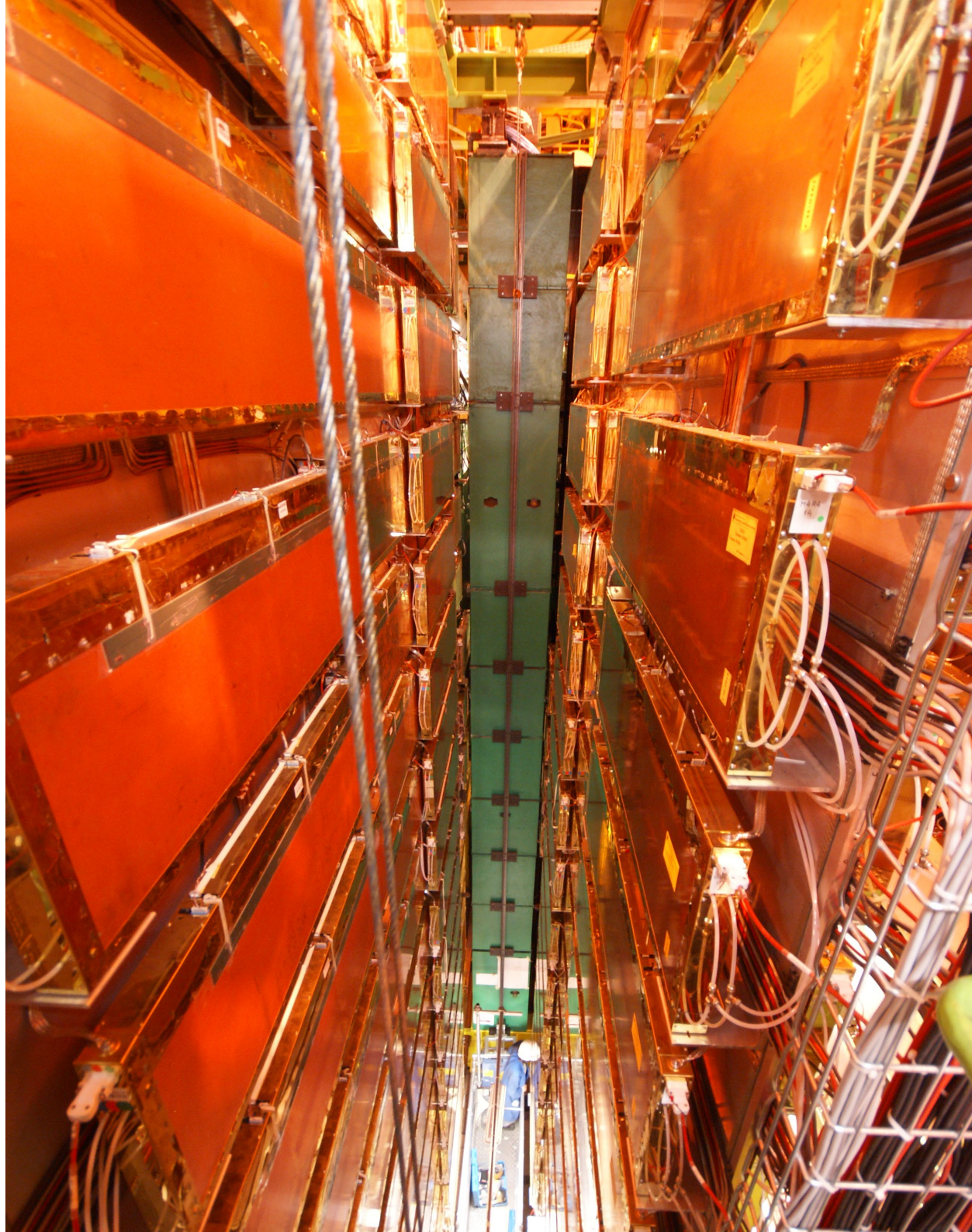
Come vede le particelle il rivelatore LHCb?





Come vede le particelle il rivelatore LHCb?





Esercizi Masterclass

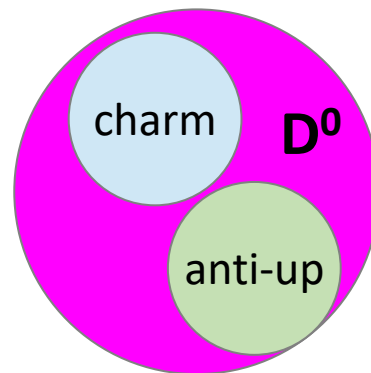
- Negli esercizi che farete userete un **campione di dati raccolti dall'esperimento LHCb** in collisioni p-p all'acceleratore LHC.
- PRIMA PARTE: cercherete la **particella D^0**
- SECONDA PARTE: misurerete una delle proprietà caratteristiche delle particelle: **la vita media**

La particella D^0

- La **particella D^0** è un **mesone** (= adrone composto da quark e anti-quark) prodotto molto copiosamente ad LHC.
- Il D^0 e la sua anti-particella ($\bar{D}^0$) sono importanti per lo **studio delle differenze tra materia e anti-materia**.
 - Il D^0 è un mesone elettricamente neutro che ha la particolarità (come i mesoni K^0 e B^0) di poter “oscillare” nell’anti-mesone prima di decadere.
 - I ricercatori di LHCb studiano le possibili differenze nei decadimenti e nelle “oscillazioni” delle particelle D^0 e anti- D^0 . Si cercano differenze anche molto piccole con studi di alta precisione.

La particella D^0

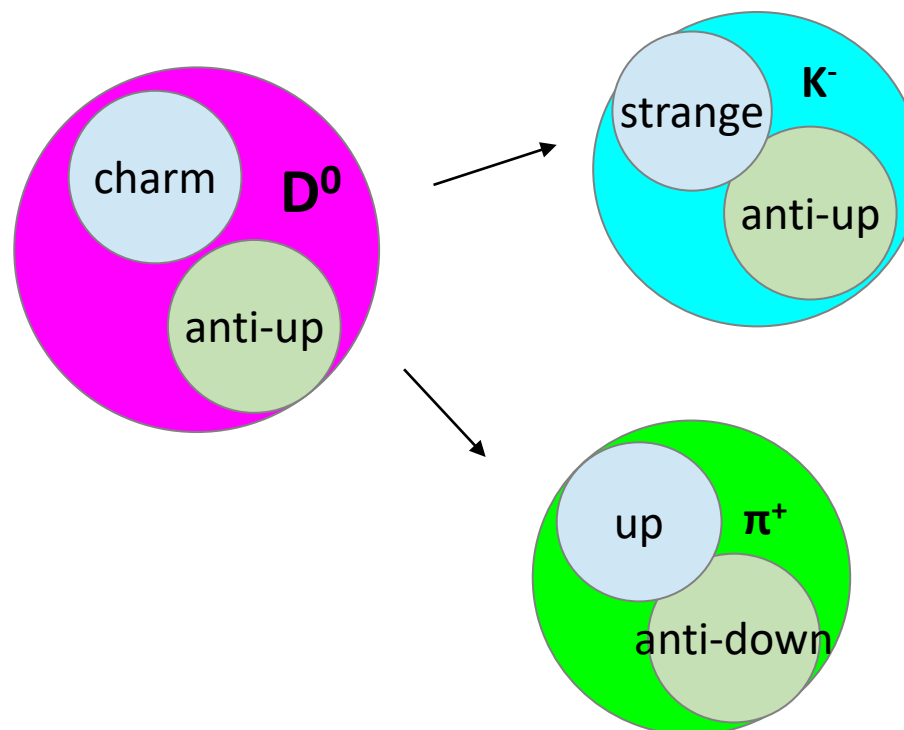
- Il D^0 è composto da un **quark charm e un quark anti-up**.



La particella D^0

- Il D^0 è composto da un **quark charm** e un **quark anti-up**.
- E' una particella instabile: **decade velocemente** in altre particelle più leggere.
- Una delle possibilità di decadimento (tra le innumerevoli): un **kaone** di carica negativa (K^-) e un **pione** di carica positiva (π^+)

$$D^0 \rightarrow K^- \pi^+$$



Per l'anti-particella:

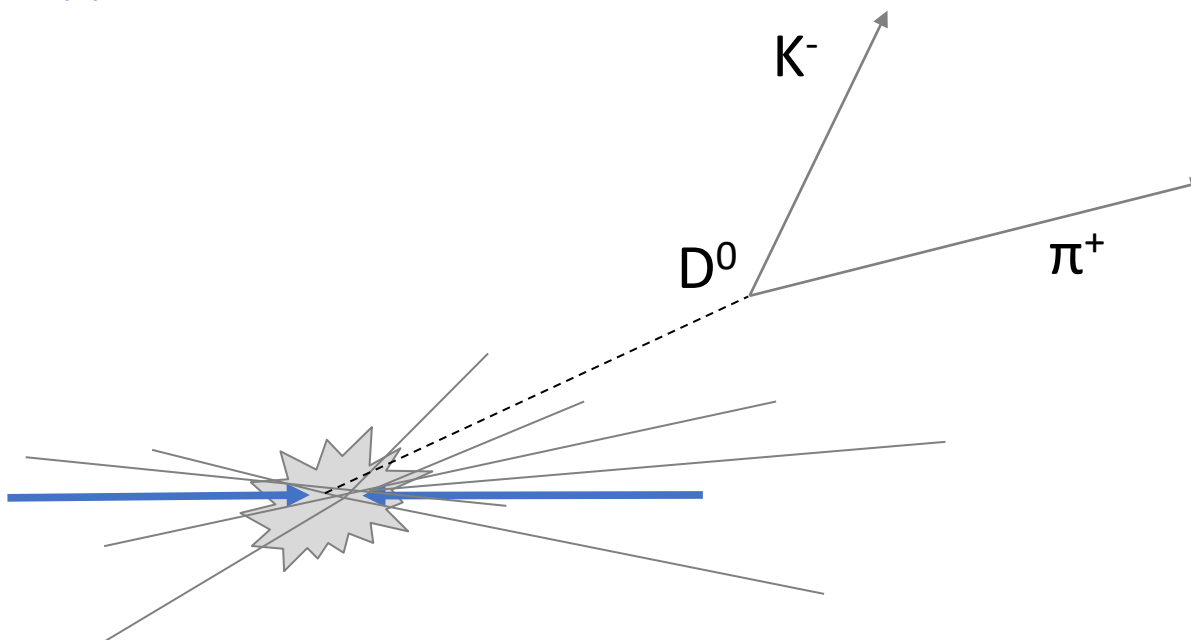
$$\bar{D}^0 \rightarrow K^+ \pi^-$$

Esercizio Masterclass: prima parte

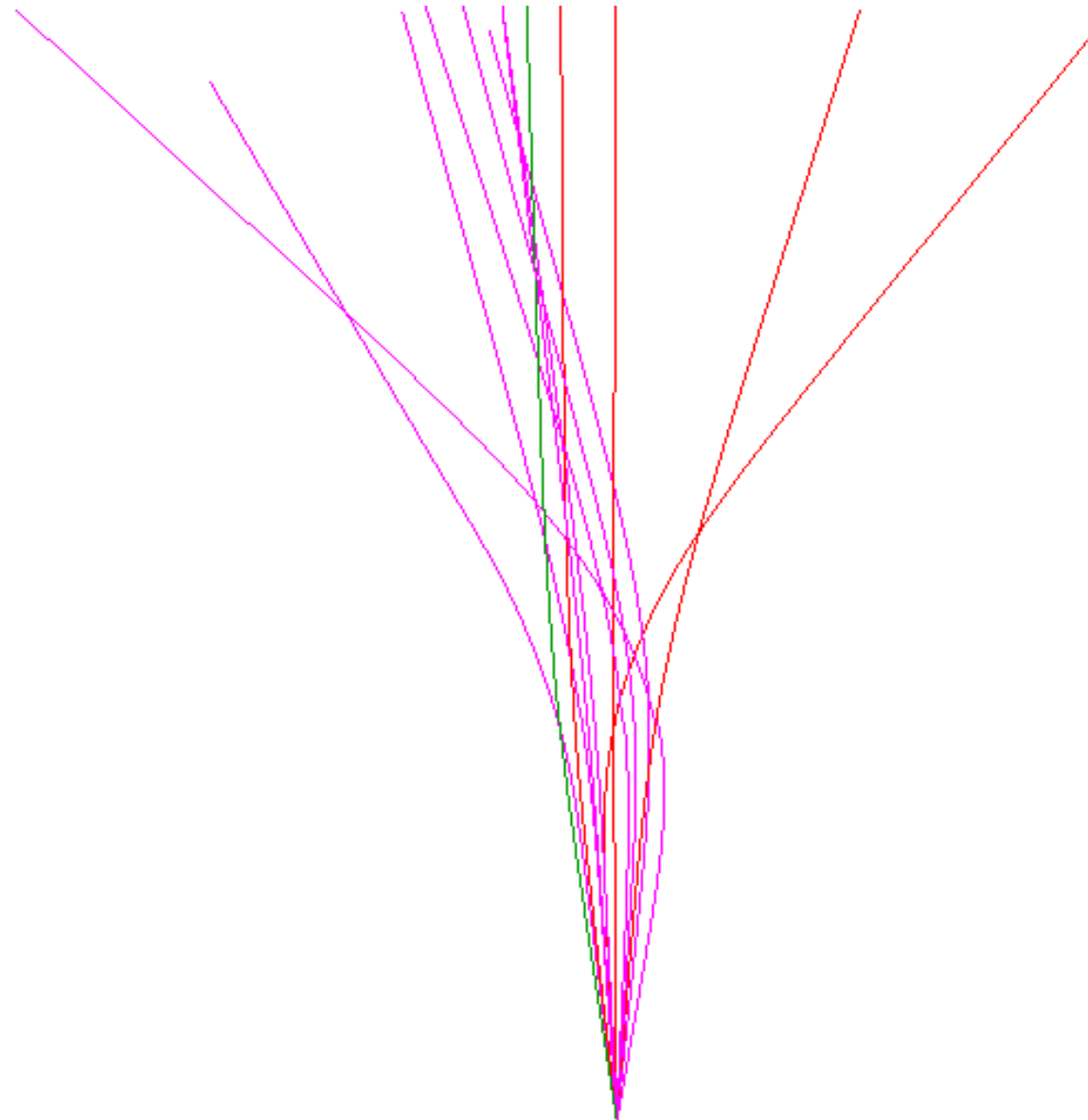
- I dati che userete contengono **eventi** (= collisioni) che sono stati “pre-selezionati” in modo da contenere una particella D^0 con alta probabilità.
- Il vostro compito inizialmente sarà
 - “Ricostruire” i D^0 : **individuare** tra le tracce prodotte in ogni evento quali sono il K^- e il π^+ che formano un D^0
 - Determinare il valore della **massa** della particella ricostruita per poter **distinguere** i **veri** D^0 da quelli **falsi** detti di “fondo”

Ricostruiamo il D^0

- Il D^0 non lascia traccia nel rivelatore, ma **possiamo ricostruirlo e identificarlo se troviamo le tracce delle due particelle kaone e pione in cui è *decaduto* poco dopo esser stato prodotto.**
- Kaone e pione sono carichi e vivono abbastanza a lungo per essere rivelati, misurati e identificati nel rivelatore LHCb.
- Il mesone è elettricamente neutro: **per ricostruirlo dovrò cercare due tracce di carica elettrica opposta: K^- e π^+**



Come si determina la carica elettrica di una particella?



