

Scopo dell'esercizio



Misura

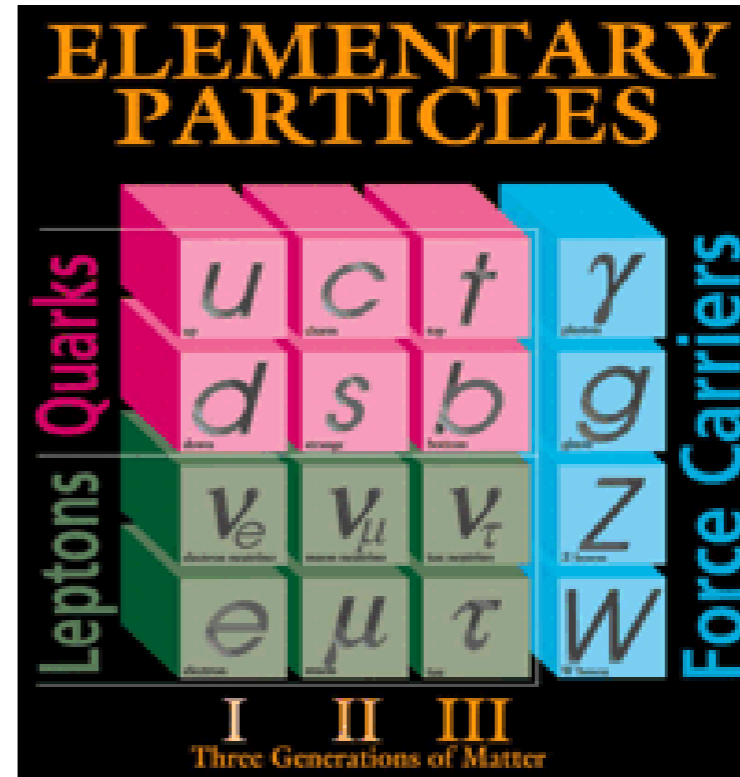
della **massa** e della **vita media**

della **particella D^0**

su **dati raccolti**

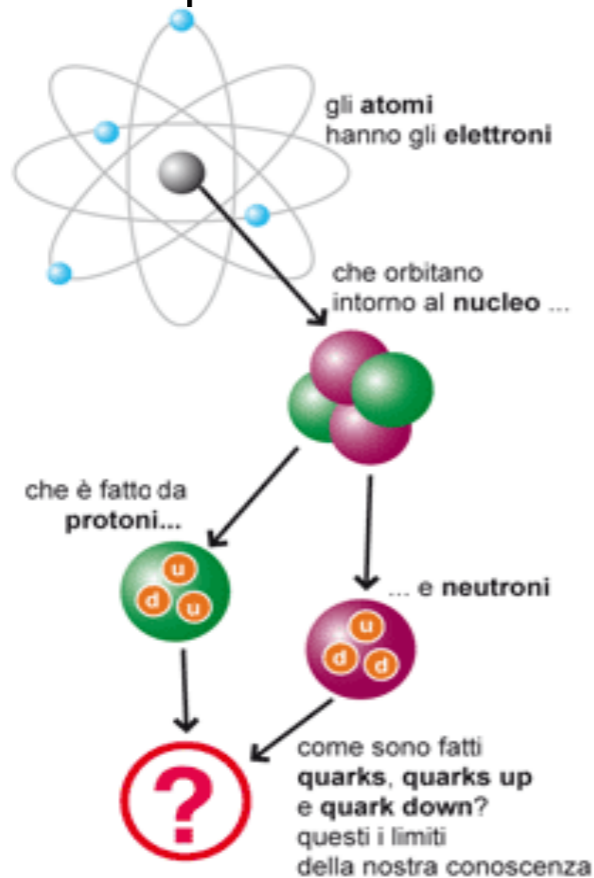
dall'**esperimento LHCb**

Secondo la teoria del modello standard, le particelle fondamentali sono **quark** e **leptoni** a cui si aggiungono le **particelle mediatrici di forza** che sono responsabili delle interazioni tra le particelle.



Il Modello Standard delle particelle

Secondo la teoria del modello standard, le particelle fondamentali sono **quark** e **leptoni** a cui si aggiungono le **particelle mediatrici di forza** che sono responsabili delle interazioni tra le particelle.



ELEMENTARY PARTICLES

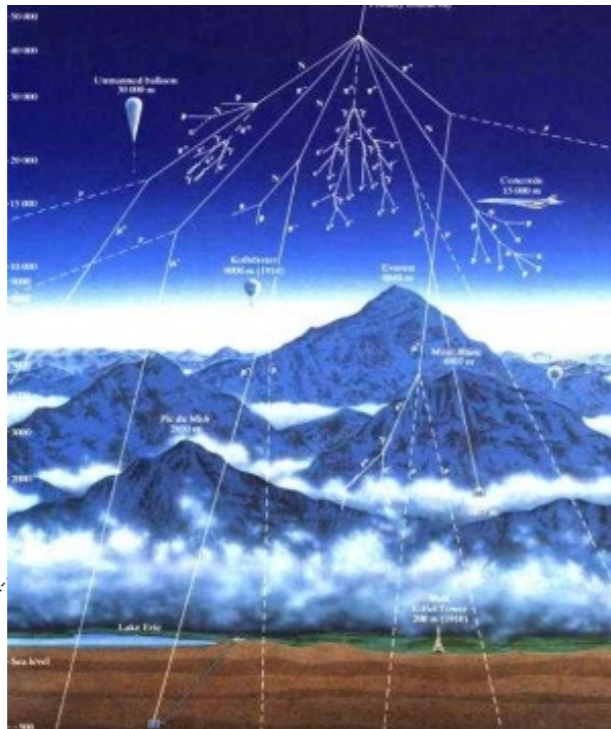
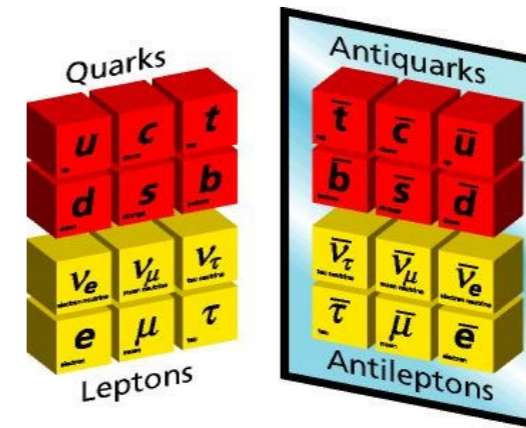
Quarks	u	c	t	Force Carriers	γ
	d	s	b		g
Leptons	ν_e	ν_μ	ν_τ	Force Carriers	Z
	e	μ	τ		W
	I	II	III		
	Three Generations of Matter				

Per quanto ne sappiamo fino ad ora, l'elettrone e i **quark up** e **down** sono i **mattoni fondamentali** della **materia stabile dell'universo**, e della **``materia ordinaria''**

Il Modello Standard delle particelle

Il quadro delle particelle è molto più complesso

Infatti per ogni **particella** esiste **un'antiparticella** (stessa massa ma carica opposta)



Nelle interazioni in cui ci sono scambi elevati di energia, come avviene **naturalmente** nei **raggi cosmici** vengono prodotte **altre particelle** (di materia e antimateria) che in breve tempo si trasformano (**decadono**) in particelle più leggere e stabili.

In natura non si possono osservare singoli quark o antiquark liberi, ma solo aggregati costituiti da almeno una coppia quark-antiquark (mesone) o un trio di quark (barione)

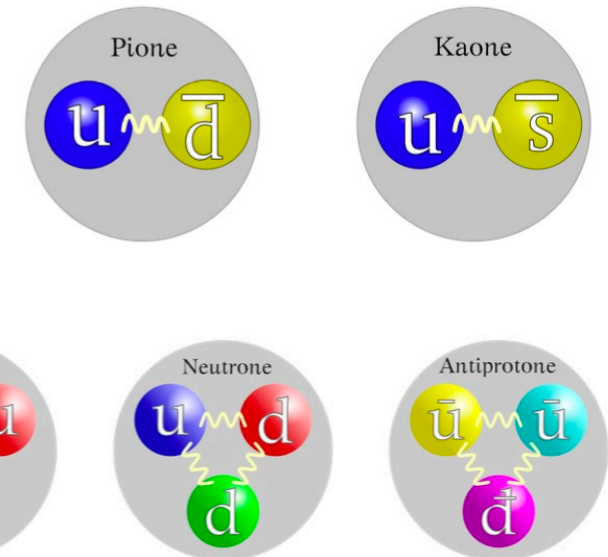
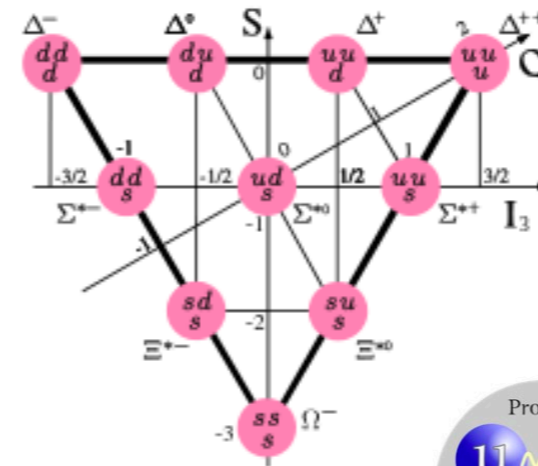
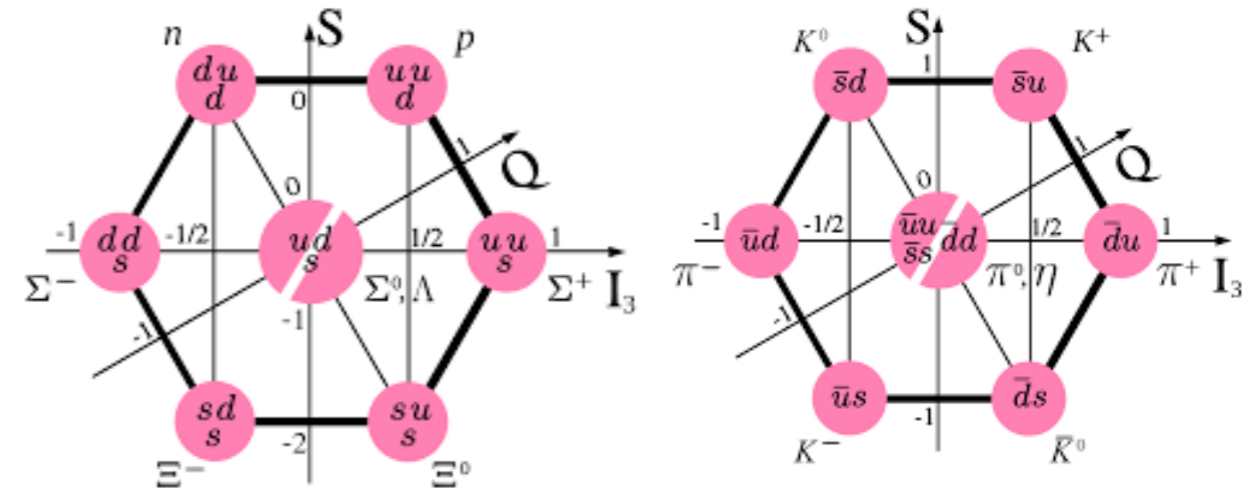
Ad oggi sono state scoperte centinaia di queste particelle composte da quark, dette **ADRONI**

Il **protone** è un esempio di barione, composto da due quark up e un quark down

Esempi di mesoni sono il **pione** π^+ (un quark up e un antiquark down), il **kaone** K^+ (un quark up e un antiquark strange) e il **mesone** D^0 (un quark charm e un antiquark up)

I quark sono tenuti insieme all'interno degli adroni dal mediatore della forza forte, il gluone

The eightfold way of hadrons



Come si producono queste particelle?

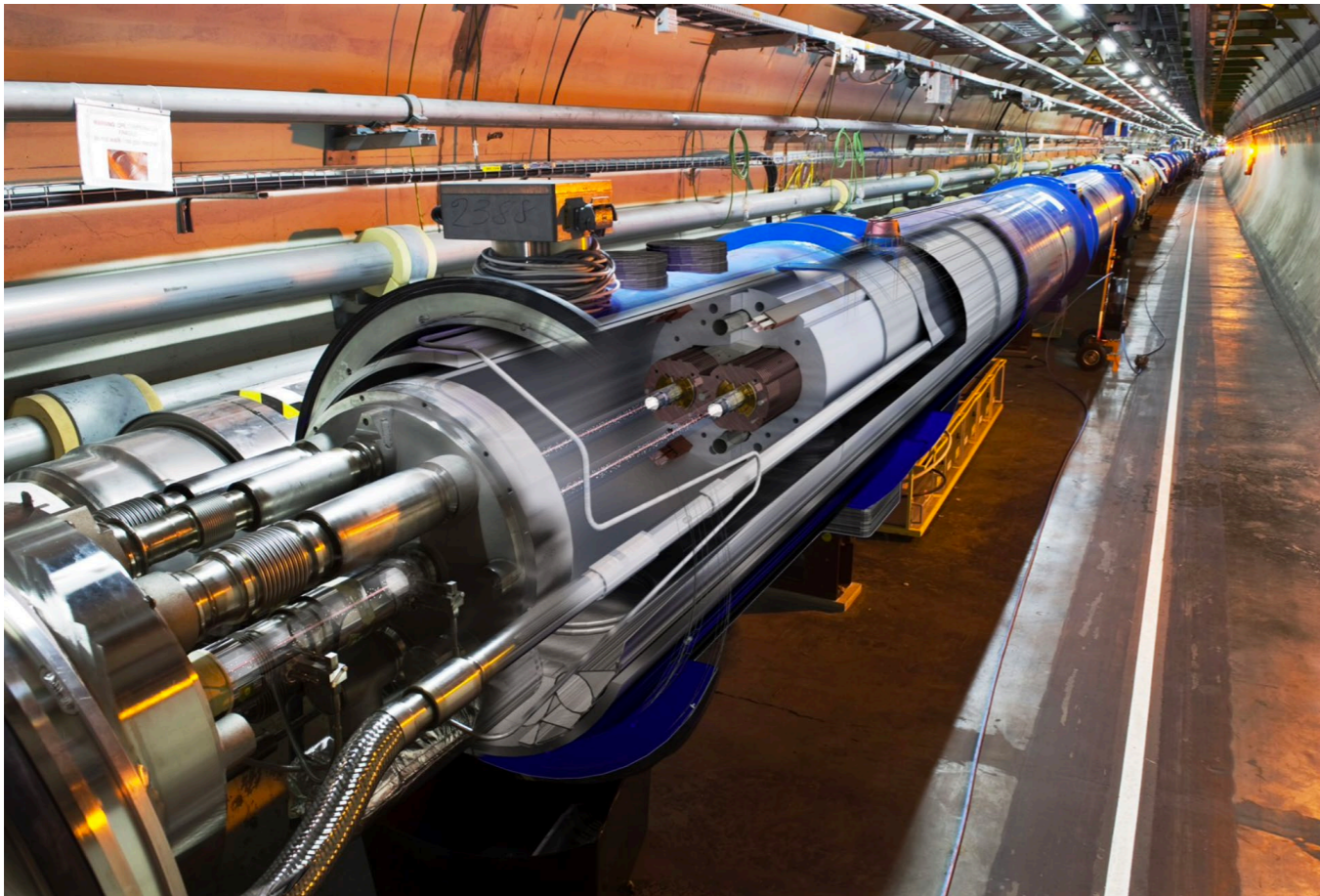
Tutte queste particelle possono essere **prodotte artificialmente** negli **acceleratori**: ad esempio a LHC, fasci di protoni vengono accelerati per mezzo di campi elettrici e guidati da campi magnetici e fatti collidere. Appositi strumenti, i **rivelatori di particelle**, rivelano i prodotti di queste collisioni.

A LHC i fasci vengono fatti collidere in 4 punti, dove ci sono gli esperimenti CMS, ATLAS, ALICE e LHCb.



Come si producono queste particelle?

Tutte queste particelle possono essere **prodotte artificialmente** negli **acceleratori**: ad esempio a LHC, fasci di protoni vengono accelerati per mezzo di campi elettrici e magnetici e fatti collidere. Appositi strumenti, i **rivelatori di particelle**, rivelano i prodotti di queste collisioni.

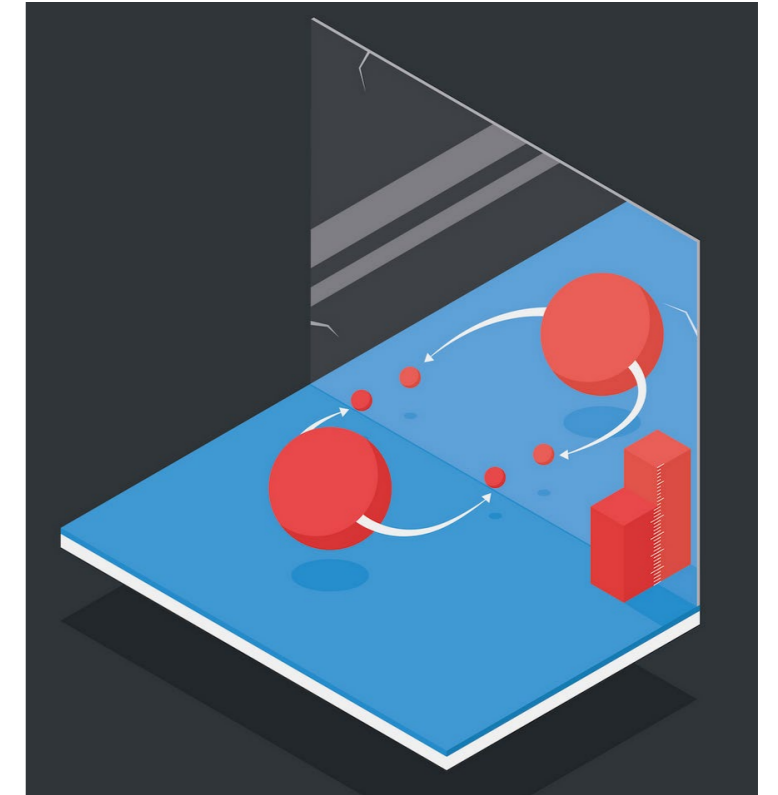


I protoni sono accelerati in un anello di 27 km fino a quasi la velocità della luce

Un tipico ciclo di LHC fa circolare i protoni per circa 10 ore: i pochi protoni che non interagiscono **alla fine di questo ciclo avranno percorso circa 10 miliardi di km (la distanza tra la Terra e Nettuno andata e ritorno!)**

Tra gli obiettivi principali dell'esperimento c'è lo studio dei meccanismi che hanno portato, nell'Universo primordiale, ad una asimmetria tra materia e antimateria, originariamente prodotte in egual misura nel Big Bang.

