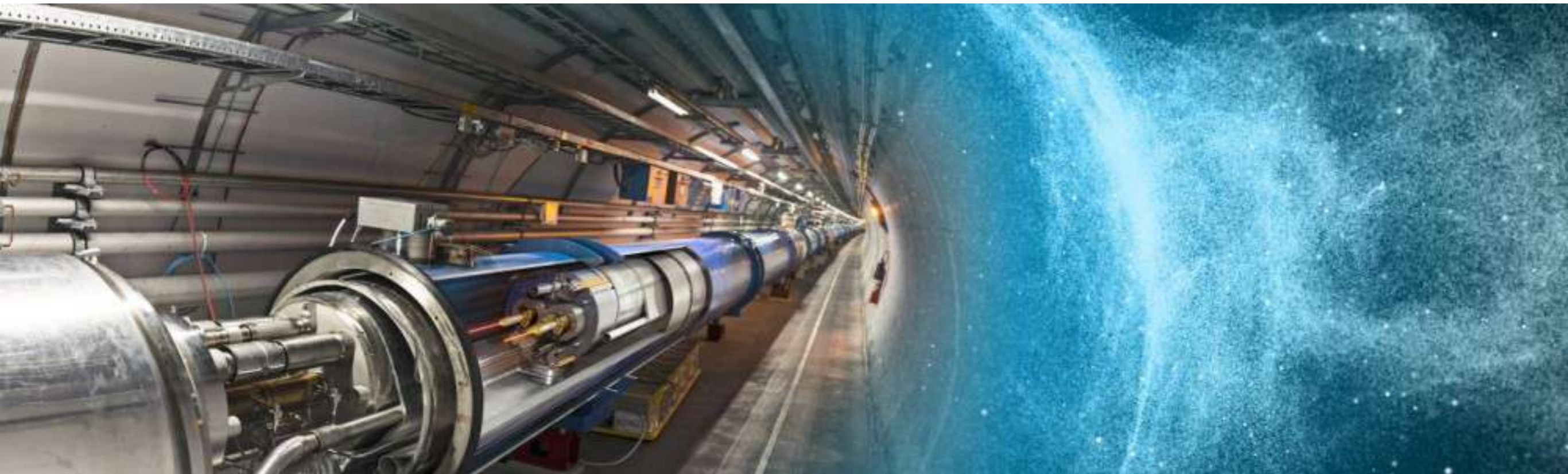




# Misura della vita media del mesone $D^0$

---

Marco Santimaria / Masterclass Internazionale 09/03/2022 - LNF



# Eventi di collisione a LHCb

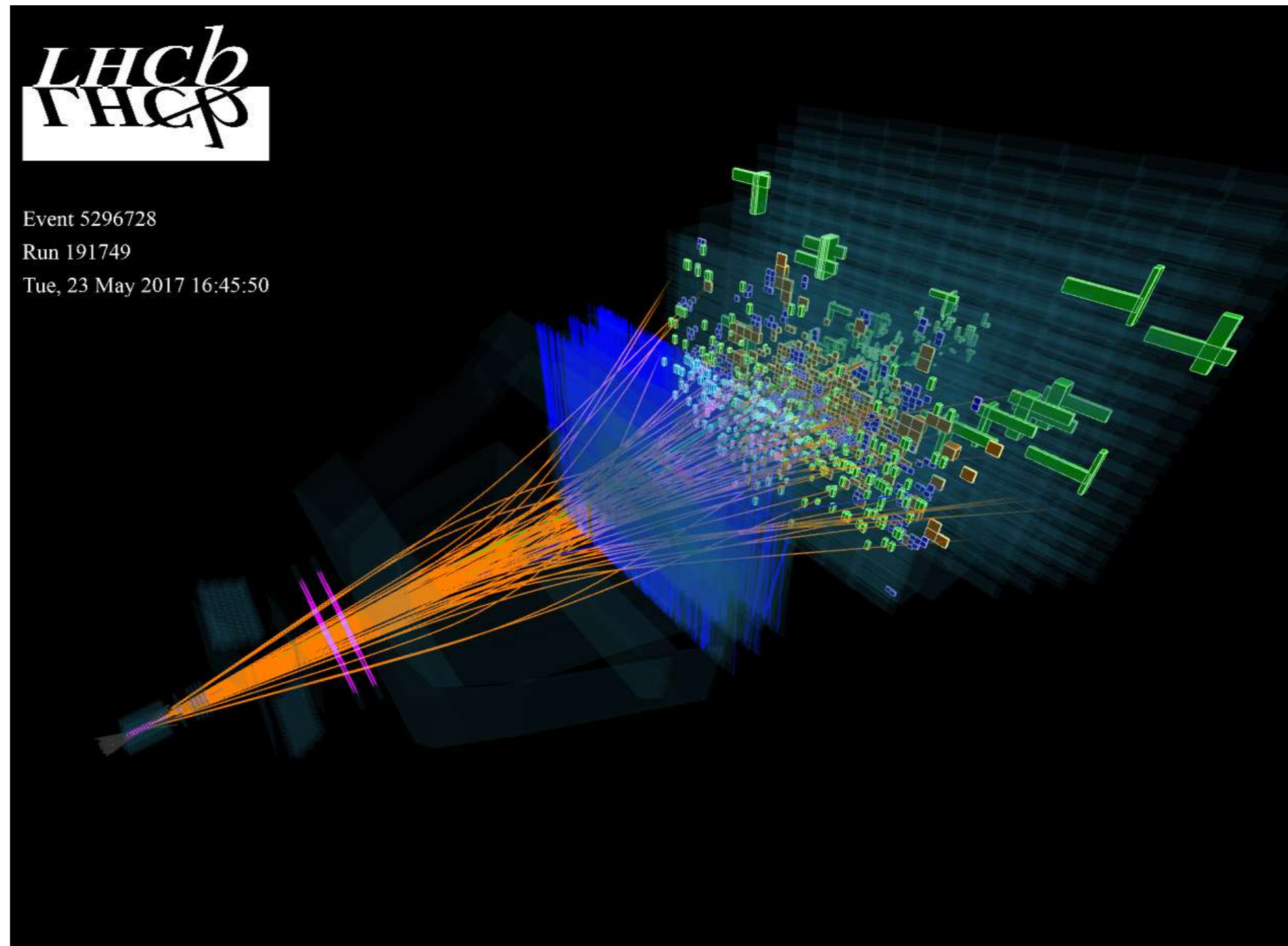
I protoni di LHC si scontrano in LHCb e generano molte particelle, tra cui i mesoni  $D^0$ .  
Come cerchiamo gli eventi interessanti?

Con milioni di eventi  
al secondo e  
centinaia di tracce?

**Trigger**

Con 30 eventi?