Come si determina la carica elettrica di una particella?

Con un campo magnetico!

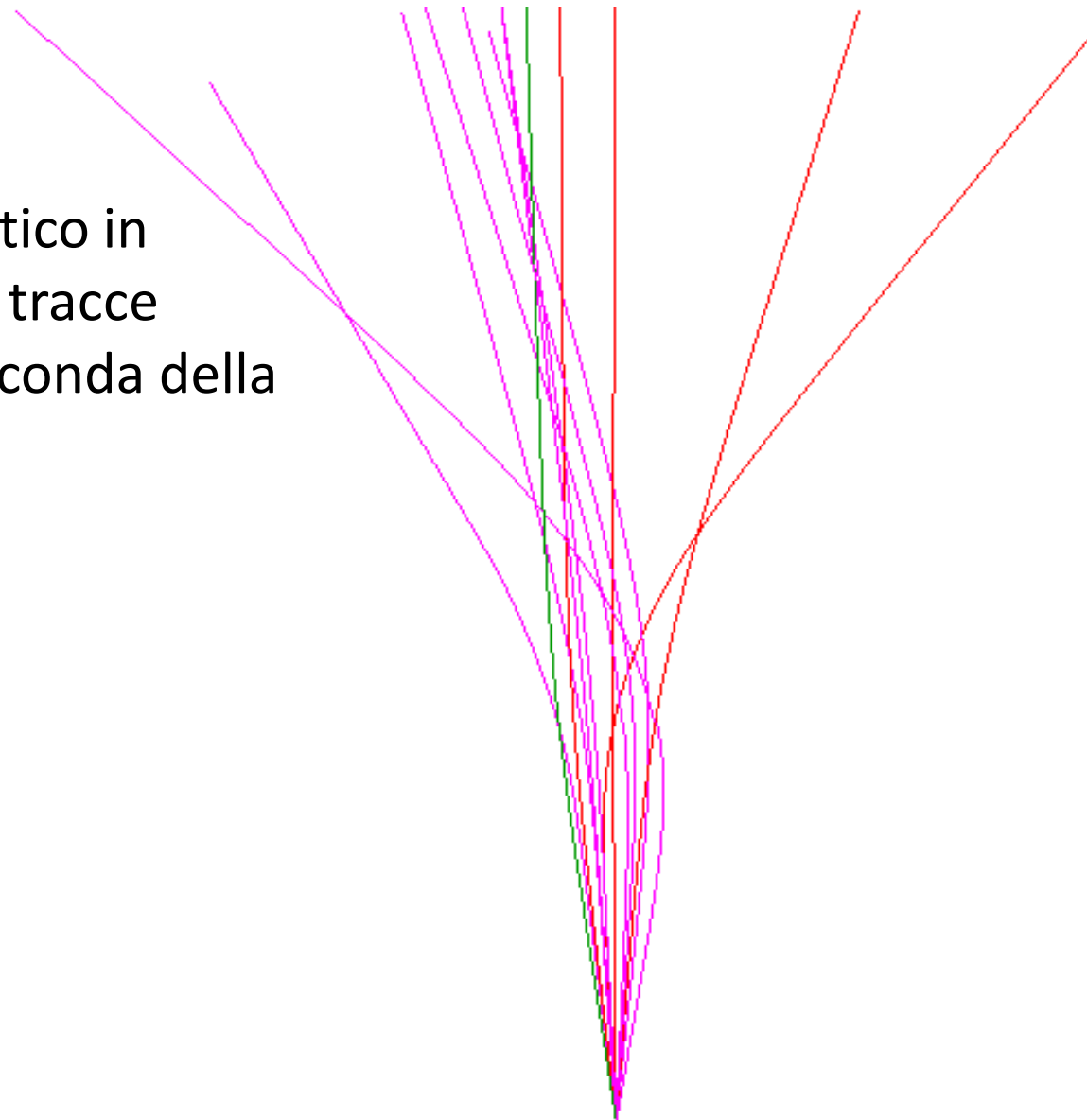
- Se è presente un campo magnetico in direzione entrante nel foglio: le tracce curvano a destra o sinistra, a seconda della carica della particella
- Particelle con carica positiva o negativa curvano in direzione opposta:

Forza di Lorentz: $\mathbf{F} = q (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$

q = carica

$\mathbf{v}$ = velocità

$\mathbf{B}$ = campo magnetico



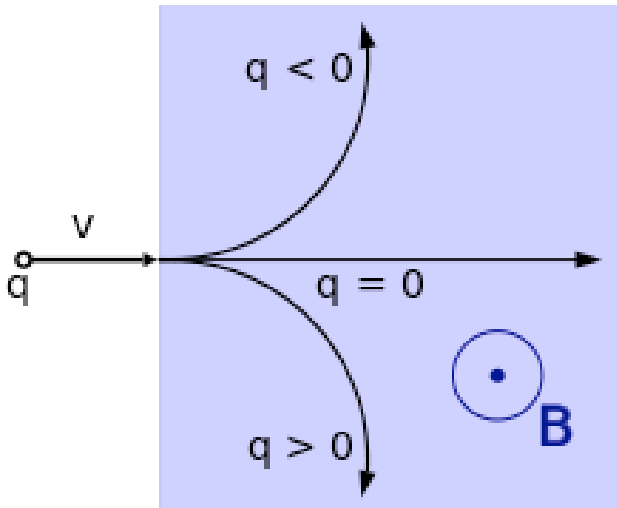
Curvatura in campo magnetico

- La curvatura della traiettoria nel campo magnetico permette di ricavare la quantità di moto della particella:

$$R = \frac{mv}{qB}$$

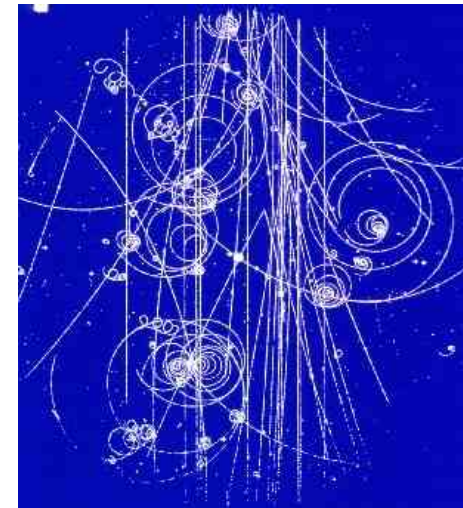
Una particella con velocità v e massa m , carica q , in un campo magnetico B costante, percorre una traiettoria circolare di raggio R

- Se si ricostruisce la traiettoria della particella e si misura il suo raggio R si può ricavare la quantità di moto $p = mv$ (detta anche **momento**)



Grande raggio
→ grande momento

Piccolo raggio
→ piccolo momento



Energia e massa di una particella

- In fisica classica

il momento di una particella e l'energia cinetica sono legati alla massa e alla velocità dalle relazioni

$$p = m v$$

$$E = \frac{1}{2} m v^2$$

- La relatività ristretta ci dice che per particelle che viaggiano a velocità prossima a quella della luce vale

$$E^2 = p^2 c^2 + (m c^2)^2$$

Da cui possiamo ricavare: $(m c^2)^2 = E^2 - p^2 c^2$

→ Posso calcolare la massa della particella dalla misura della sua energia e del suo momento

Energia e massa di una particella

- Il momento e l'energia del D^0 sono dati dalla **somma dei valori misurati per i suoi prodotti di decadimento**: kaone e pione

$$\vec{p}_{D^0} = \vec{p}_K + \vec{p}_\pi$$

$$E_{D^0} = E_K + E_\pi$$

In conclusione:

- Trovati il kaone e il pione che formano il D^0 e misurati i loro momenti ed energie, si possono ricavare momento, energia e quindi massa del D^0

$$(mc^2)^2 = E^2 - p^2c^2 \rightarrow m^2c^2 = E^2/c^2 - p^2$$

$$m_{D^0}c = \sqrt{\frac{E_{D^0}^2}{c^2} - p_{D^0}^2}$$

Esercizio Masterclass: prima parte

Dovrete individuare le due tracce
che compongono un D^0

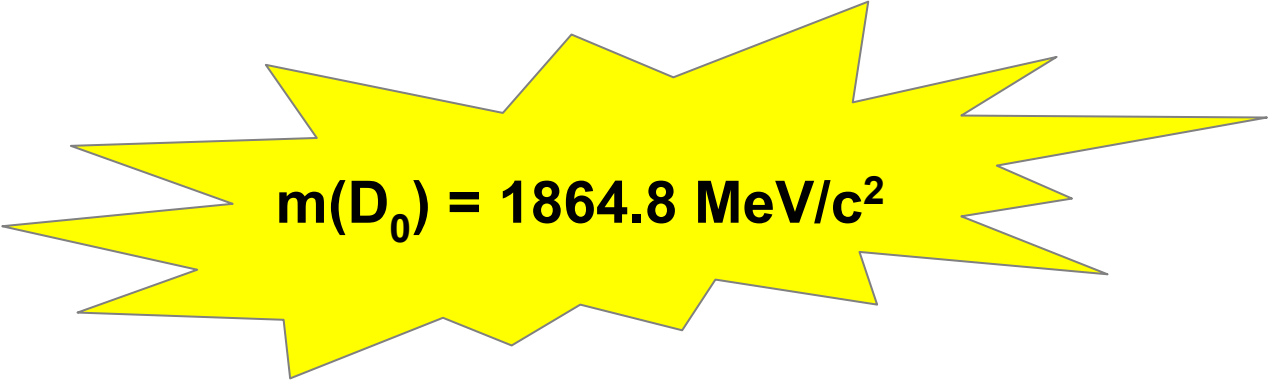
- ✓ un kaone e un pione
- ✓ di carica elettrica opposta
- ✓ la massa della particella
composta deve risultare uguale
a quella della particella D^0

Il programma calcolerà
per voi la massa della
particella composta ☺

.... proprio uguale??

La massa del D^0

La misura della massa della particella D^0 effettuata da diversi esperimenti è


$$m(D_0) = 1864.8 \text{ MeV}/c^2$$

Questo è quello che mi aspetto di trovare per veri D^0

Ma

- La ricostruzione delle tracce e la misura del loro momento non è perfetta: ci sono **incertezze di misura** che si riflettono in variazioni del valore della massa ottenuto in ciascuna misura rispetto quello vero.
- Non tutti i D^0 ricostruiti sono veri e per quelli falsi (combinazioni di due tracce di altra provenienza), detti di **“fondo”**, il valore della massa è casuale.

→ Troverete una *distribuzione* di valori per le masse dei D^0 ricostruiti

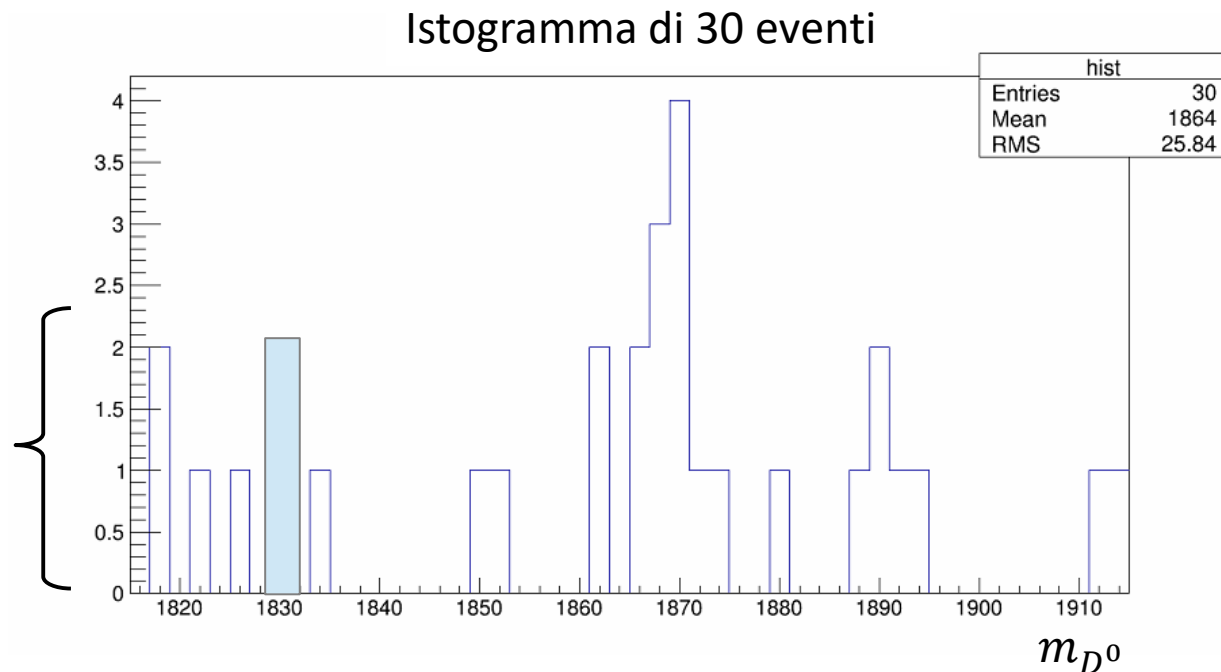
Una parentesi: come rappresentiamo i risultati delle misure? Gli istogrammi

Supponiamo di avere misurato più volte una grandezza X .