- Le particelle di **materia e di antimateria** che vengono a contatto tra loro si **annichilano**, convertendo la loro massa in [radiazione elettromagnetica](#).
- Se, quindi, in natura materia e antimateria si comportassero esattamente allo stesso modo, si sarebbero completamente annichilate immediatamente dopo il Big Bang, lasciando un **Universo fatto solo di radiazione**.
- Una piccolissima asimmetria nel comportamento di materia e antimateria, nota come **violazione della simmetria CP**, potrebbe essere alla base del leggero squilibrio in favore della materia nell'Universo primordiale.

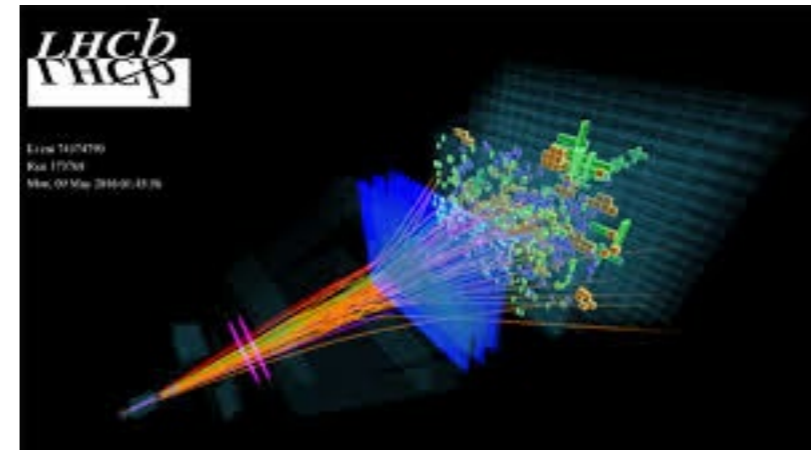
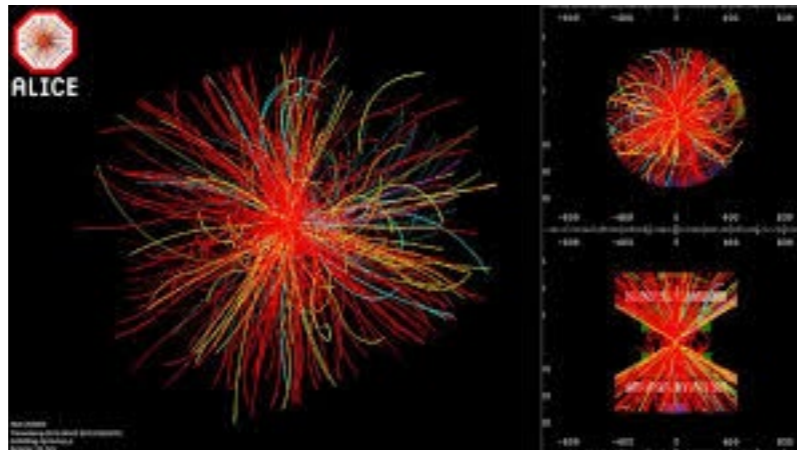
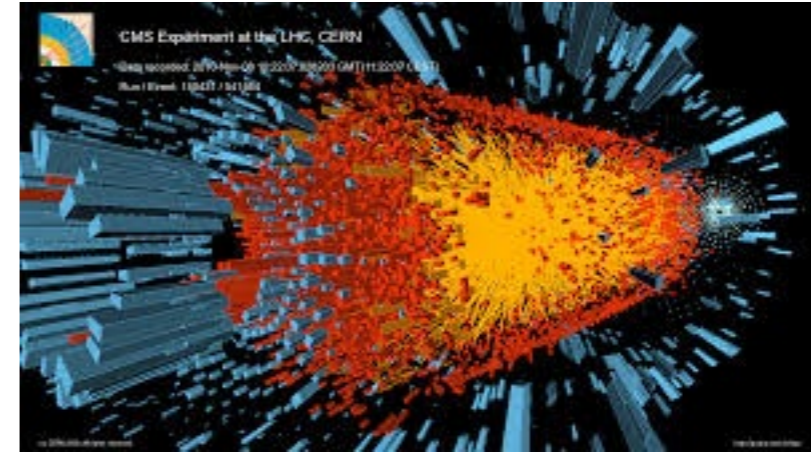
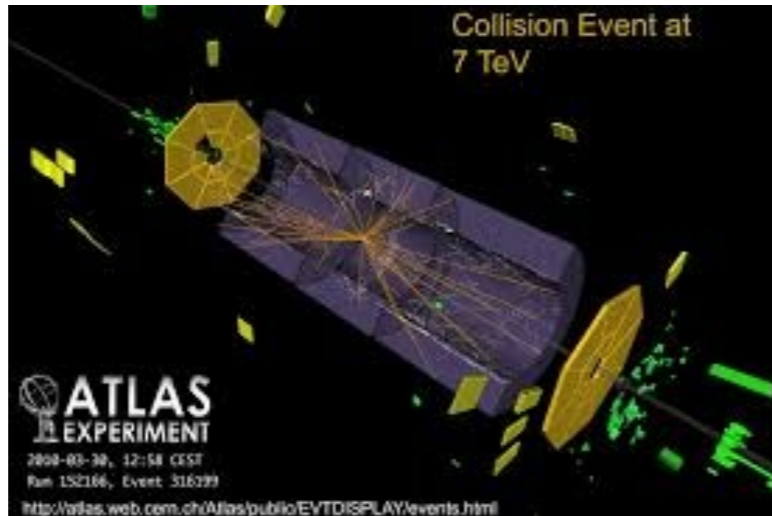


La **violazione di CP** prevista dal **Modello Standard** è **troppo piccola** per spiegare l'asimmetria tra materia e antimateria creatasi nell'Universo primordiale.

La natura deve quindi aver previsto altre particelle (non ancora osservate) e altri meccanismi in grado di generare la quantità di violazione di CP necessaria per spiegare l'Universo in cui viviamo. E' quindi una priorità della fisica dei giorni nostri quella di cercare **segnali di nuova fisica** oltre il Modello Standard.

“Fotografare” una collisione

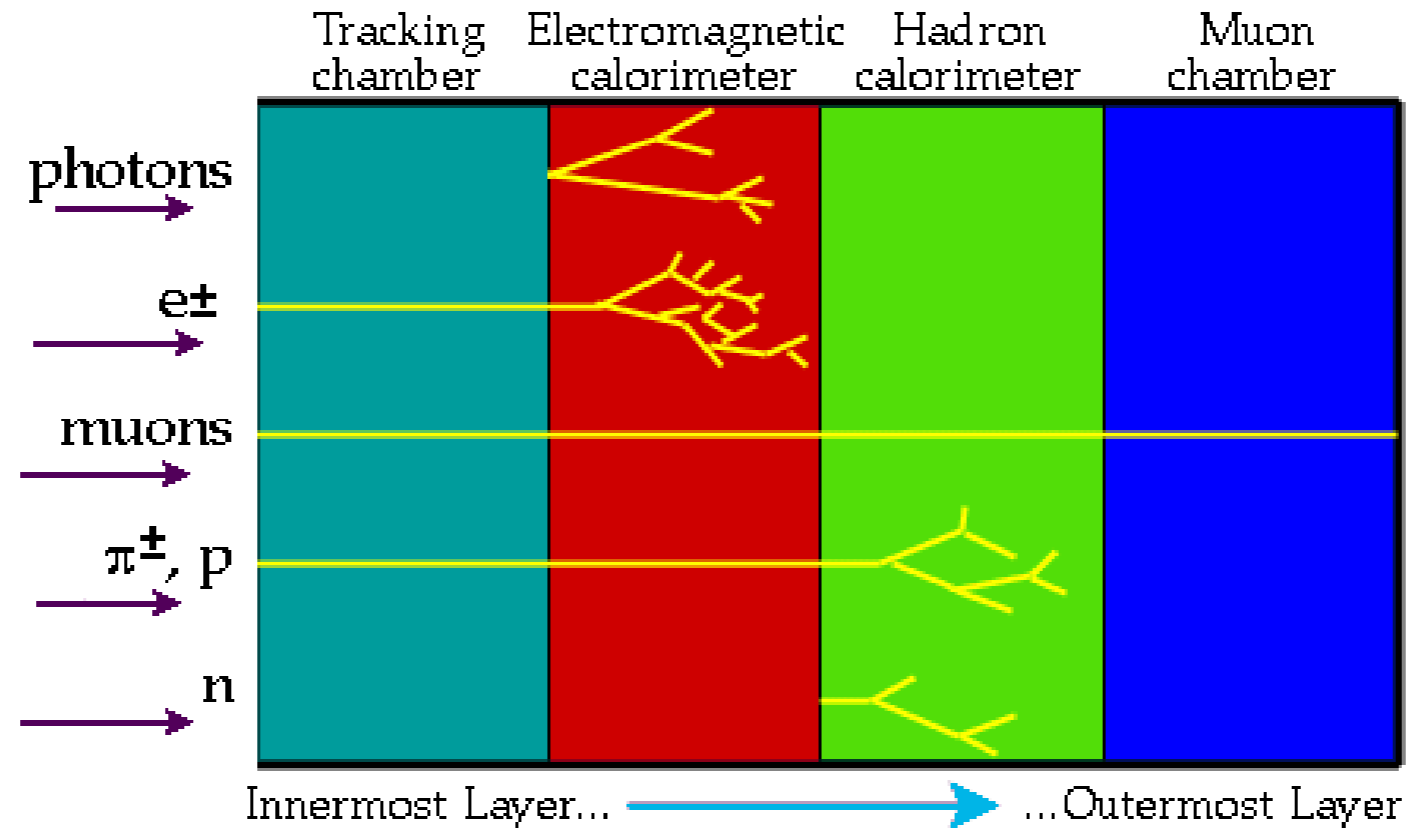
Nelle collisioni pp si producono **molteplici nuove particelle di materia e antimateria** che **decadono** in tempi più o meno brevi in particelle più leggere che siamo in grado di **rivelare con i nostri strumenti**



“Fotografare” una collisione

Le particelle “visibili” vengono rivelate e identificate nei **rivelatori di particelle**, grazie al loro diverso modo di interagire con la materia.

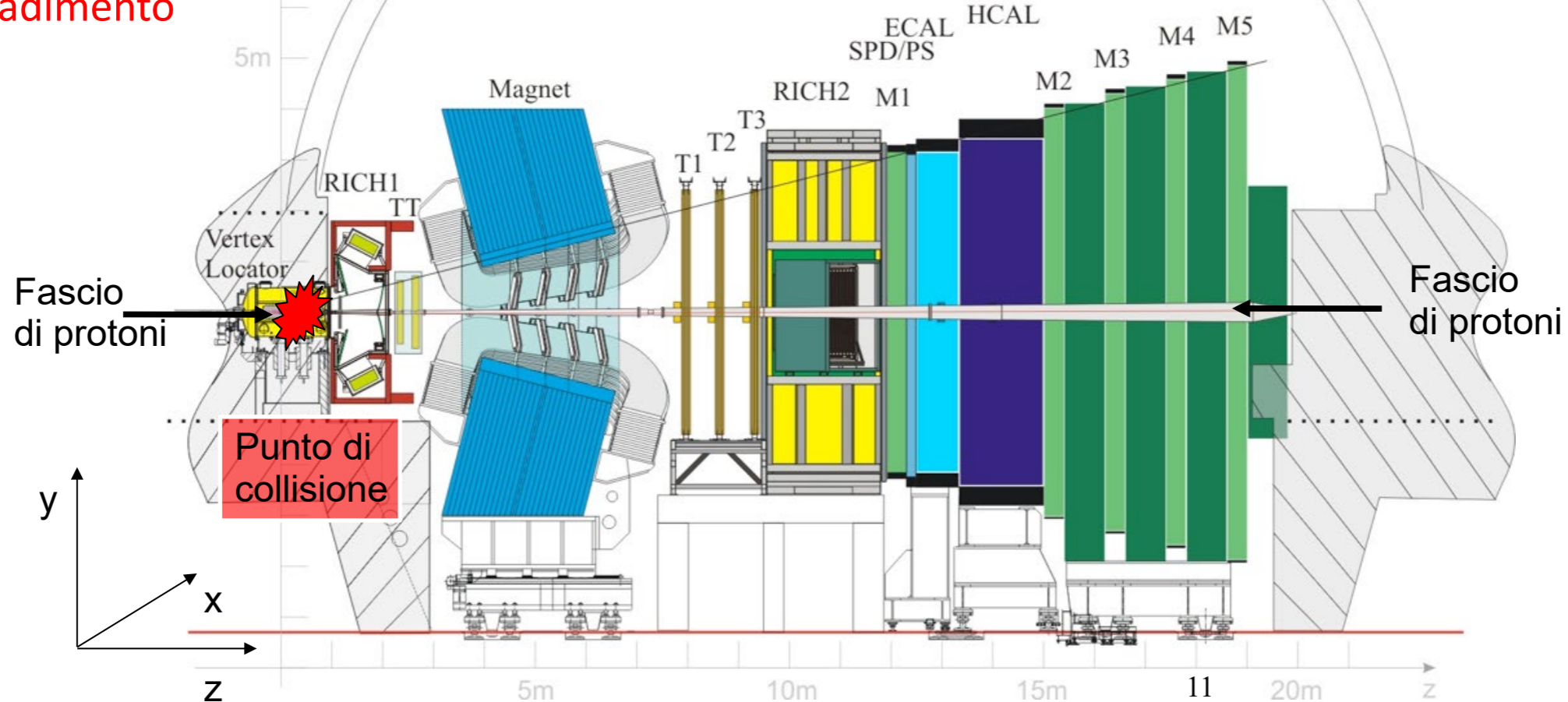
 Un rivelatore di particelle è costituito da più strati, ciascuno in grado di rivelare una particolare caratteristica della particella.



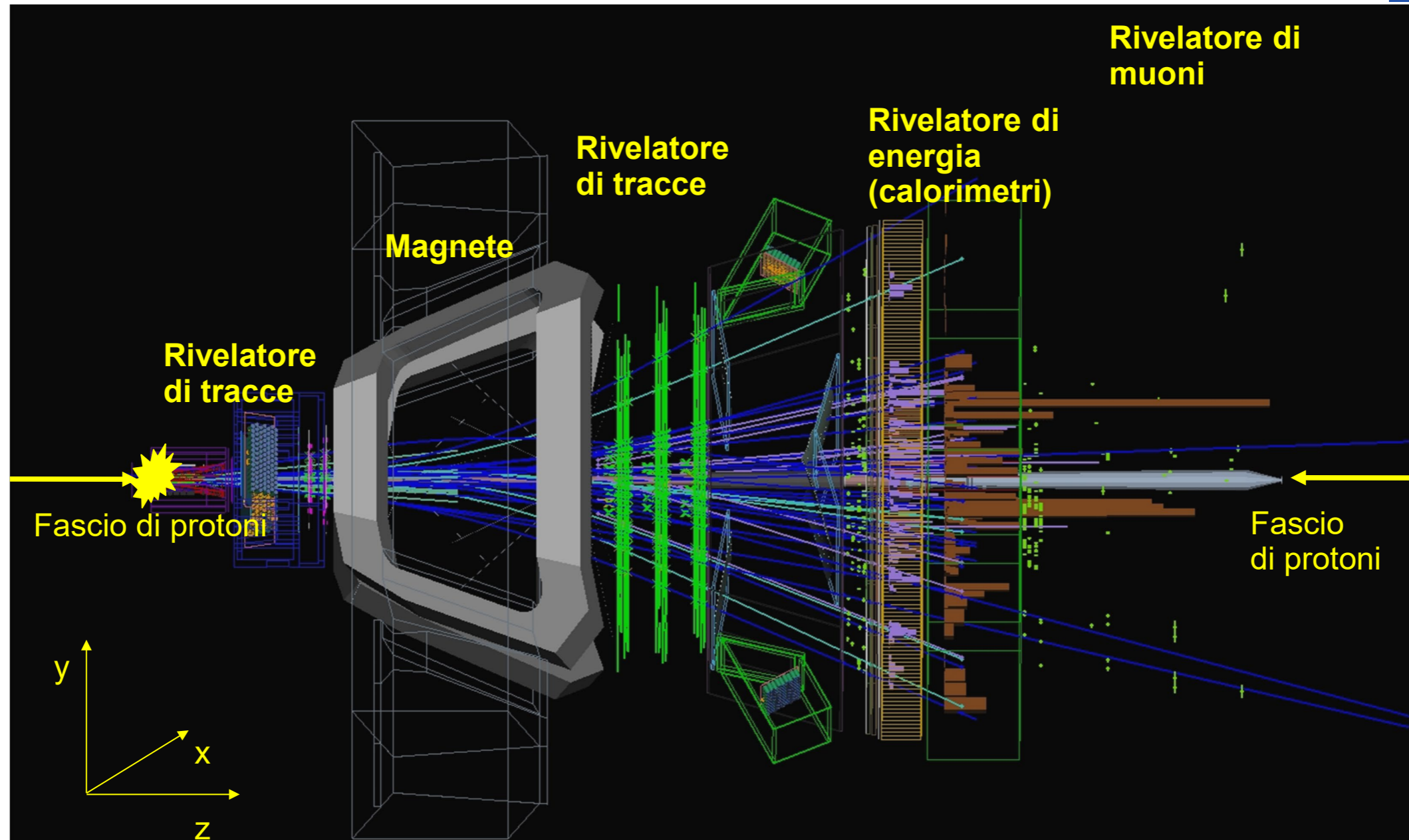
“Fotografare” una collisione con LHCb

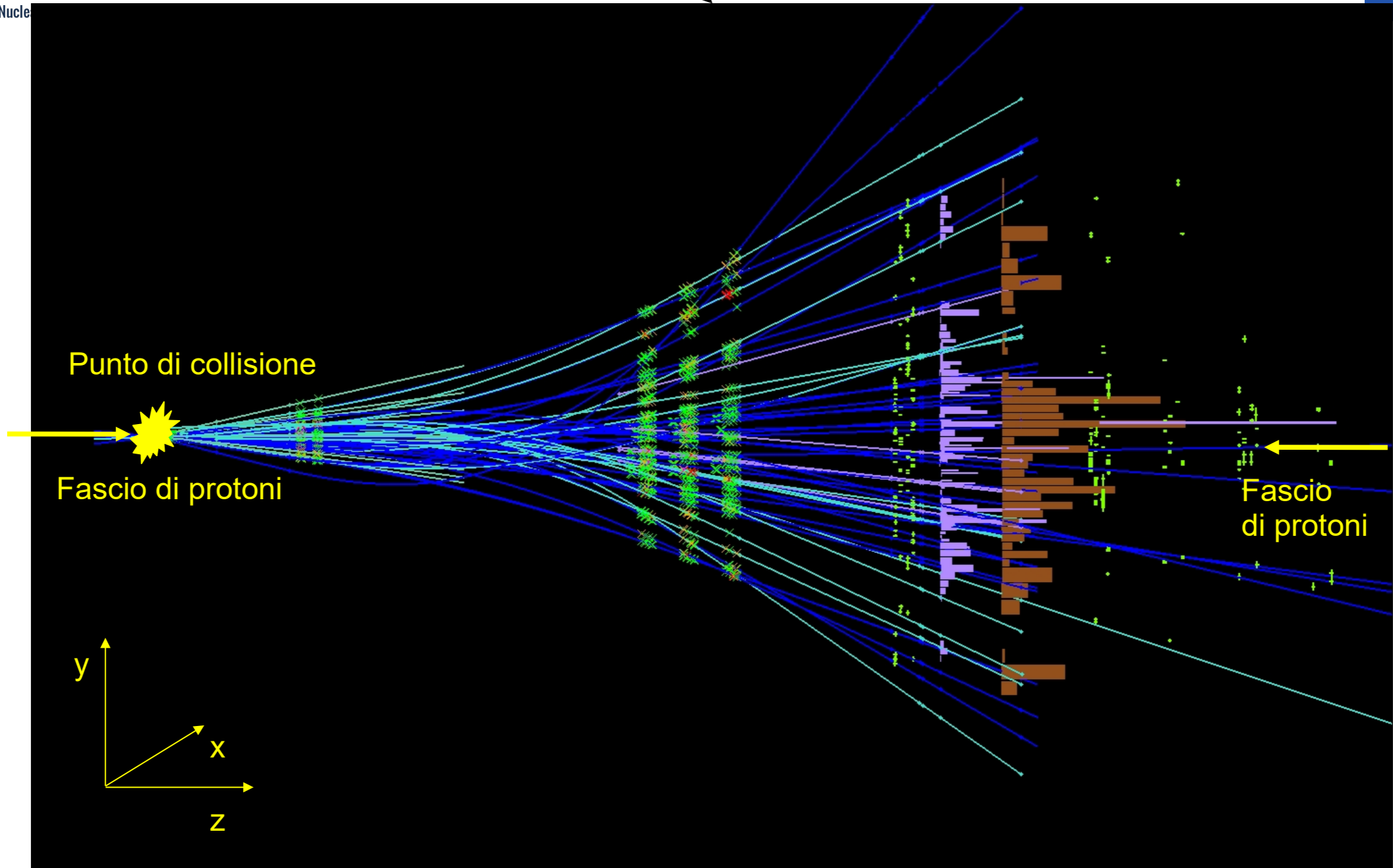
L'esperimento LHCb è dotato di diversi **rivelatori di particelle** cariche e neutre e di un **magnete** che permettono di misurare:

- 1) le **traiettorie** delle particelle cariche (\rightarrow la carica \pm)
- 2) **La quantità di moto** e/o **l'energia** delle particelle
- 3) **Identificare** la specie di particella (π, K, p, e, μ) e ricostruire **I vertici di interazione e decadimento**



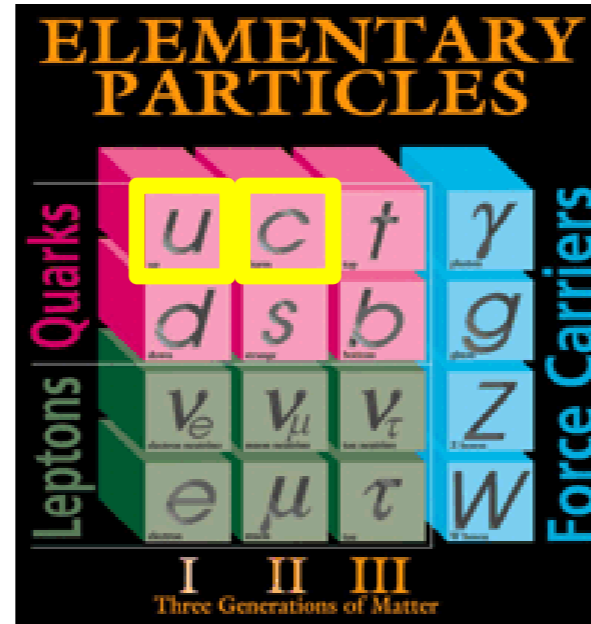
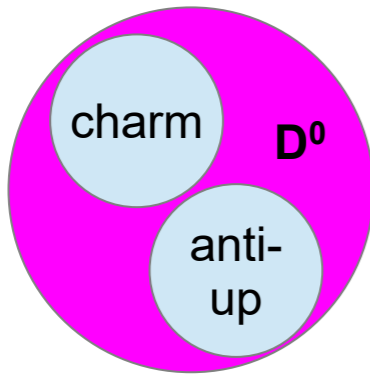
“Fotografare” una collisione con LHCb



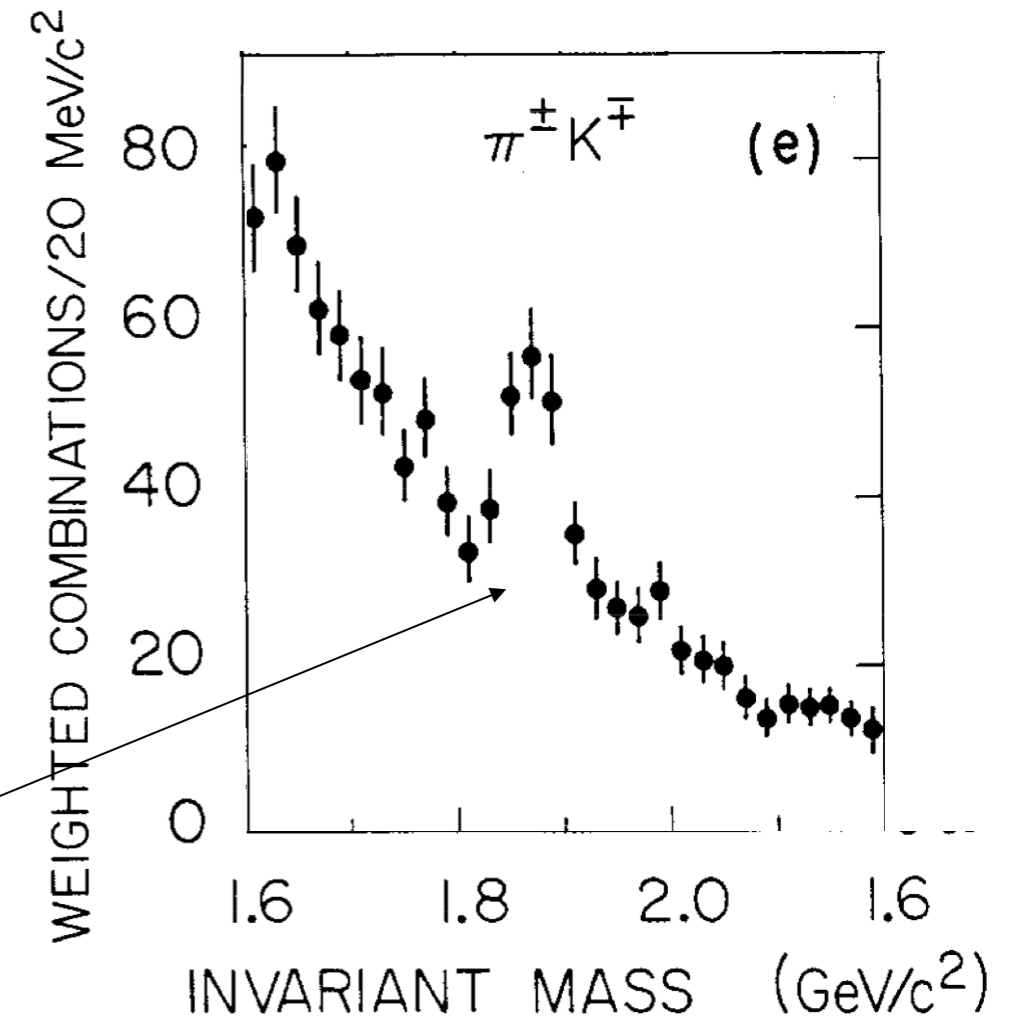


La particella D^0

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



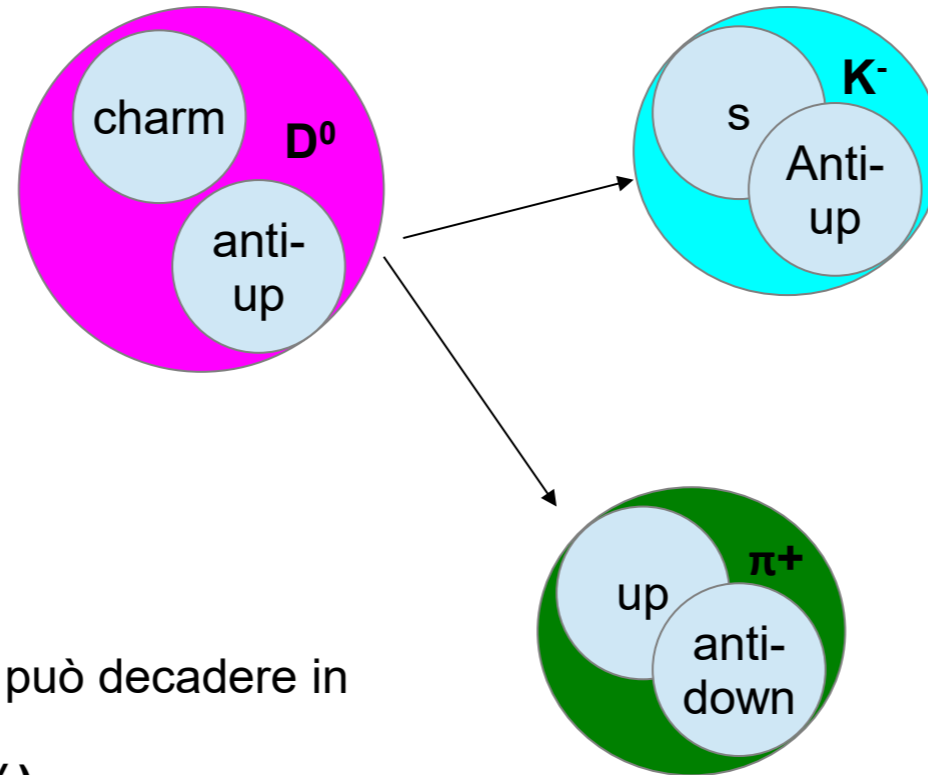
Scoperto nel 1976 all'esperimento Mark I presso l'acceleratore lineare di Stanford (SLAC)



L'accumulo di eventi (risonanza) è spesso indice della presenza di una particella, in questo caso il D^0

La particella D^0

Il mesone D^0 è costituito da un **quark anti-up e un quark charm**.
 E' una **particella instabile** e dopo un certo tempo **decade in particelle più leggere**. Per esempio in un **Kaone** negativo (K^-) e un **Pione** positivo (π^+)

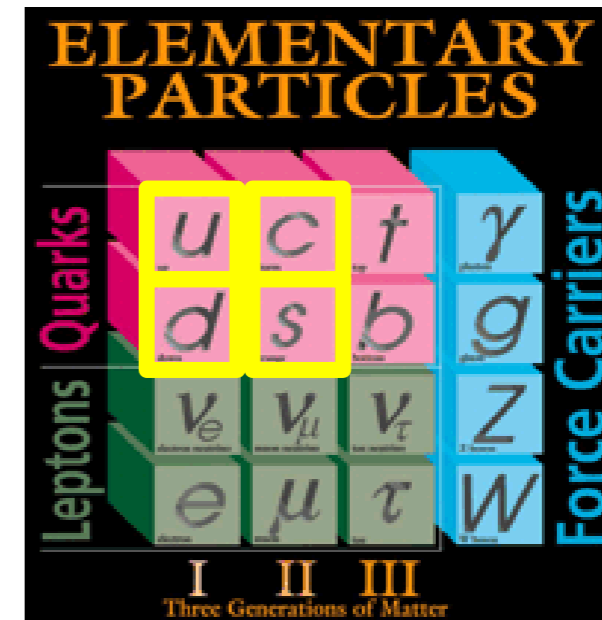


NB: Il mesone D^0 può decadere in molti "modi".

$D^0 \rightarrow K^-\pi^+$ (3.88%)

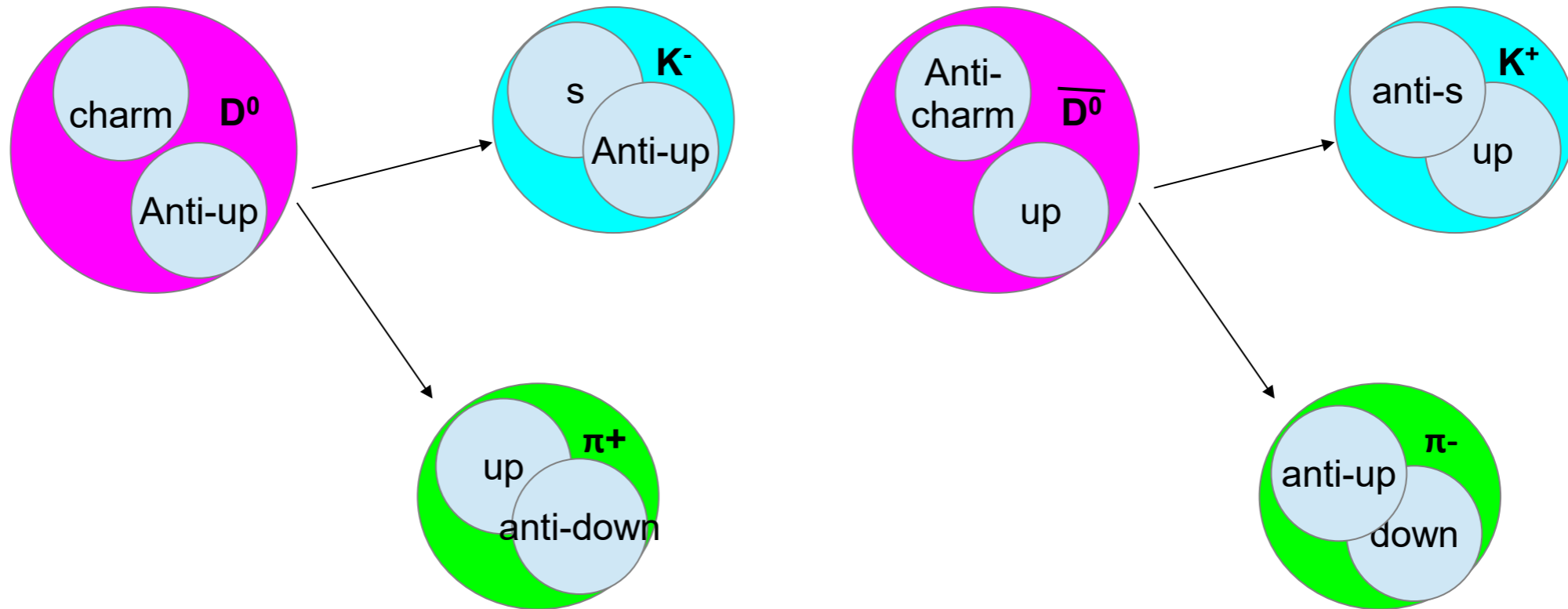
$D^0 \rightarrow K^+\pi^-$ (0.013%)

$D^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ (0.14%)



La particella D^0

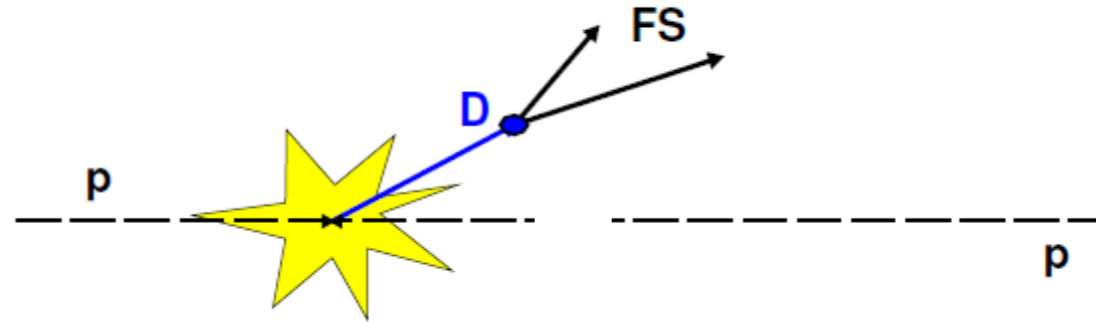
Il mesone D^0 è costituito da un **quark up e un quark anti-charm**.
 E' una particella instabile e dopo un certo tempo decade in un **Kaone** negativo (K^-)
 e un **Pione** positivo (π^+)
 La sua corrispondente anti-particella è l' \bar{D}^0



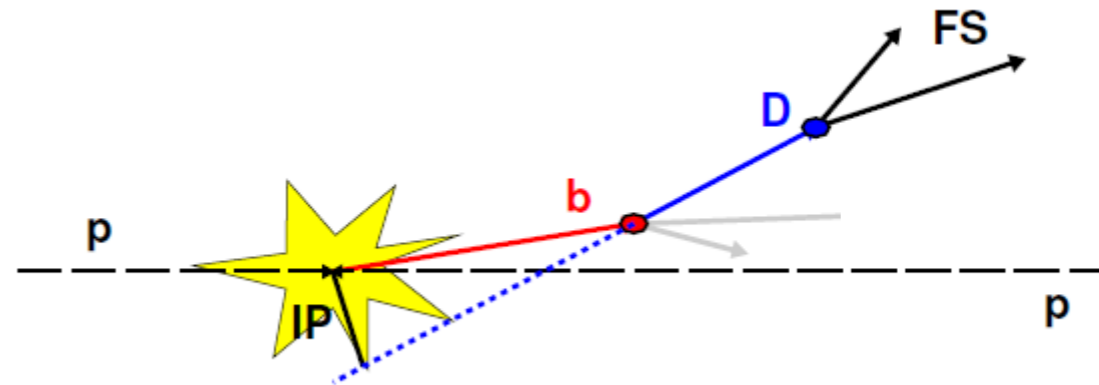
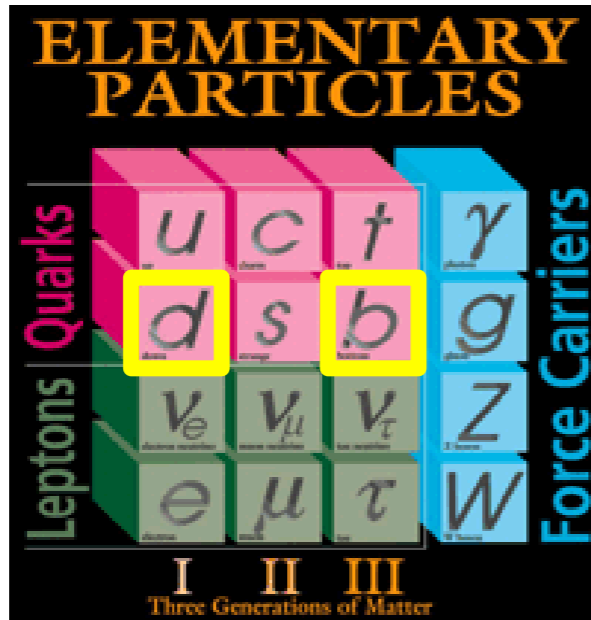
La particella D^0