**A mano!**



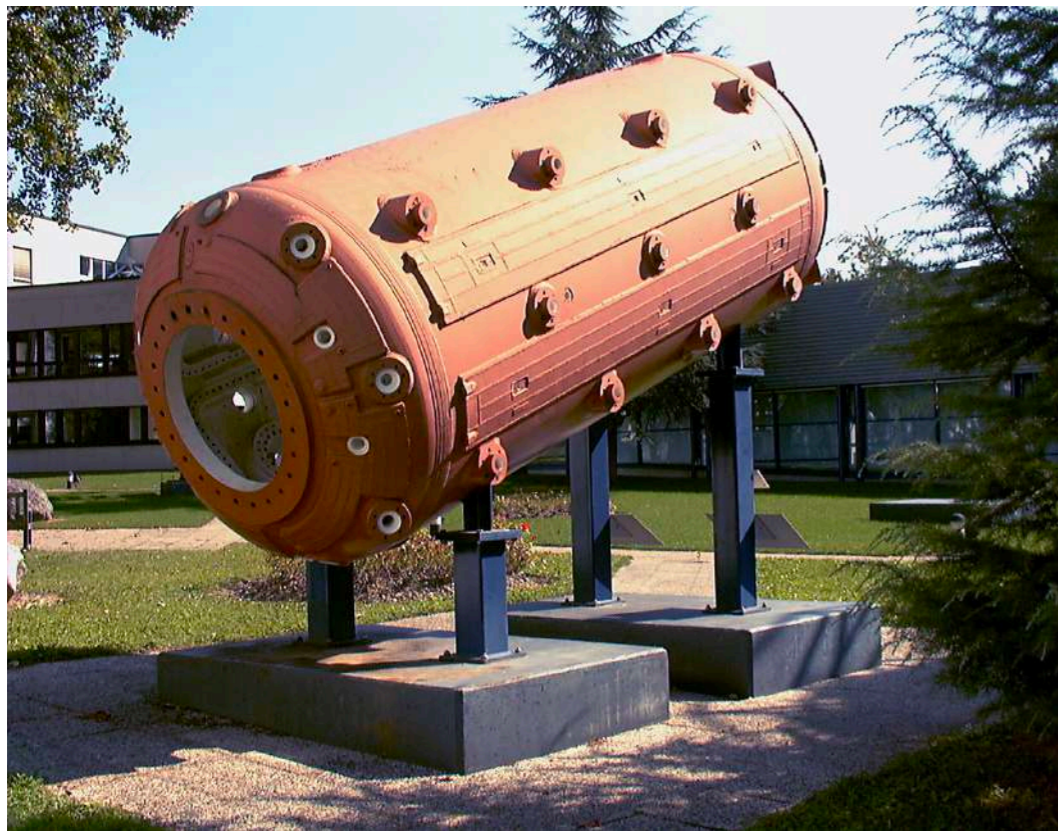


# Physics like it's 1972!

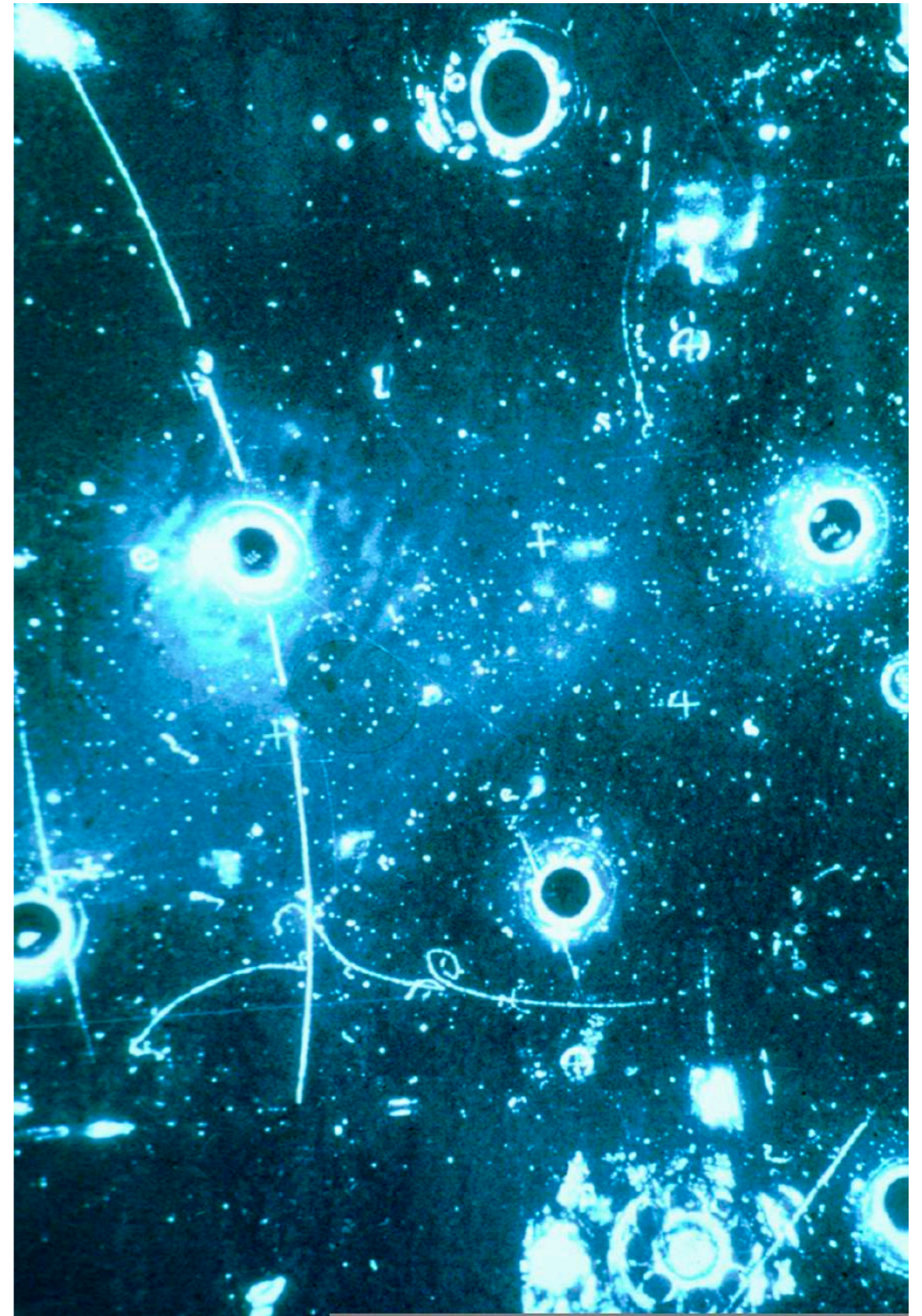
Una volta era proprio così che si faceva:  
analizzare delle fotografie una per una ...



...2 MESONI! Però è valso un Nobel!



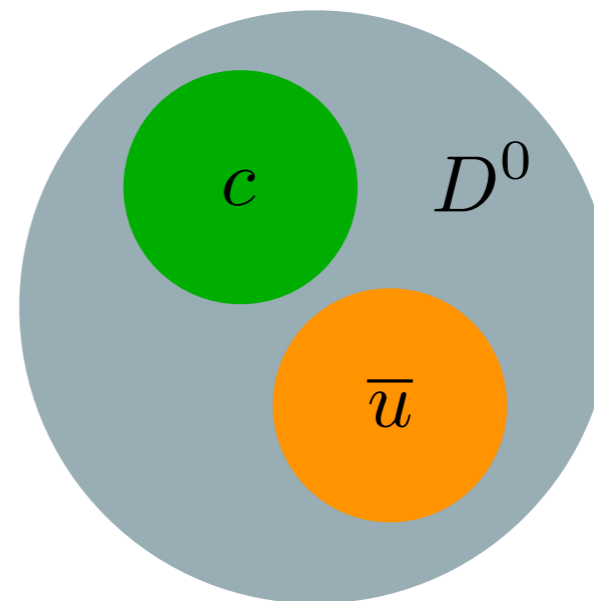
La camera a bolle "Gargamelle" al CERN



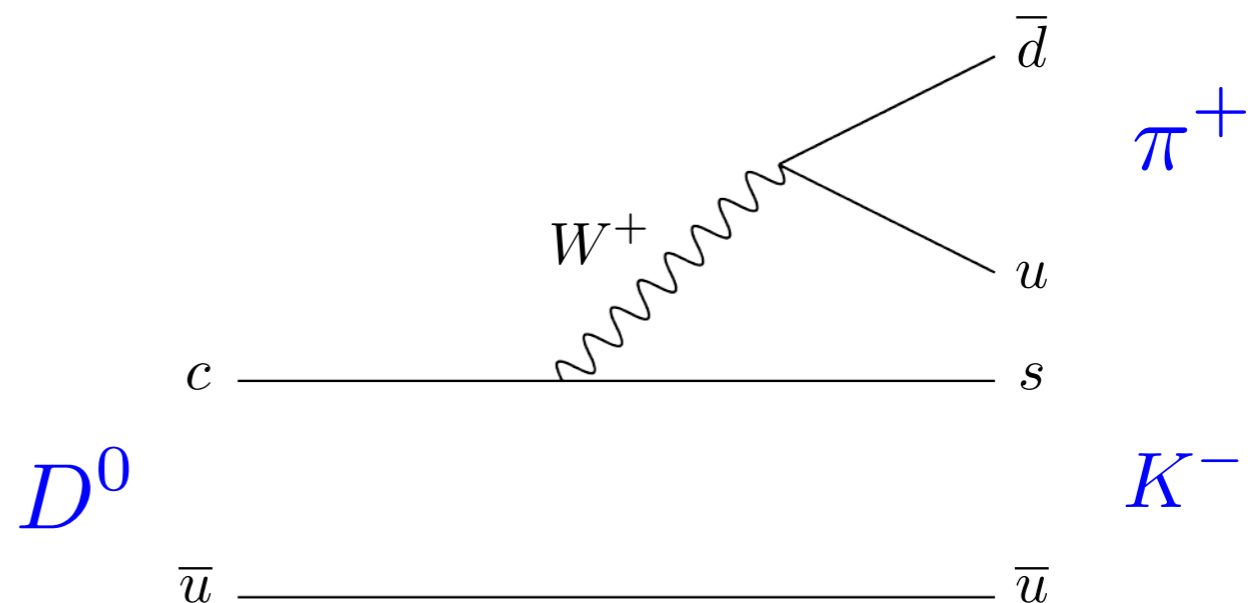


# Il mesone $D^0$

Un mesone  $D^0$  è formato da un quark charm ( $c$ ) e un quark anti-up ( $\bar{u}$ )



É una particella instabile ed esplosa in due frammenti piú leggeri: i mesoni  $K^-$  e  $\pi^+$



- 1° esercizio:** identificare i decadimenti del  $D^0$   
**2° esercizio:** analizzare i dati per misurarne la vita media

# Come si misura la vita media?

## 1. Misuro direttamente il tempo: cronometro

Il  $D^0$  è troppo piccolo, veloce e non ha carica elettrica!



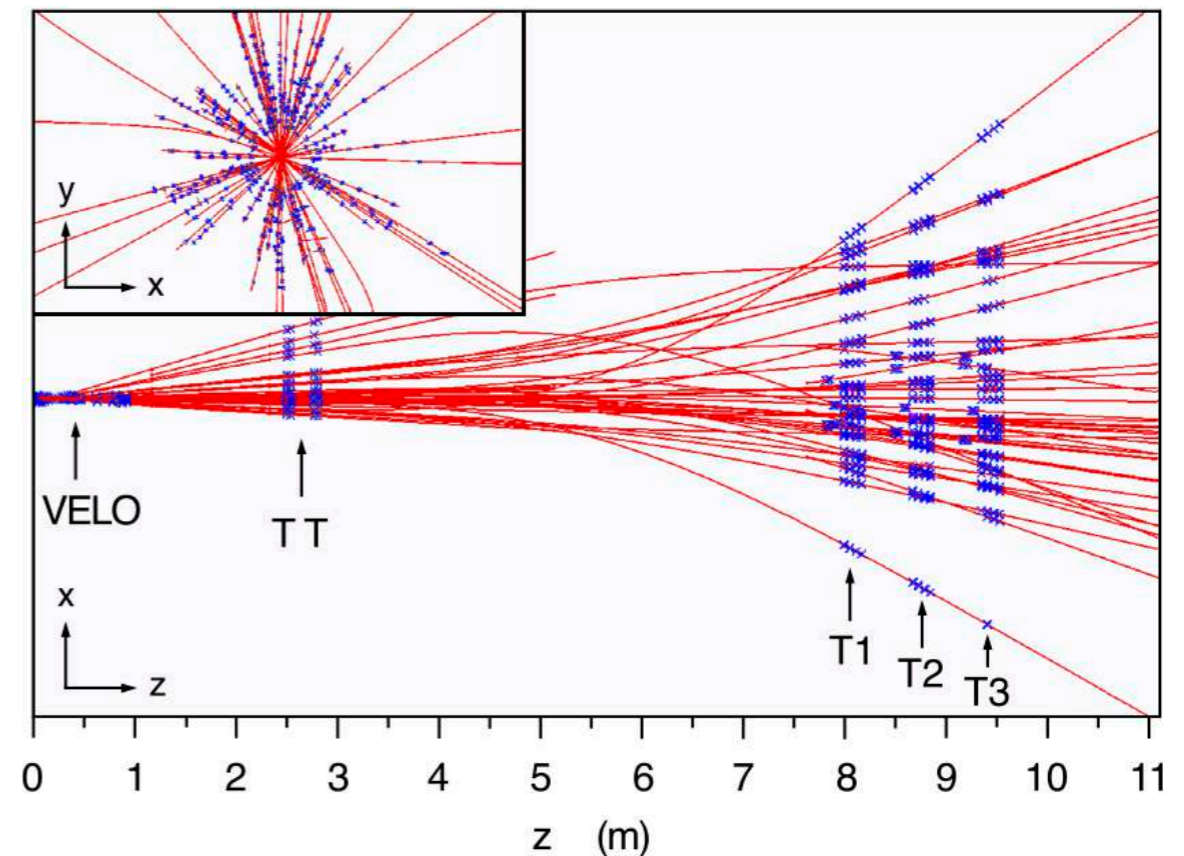
## 2. Calcolo il tempo misurando distanza e velocità: tracce in campo magnetico

se si muove alla velocità della luce:

$$d = c \times \tau = 0.12 \text{ mm}$$



velocità = spazio / tempo  
Galileo: EASY

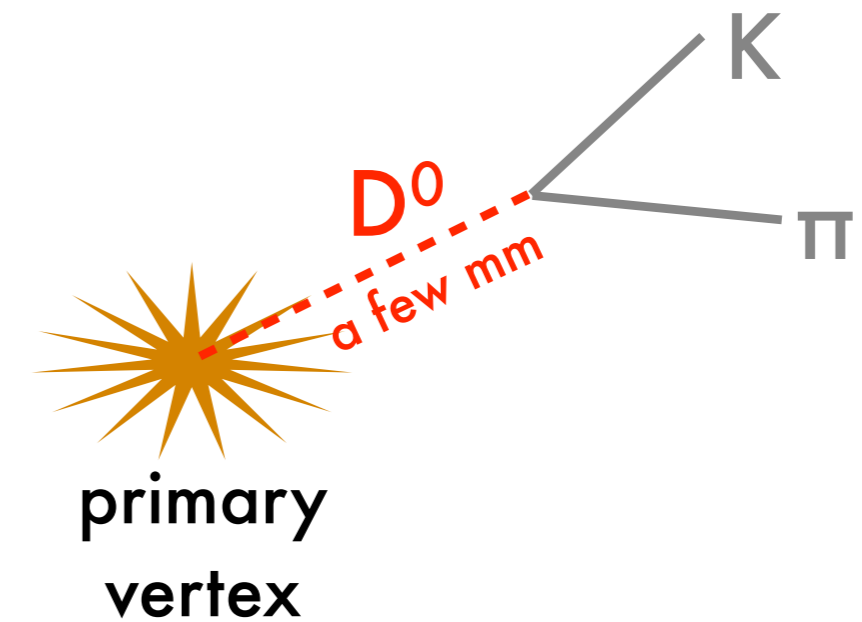
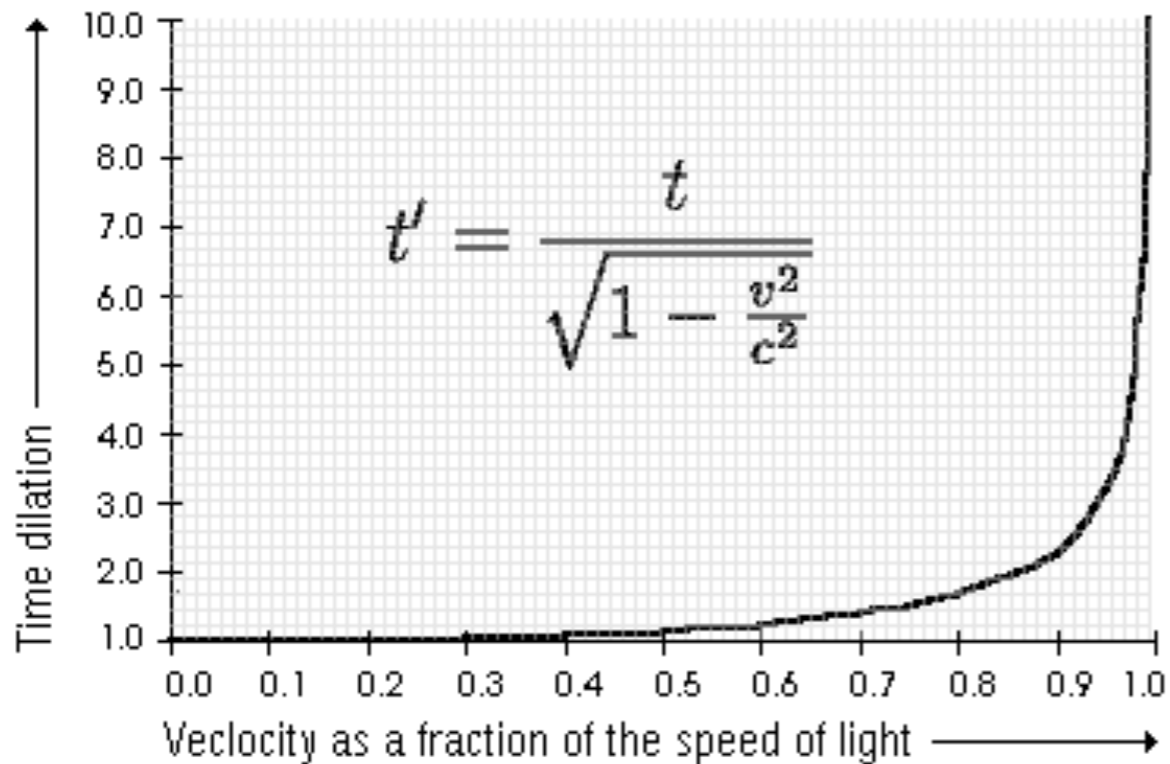


# Per fortuna c'è la relatività!



Einstein: WRONG!  
Andando veloci il tempo si dilata!

Il  $D^0$  cammina per **qualche millimetro** prima di esplodere: una distanza ben misurabile!

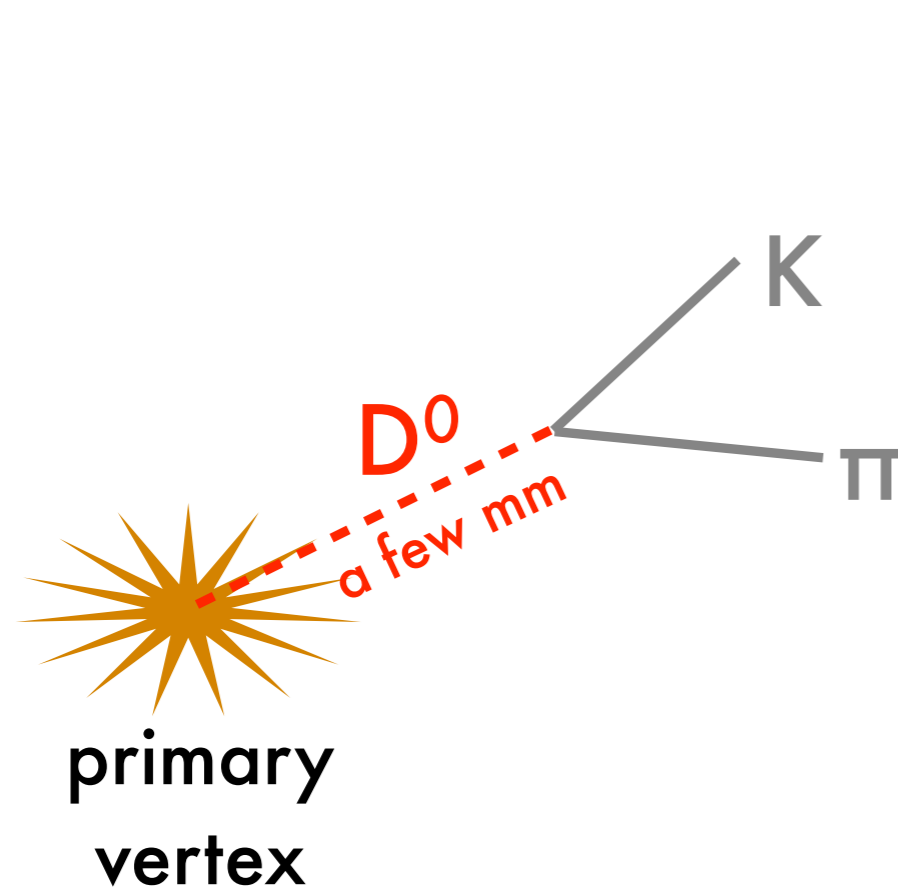


$$d = c\tau\beta\gamma$$

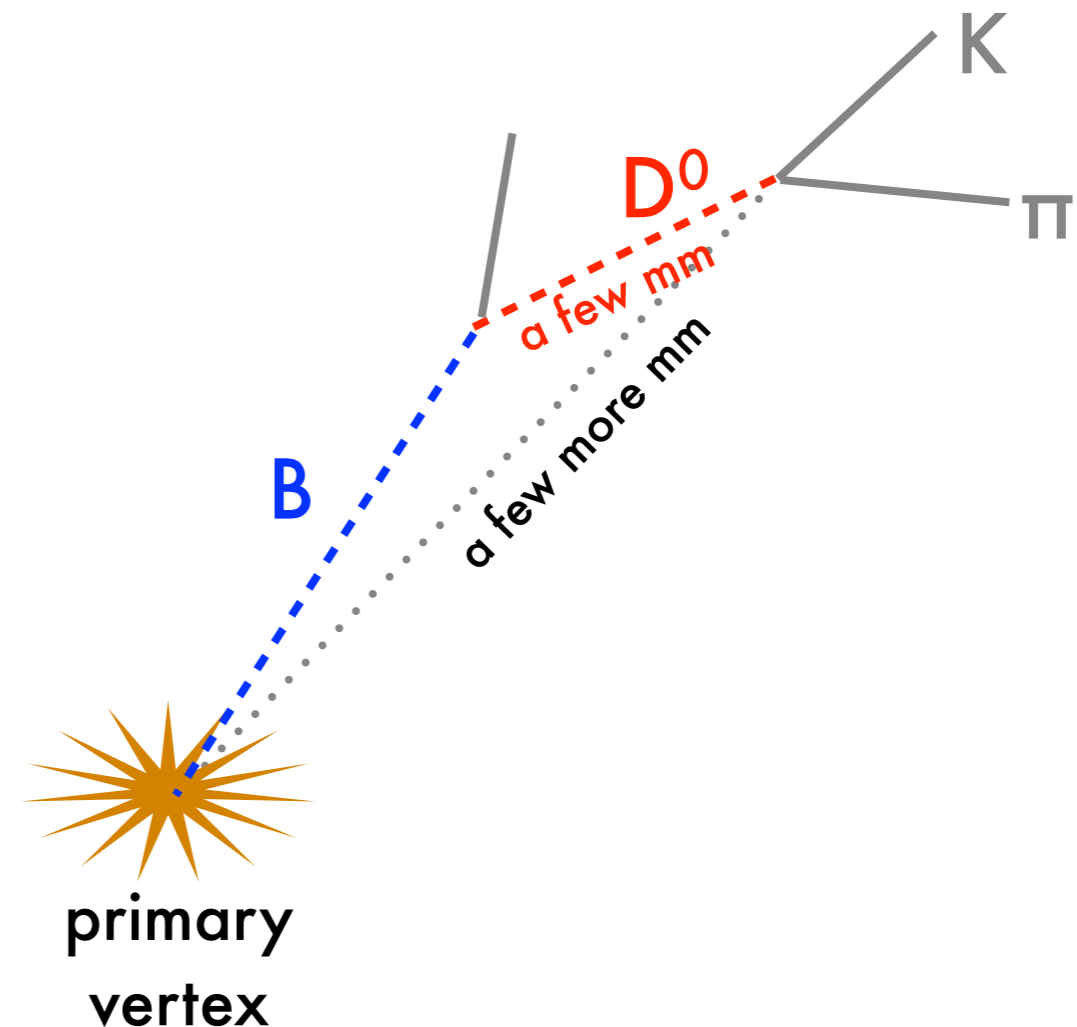
dilatazione del tempo

# Un paio di problemini

1. I  $D^0$  sono neutri quindi non lasciano tracce! Vediamo i  $K^-$  e  $\pi^+$  di decadimento
2. Le collisioni ad alta energia non generano solo mesoni  $D^0$  :



Produzione diretta  
 $pp \rightarrow D^0$



Produzione secondaria  
 $pp \rightarrow B \rightarrow D^0$

# A lavoro!

Collegatevi a:

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

Inserite i vostri dati,  
selezionate una  
combinazione di eventi e  
cliccate "Save"

Firstname  
Albert

---

Surname  
Einstein

---

Grade  
A

---

Combination  
Combination 4

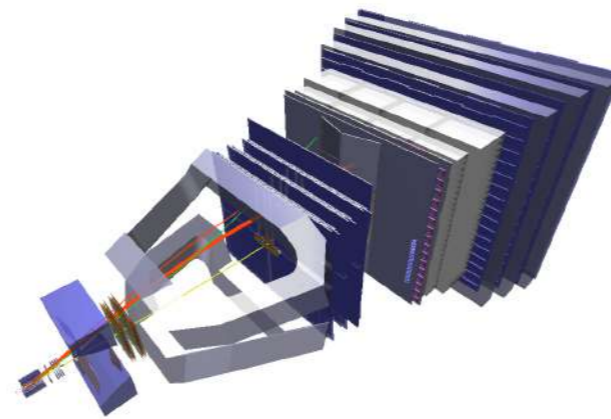
---

Save

L'esercizio è diviso in 2 parti:

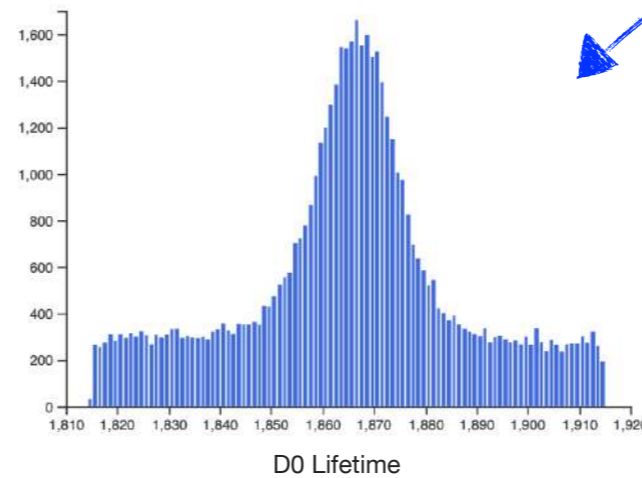
## 1. Event display

Ricerca delle tracce di  
decadimento



Event Display

## 2. $D^0$ lifetime Analisi dati





# ESERCIZIO 1: EVENT DISPLAY

---

ovvero: cercare  
l'ago nel pagliaio



# Event display

## Event Display Exercise

The interface is divided into three main sections on the left and a large 3D visualization area on the right.