Un modo conveniente per rappresentare i valori ottenuti è l'**istogramma**.

Istogramma dei valori misurati per la massa del D^0

Altezza dei rettangoli = numero di D^0 misurati per ciascun valore della massa



Il valore centrale dell'istogramma, per un numero sufficientemente elevato di misure dovrebbe corrispondere al valore vero della massa del D^0 .

Esercizio Masterclass: prima parte

Loggarsi nel PC

Clic su "Testo e Consegna" e poi su cartella TESTO

Aprire «ESERCIZI_MASTERCLASS.htm»

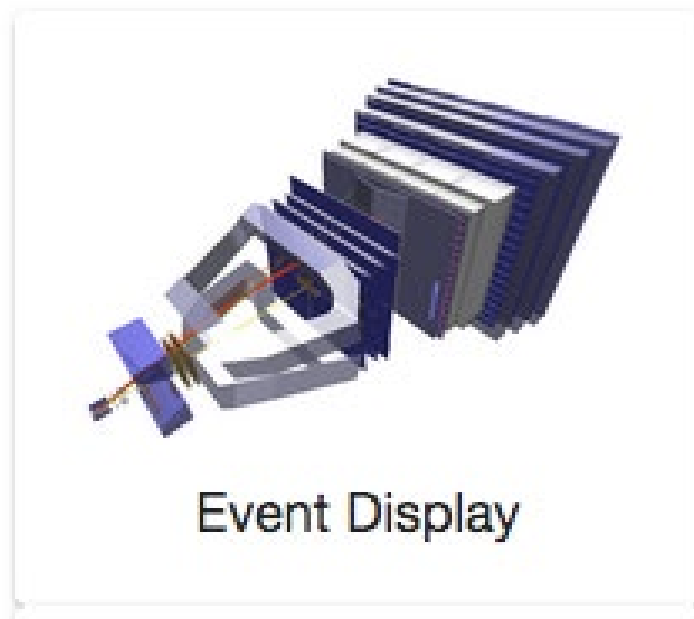
Collegarsi a <https://lhcb-d0.web.cern.ch/>

Inserire i propri dati

Scegliere la combinazione

Cliccare Save

Scegliere il primo esercizio



Event Display Exercise

*Puoi zoomare,
cambiare vista,
ruotare,
togliere/mettere il rivelatore*

Event
handler
event_1_0.json

previous

next

View

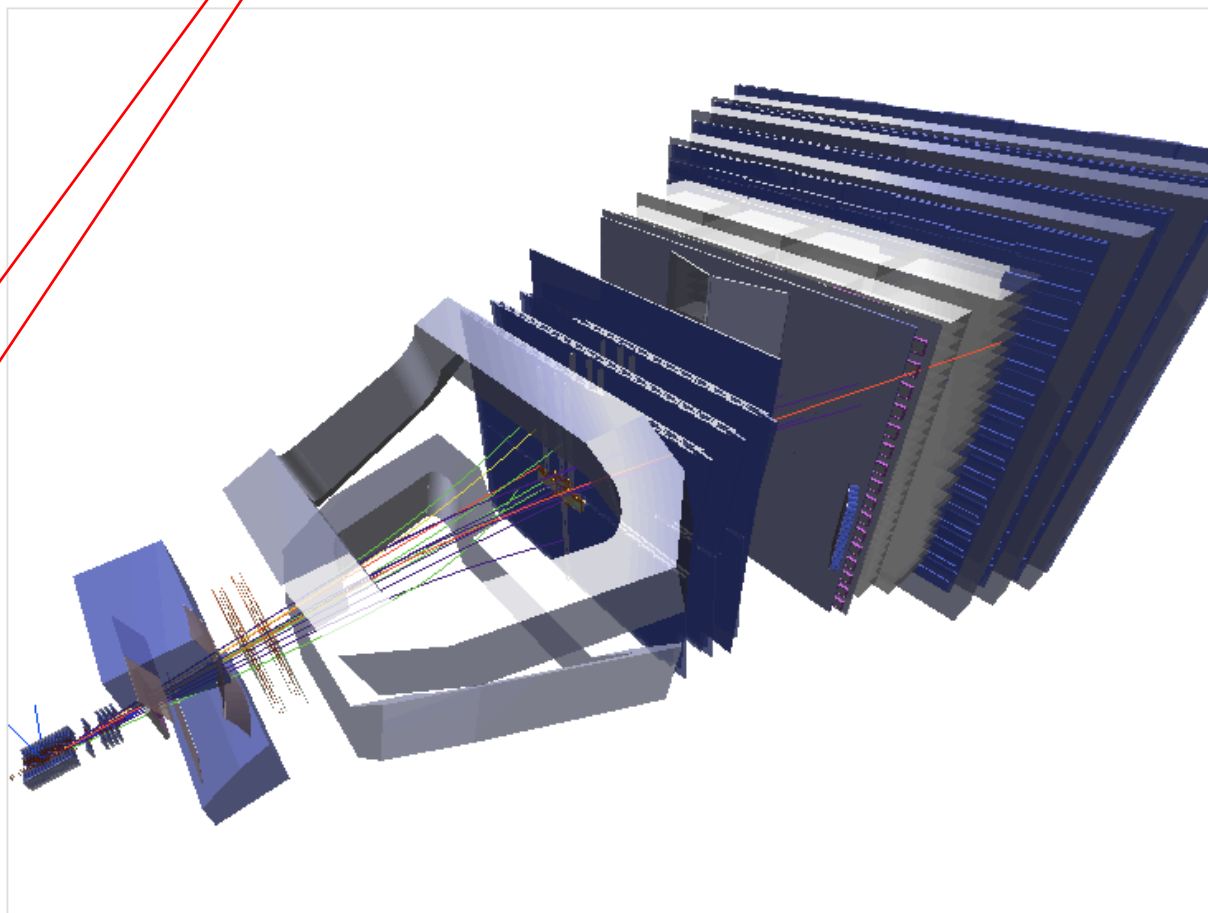
☐ Zoom
☒ Detector
☐ Help

View

☐ Auto rotate

Legend

K⁻ —
K⁺ —
pi⁺ —
pi⁻ —
D⁰ —



Particle information

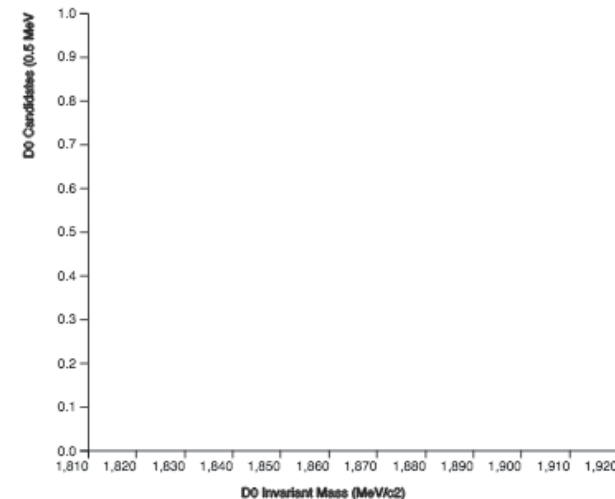
E 4555.439 MeV
chi2 0.775
ipchi2 5.767
mass 139.570 MeV/c²
name pi+
ZFstM 94.103

My particles

Mass

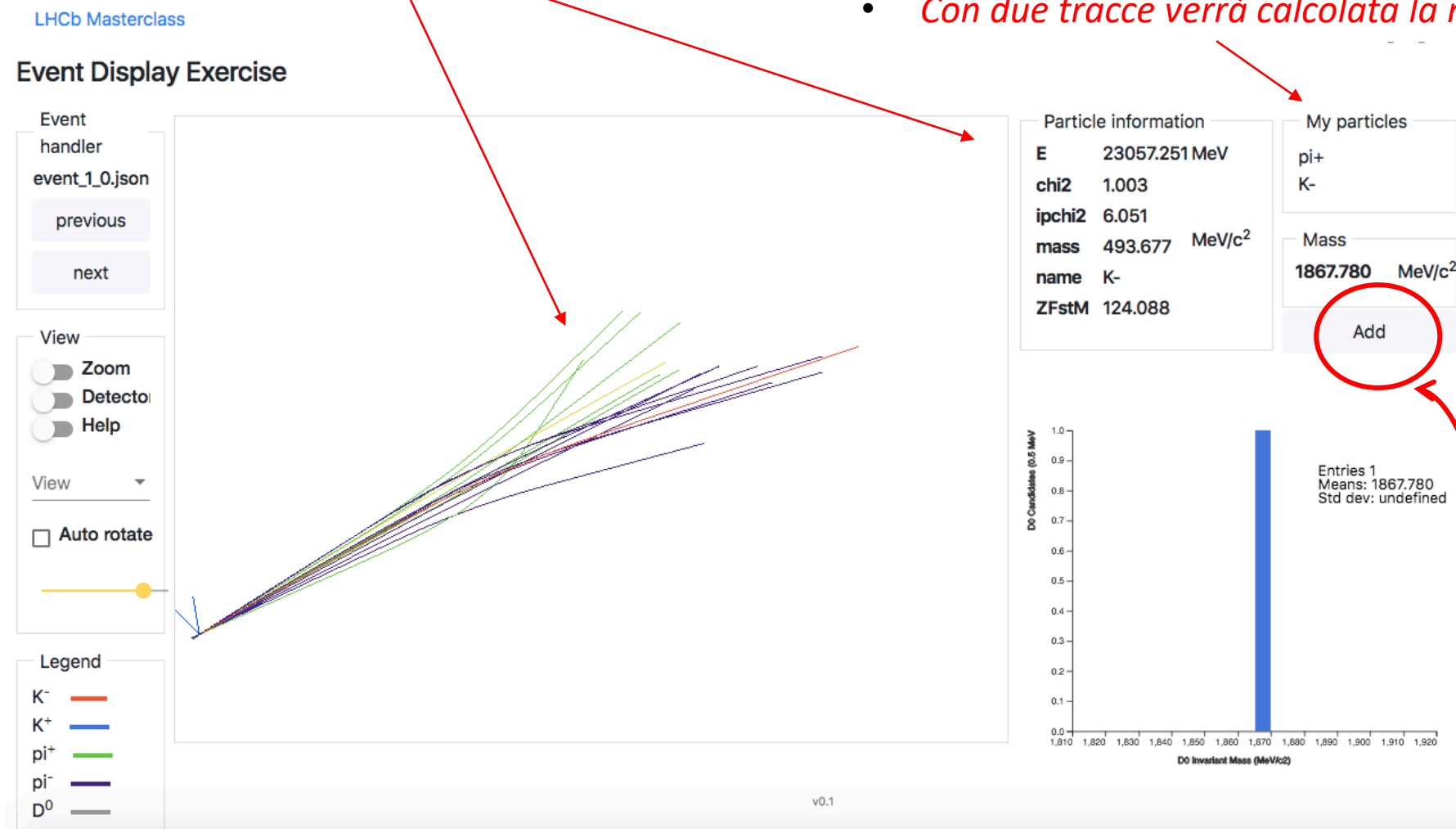
MeV/c²

Add



Posizionando il mouse su una traccia, ne scoprirai le caratteristiche principali.

- *Cliccandoci sopra la selezionerai*
- *Con due tracce verrà calcolata la massa*



Ripeti l'operazione per i 30 eventi del tuo campione e salva l'istogramma complessivo.

Puoi inserire nell'istogramma la combinazione di due tracce cliccando Add.