I mesoni D^0 e \bar{D}^0 possono essere prodotti in due modi:

Produzione diretta

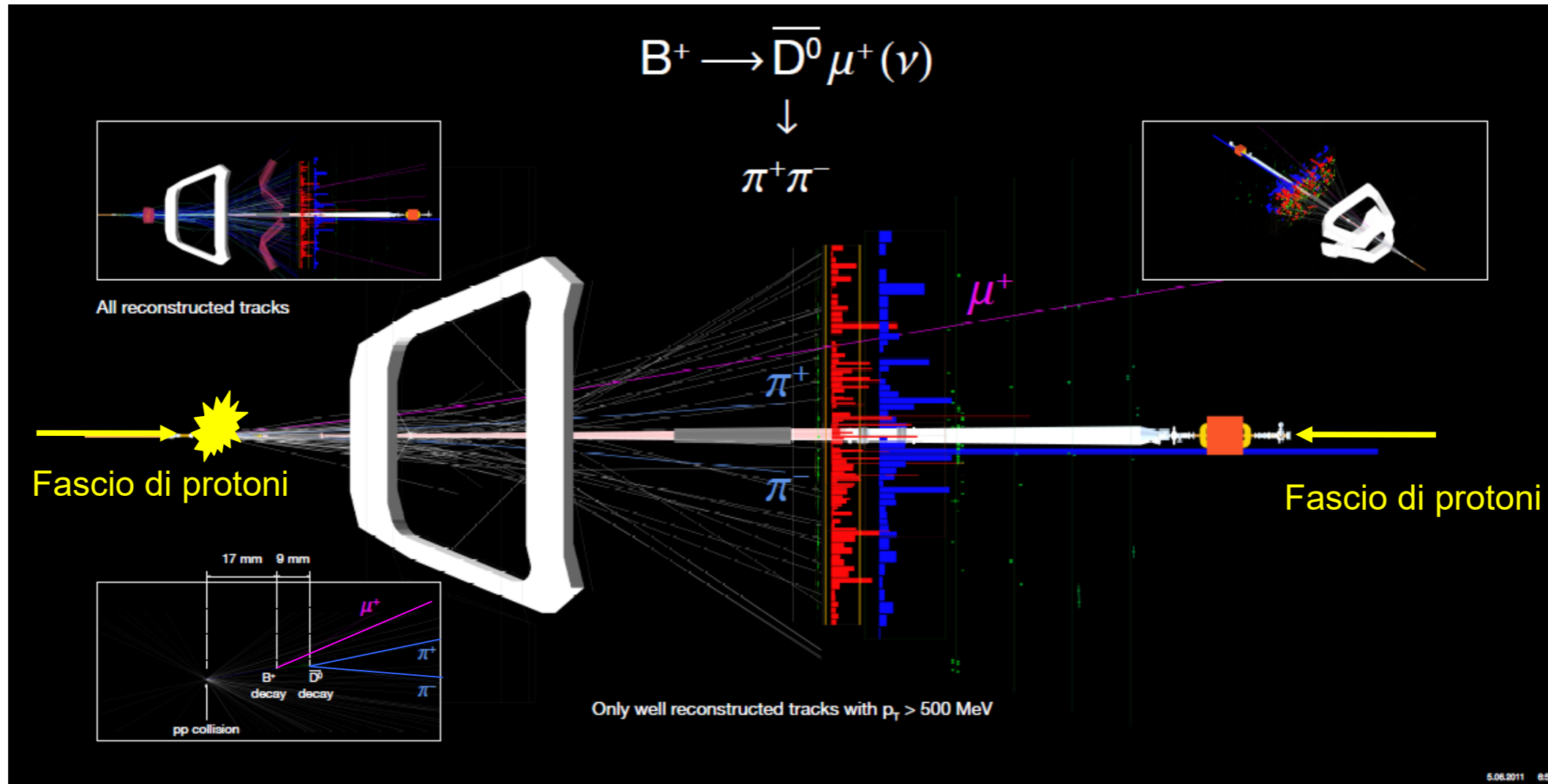


Produzione dal decadimento di una particella B ($\bar{b}d$)



Che segnali vengono rilasciati nel rivelatore?

Esempio con un decadimento simile



A partire dai prodotti di decadimento ($\pi^+ \pi^-$ in questo caso, $K^- \pi^+$ nel caso del nostro esercizio) possiamo **ricostruire** la particella D^0 e studiarne alcune grandezze (momento, massa, ...)

Il Momento di una particella

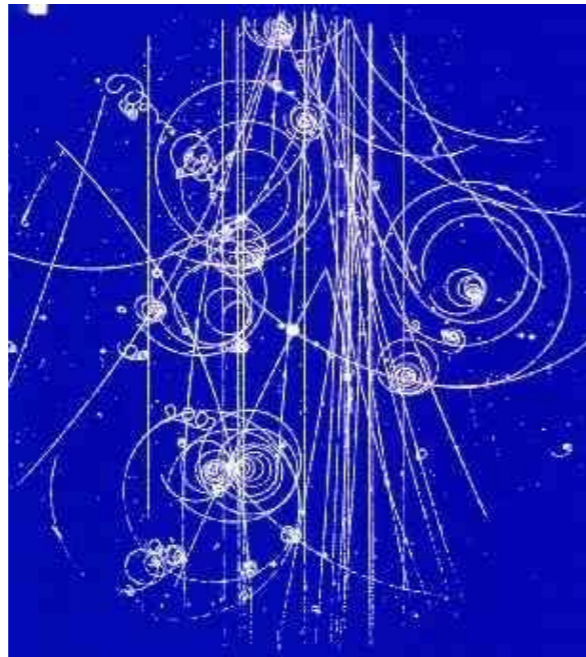
Momento (quantità di moto) di una particella

In **fisica classica**: $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$

In **fisica relativistica** (particelle che viaggiano a velocità prossime a quelle della luce), la formula è un po' più complicata: $\mathbf{p} = m\mathbf{v}\gamma$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Il momento \mathbf{p} di una particella di carica q si misura dal raggio R di curvatura della sua traiettoria in un campo magnetico \mathbf{B} .



Tracce di particelle in una camera a bolle riempita di idrogeno liquido.

$$\mathbf{F}_{Lorentz} = -\mathbf{F}_{centrifuga}$$

$$q|\mathbf{v} \times \mathbf{B}| = m v^2 / R$$

$$R = |\mathbf{p}| / (q|\mathbf{B}|)$$

Grande raggio \rightarrow grande momento
 Piccolo raggio \rightarrow piccolo momento.

Conservazione della quantità di moto:

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

La massa

Ricaviamo l'espressione della massa dalla formula dell'energia relativistica $E=mc^2$:

$$E = \sqrt{(\vec{p} \cdot c)^2 + (m_0 \cdot c^2)^2} \quad \longrightarrow \quad m_0 = \sqrt{\frac{E^2}{c^4} - \frac{p^2}{c^2}}$$

$$\mathbf{p}_{D^0} = \mathbf{p}_K + \mathbf{p}_\pi \quad E_{D^0} = E_K + E_\pi$$

Nel nostro caso $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$, e possiamo misurare i momenti di K^- e π^+ . Sostituendo nella formula, e facendo qualche approssimazione:

$$m_{D^0} \approx \frac{1}{c} \sqrt{2 (1 - \cos(\beta)) p_K p_\pi}$$

Dove β è l'angolo tra K^- e π^+

$$\mathbf{m}(D^0) = (1864.83 \pm 0.05) \text{ MeV}$$

Valore che dovrete misurare!

NB: $1 \text{ MeV}/c^2 = 1.78 \times 10^{-30} \text{ Kg}$

$$D^0 \rightarrow K^- \pi^+ / \text{anti-}D^0 \rightarrow K^+ \pi^-$$

Event Display Exercise

Event handler

event_1_0.json

previous

next

View

Zoom

Detector

Help

View

Auto rotate

Legend

K⁻ —

K⁺ —

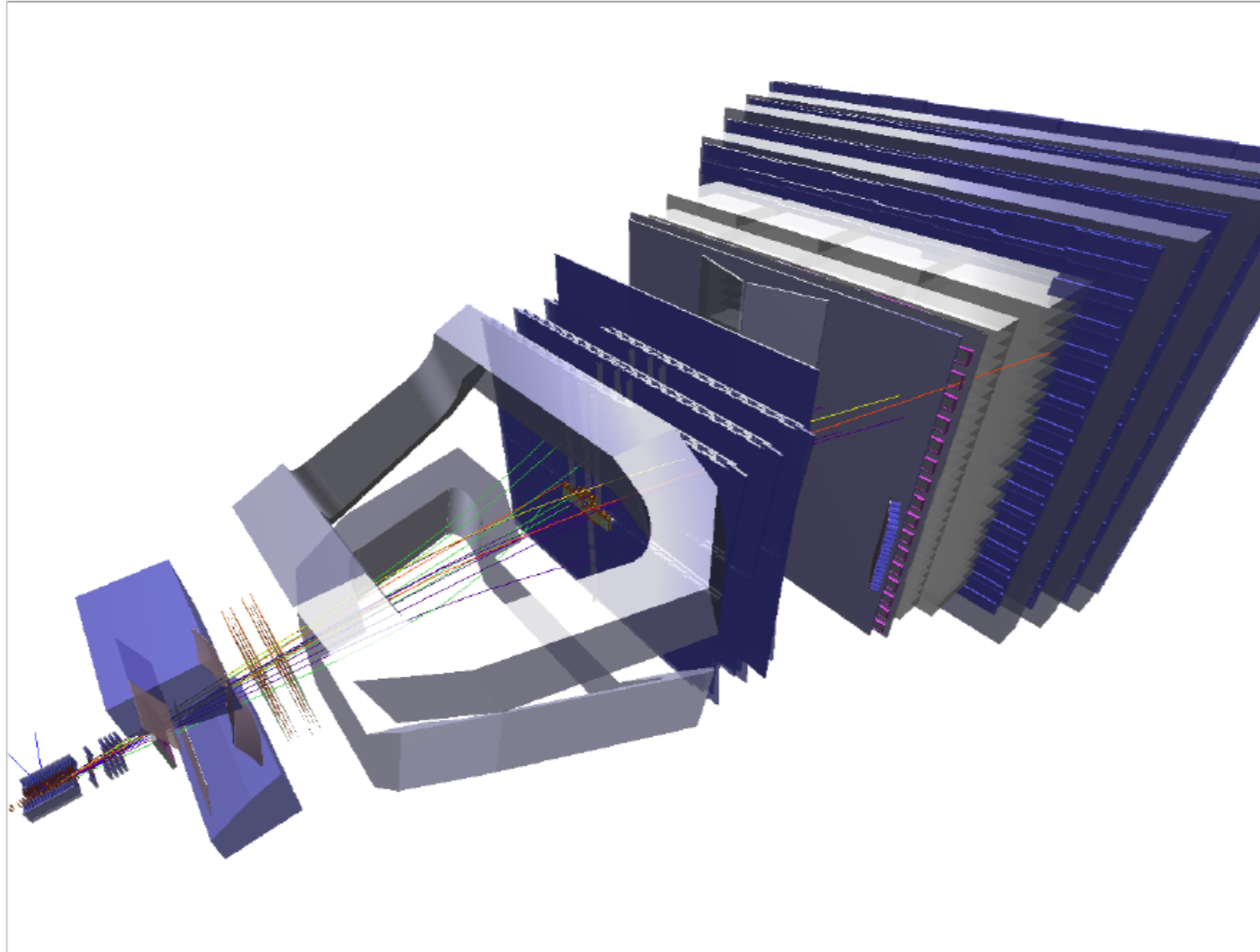
π⁺ —

π⁻ —

D⁰ —

Read instructions

Download JSON

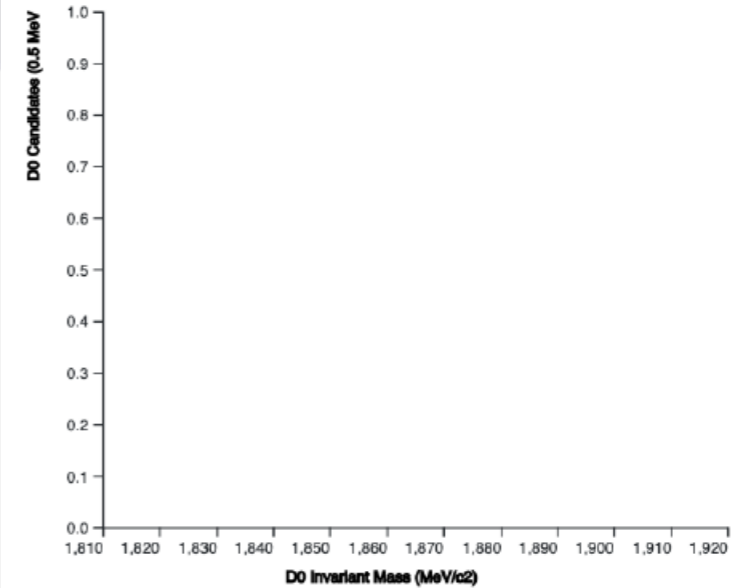


Particle information

E	3340.767	MeV
chi2	1.763	
ipchi2	18390.679	
mass	139.570	MeV/c ²
name	pi-	
ZFstM	169.454	

My particles

Mass	MeV/c ²
Add	



Prima parte dell'esercizio: selezione degli eventi $D^0 \rightarrow K^-\pi^+$ / $\text{anti-}D^0 \rightarrow K^+\pi^-$

Event Display Exercise

Event handler
event_1_0.json

previous

next

View

Zoom

Detector

Help

View

Auto rotate

Legend

— K⁻

— K⁺

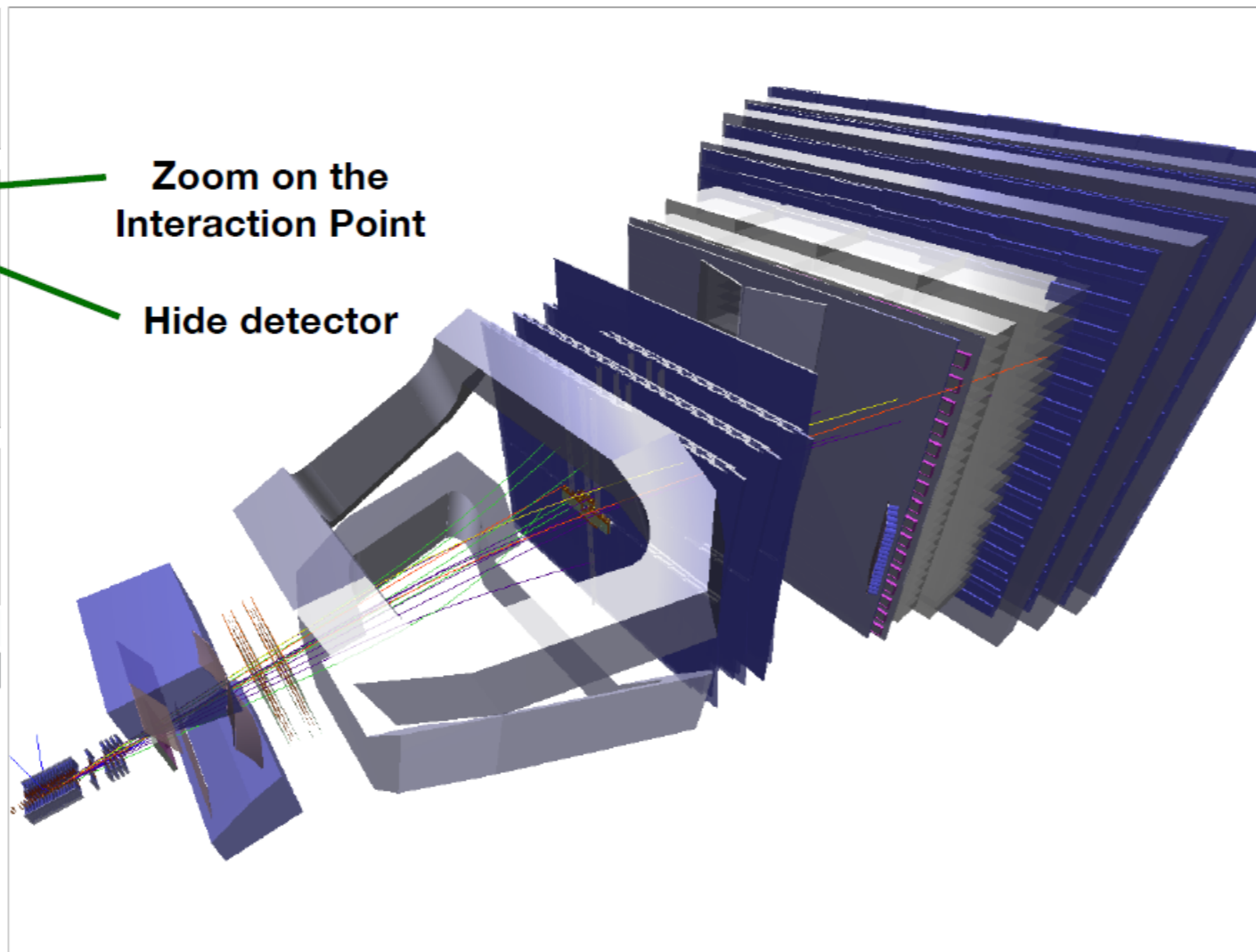
— pi⁺

— pi⁻

— D⁰

Read instructions

Download JSON



Particle information

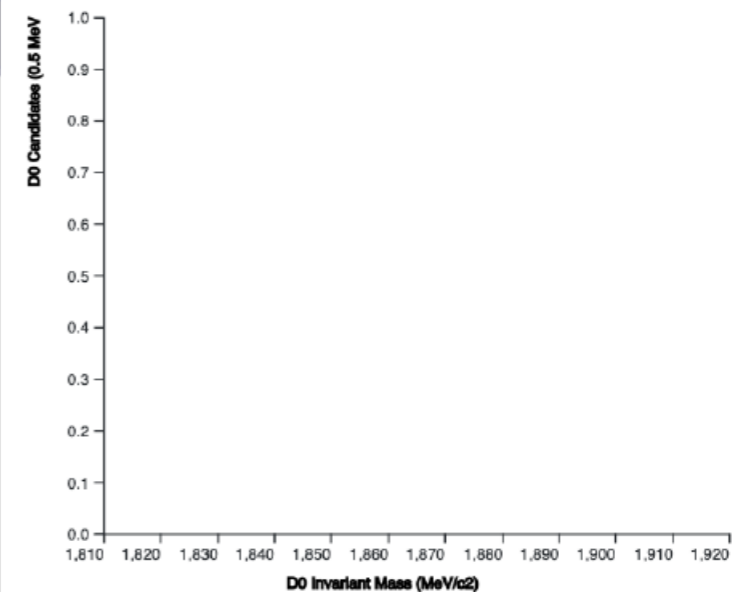
E	3340.767	MeV
chi2	1.763	
ipchi2	18390.679	
mass	139.570	MeV/c ²
name	pi-	
ZFstM	169.454	