- Event handler:** Shows the file name "event\_3\_0.json" and two buttons: "previous" and "next".
- View:** Contains three toggle switches: "Zoom" (off), "Detector" (on), and "Help" (off). Below them is a "View" dropdown menu and an "Auto rotate" checkbox (unchecked). A slider control is also present.
- Legend:** Lists particle types with corresponding colored line segments:  $K^-$  (red),  $K^+$  (blue),  $\pi^+$  (green),  $\pi^-$  (purple), and  $D^0$  (grey).
- Buttons:** "Read instructions" and "Download JSON" are located at the bottom left.

The 3D visualization shows a complex detector structure with multiple layers. Particle tracks are overlaid on the detector, with colors corresponding to the legend. A blue arrow points from the text below to the legend.

Il tipo di particella è comodamente indicato dal **colore della traccia**  
Potete cambiare/ruotare la vista, zoomare, e rimuovere il rivelatore. Sperimentate!



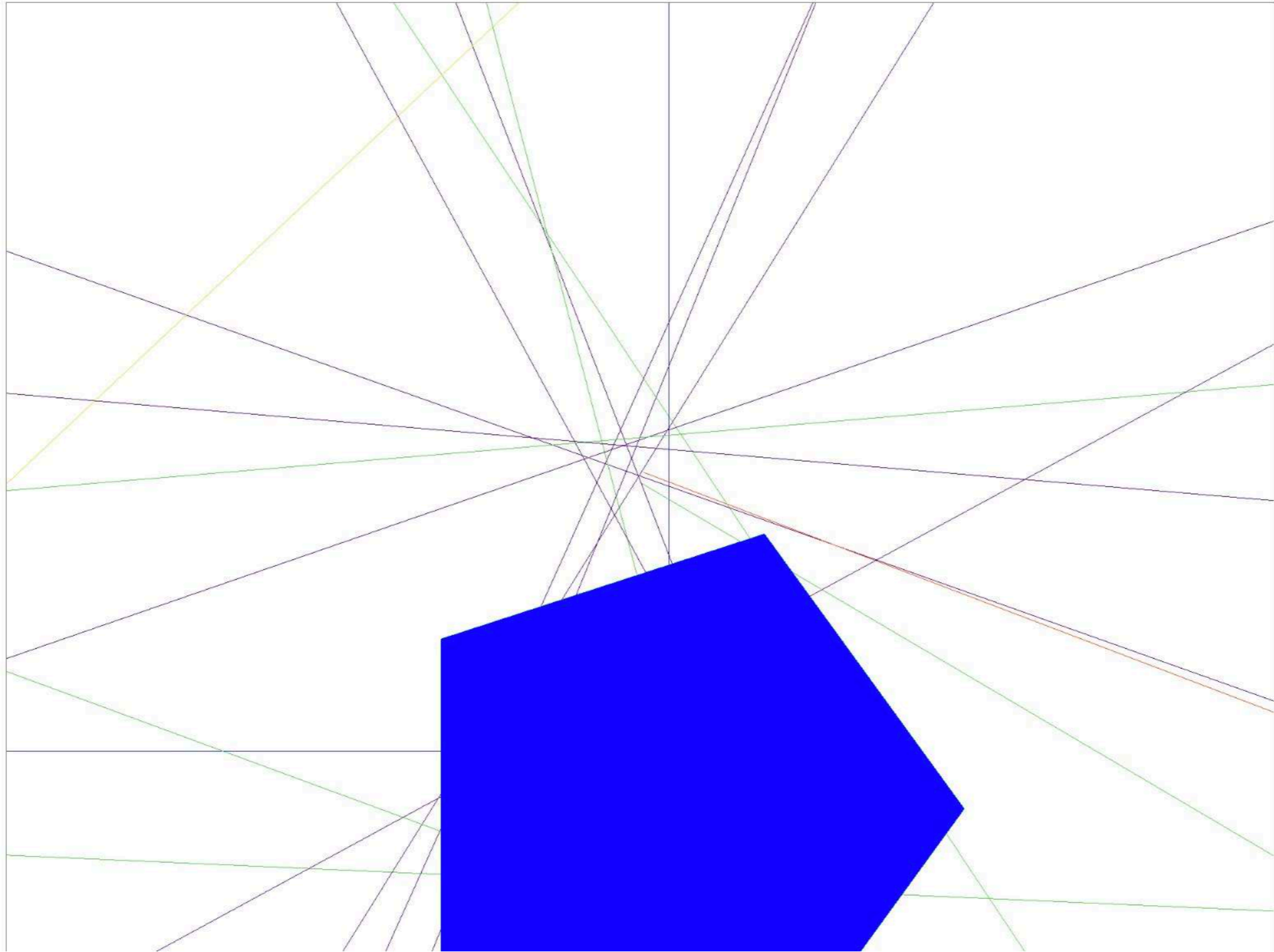
# Esempio: un evento facile

Alla ricerca di un  $K^-$  (rosso) e  $\pi^+$  (verde) che si incontrano in un “punto” (vertice)  
Il vertice deve essere **separato** dal vertice primario (dove originano la maggior parte delle tracce)



# ...e uno più difficile!

---





# Salvare un evento

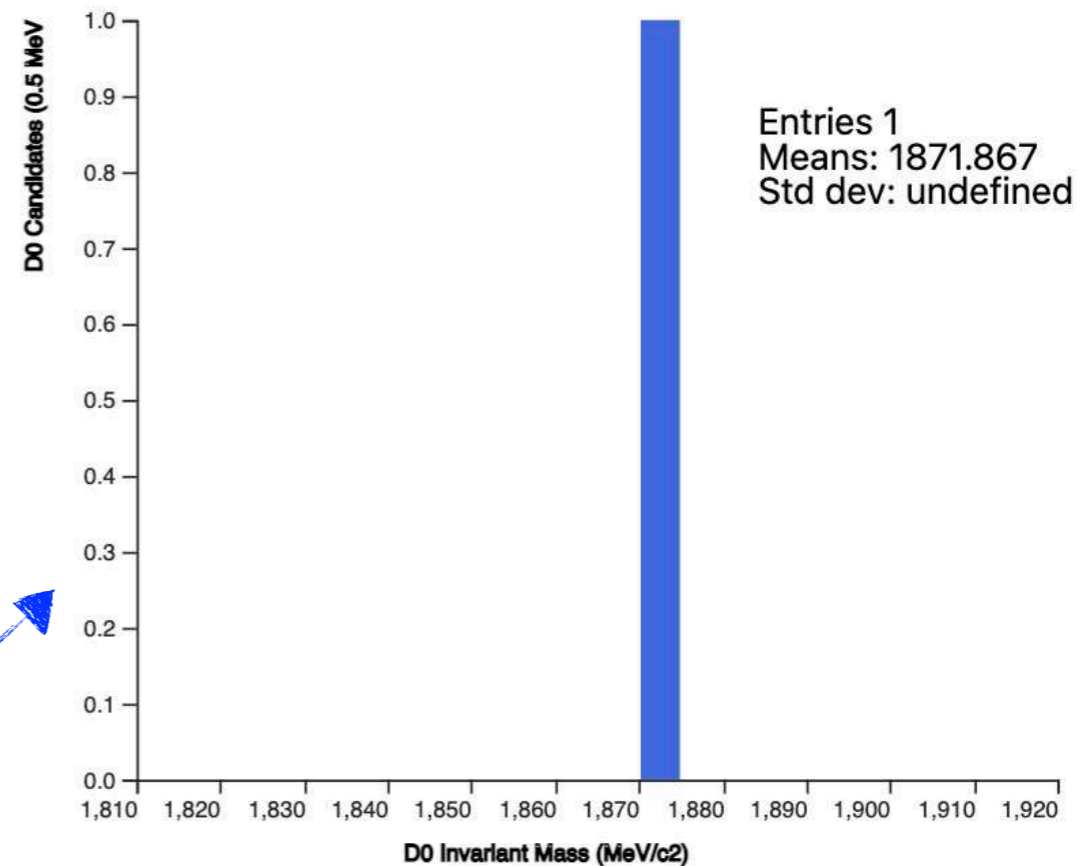
Non tutti gli eventi sono buoni!

Particle information		
E	7433.891	MeV
chi2	0.885	
ipchi2	0.260	
mass	139.570	MeV/c <sup>2</sup>
name	pi+	
ZFstM	124.088	

My particles	
K-	
pi+	
Mass	
1871.867	MeV/c <sup>2</sup>
Add	

Se trovate un evento buono:

1. Selezionate le tracce
2. Guardate il valore della massa invariante\* : se è vicino alla massa del  $D^0$  aggiungete l'evento ("Add")
3. repeat! (Event handler → "next").  
In questo modo populate **l'istogramma di massa**