Esempio di zoom

Event Display Exercise

Event handler
event_32_4.json

previous

next

View

☒ Zoom
☐ Detector
☐ Help

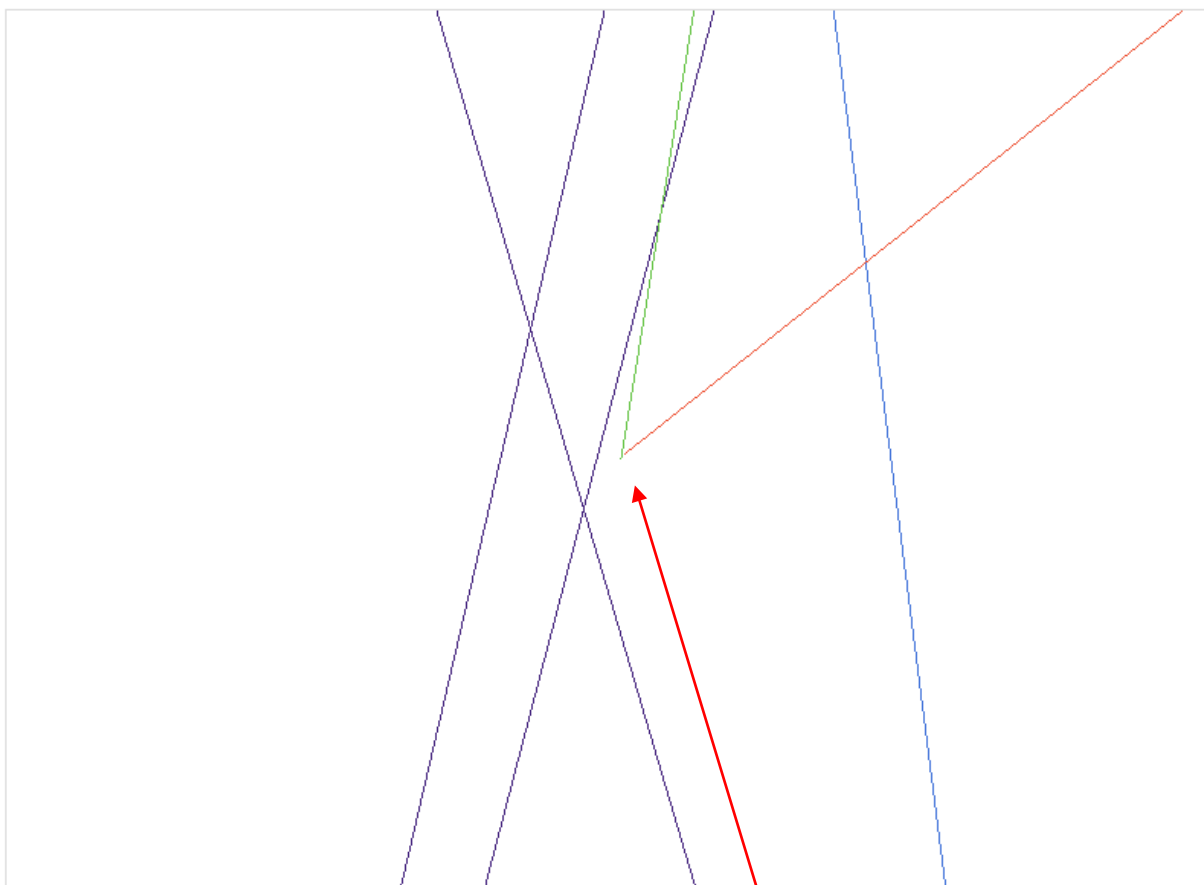
View

Perspective ▾

☐ Auto rotate

Legend

K⁻ —
K⁺ —
pi⁺ —
pi⁻ —



Particle information

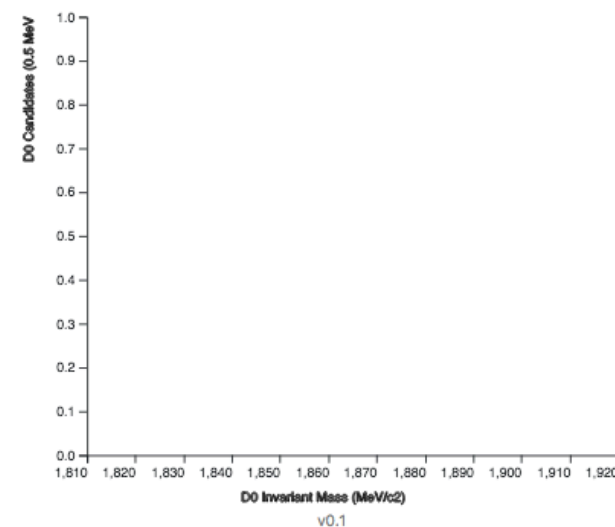
E MeV
chi2
ipchi2
mass MeV/c²
name
ZFstM

My particles

Mass

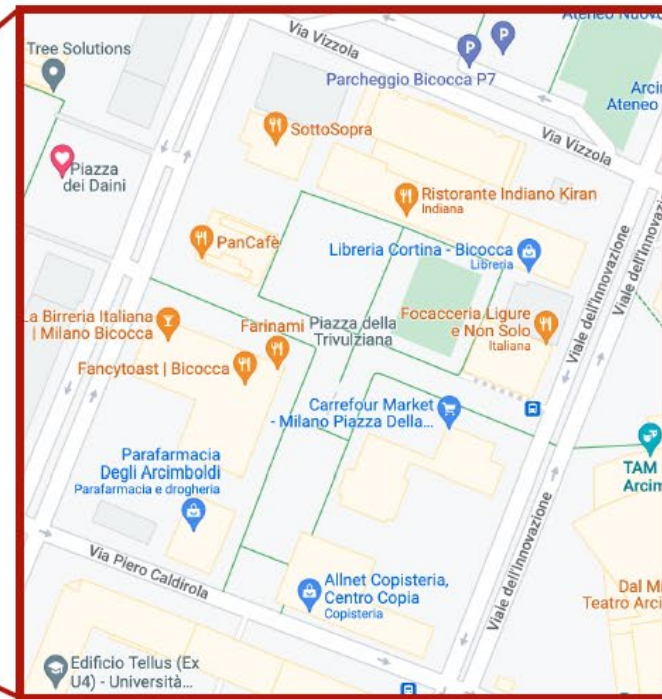
MeV/c²

Add



Vertice delle due tracce

Suggerimenti per il pranzo



Dopo pranzo:
**Ritrovo in
U9-06**

Esercizio Masterclass: prima parte

LAB907

IIS Schiaparelli Gramsci – Milano

Mapelli di Monza

Liceo A. Banfi di Vimercate

IIS Carlo Emilio Gadda Paderno Dugnano

Liceo Scientifico e Musicale G.B.Grassi Lecco

Liceo "Da Vinci - Pascoli"

IIS Severi Correnti Milano

LAB908

IIS Curie Sraffa, Milano

Liceo Statale G.B. Vico (Corsico - MI)

Liceo Scientifico statale Paolo Frisi

Liceo Scientifico di Stato "A. Calini"

ITAS "Giulio Natta"

Istituto "Lorenzo Rota"

Dopo pranzo:

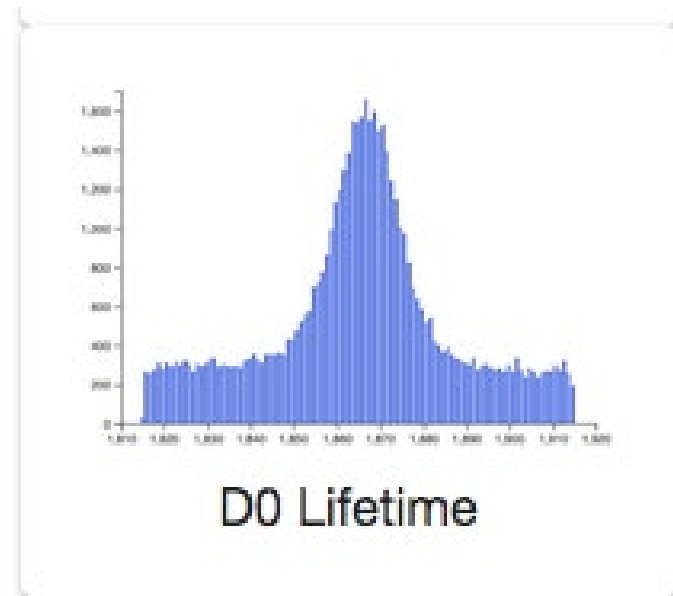
Ritrovo in

U9-06

Pausa pranzo

Esercizio Masterclass: seconda parte

Misura della vita media della particella D^0

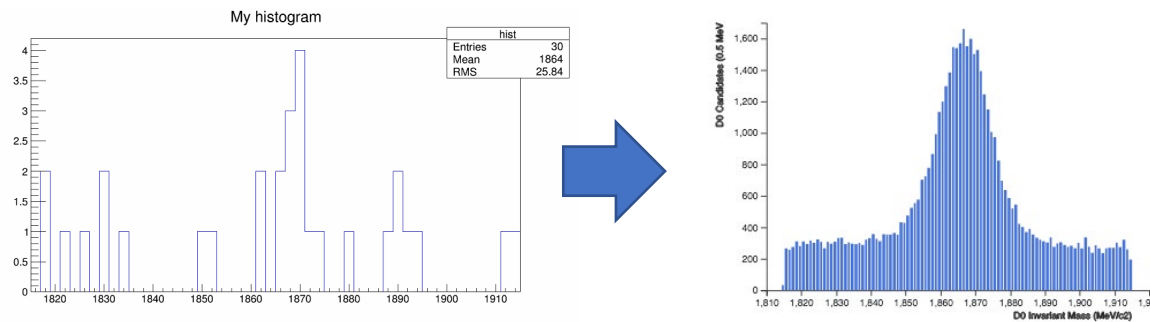


SCOPO:

- **Misurare** la **vita media della particella D^0** interpolando la distribuzione dei **tempi di decadimento** dei veri D^0 ricostruiti

Segnale e Fondo

- In questo secondo esercizio utilizzerete un **campione di dati molto più ampio** del precedente, pre-selezionato in modo da contenere un numero elevato di particelle D^0 .



- Poiché solo in una piccola frazione delle collisioni protone-protone registrate da LHCb vengono prodotti dei D^0 , nel campione sono presenti anche “falsi D^0 ” = combinazioni di tracce che non provengono dal D^0 ma che per caso danno un valore della massa vicino a quella del D^0
- Chiamiamo:
Particella che stiamo cercando → **SEGNALE**
Tutto il resto → **FONDO**

Come distinguere segnale e fondo?

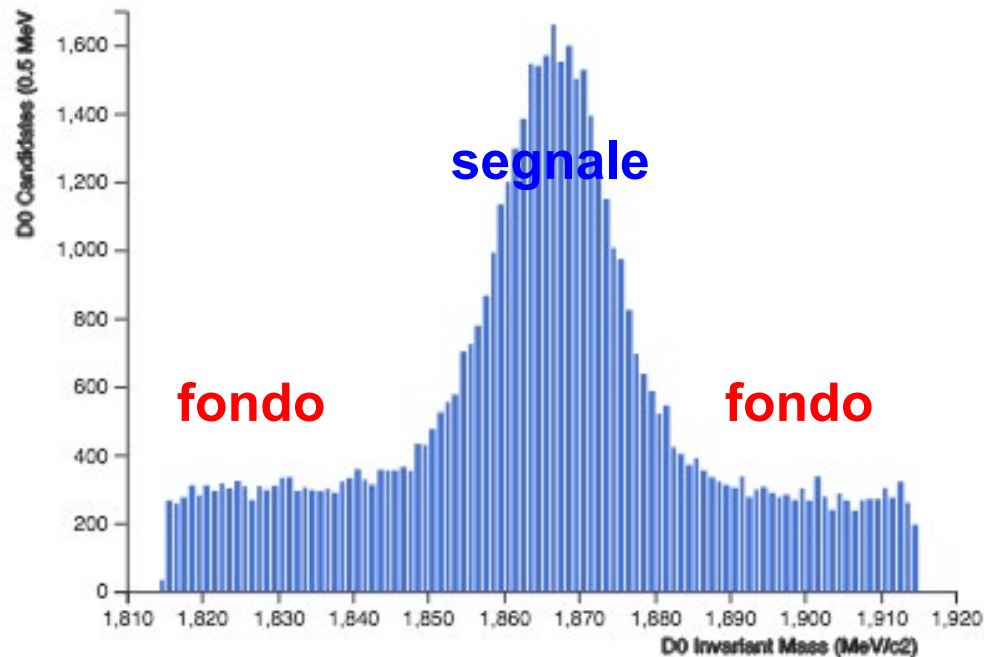
Utilizzo la distribuzione delle masse misurate per **sottrarre in modo “statistico”** gli eventi di fondo rimasti nel campione

Posso anche migliorare la selezione con opportuni «tagli», ovvero tenendo solo i D^0 che hanno le proprietà tipiche dei veri D^0 . Devo quindi aggiungere delle richieste sulle proprietà che hanno i candidati D^0

In questo esercizio potrete considerare quattro grandezze:

- La massa
- Il momento trasverso (p_T)
- Il parametro di impatto (IP)
- Il tempo di decadimento (t)

Distribuzione di massa

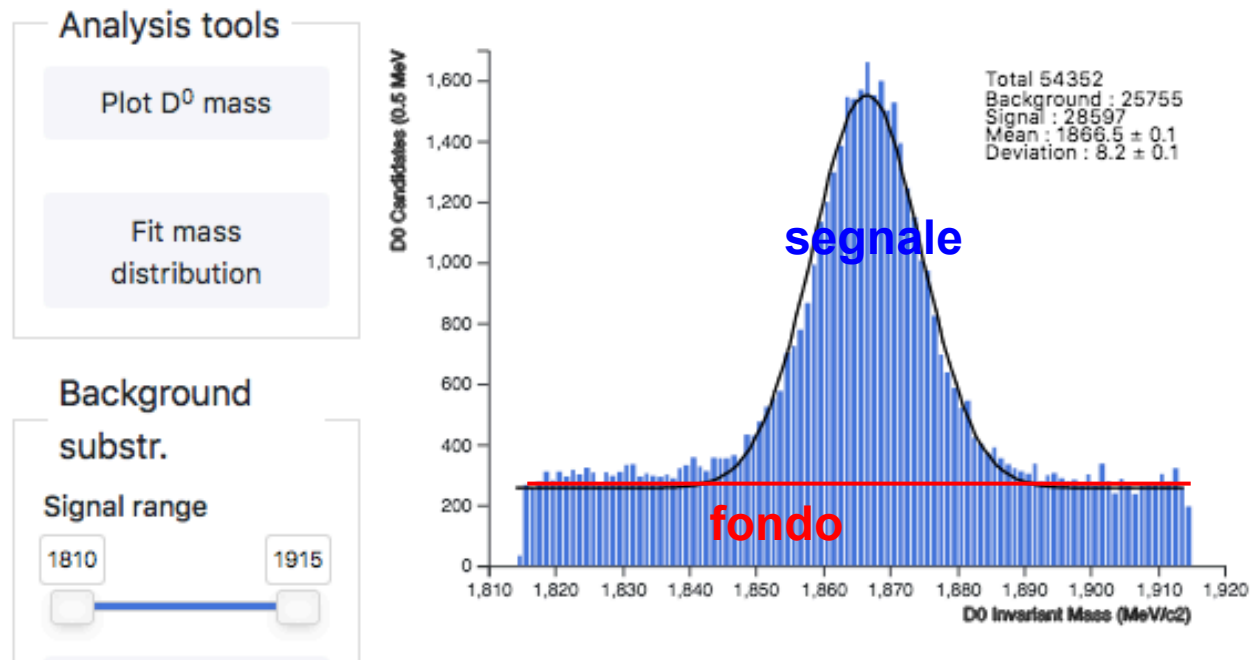


- La massa ricostruita per gli eventi di **segnale** ha valori più vicini al valore vero. L'insieme degli eventi di segnale costituisce pertanto “un picco” centrato sul valore vero.
- Gli eventi di **fondo** derivano da combinazioni casuali di tracce, la massa ricostruita può assumere qualsiasi valore, la sua distribuzione è piatta, uniforme.