My particles

Mass

MeV/c²

Add



Prima parte dell'esercizio: selezione degli eventi $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$ / $\text{anti-}D^0 \rightarrow K^+ \pi^-$

Event Display Exercise

Event handler
event_1_0.json

previous

next

View

Zoom

Detector

Help

View

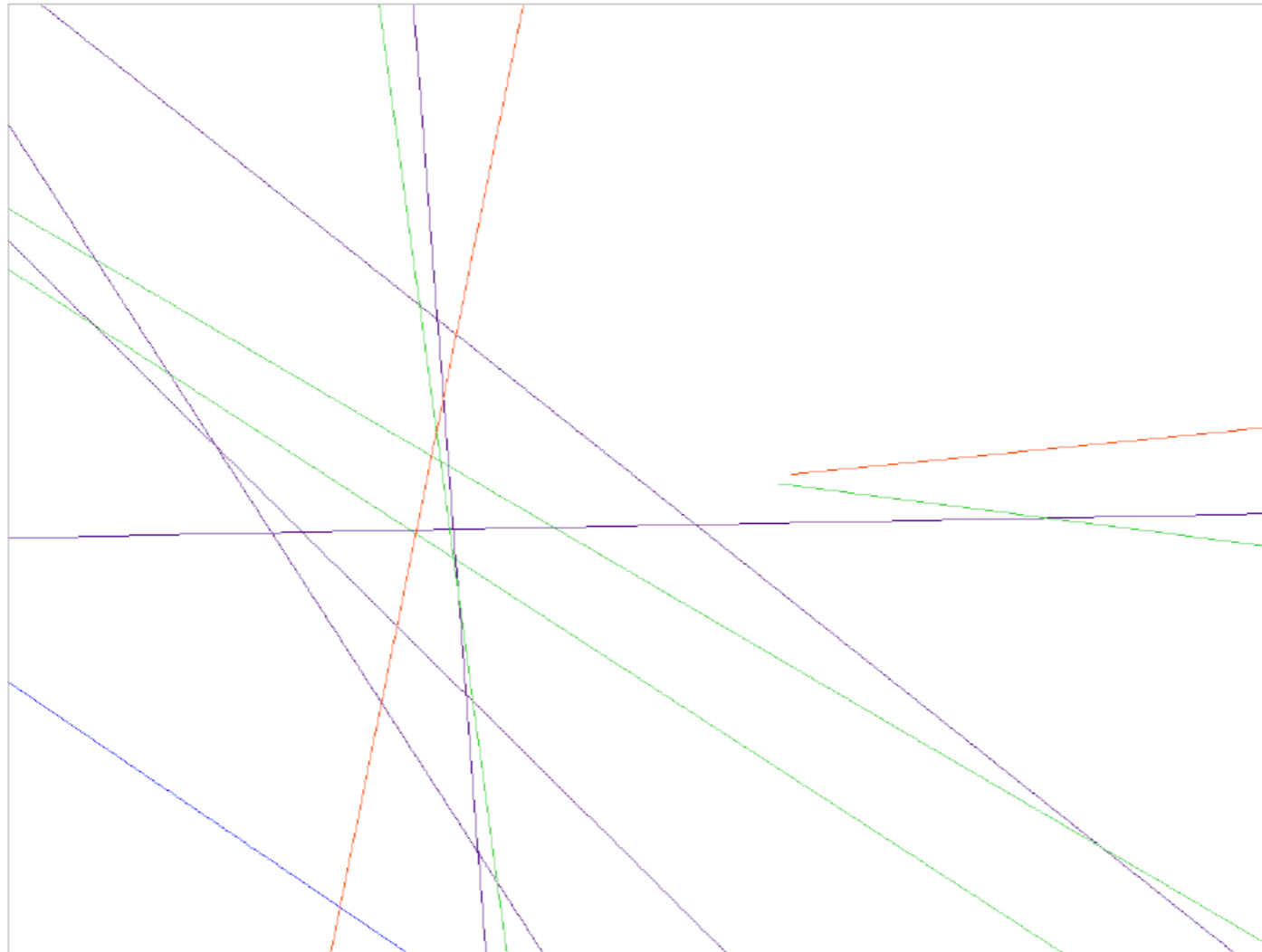
Auto rotate

Legend

- K^-
- K^+
- π^+
- π^-
- D^0

Read instructions

Download JSON

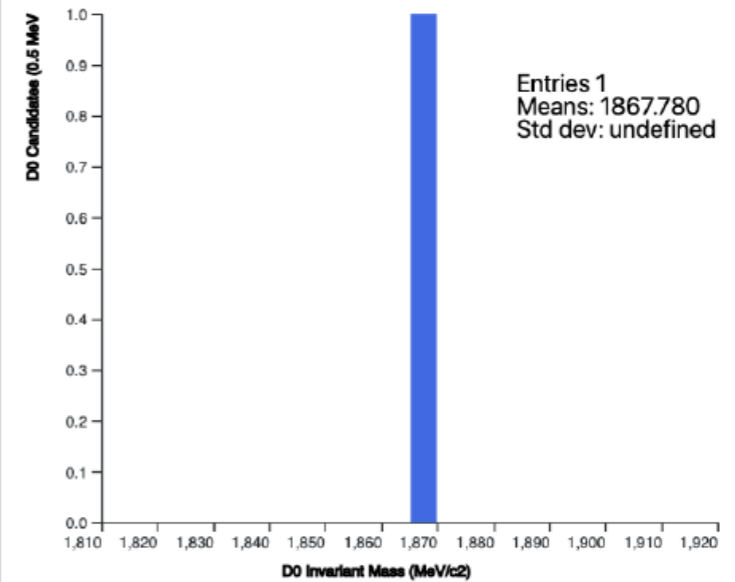


Particle information

E	33628.960	MeV
chi2	0.516	
ipchi2	8.081	
mass	139.570	MeV/c ²
name	pi+	
ZFstM	584.415	

My particles

K-	
pi+	
Mass	MeV/c ²
1867.780	
Add	



Prima parte dell'esercizio: selezione degli eventi $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$ / $\text{anti-}D^0 \rightarrow K^+ \pi^-$

Event Display Exercise

Event handler
event_1_0.json

previous

next

View

Zoom

Detector

Help

View

Auto rotate

Legend

K^- —

K^+ —

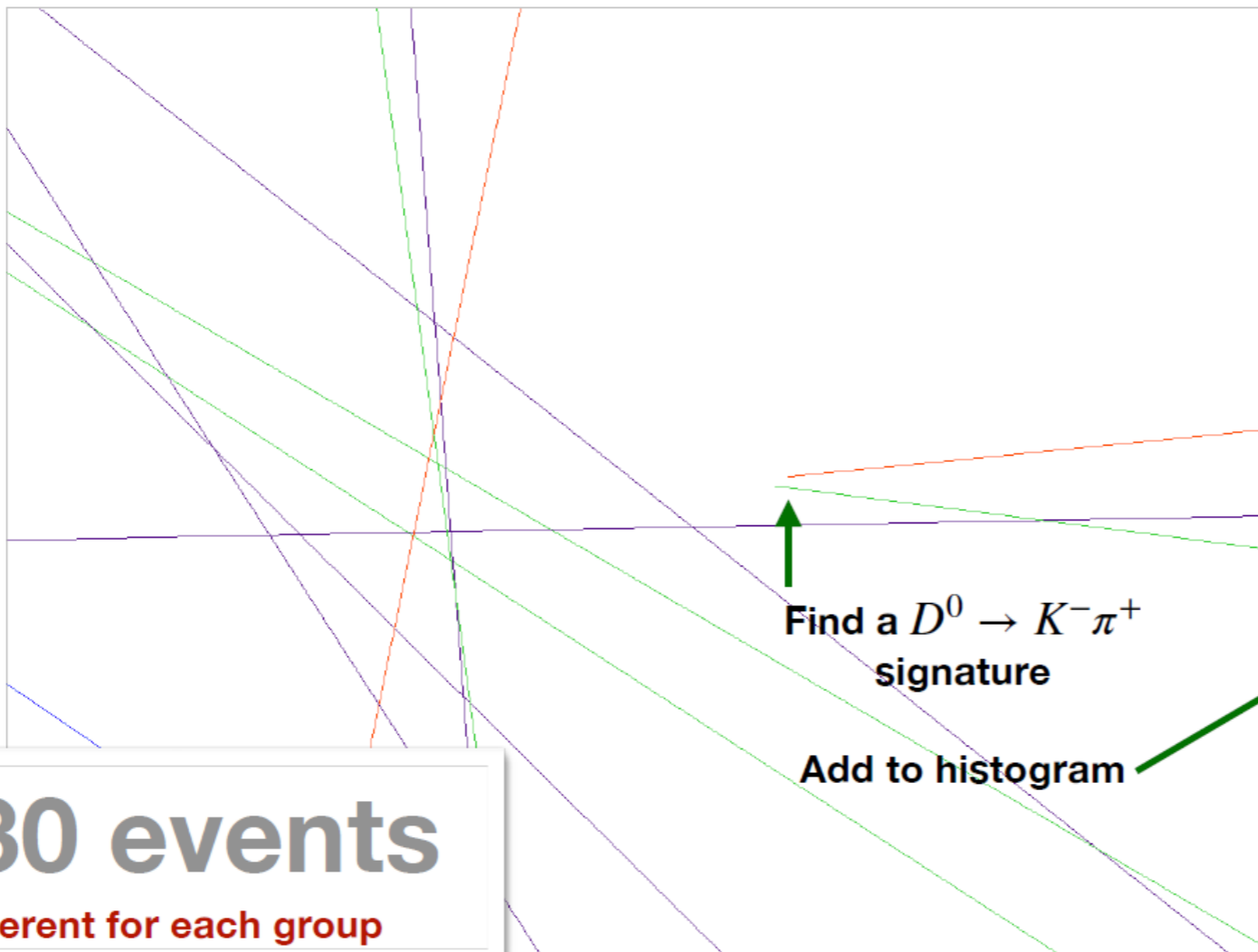
π^+ —

π^- —

D^0 —

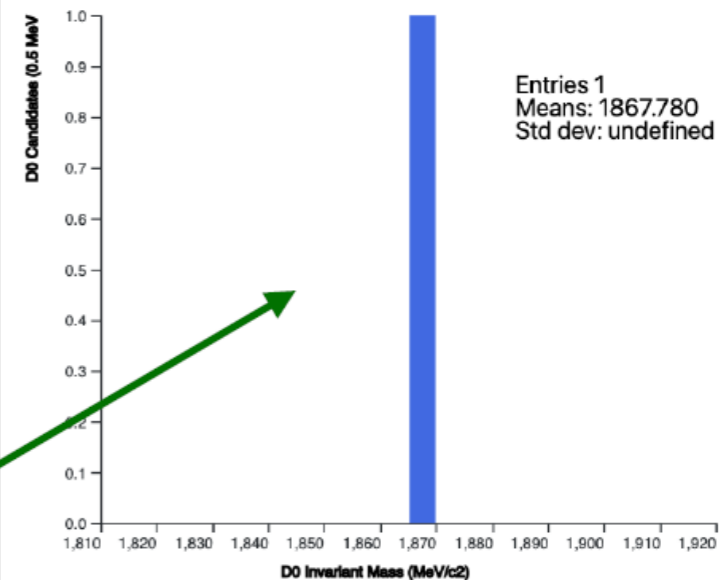
Read instructions

Download JSON



Particle information		
E	33628.960	MeV
chi2	0.516	
ipchi2	8.081	
mass	139.570	MeV/c ²
name	pi+	
ZFstM	584.415	

My particles	
K-	
pi+	
Mass	
1867.780	MeV/c ²
Add	



x 30 events
Different for each group

Prima parte dell'esercizio: selezione degli eventi $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$ / $\text{anti-}D^0 \rightarrow K^+ \pi^-$

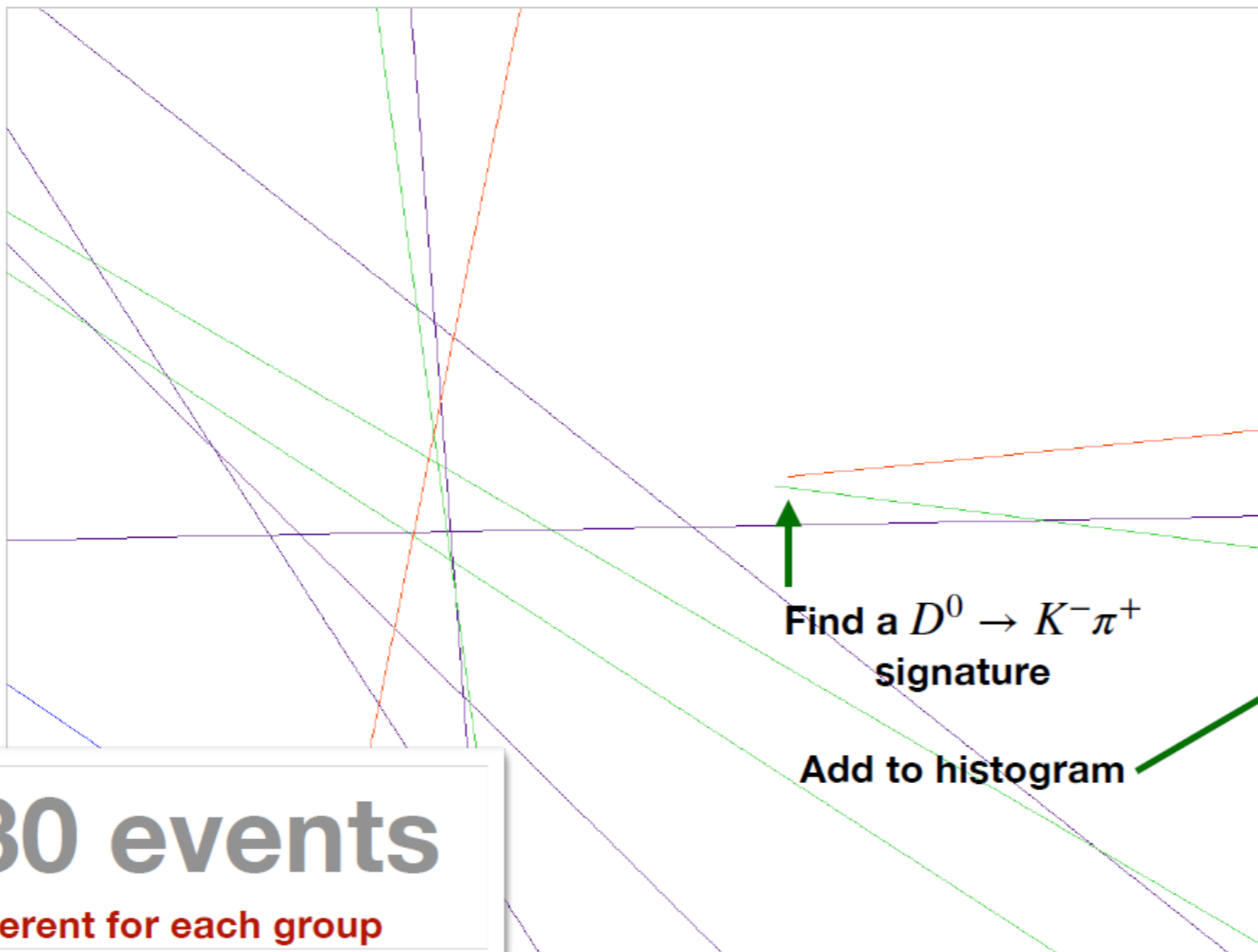
Event Display Exercise

Event handler
event_1_0.json
previous
next

View
Zoom
Detector
Help
View
 Auto rotate

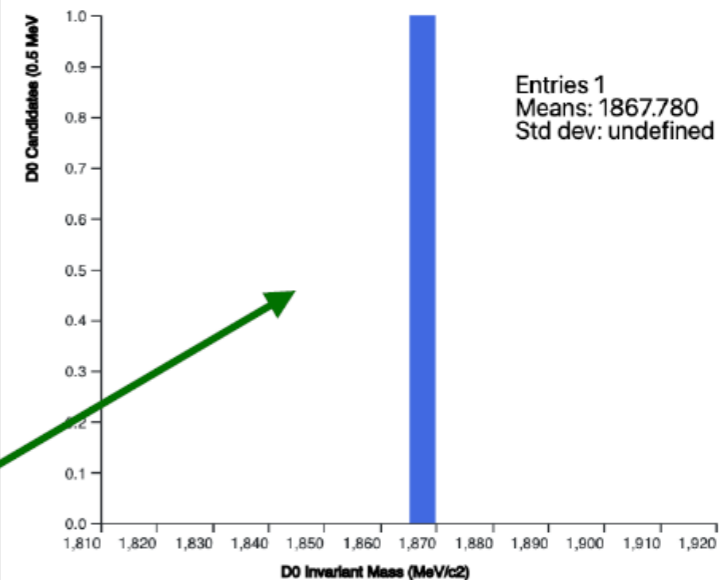
Legend
K⁻
K⁺
pi⁺
pi⁻
D⁰

[Read instructions](#)
[Download JSON](#)



Particle information		
E	33628.960	MeV
chi2	0.516	
ipchi2	8.081	
mass	139.570	MeV/c ²
name	pi+	
ZFstM	584.415	

My particles	
K-	
pi+	
Mass	MeV/c ²
1867.780	
Add	



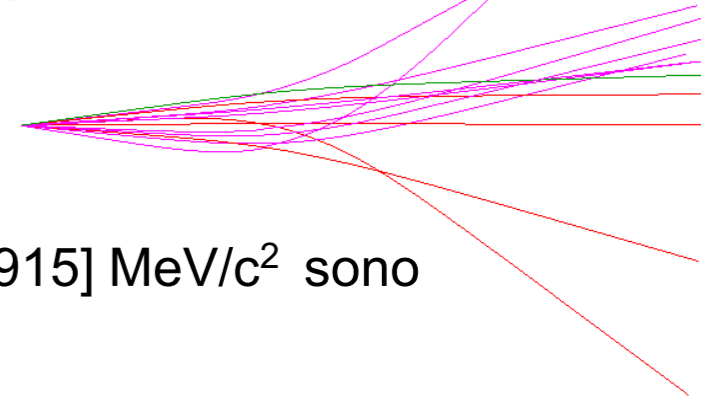
x 30 events
Different for each group

Suggerimento

In ogni evento vedrete decine di tracce.
Come si fa a capire quali potrebbero provenire dal D^0 ?