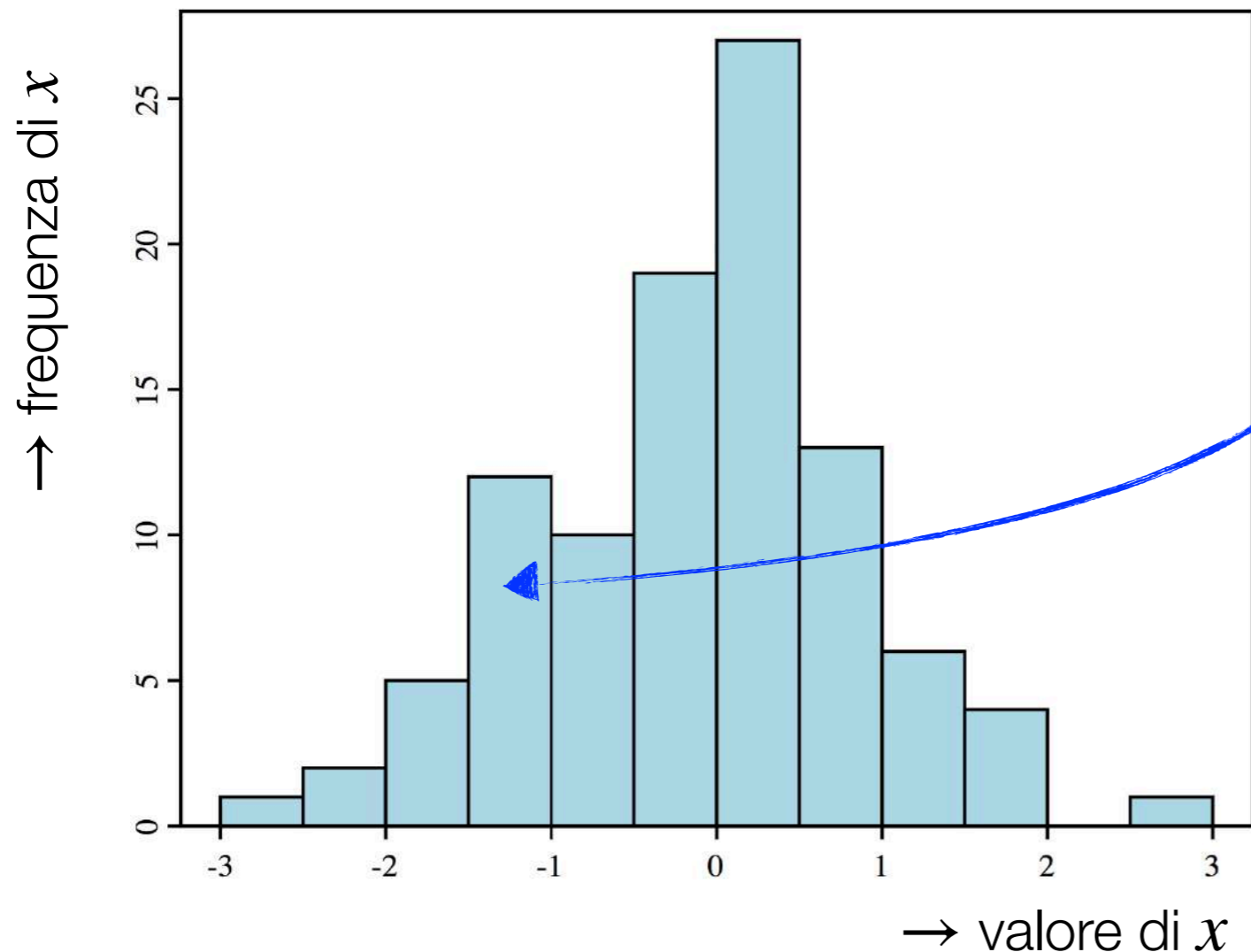


$$* m_{D^0}^2 = m_K^2 + m_\pi^2 + 2\sqrt{m_K^2 + p_K^2}\sqrt{m_\pi^2 + p_\pi^2} - 2p_K p_\pi \cos\vartheta$$

# Cos'è un istogramma?

Un modo di rappresentare graficamente una serie di misure

- Ogni misura è classificata in un intervallo (“bin”) a seconda del suo valore
- L'altezza delle barre è il numero di volte in cui il valore misurato cade all'interno del bin

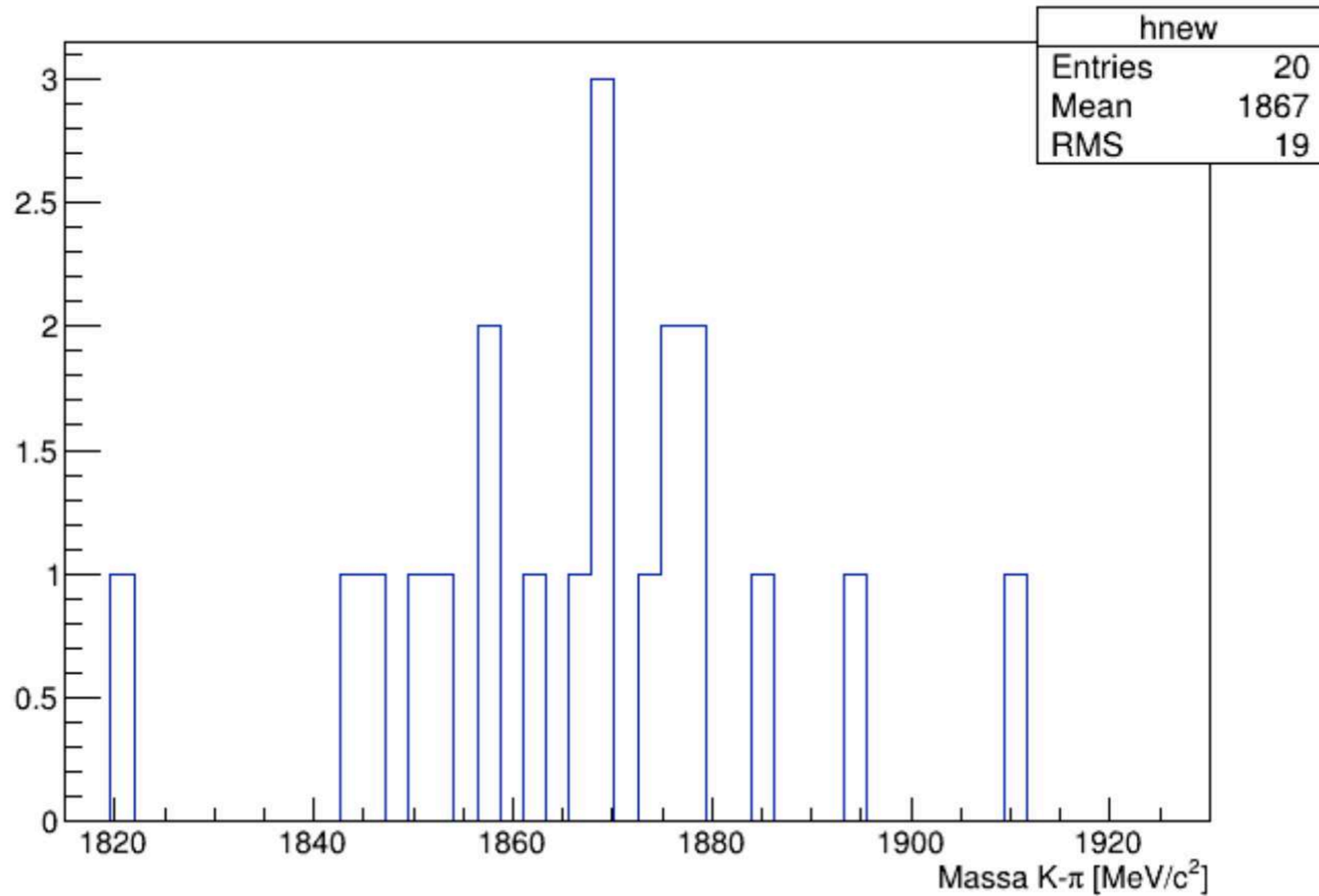


Se misuro  $x = -1.2$  devo riempire il bin numero 4:  
 $x \in [-1.5, -1.0]$



# Esercizio 1: risultato

Alla fine dell'esercizio 1 si ottiene l'istogramma di massa del  $D^0$



# ESERCIZIO 2: $D^0$ LIFETIME

---

ovvero: un tipico giorno  
di lavoro al CERN!



# Segnale vs fondo

Passiamo ora all'analisi dati, partiamo da un istogramma di massa... ma con **più dati!**  
Notiamo due popolazioni sovrapposte:

Analysis tools

Plot  $D^0$  mass

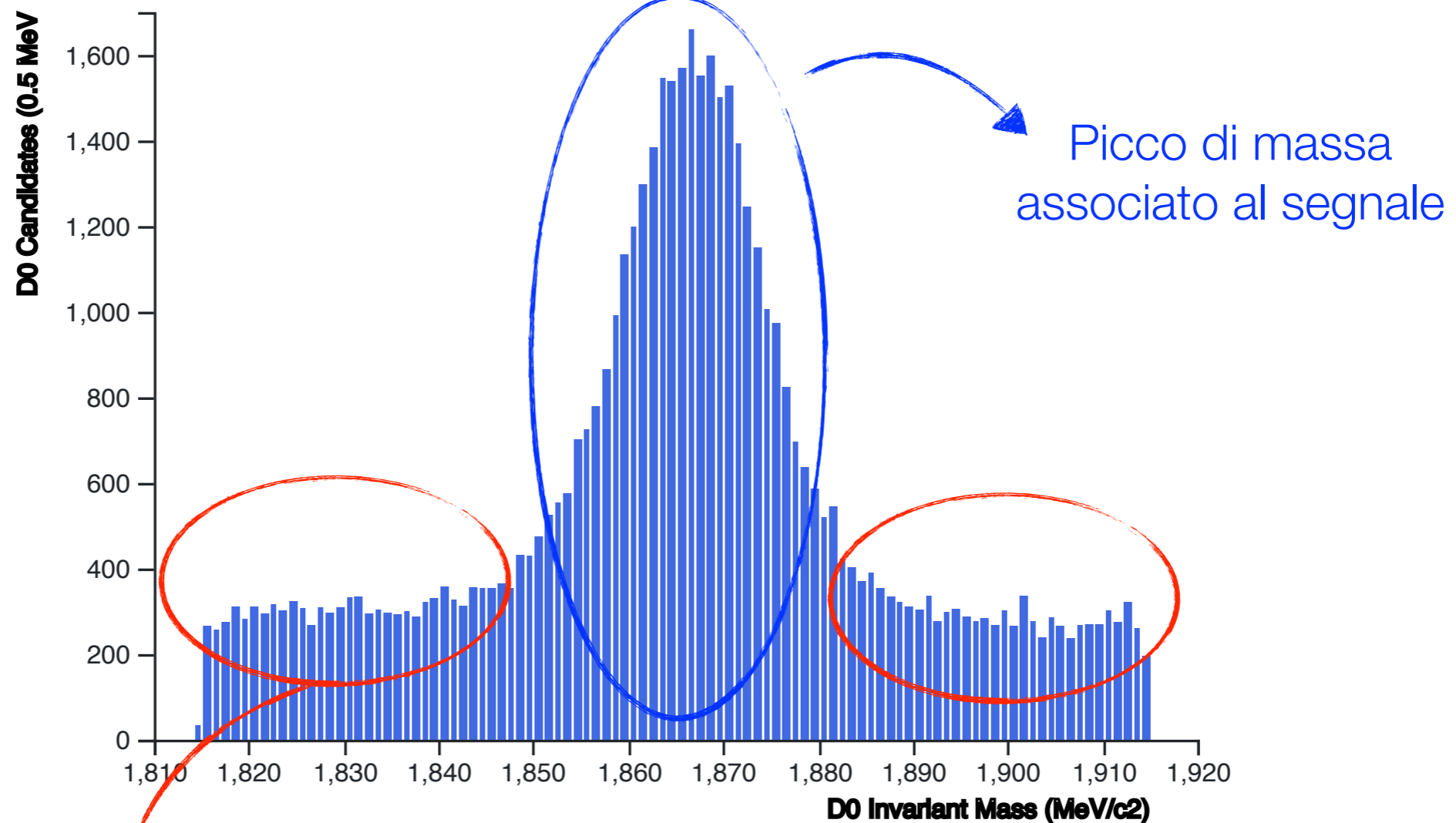
Fit mass distribution

Background substr.