La sovrapposizione dei due contributi determina la distribuzione osservata.

Interpolazione (fit) della distribuzione di massa

D⁰ lifetime Exercise



- La distribuzione di massa viene interpolata con due curve che rappresentano il **segnale** (funzione Gaussiana) e il **fondo** (una retta)
- Il candidati di segnale possono essere studiati “sottraendo” nelle loro distribuzioni (istogrammi) i candidati di fondo

D⁰ lifetime Exercise

Analysis tools

1

Plot D⁰ mass

2

Fit mass distribution

Background substr.

Signal range

1810

1915

Plot distributions

Variable range

D⁰ PT

2.5

20

D⁰ TAU

0

10

D⁰ IP

-4

1.5

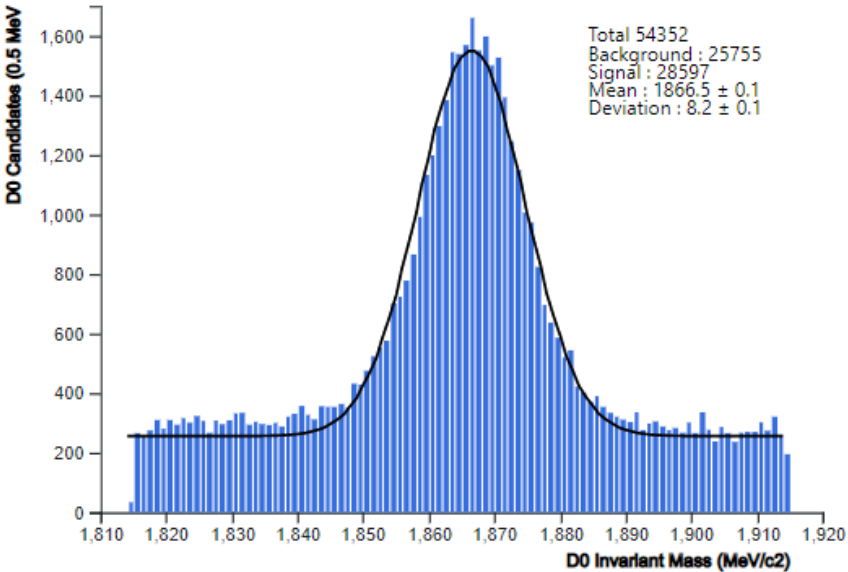
Refresh

Time fit

Fit result (ps) Fit Error

Save result

Read instructions



D⁰ lifetime Exercise

Analysis tools

Plot D⁰ mass

Fit mass distribution

Background substr.

Signal range

3

1842

1891

4 Plot distributions

Variable range

D⁰ PT

2.5

20

D⁰ TAU

0

10

D⁰ IP

-4

1.5

Refresh

Time fit

Fit result (ps)

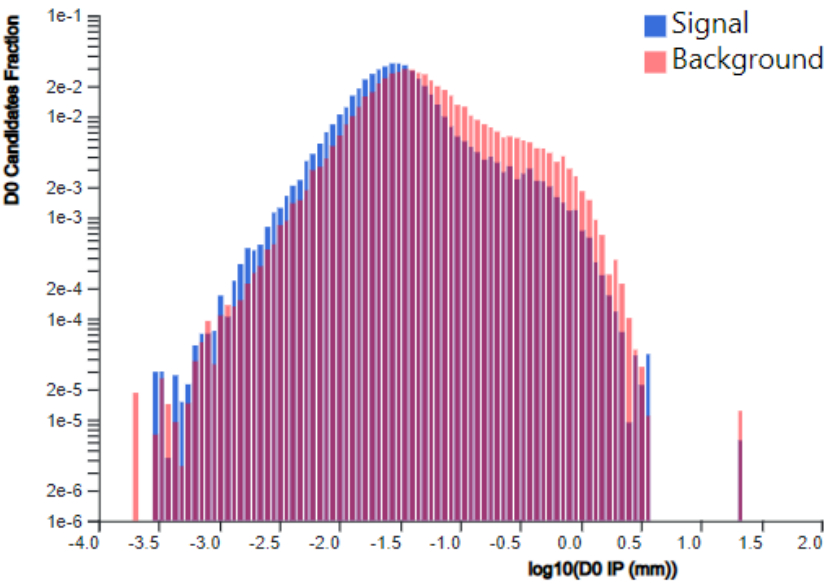
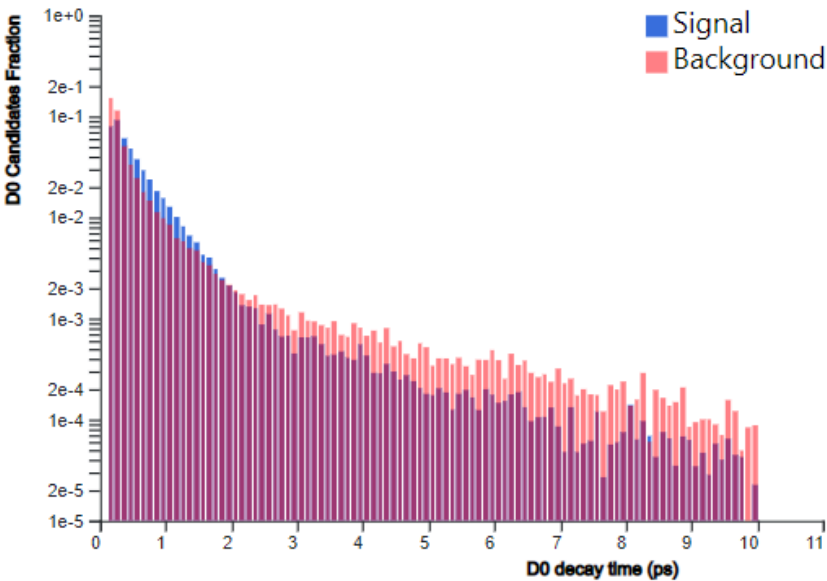
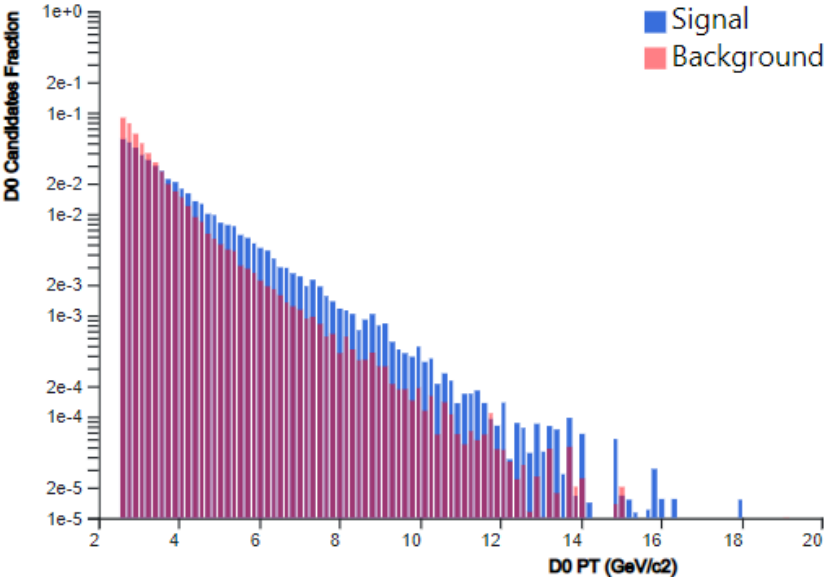
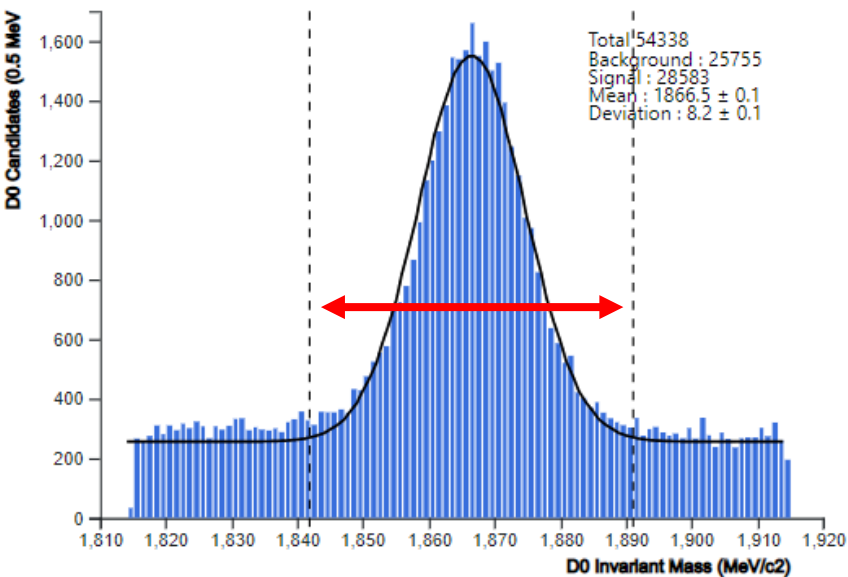
0.480

Fit Error

0.0039

5 Save result

Read instructions



D⁰ lifetime Exercise

Analysis tools

Plot D⁰ mass

Fit mass distribution

Background substr.

Signal range

1842

1891

Plot distributions

Variable range

D⁰ PT

2.5

20

D⁰ TAU

0

10

D⁰ IP

-4

1.5

6

7

Refresh

Time fit

Fit result (ps)

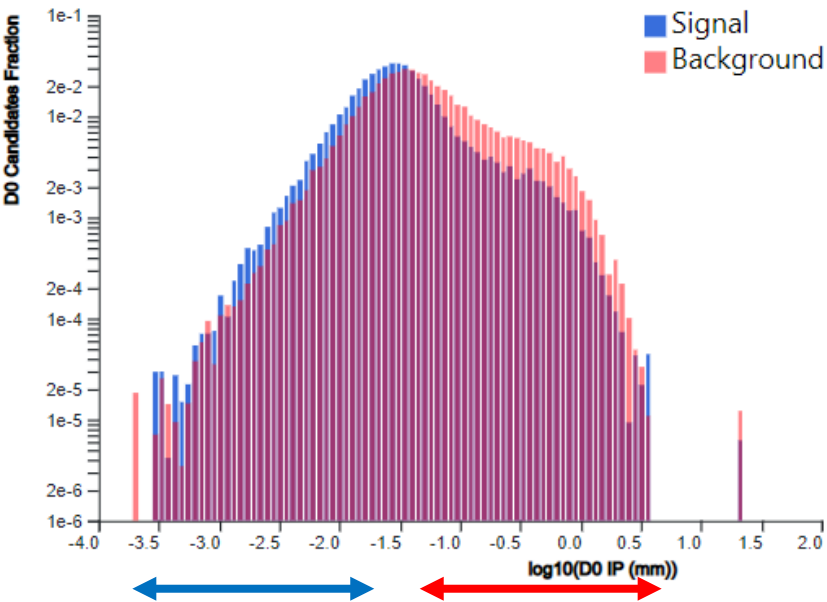
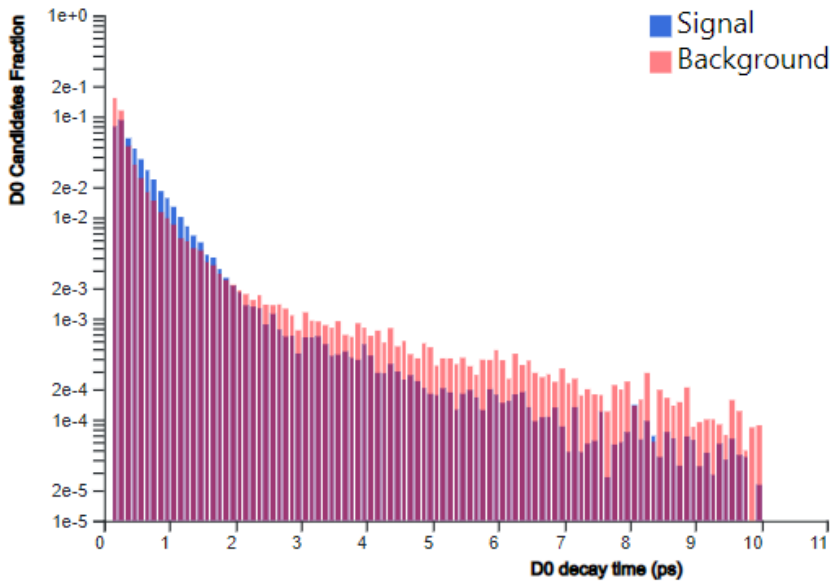
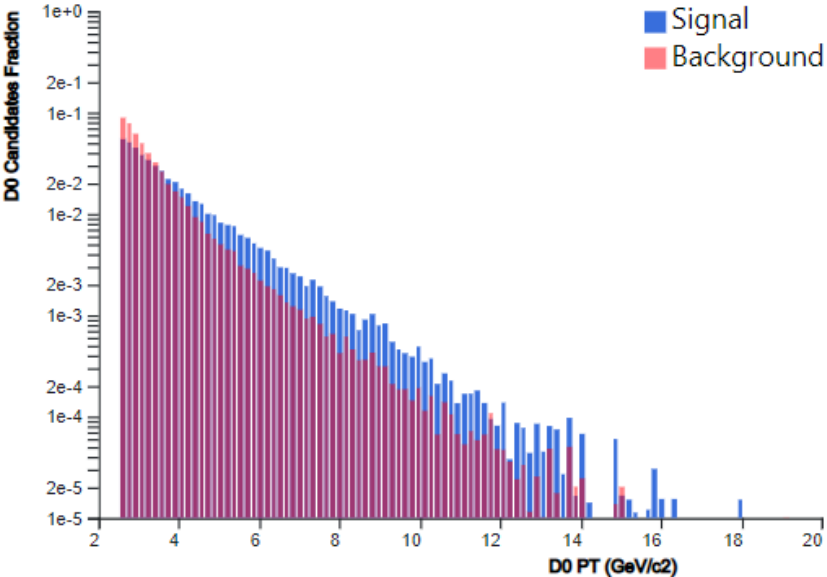
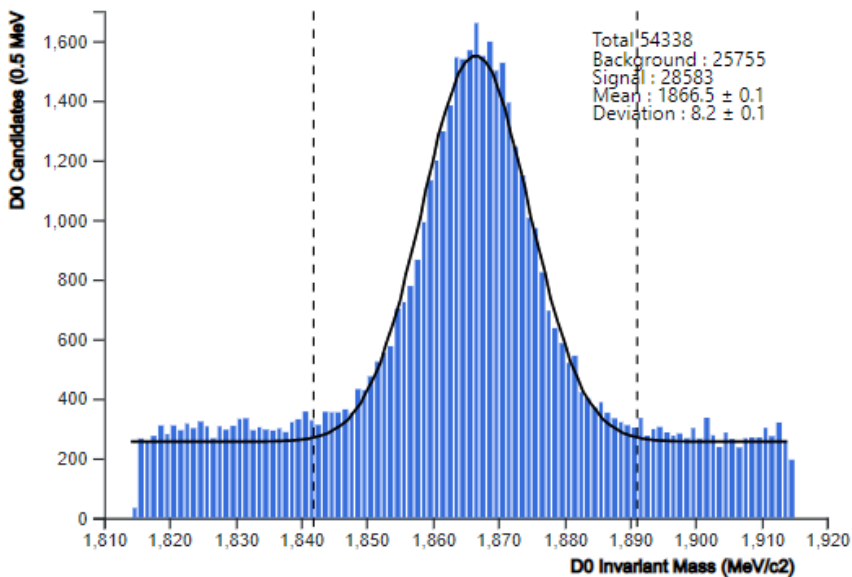
0.480