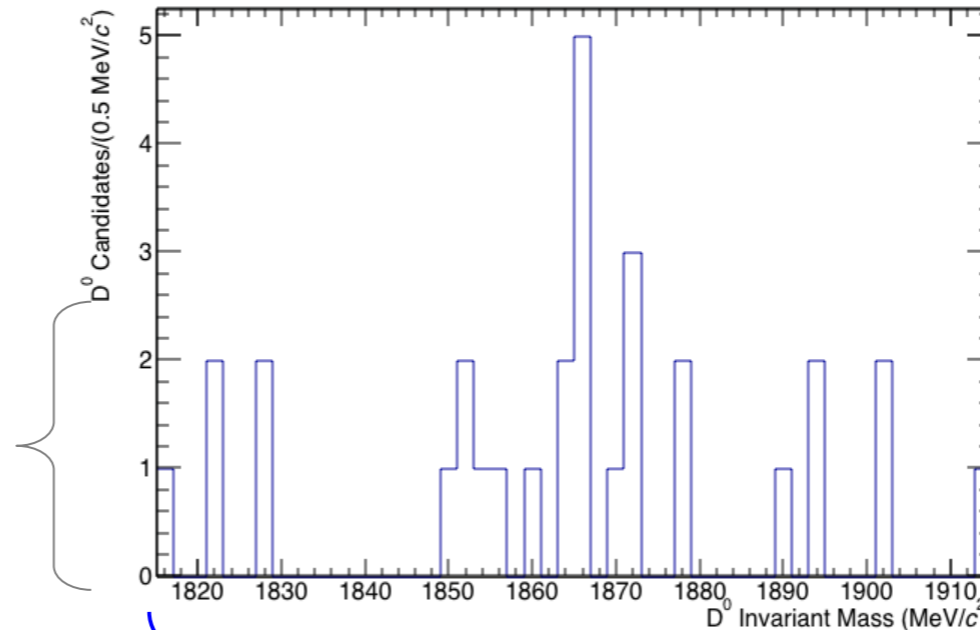
Ricordate che dovete selezionare **2 tracce di carica opposta**:

- $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$ e anti- $D^0 \rightarrow K^+ \pi^-$
- La massa del D^0 è $1864 \text{ MeV}/c^2$ (valori fuori dall'intervallo $[1815, 1915] \text{ MeV}/c^2$ sono sicuramente fondo)
- Il D^0 “viaggia” prima di decadere (forma un vertice secondario, staccato dal vertice di interazione pp)
- Suggerimento: il campione contiene 1 solo D^0 per ciascun evento



Supponiamo di avere misurato più volte una grandezza X .
Un modo conveniente per rappresentare questi valori è **l'istogramma**.

Altezza dei rettangoli =
frequenza dei valori misurati in
ciascun intervallo (bin).



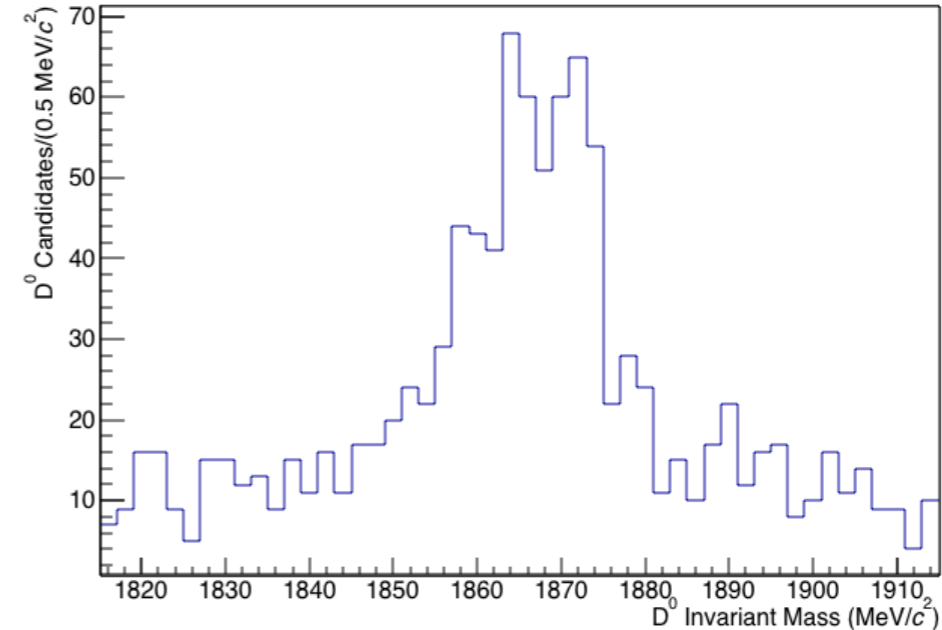
base= l'intervallo in cui sono contenute le misure.

Difficile stabilire il valore della massa del D^0 quando la statistica è così bassa

Una parentesi: come rappresentiamo queste grandezze? Gli istogrammi

Con **maggiore statistica** si vede chiaramente un accumulo di eventi attorno al valore vero della massa del D^0 (**segnale**) ma una parte di eventi è distribuita in maniera casuale (**fondo**).

Con maggiore statistica, l'errore di una misura si riduce di un fattore \sqrt{N} , dove N è il numero di eventi raccolti, in altre parole la precisione sulla misura migliora.



Nel mondo ideale l'istogramma dovrebbe essere popolato solamente per il valore vero della massa del D^0 .

Questo non succede nella realtà perché:

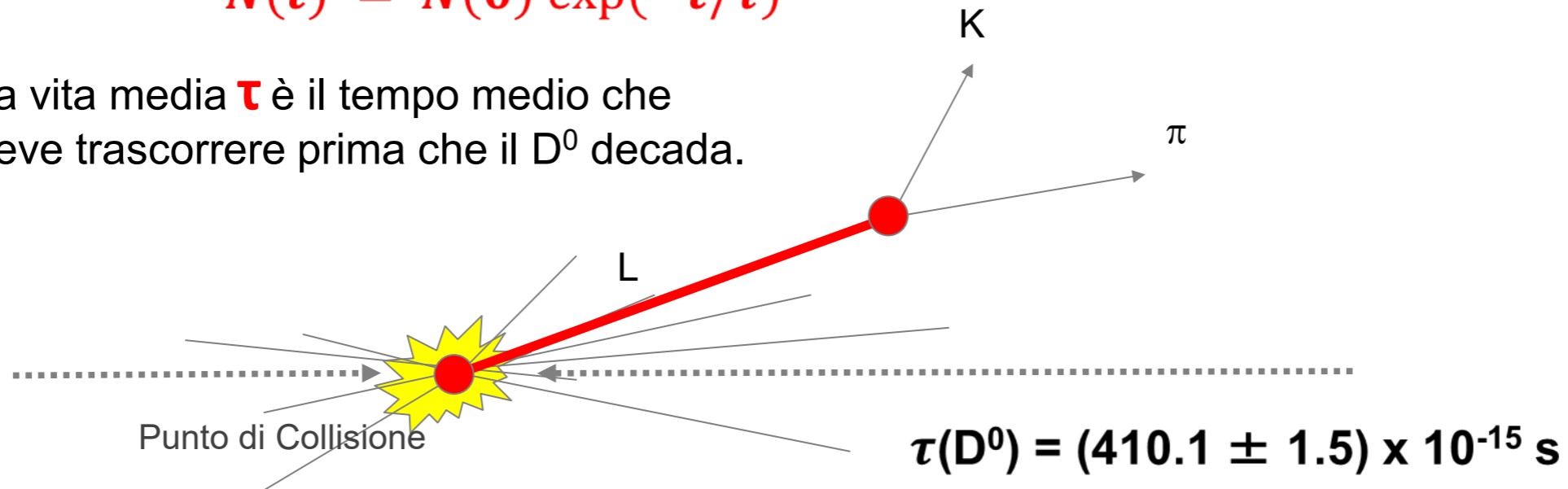
- 1) La precisione del rivelatore non è perfetta, cioè quando si misura la quantità di moto si ha un'incertezza, detta **risoluzione, che allarga il valore misurato della massa del D^0** (simile all'incertezza che assegnate quando misurate distanze con un righello)
- 2) Vista la presenza di decine di particelle per evento, si possono avere **combinazioni casuali di tracce non provenienti da un vero D^0 ma che per caso danno un valore simile della massa (fondo combinatorio)**

Seconda parte dell'esercizio: Misura della vita media del D^0

Il D^0 è una particella instabile, e dopo un certo tempo, decade in particelle più leggere. Il decadimento è descritto dalla legge esponenziale

$$N(t) = N(0) \exp(-t/\tau)$$

La vita media τ è il tempo medio che deve trascorrere prima che il D^0 decada.



La **vita media** è legata allo **spazio percorso** dal D^0 prima di decadere dalla relazione,

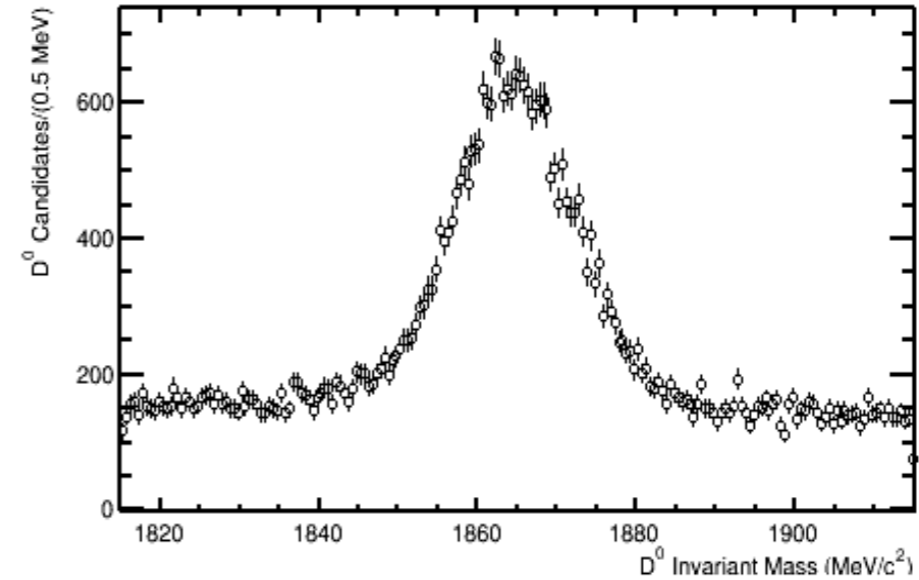
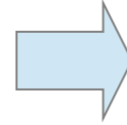
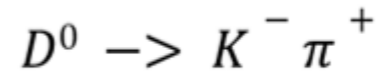
$$L = \gamma vt$$

Valore che dovrete misurare!

analogia a *spazio = velocità x tempo* del "moto uniforme"

Come posso misurare la vita media del D^0 ?

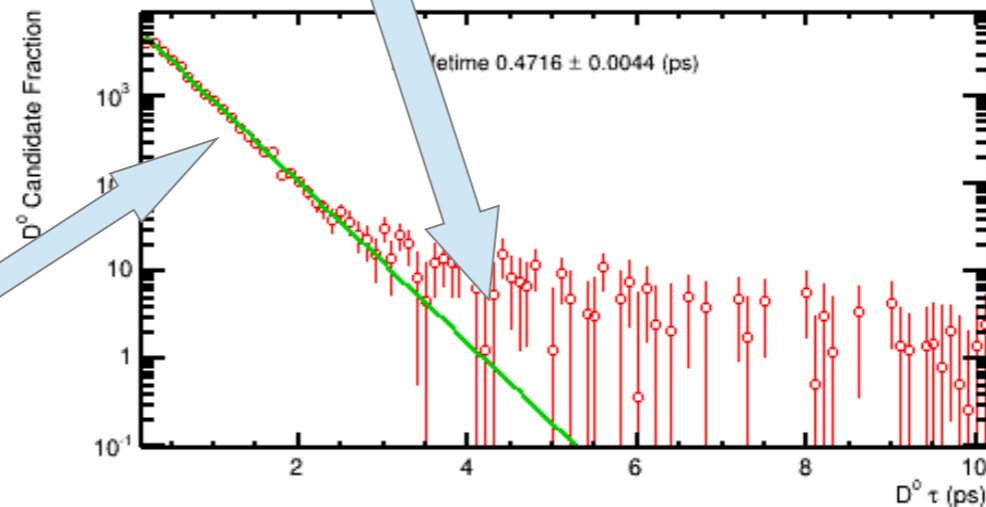
Raccolgo un campione di eventi



Dalla lunghezza di decadimento calcolo il tempo di decadimento: $t = m_{D^0} L / p_{D^0}$

Dalla distribuzione del tempo di decadimento ricavo la vita media τ interpolando con la funzione:

$$N(t) = N(0) \exp(-t/\tau)$$



NB: interpolare = trovare la curva che meglio approssima la mia distribuzione

Attenzione! Segnale e Fondo

Nelle collisioni NON viene sempre prodotta la particella che stiamo cercando!
Essa viene prodotta solo in un sottoinsieme delle collisioni che vengono registrate.

Particella che stiamo cercando → **SEGNALE**

Tutto il resto → **FONDO**

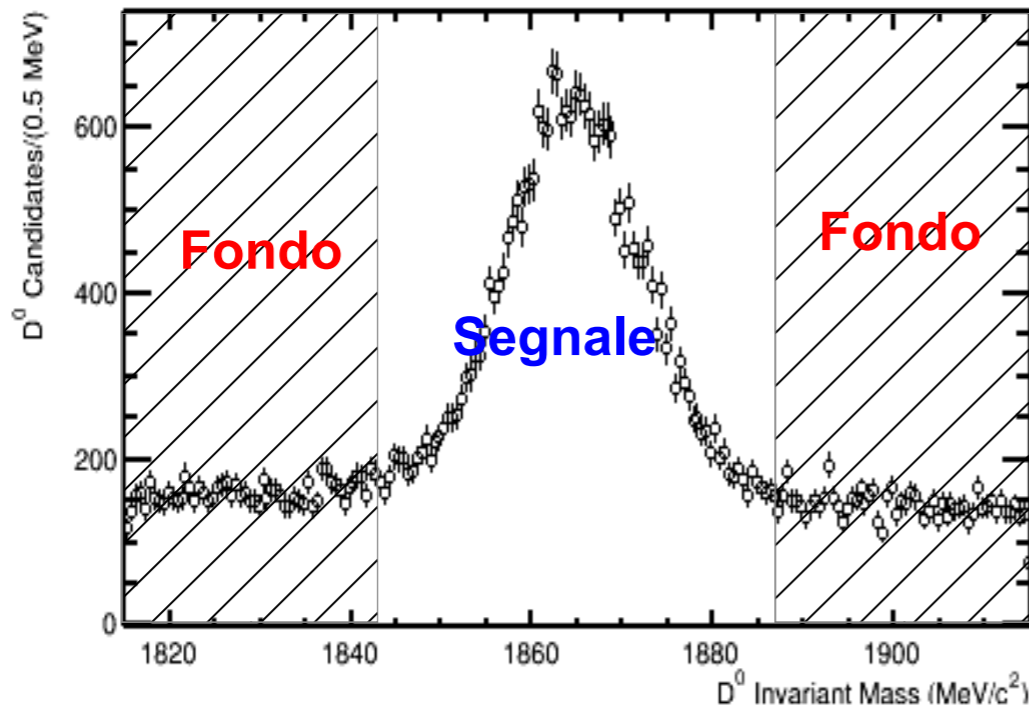
Voi avete selezionato tracce che combinate danno una massa simile a quella del D^0 .

Ma avete sicuramente selezionato anche tracce che non provengono dal D^0 (fondo combinatorio) e che per caso danno un valore di massa simile a quello del D^0 .

Come distinguere nel campione i veri D^0 ?

Come distinguere segnale e fondo?

La massa del D^0 è una variabile fondamentale che separa il segnale (la struttura a picco al centro) dal fondo piatto.

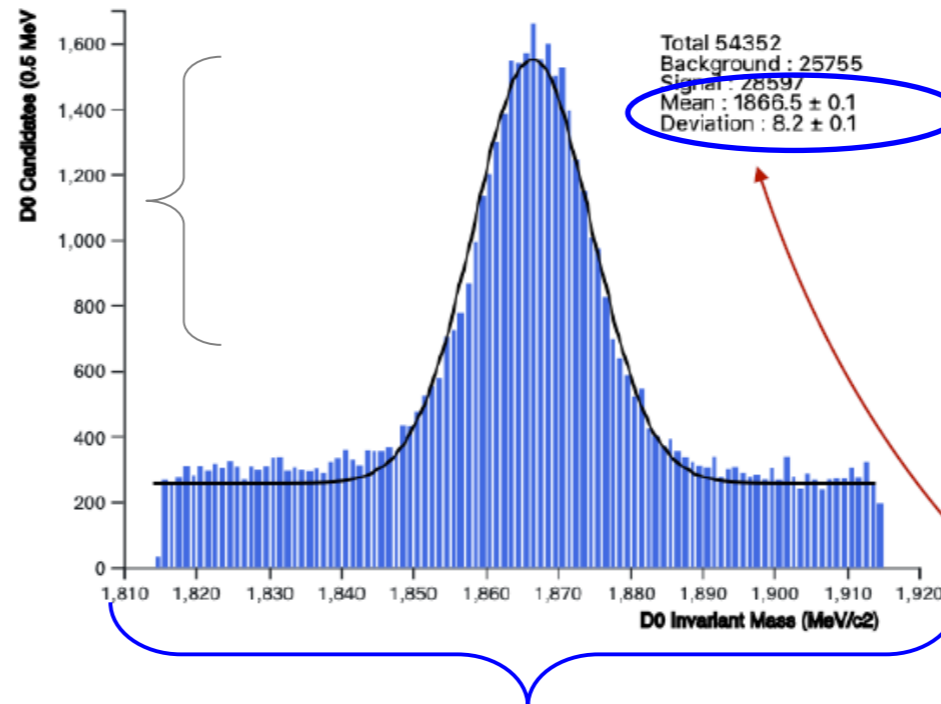


Individuiamo due regioni:

- **regione dominata dal segnale (attorno al picco)**
- **regione dominata dal fondo (bande laterali attorno al picco)**

Con **maggiore statistica** si vede chiaramente un accumulo di eventi attorno al valore vero della massa del D^0 (**segnale**) ma una parte di eventi è distribuita in maniera casuale (**fondo**).

Interpolando i dati con una funzione che descrive il **segnale (gaussiana)** e il **fondo (costante)** si ricava il valore della massa del D^0 (media della gaussiana)



Altezza dei rettangoli = frequenza dei valori misurati in ciascun intervallo (bin).