Signal range

1810 1915

Plot distributions

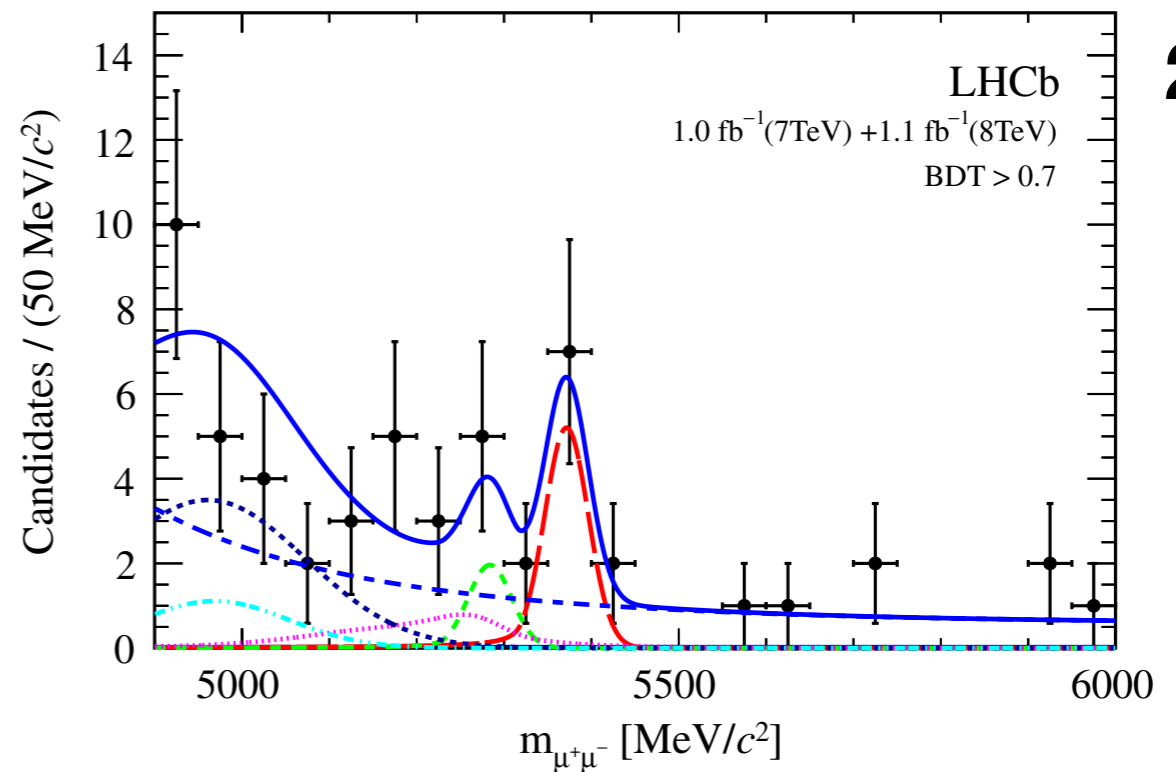
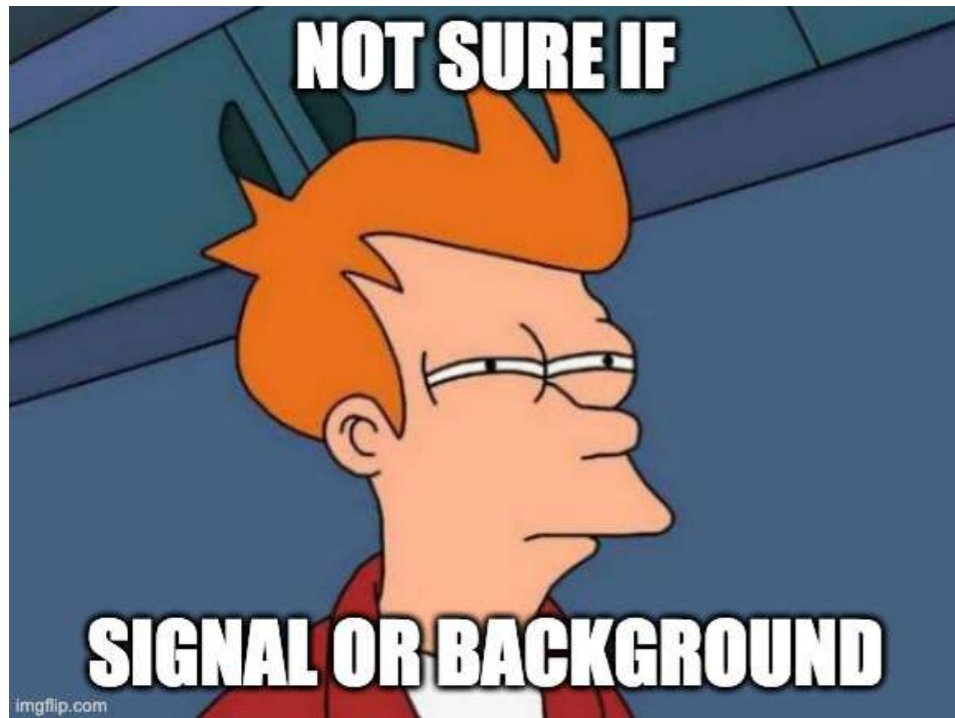


Fondo combinatorio: un  $K^-$  e un  $\pi^+$  che NON vengono dal decadimento di un  $D^0$

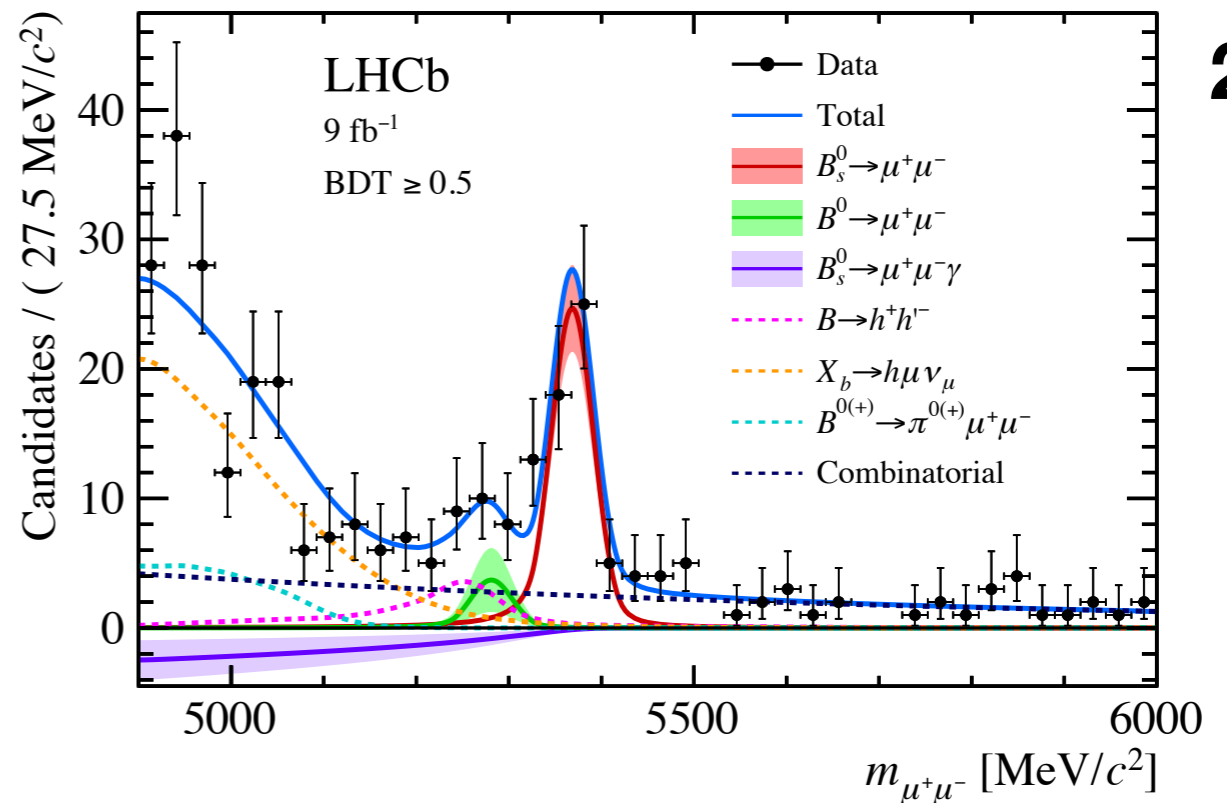


# Ricerca del decadimento raro $B \rightarrow \mu^+ \mu^-$

Tutti i campioni hanno segnale e fondo: più grande è il loro rapporto, più chiara l'osservazione!



2012



2021

Bisogna accumulare dati per decretare una scoperta!

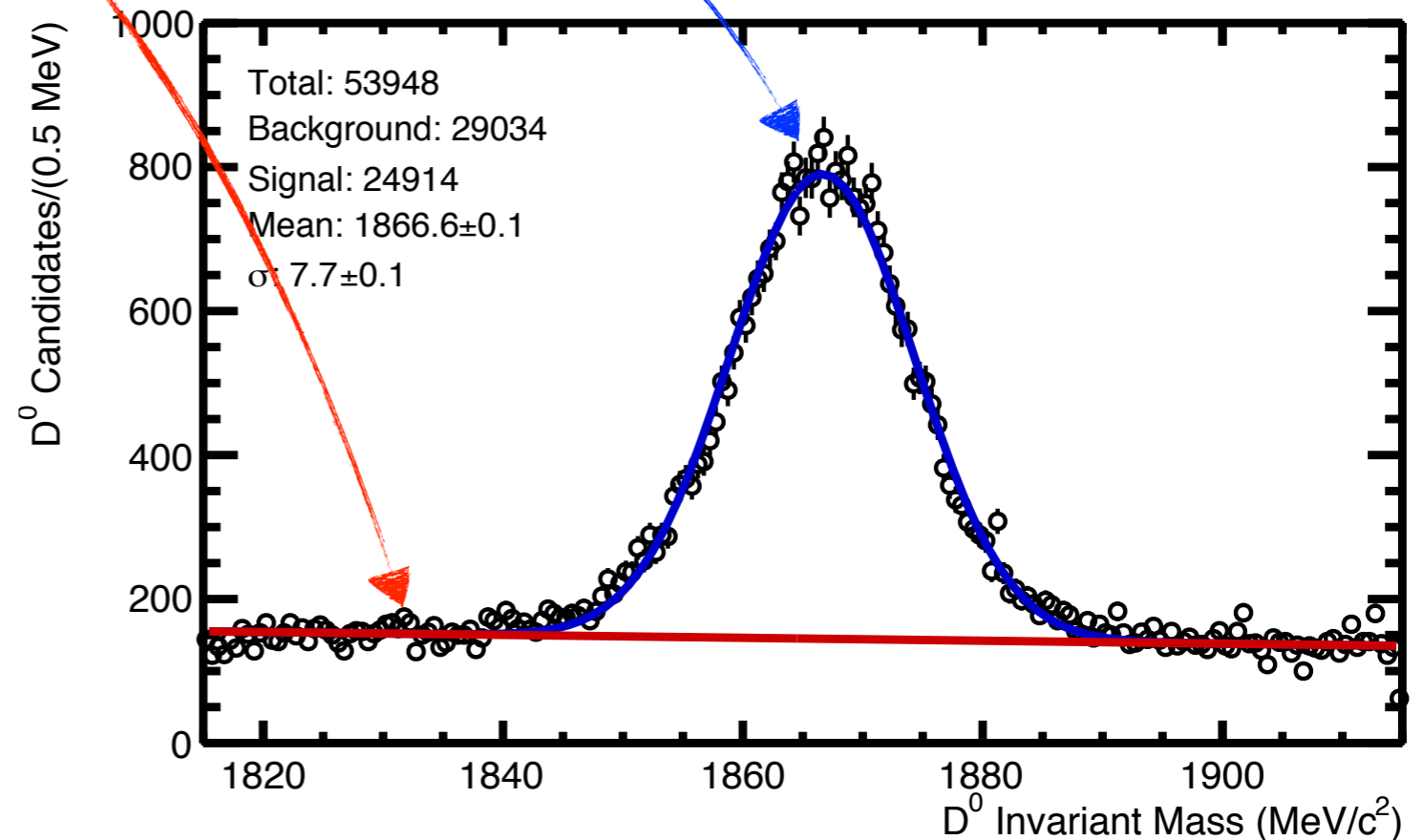
# Fit alla massa

Per isolare il segnale a cui siamo interessati (il picco di massa del  $D^0$ ) eseguiamo un **FIT**