Fit Error

0.0039

Save result

Read instructions



D⁰ lifetime Exercise

Analysis tools

Plot D⁰ mass

Fit mass distribution

Background substr.

Signal range

1842

1891

Plot distributions

Variable range

D⁰ PT

2.5

20

D⁰ TAU

0

10

D⁰ IP

-4

-1.02

Refresh

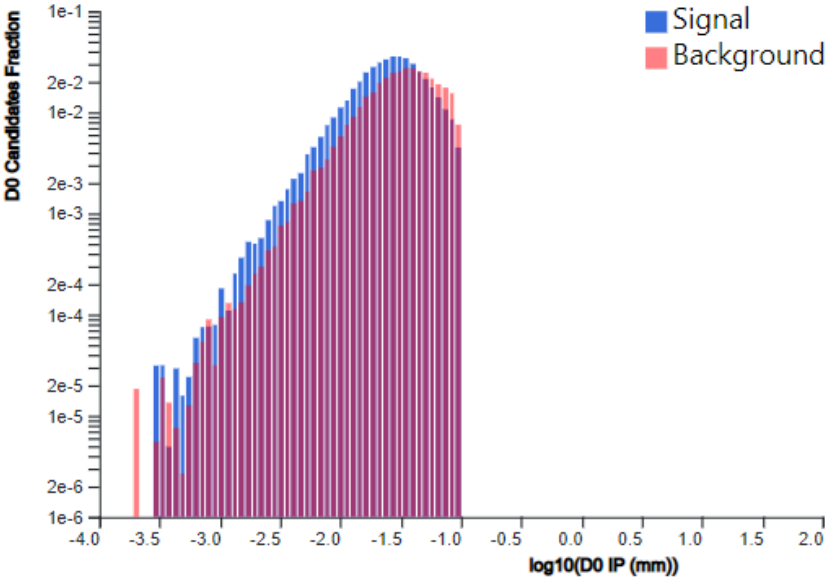
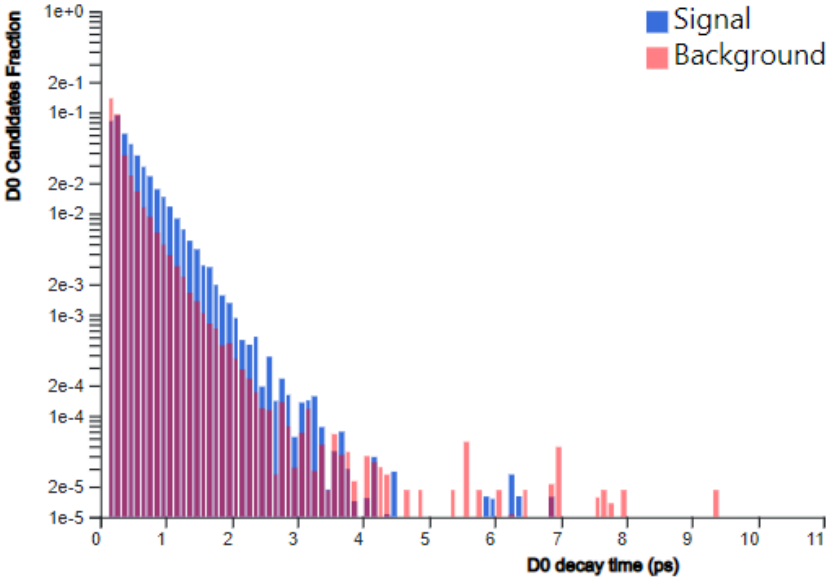
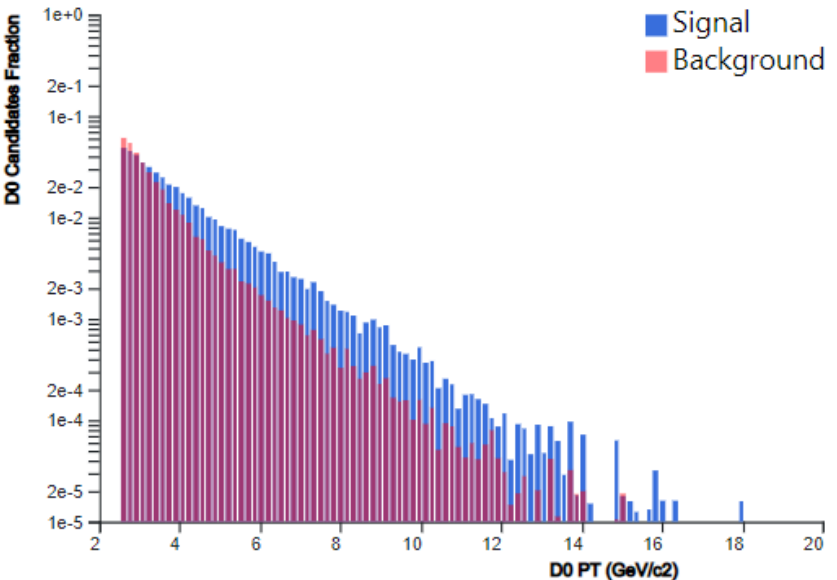
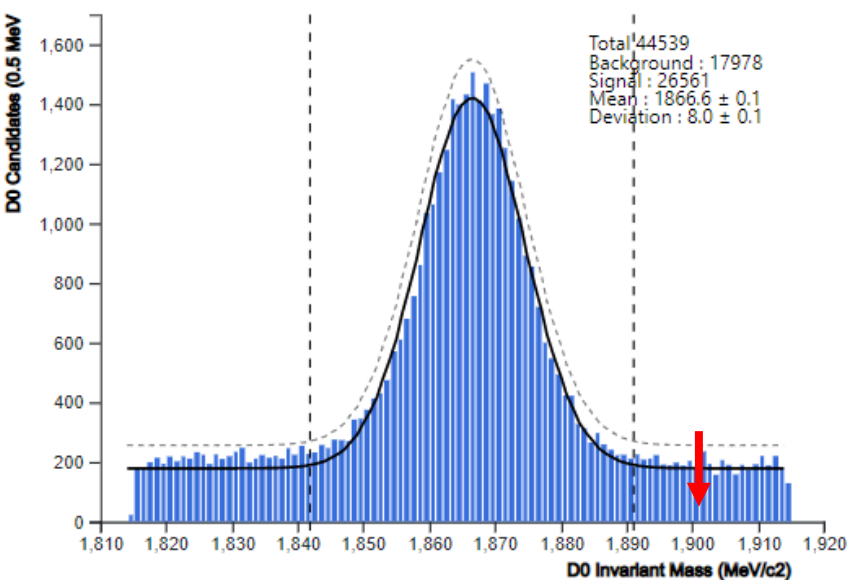
Time fit

Fit result (ps) Fit Error0.0032
0.419

8

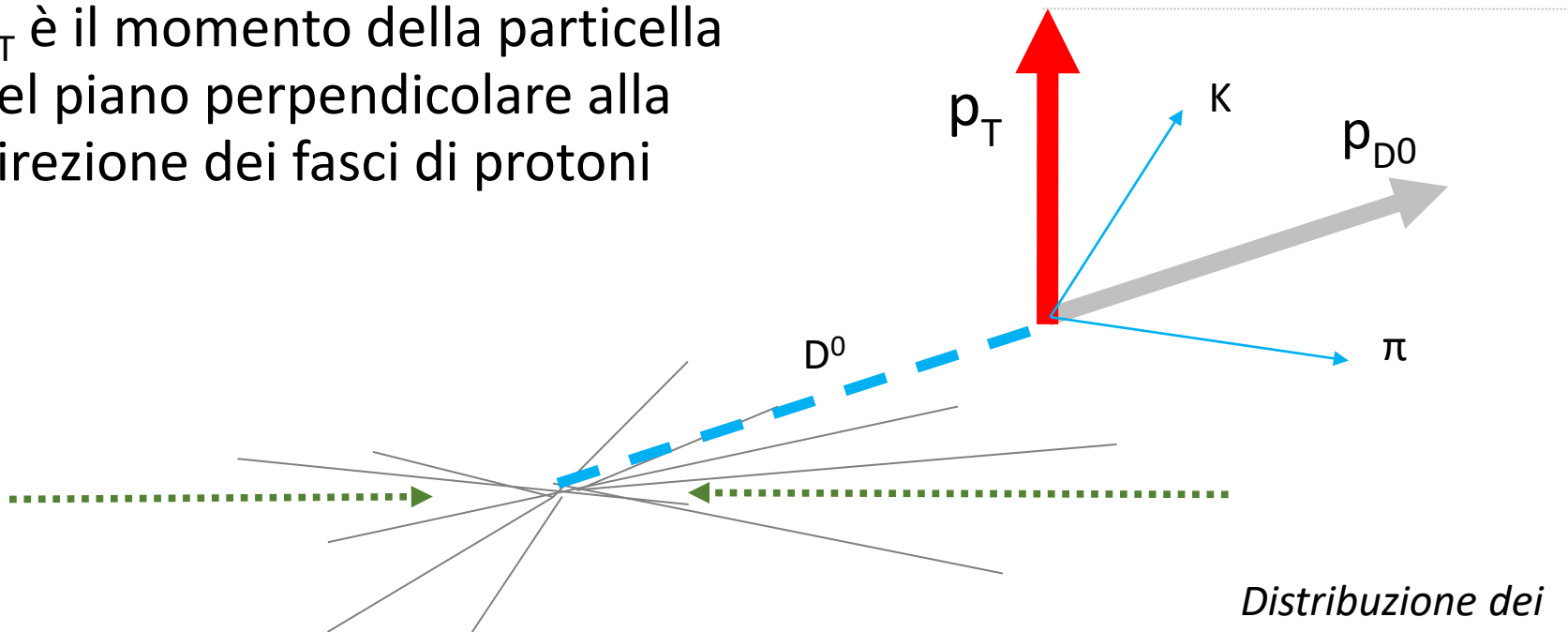
Save result

Read instructions



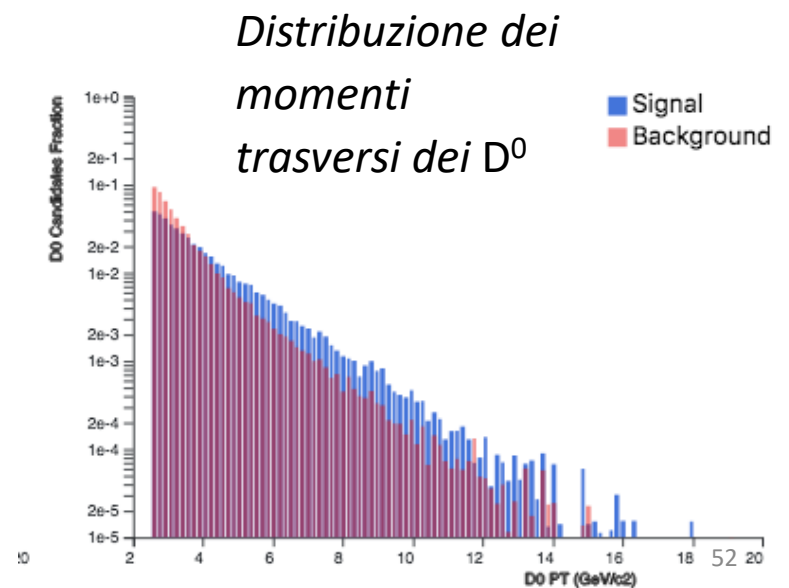
Momento trasverso p_T

p_T è il momento della particella nel piano perpendicolare alla direzione dei fasci di protoni