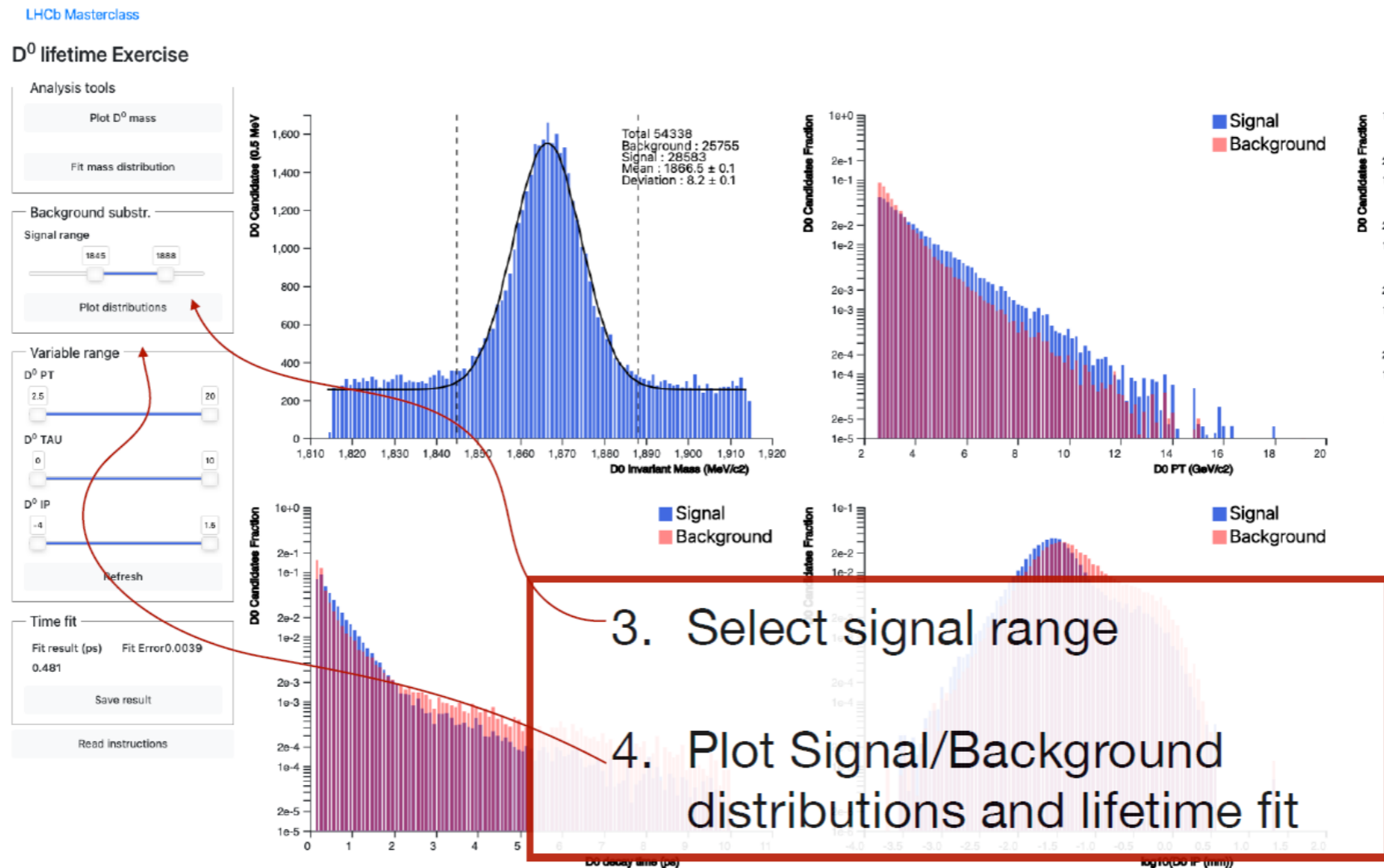
1. Plot a D^0 sample (same sample for everybody)
2. Fit the distribution (get N_{sig} , N_{bkg})

base= l'intervallo in cui sono contenute le misure.

Leggi i **risultati del fit** e utilizzali per determinare l'**intervallo del segnale**.
La funzione che viene adattata al segnale è una **Gaussiana**, la cui larghezza, indicata dalla lettera greca σ , è correlata a quanto il segnale si estende rispetto al valore medio (il più probabile).

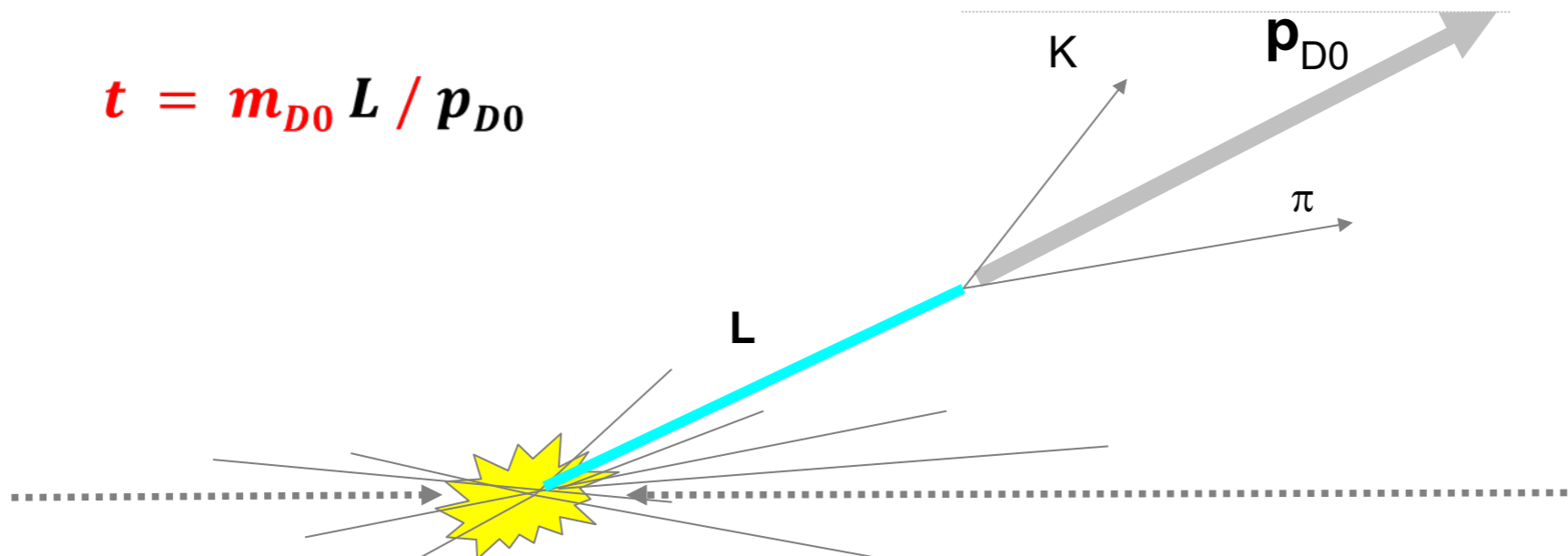
In particolare, un intervallo di $\pm 1 \sigma$ attorno al **valore medio** contiene il **68% del segnale**, mentre $\pm 3 \sigma$ contiene il **99,7% del segnale**

Utilizza lo slider per impostare l'intervallo del segnale su $\pm 3 \sigma$ attorno al valore medio.

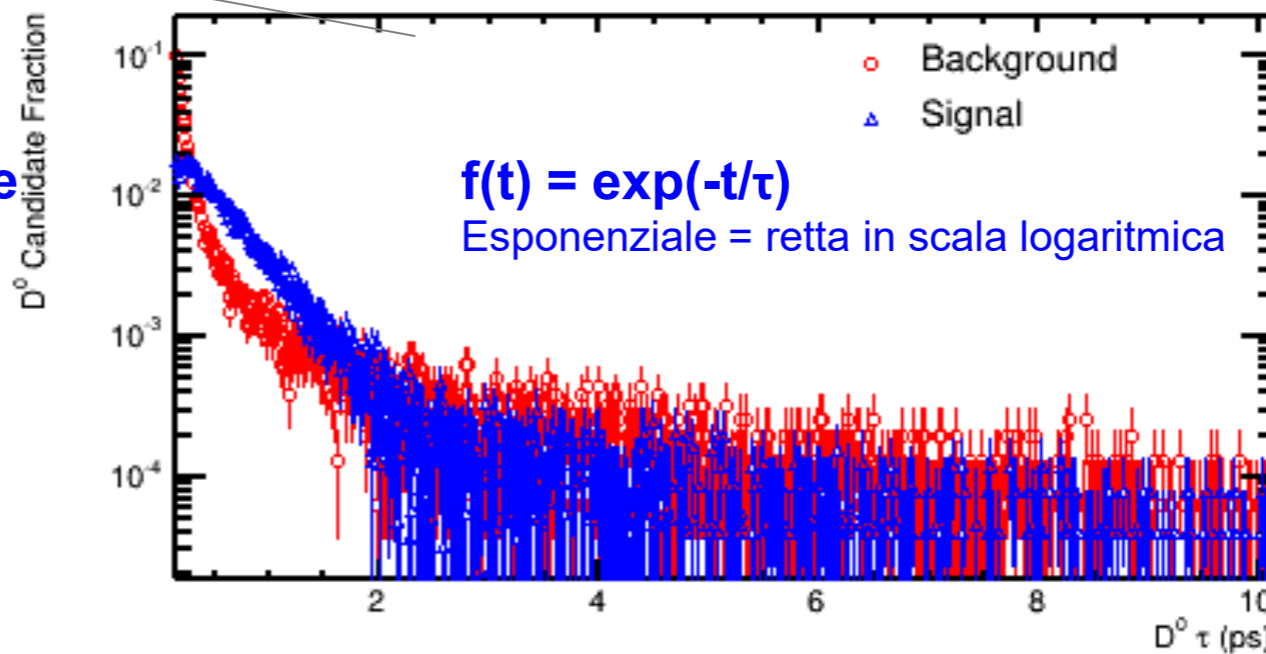


Il tempo di decadimento del D^0

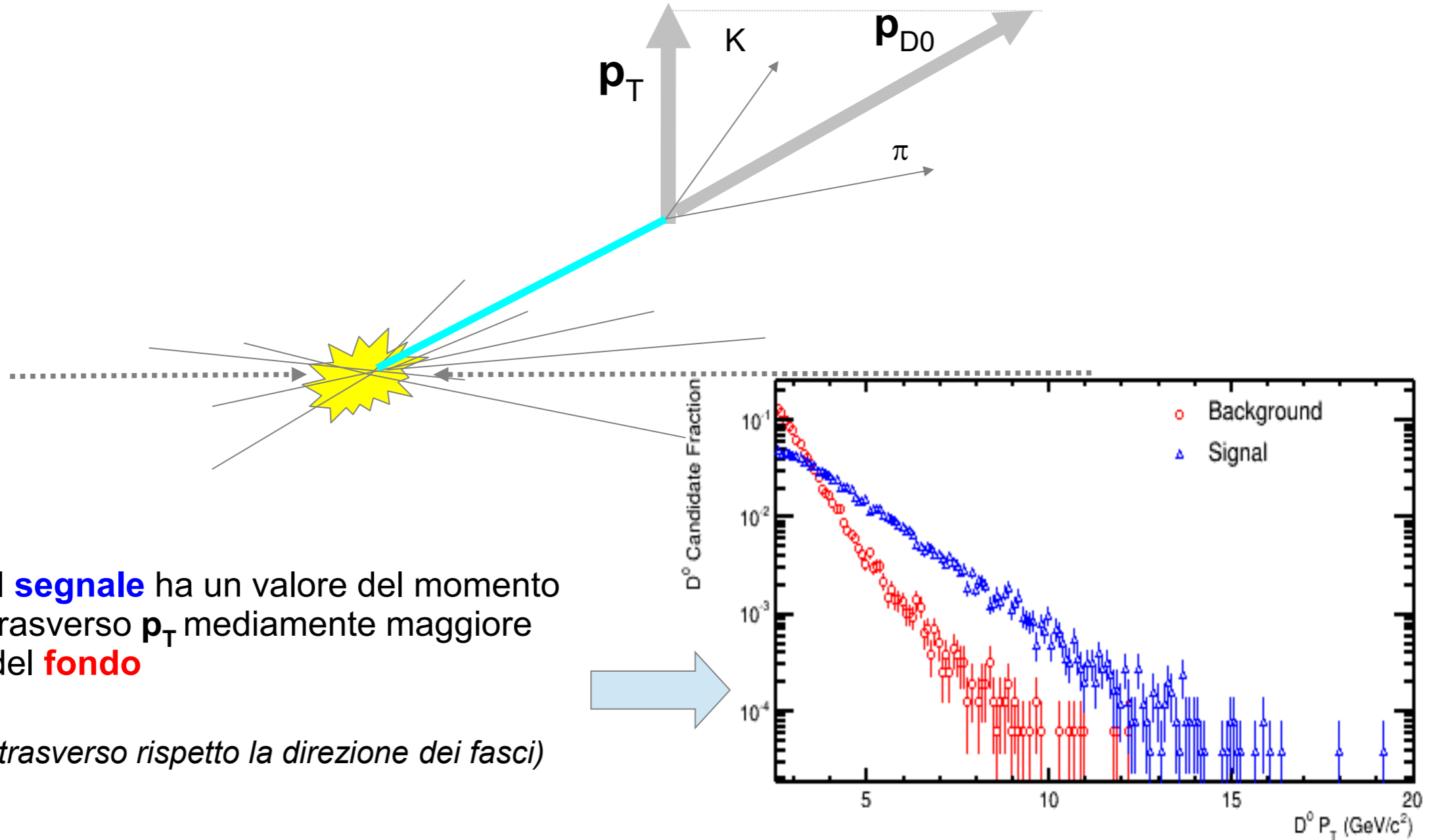
$$t = m_{D^0} L / p_{D^0}$$



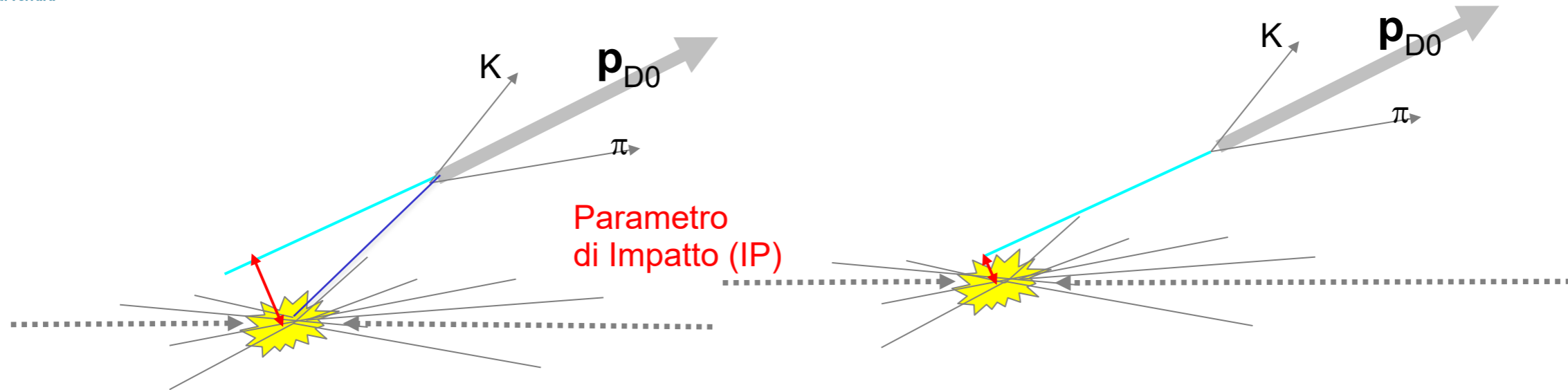
- Il segnale segue una distribuzione **esponenziale**
- Il fondo ha tempi di decadimento **tipicamente piu piccoli** (tracce dal PV)