Fit: adattare un modello parametrico (funzione) ai dati

1. Segnale  $\rightarrow$  Gaussiana
2. Fondo combinatorio  $\rightarrow$  Retta

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$



# Fit alla massa

Il fit trova i parametri che meglio si adattano ai dati. Il parametro  $\mu$  (mean) della Gaussiana è la misura della massa del  $D^0$ , il parametro  $\sigma$  (standard deviation) indica l'errore.

Analysis tools

Plot  $D^0$  mass

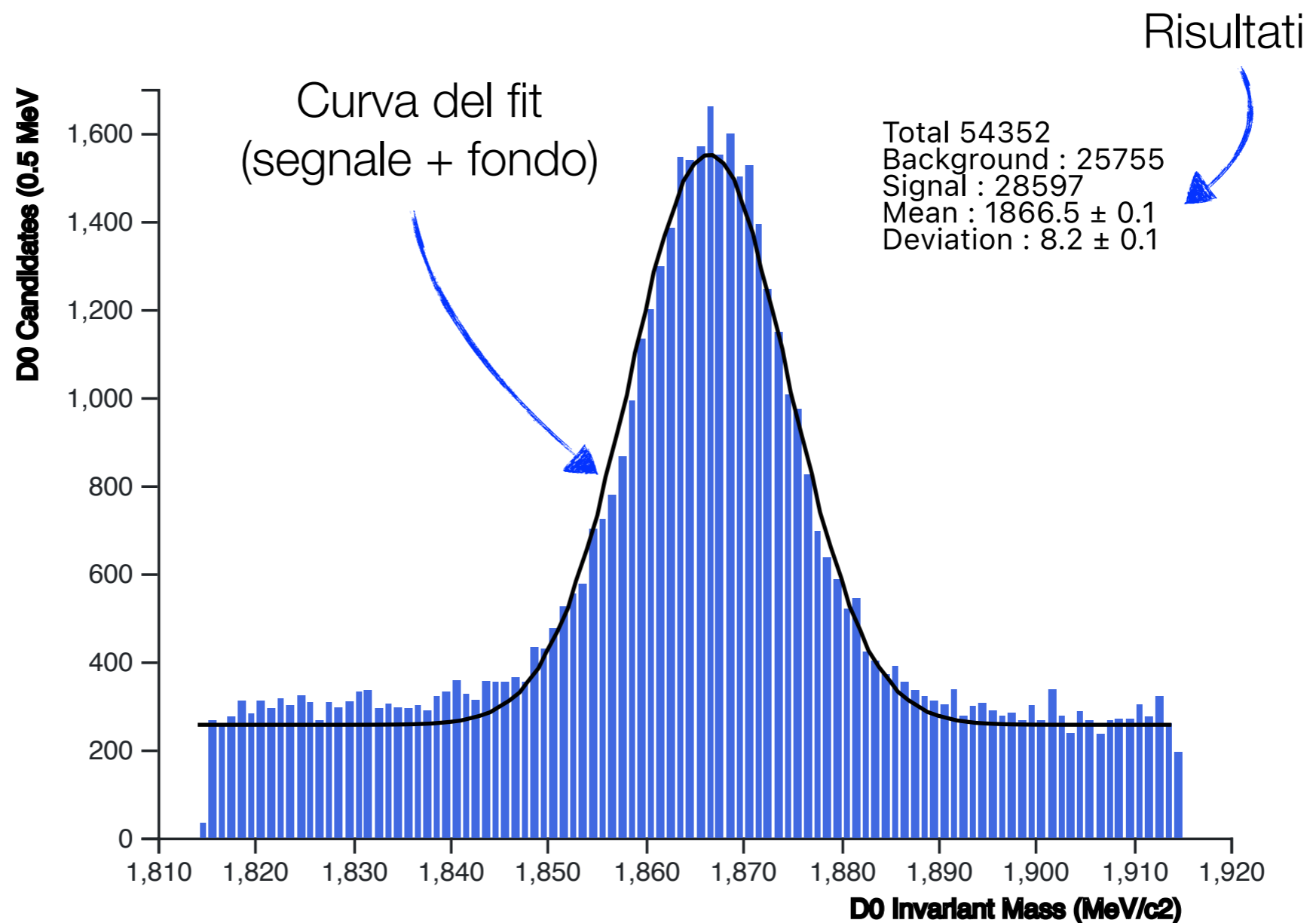
Fit mass distribution

Background substr.

Signal range

1810 1915

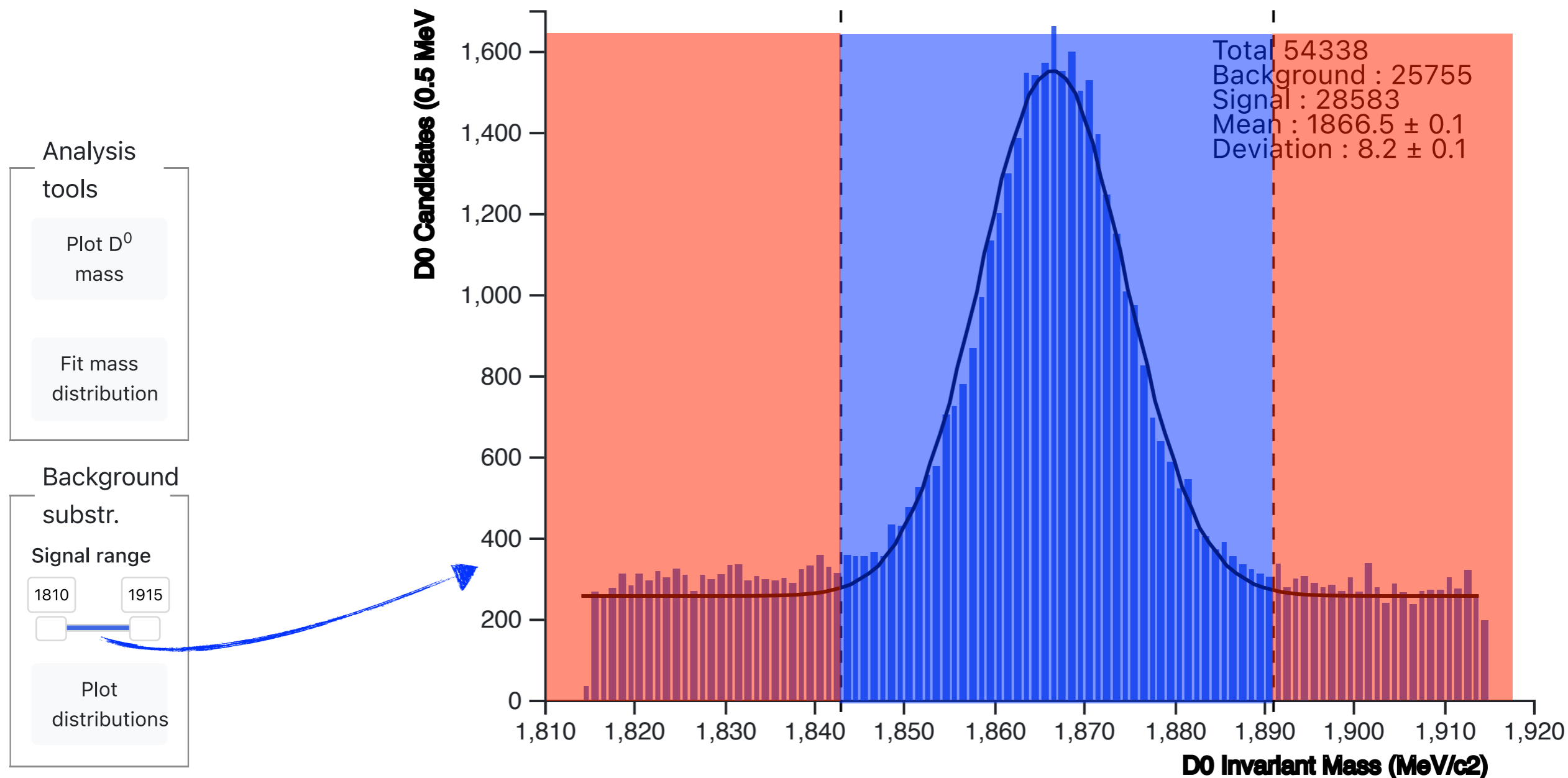
Plot distributions





# Rimuovere il fondo

Selezioniamo la regione di segnale, prendendo una regione larga  $3\sigma$  attorno al valore centrale  $\mu$ . Gauss docet: entro  $3\sigma$  è contenuto il **99.7 %** del segnale