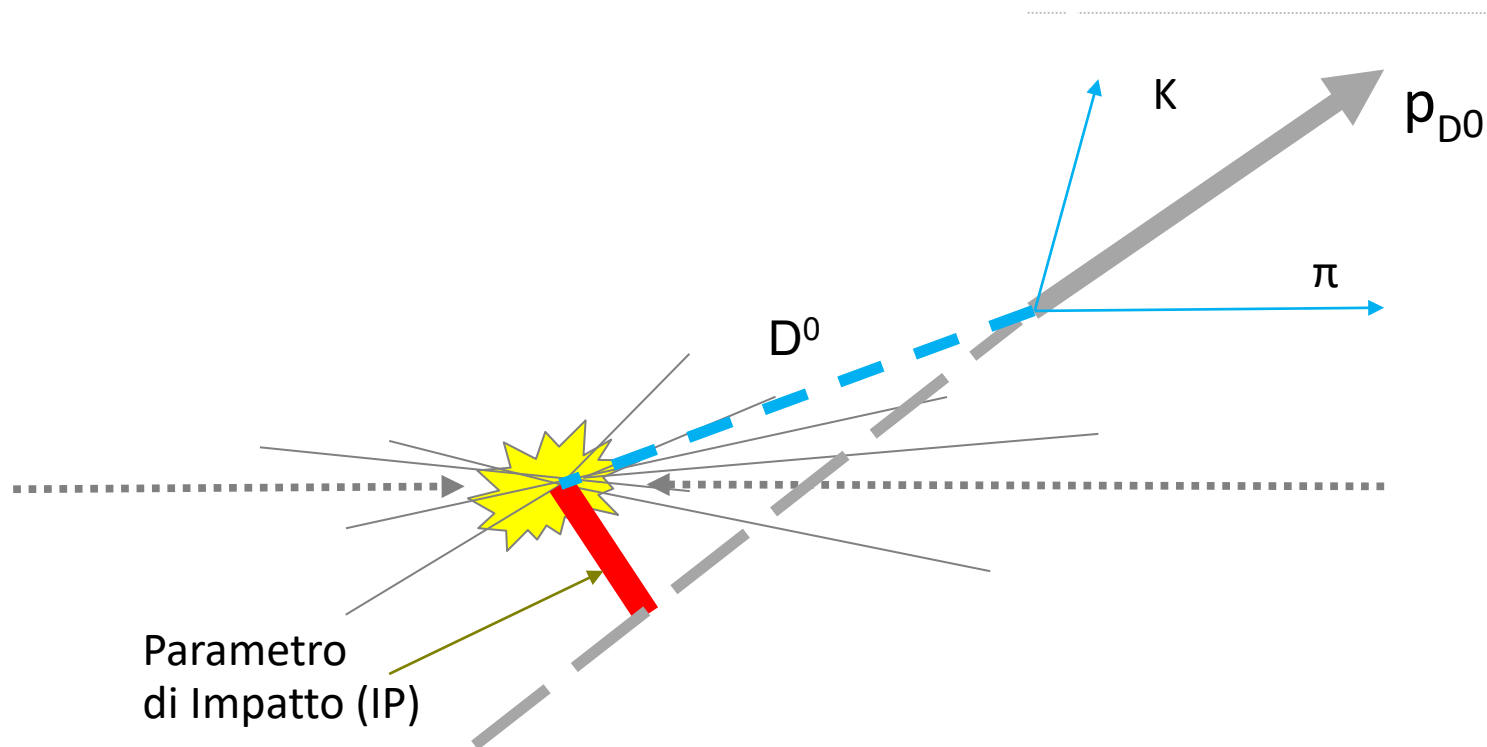


Eventi di scattering o contenenti particelle di massa ridotta hanno tracce con momento trasverso più basso

I veri D^0 hanno un momento trasverso elevato



Parametro d'impatto IP



IP è la **minima distanza** tra la **retta** che descrive la direzione della particella e il **punto** dove è avvenuta la collisione tra i protoni (vertice primario)

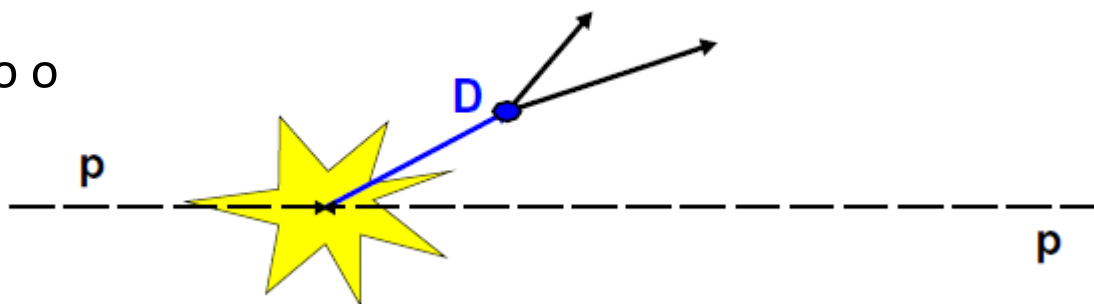
I D^0 prodotti nel punto di collisione hanno $IP \approx 0$

La produzione della particella D^0

La particella D^0 può essere prodotta in due modi:

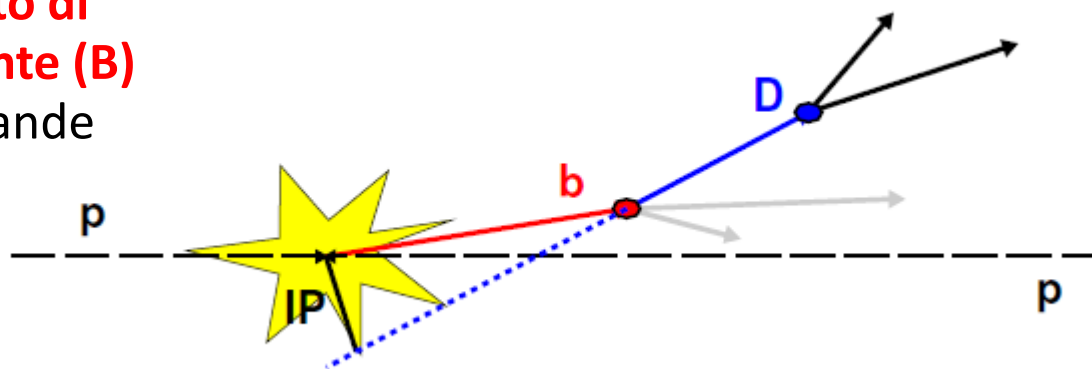
Produzione diretta

Il parametro d'impatto è nullo o piccolo

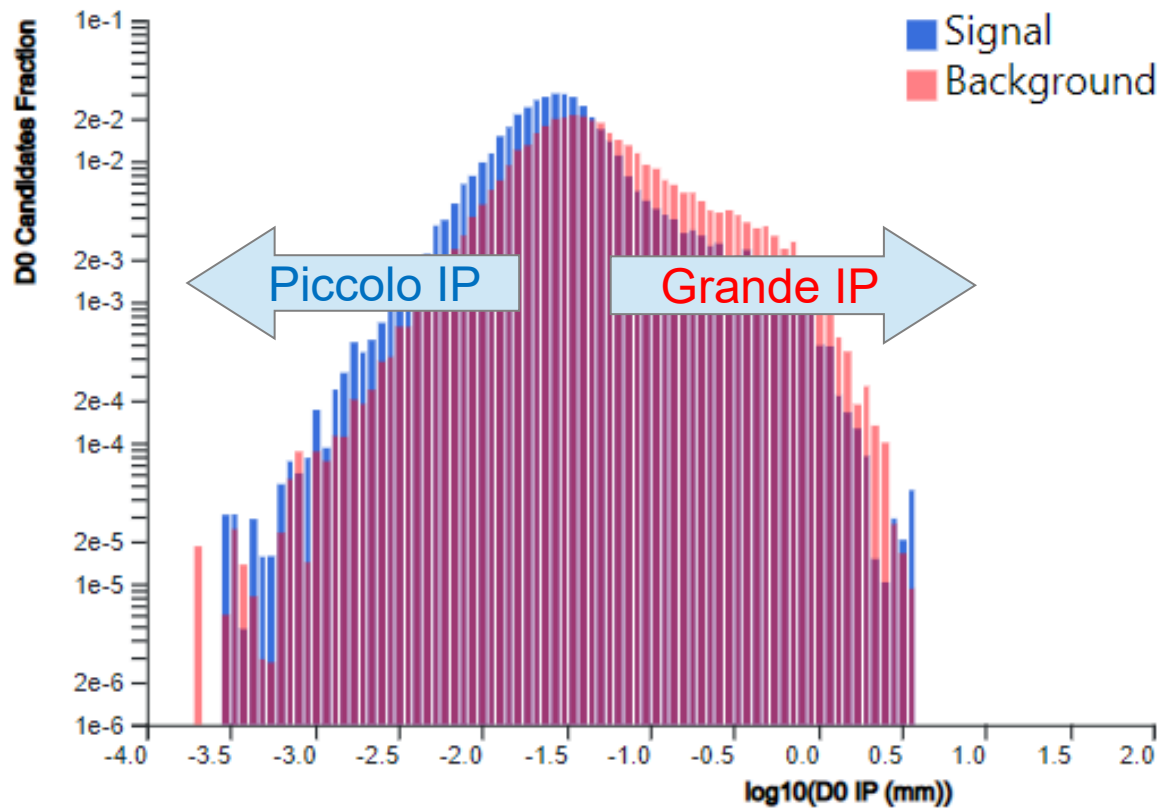


Produzione dal decadimento di un'altra particella più pesante (B)

Il parametro d'impatto è grande



Parametro d'impatto IP



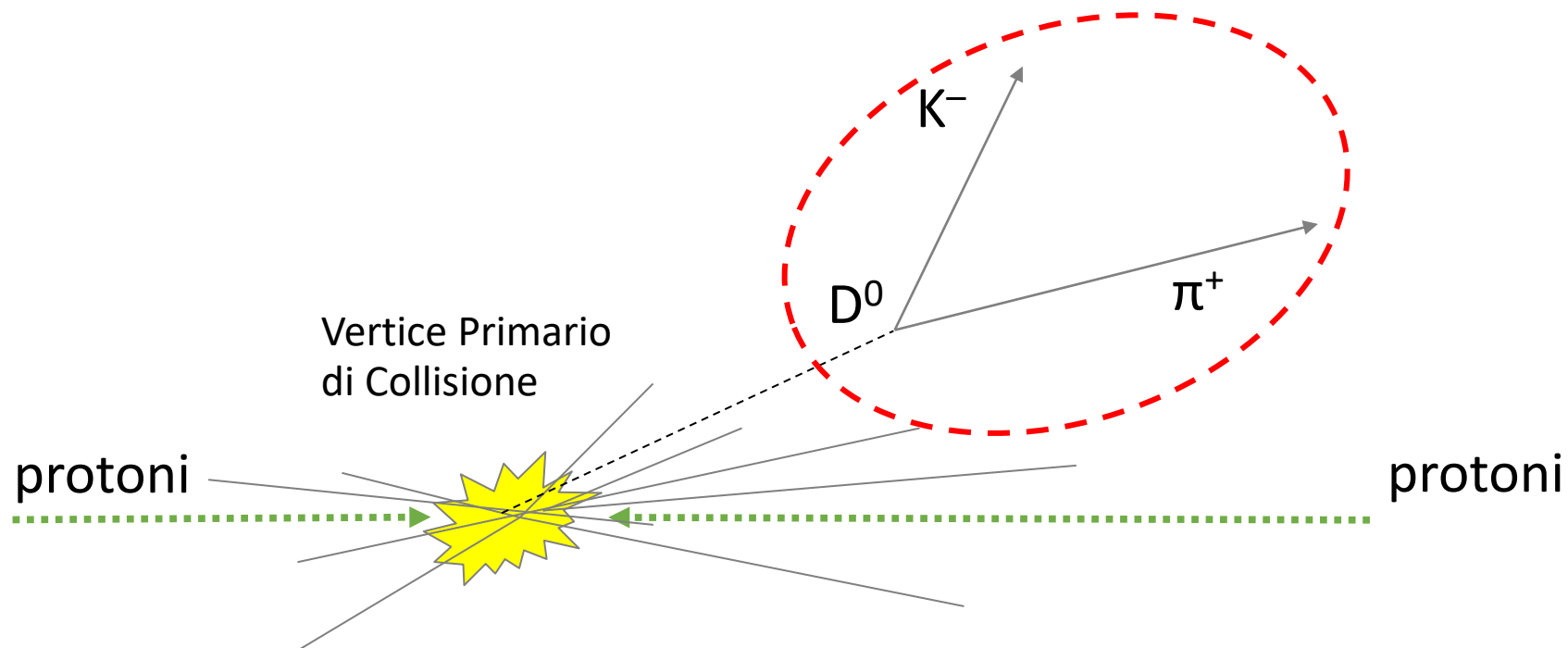
Per evidenziare meglio le differenze tra segnale e fondo mettiamo in grafico il logaritmo del parametro di impatto

IP piccolo $\rightarrow \text{Log (IP) tende a } -\infty$

IP grande $\rightarrow \text{Log (IP) tende a } +\infty$

Tempo di decadimento del D^0

Il D^0 è una particella instabile e, dopo un certo tempo, decade in $K^- \pi^+$



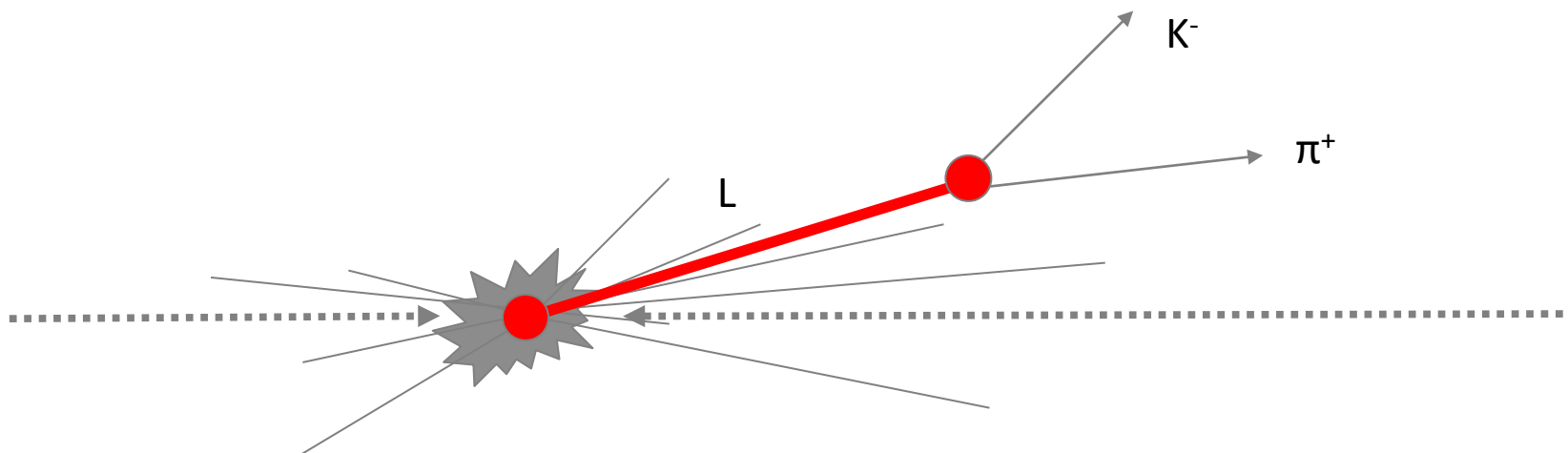
- Dopo quanto tempo decade il D^0 ?
- Come posso misurare questo tempo?
- Tutti i D^0 vivono lo stesso tempo?