Il momento trasverso del D^0



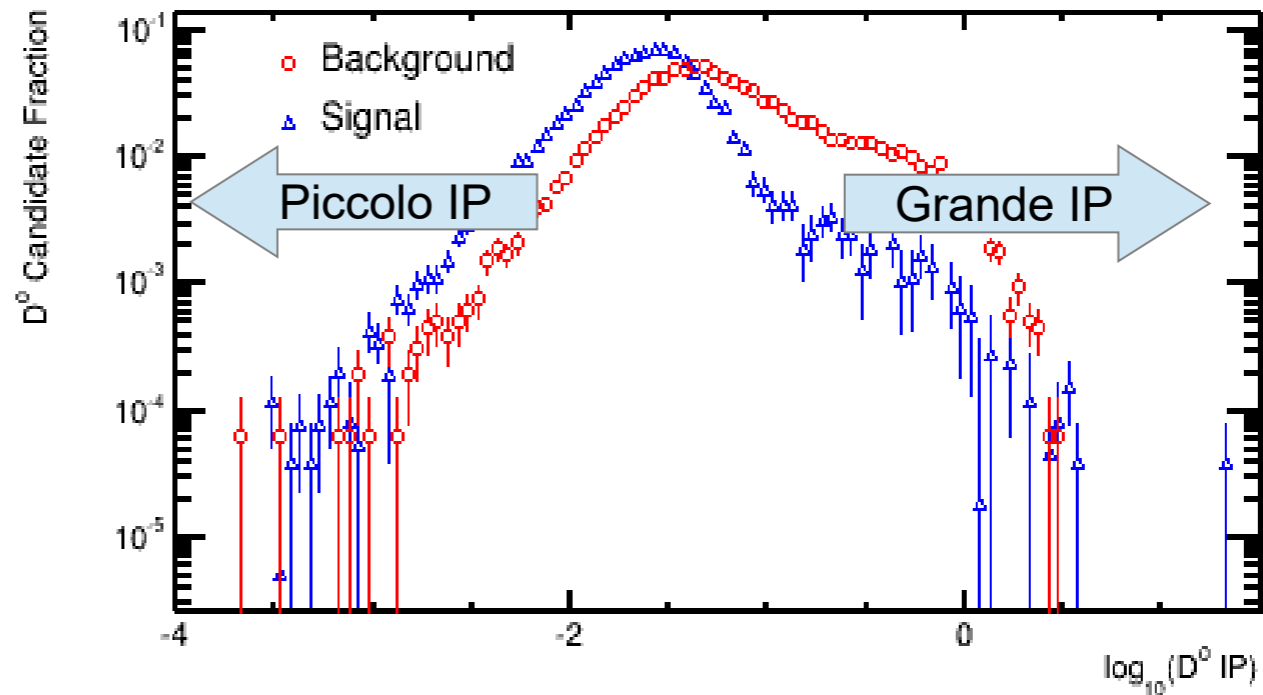
Il parametro d'impatto del D^0



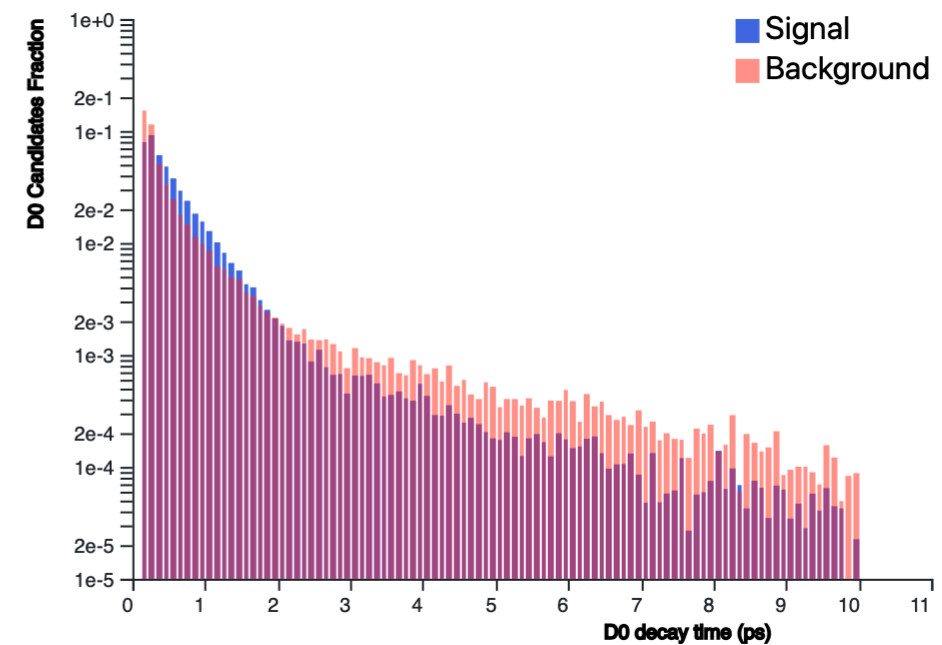
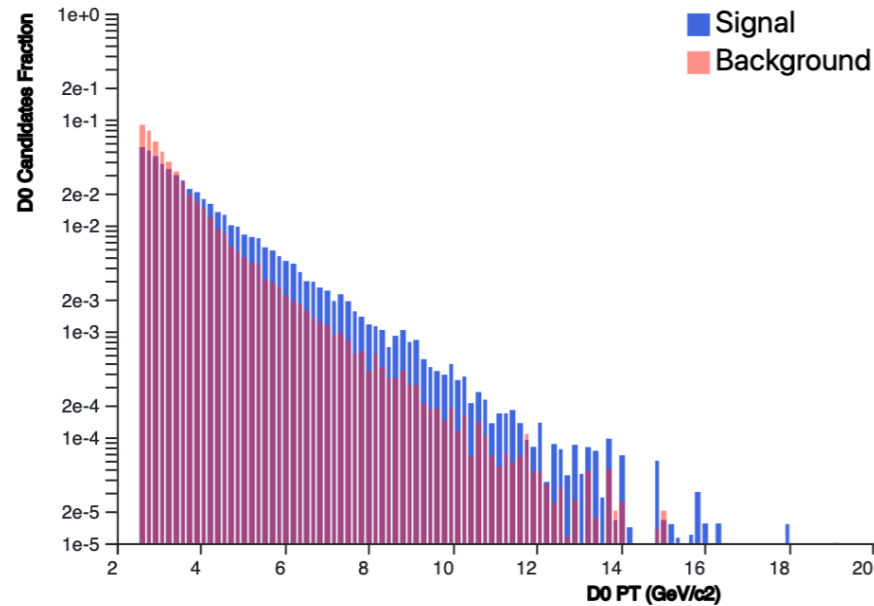
NB: in questo grafico, per evidenziare meglio le differenze tra segnale e fondo abbiamo rappresentato il logaritmo di IP.

$\text{Log}(\text{IP}) > 0 \rightarrow$ grande IP

$\text{Log}(\text{IP}) < 0 \rightarrow$ piccolo IP



Come scegliere le selezioni?



- Per quanto riguarda PT e D0 decay time, **occorre scegliere un valore che massimi la presenza del segnale e minimizzi quella di fondo**
- **Scegliere diversi valori di tagli di PT e D0 decay time e vedere come evolve la distribuzione di massa del D0 in termini del segnale e del fondo**
- NB: in generale si tratta di scelte che effettuiamo quando svolgiamo una misura. In assenza di ulteriori informazioni (per esempio provenienti da altre misure), **occorrerebbe assegnare una incertezza a queste scelte che prende il nome di incertezza sistematica**

Osserva il fit della distribuzione della vita media. Salva i risultati e confrontali con il valore del PDG. Concordano? Ripeti la procedura variando l'intervallo della variabile superiore D0 log(IP) da 1.5 a -2 in incrementi di 0.2. Noti un pattern?

D⁰ lifetime Exercise

Analysis tools

Plot D⁰ mass

Fit mass distribution

Background substr.

Signal range



Plot distributions

Variable range

D⁰ PT



D⁰ TAU



D⁰ IP



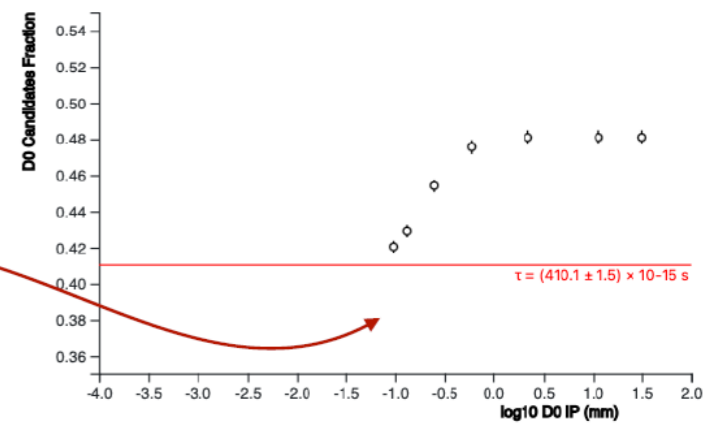
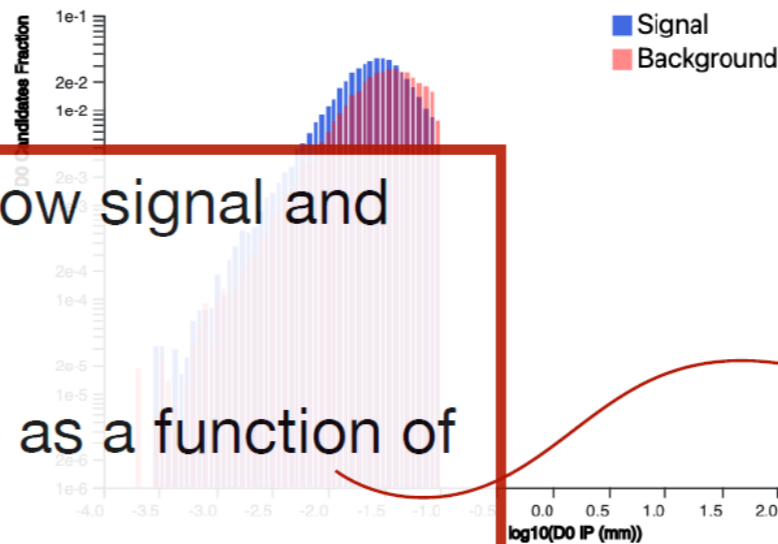
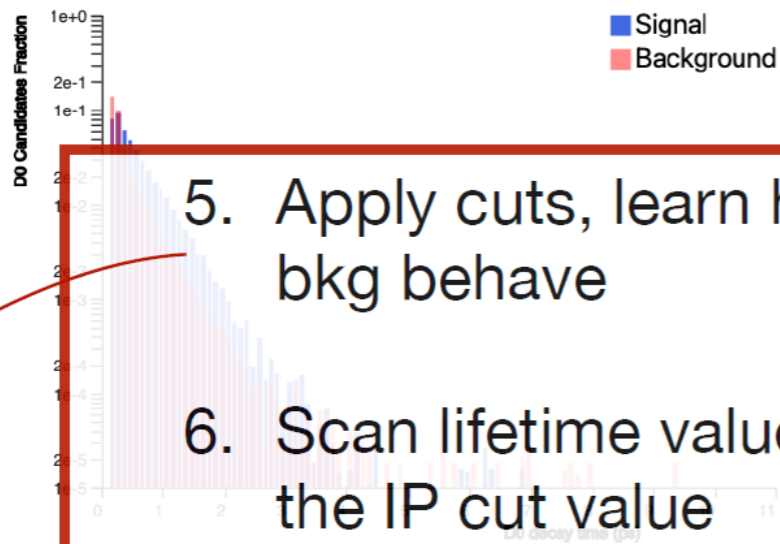
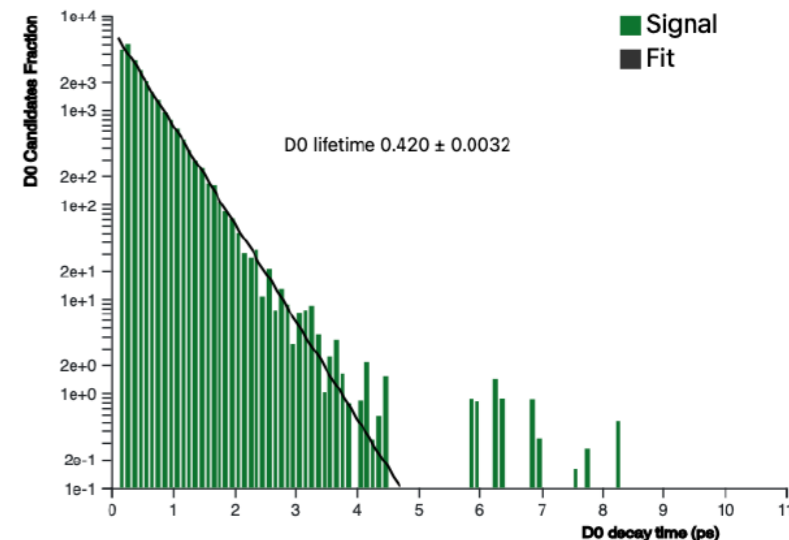
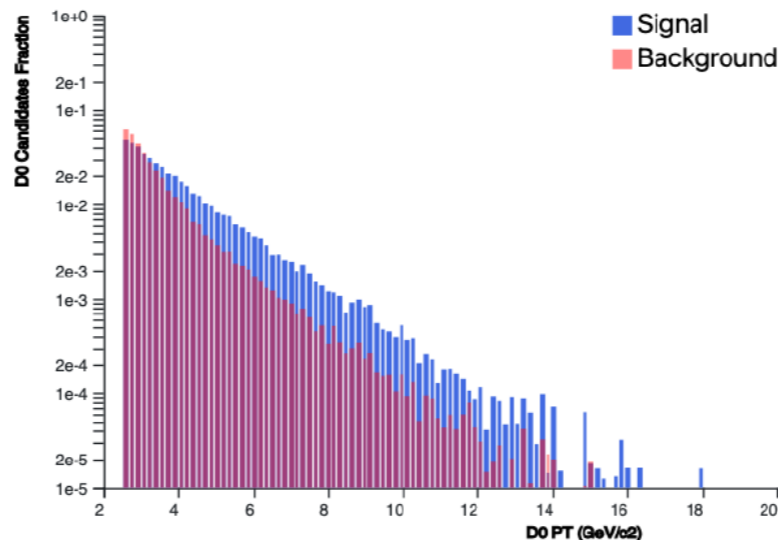
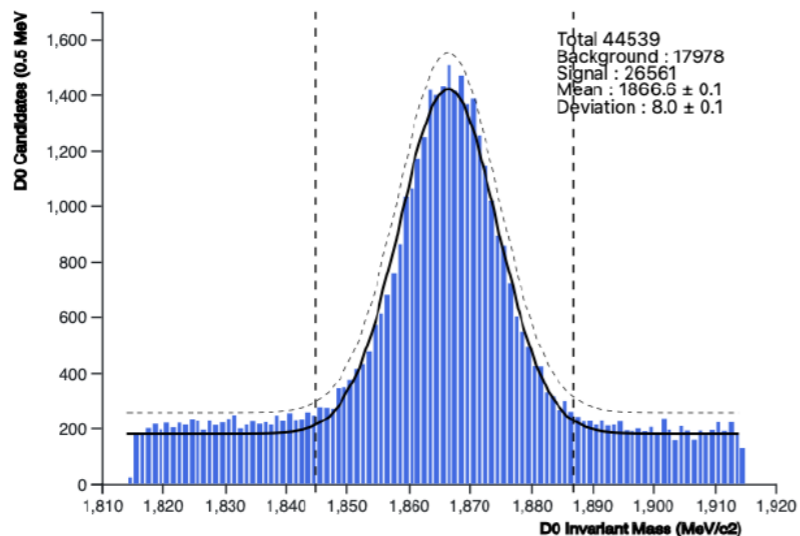
Refresh

Time fit

Fit result (ps) Fit Error 0.0032
0.420

Save result

Read instructions



5. Apply cuts, learn how signal and bkg behave
6. Scan lifetime value as a function of the IP cut value

Valori di riferimento:

$$m (D^0) = (1864.84 \pm 0.05) \text{ MeV}/c^2$$

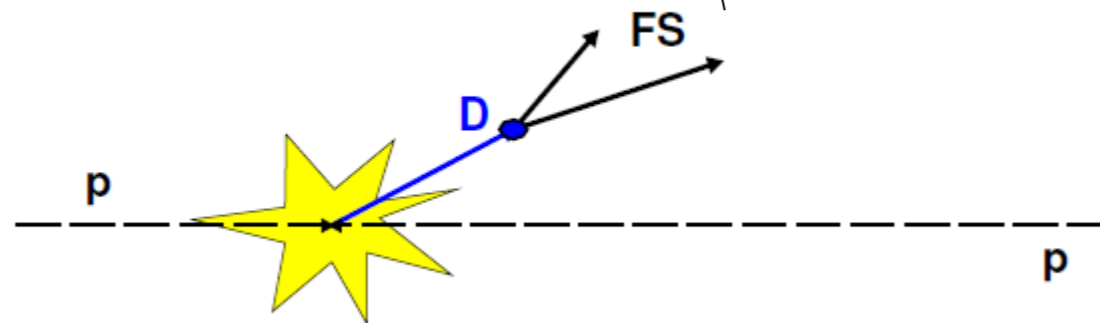
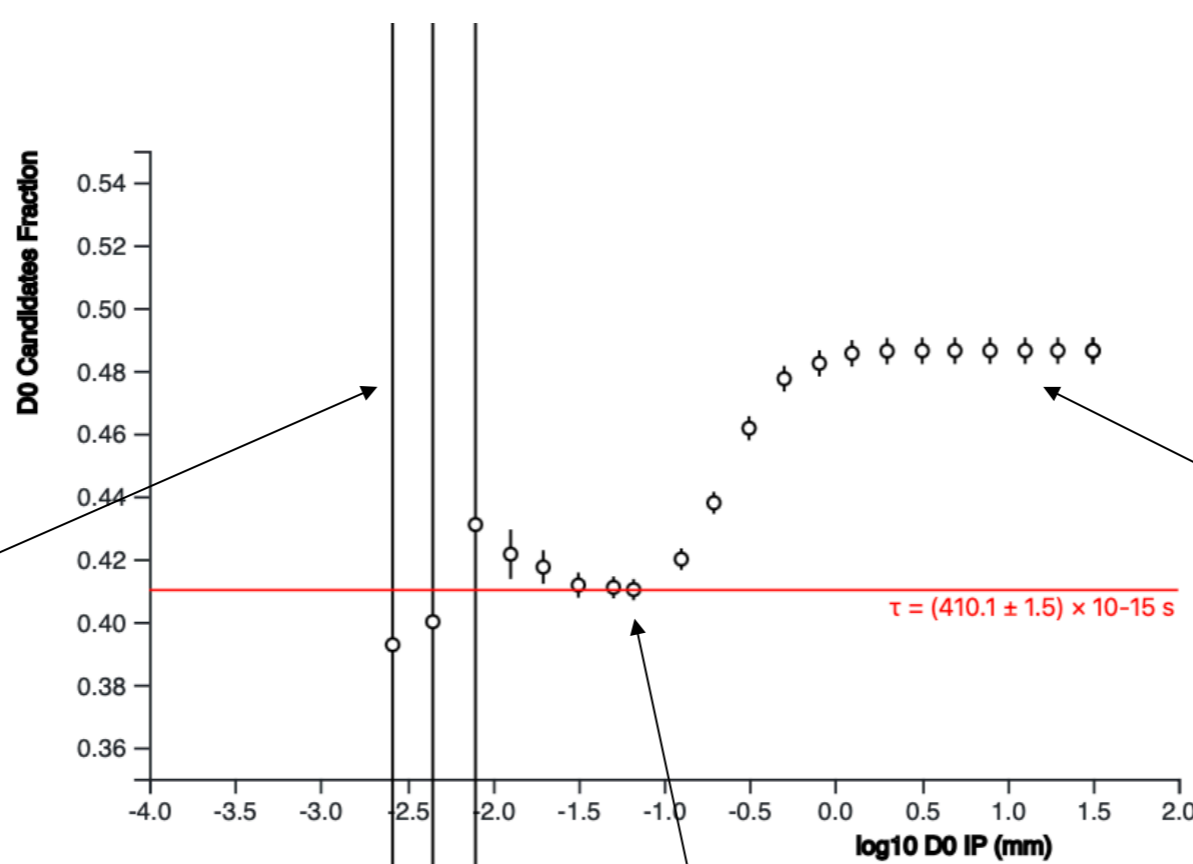
$$\tau (D^0) = (410.1 \pm 1.5) \times 10^{-15} \text{ s}$$

Questi valori sono presi dal **Particle Data Group**, un sito pubblico (cercate pdglive) in cui potete trovare le informazioni di tutte le particelle note

Il PDG effettua medie delle proprietà delle particelle misurate da diversi esperimenti: **è molto importante avere misure delle stesse quantità da diversi esperimenti per controllare l'assenza di bias che comportebbe uno scostamento del valore misurato rispetto al valore vero**

La precisione sulla misura di un singolo esperimento dipende da errore statistico (diminuisce con l'aumentare dei dati presi come $1/\sqrt{N}$) e da errore sistematico (che dipende dalle scelte fatte durante la misura)

Punti con barre di errore molto grande corrispondono a tagli che riducono troppo il segnale



Quando **tagliamo a valori di parametri d'impatto IP più alti, includiamo eventi in cui il D0 viene prodotto da un decadimento di un quark beauty** (è come se misurassimo una somma tra le due vite medie del mesone B e del mesone D0). Se ci "dimentichiamo" di questi eventi, o siamo ignoranti della loro presenza, **generiamo un bias nella misura**

Questi sono gli **eventi che ci interessano** per misurare la vita media. In una misura si prende di solito il punto che **minimizza l'incertezza**, nel nostro caso 411.0 ± 3.4 ps. Notare l'incertezza statistica raggiunta e la sua compatibilità col valore del PDG.