Quanto a lungo vive una particella?

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

Misura del tempo di decadimento del D^0

- Si può conoscere quanto tempo ha vissuto il D^0 misurando lo **spazio percorso** prima di decadere e la sua **velocità**
(nel moto uniforme: tempo = spazio/velocità)



Il tempo di vita del D^0 è di circa **$0.4 \times 10^{-12} \text{ s} = 0.4 \text{ ps}$**

La velocità del D^0 è circa la velocità della luce, **$3 \times 10^8 \text{ m/s} = 300 \mu\text{m/ps}$**

$$\text{Spazio} = \text{velocità} * \text{tempo} = (300 \mu\text{m/ps}) * (0.4 \text{ ps}) = \mathbf{120 \mu\text{m}}$$

Lo spazio percorso da una particella in tempi così piccoli è una lunghezza misurabile sperimentalmente?

Come è possibile misurare la vita (breve) di una particella?

- La particella si muove ad una velocità prossima alla velocità della luce!
- La relatività ristretta ci **dice che il tempo si dilata per chi si muove a velocità** prossima a quella della luce

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

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$L = vt\gamma$$

- Ad LHC una particella D^0 ha velocità $v \approx 0.99919 c$
quindi $\gamma \approx 25$ cioè il D^0 vive 25 volte più a lungo che se fosse fermo.
- Quindi, se un D^0 vive in media 0.4 ps, allora percorre uno spazio di
 $L = v t \gamma \approx (300 \mu\text{m/ps}) * (0.4 \text{ ps}) * 25 = \mathbf{3 \text{ mm (!!!)}}$

La legge di decadimento

- Ogni particella ha una propria vita media, quindi una probabilità di decadimento costante in un certo intervallo di tempo.
- Non posso sapere quando decadrà la singola particella, ma conosco la legge che descrive il decadimento di un certo numero di particelle.
- La legge che descrive il decadimento di una particella instabile è la legge esponenziale

$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$$

N_0 numero di particelle presenti al tempo $t = 0$

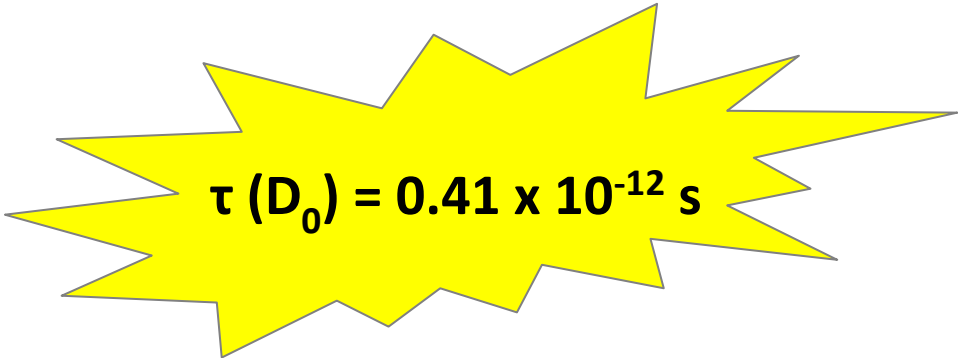
$N(t)$ numero di particelle presenti al tempo t .

- τ è detto vita media, indica il tempo che deve trascorrere perché il numero di particelle diminuisca di un fattore $e^{-1} \approx 0.37$.

La vita media del D^0

$$N(t) = N(0) e^{-t/\tau}$$

- Questa legge mi dice che se raccolgo tante particelle D^0 e ne misuro il tempo di decadimento troverò una distribuzione dei tempi che ha un andamento esponenziale.
- La pendenza di questa funzione esponenziale dipende dalla vita media τ della particella D^0
→ ecco come posso misurare la vita media D^0 !

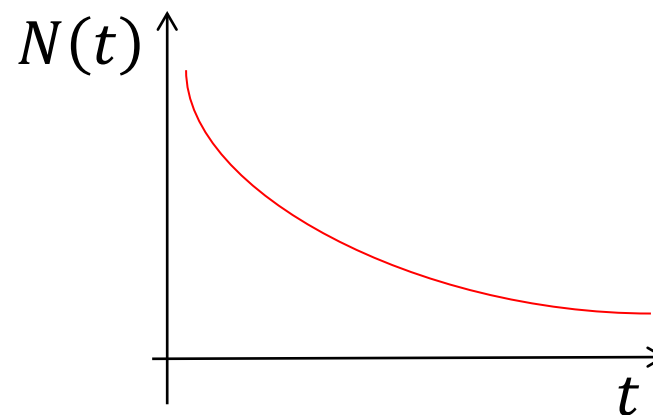

$$\tau(D^0) = 0.41 \times 10^{-12} \text{ s}$$

Valore della vita media D^0 misurato da diversi esperimenti

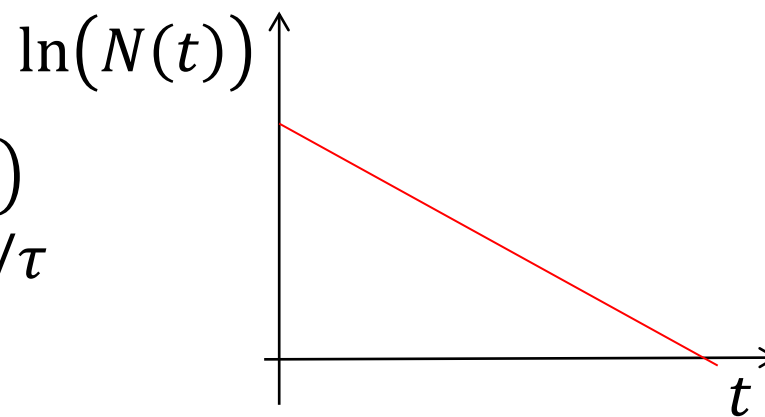
Una parentesi: la scala logaritmica

In un piano cartesiano in cui l'asse delle ordinate è in **scala logaritmica** una **funzione esponenziale** risulta una **retta**.

$$N(t) = N(0) e^{-t/\tau}$$

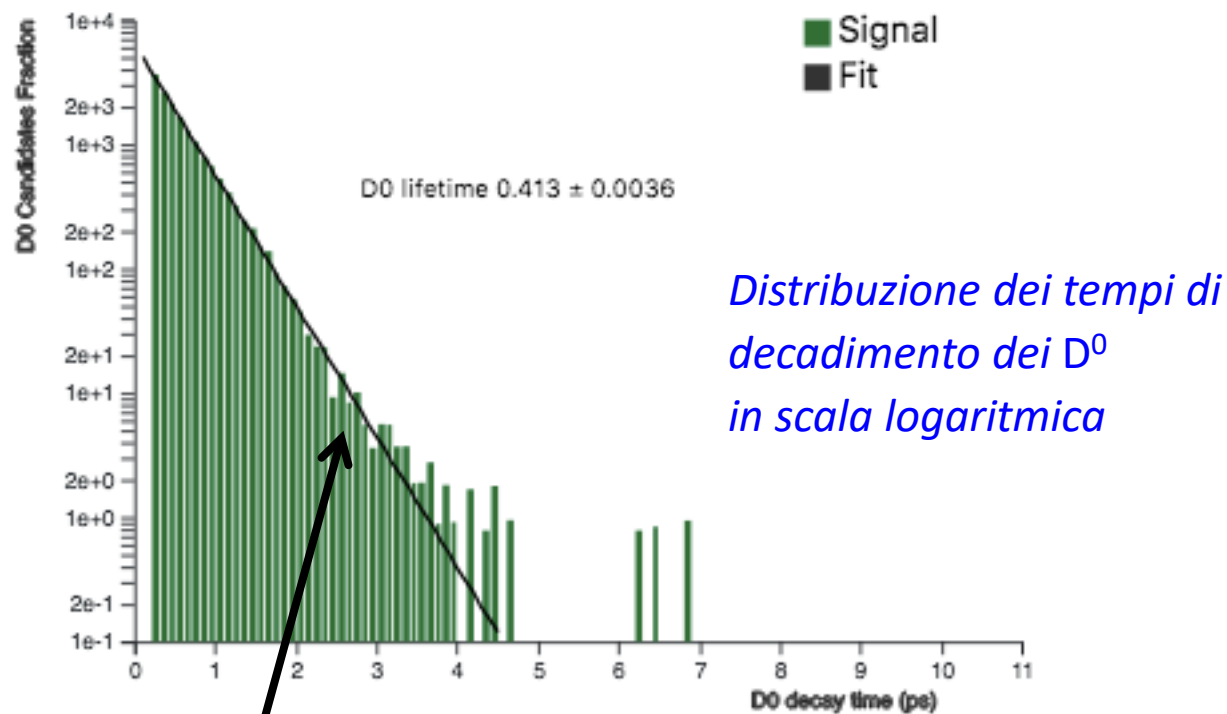


$$\begin{aligned}\ln(N(t)) &= \ln(N(0) e^{-t/\tau}) \\ &= \ln(N(0)) - t/\tau\end{aligned}$$



τ è semplicemente l'inverso della pendenza della retta

La vita media del D^0



Interpolazione: trovo la curva, in questo caso una retta, che meglio approssima la distribuzione dei dati

Riassumendo...

- ✓ Raccolgo un campione di D^0
- ✓ Con un **fit alla distribuzione di massa** separo il segnale dal fondo
- ✓ **Definisco l'intervallo** dei valori massa che definiscono la regione di segnale
- ✓ Osservo i grafici delle distribuzioni di segnale e di fondo
- ✓ Cerco di **minimizzare la quantità di fondo** variando il minimo /massimo valore accettato per p_T , IP e τ ($\rightarrow$ diverse sorgenti di fondo possibili)
- ✓ Osservo la **distribuzione dei tempi di decadimento** dei D^0 di segnale
- ✓ Ricavo un valore per la vita media del D^0 **interpolando** la distribuzione dei tempi di decadimento (in scala logaritmica) con una retta
- ✓ Posso ripetere la procedura cambiando le richieste sul parametro di impatto per studiare l'effetto sulla vita media della presenza del fondo (D^0 secondari)

Esercizio Masterclass: seconda parte

LAB906

Mapelli di Monza

Liceo A. Banfi di Vimercate

IIS Carlo Emilio Gadda Paderno Dugnano

Liceo Scientifico e Musicale G.B. Grassi Lecco

LAB910

IIS Curie Sraffa, Milano

Liceo "Da Vinci - Pascoli"

IIS Severi Correnti Milano

LAB909

IIS Schiaparelli Gramsci – Milano

Liceo Statale G.B. Vico (Corsico - MI)

Liceo Scientifico statale Paolo Frisi

LAB911

Liceo Scientifico di Stato "A. Calini"

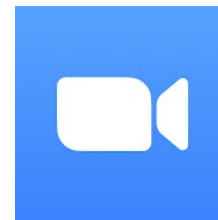
ITAS "Giulio Natta"

Istituto "Lorenzo Rota"

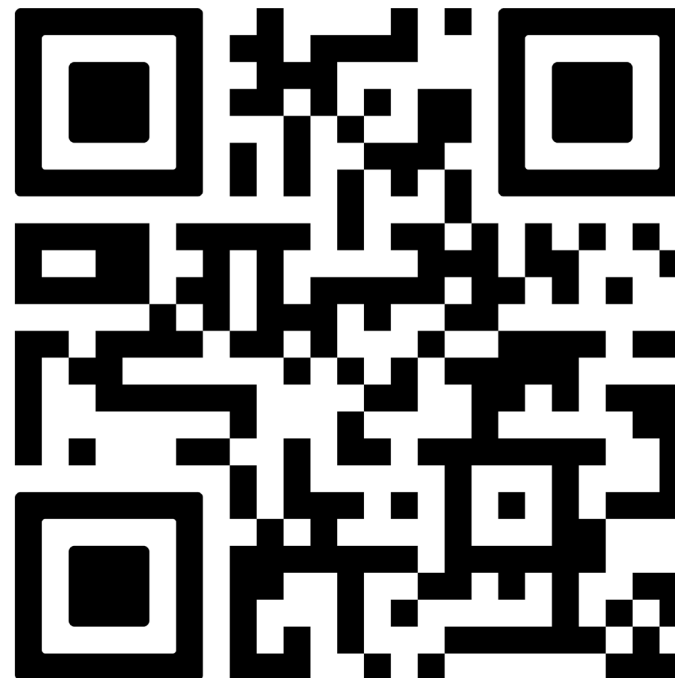
Videoconferenza

Informazioni per la conferenza con il CERN

- ✓ Videoconferenza ZOOM con il CERN



- ✓ Quiz finale su **wooclap**



Questionario finale