blu: tieni gli eventi, rosso: scarta gli eventi

# Rimuovere il fondo: sfruttiamo più variabili!

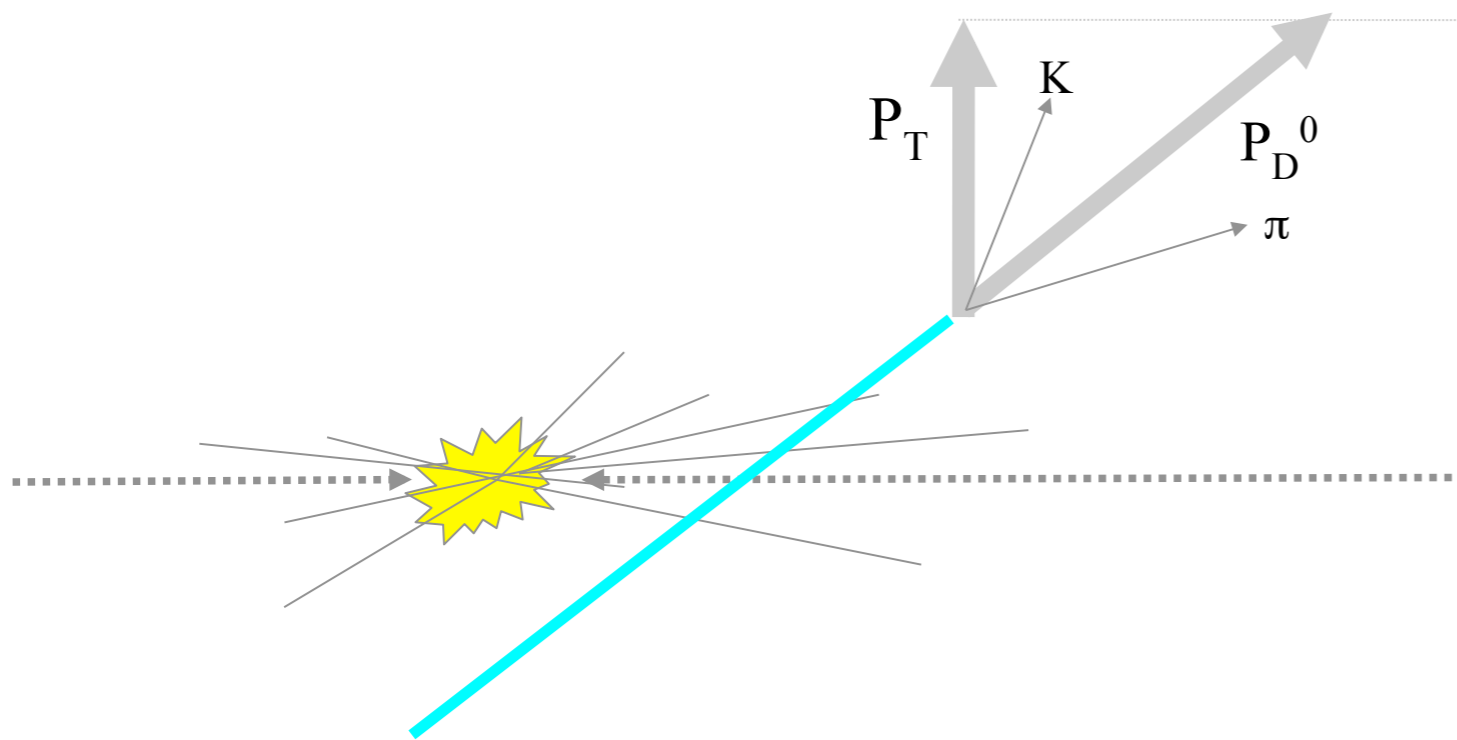
Abbiamo “tagliato” sul valore della massa, ma possiamo **sfruttare altre variabili** per separare segnale e fondo e quindi **migliorare la misura**.

Dopo aver definito la regione di massa possiamo analizzare: PT, TAU, IP

The image shows two panels from a software interface. The left panel, titled 'Analysis tools', contains two buttons: 'Plot D<sup>0</sup> mass' and 'Fit mass distribution'. Below it, the 'Background substr.' section includes a 'Signal range' slider with values 1810 and 1915, and a 'Plot distributions' button which is circled in blue. The right panel, titled 'Variable range', contains three sliders: 'D<sup>0</sup> PT' with values 2.5 and 20, 'D<sup>0</sup> TAU' with values 0 and 10, and 'D<sup>0</sup> IP' with values -4 and 1.5. A 'Refresh' button is located at the bottom of this panel.

vediamole  
una per una

# Impulso trasverso ( $P_T$ )

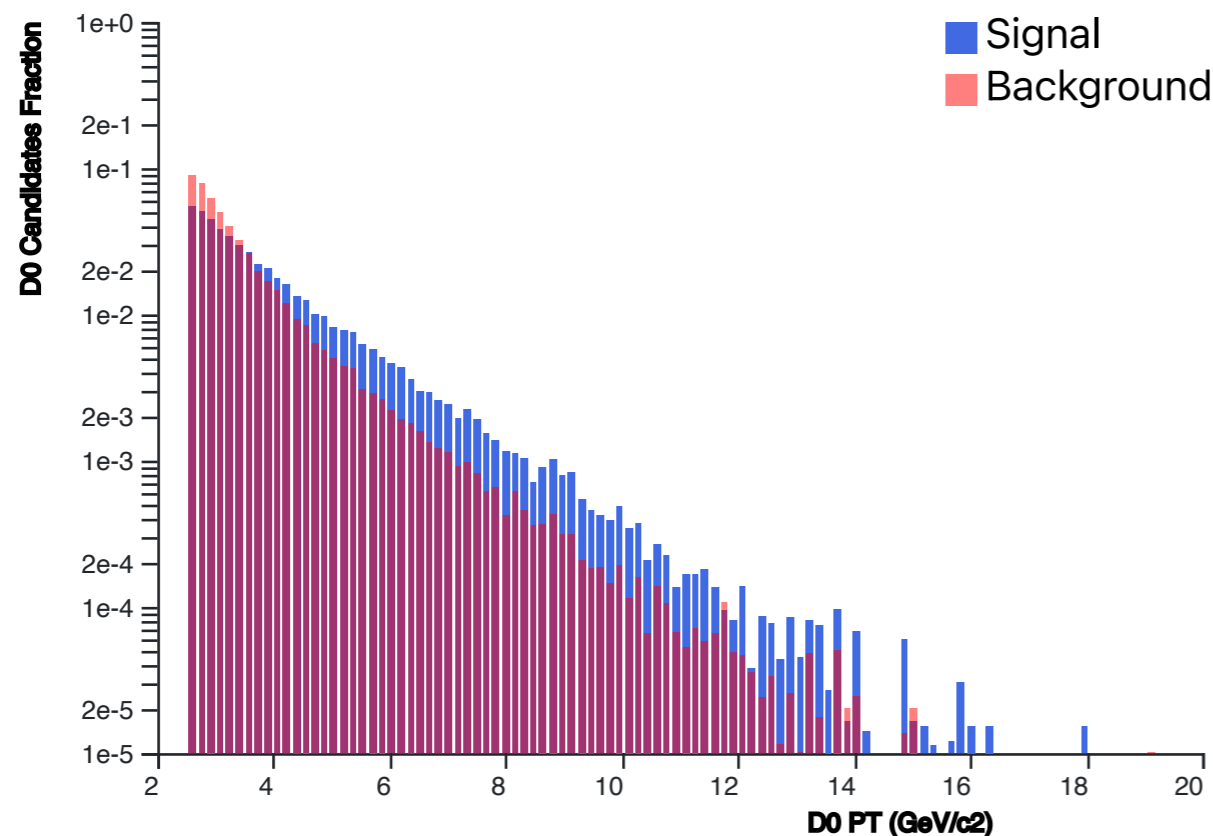
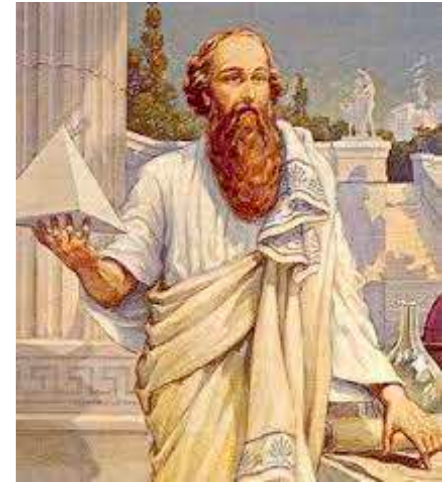


$$P_K + P_\pi = P_{D^0}$$

$P_T$  è la componente dell'impulso trasversale ai fasci di protoni.

Pitagora!

$$P_T = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}$$



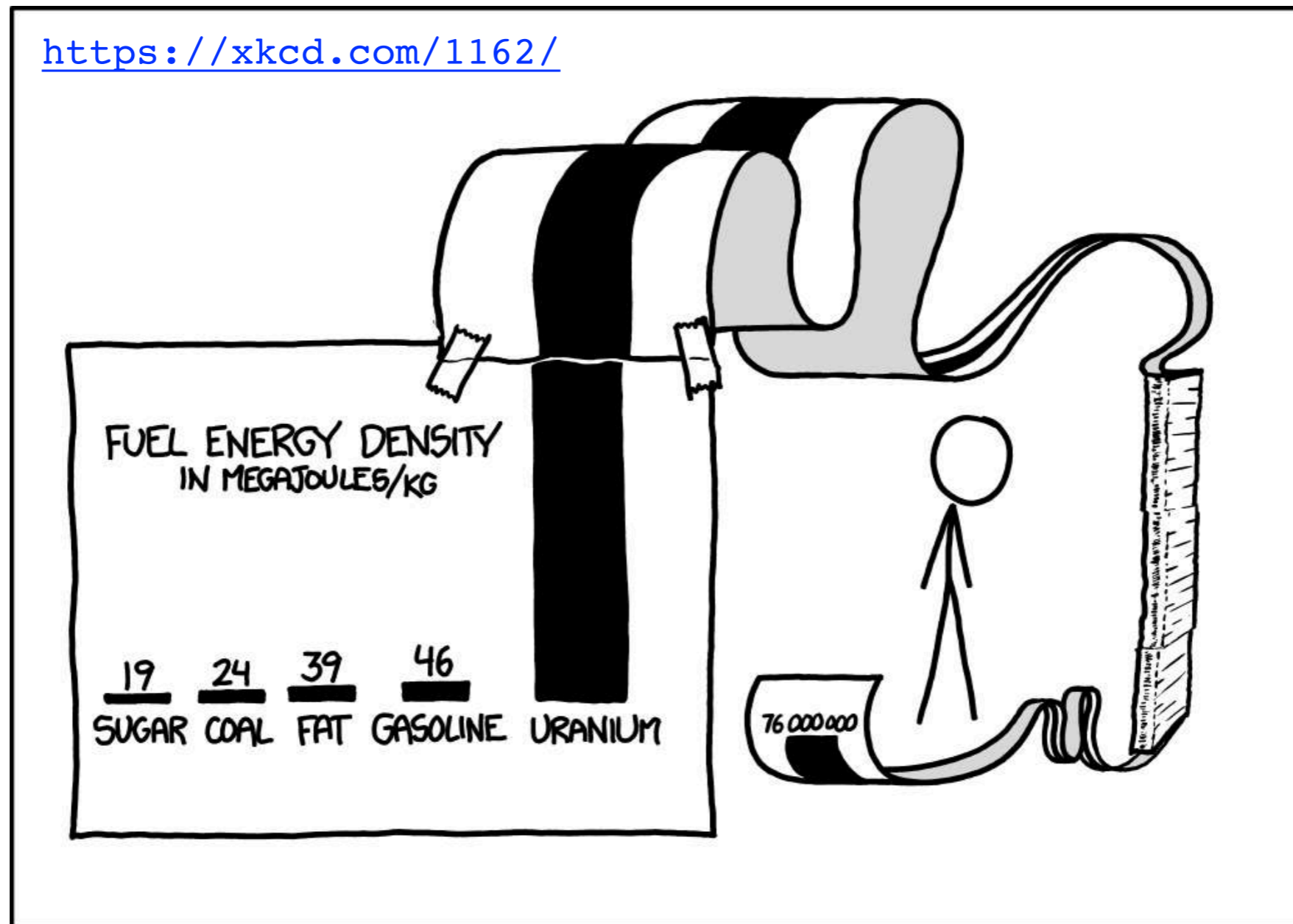
NB: scala logaritmica sull'asse y!

Il **segnale** tende ad avere  $P_T$  più alto



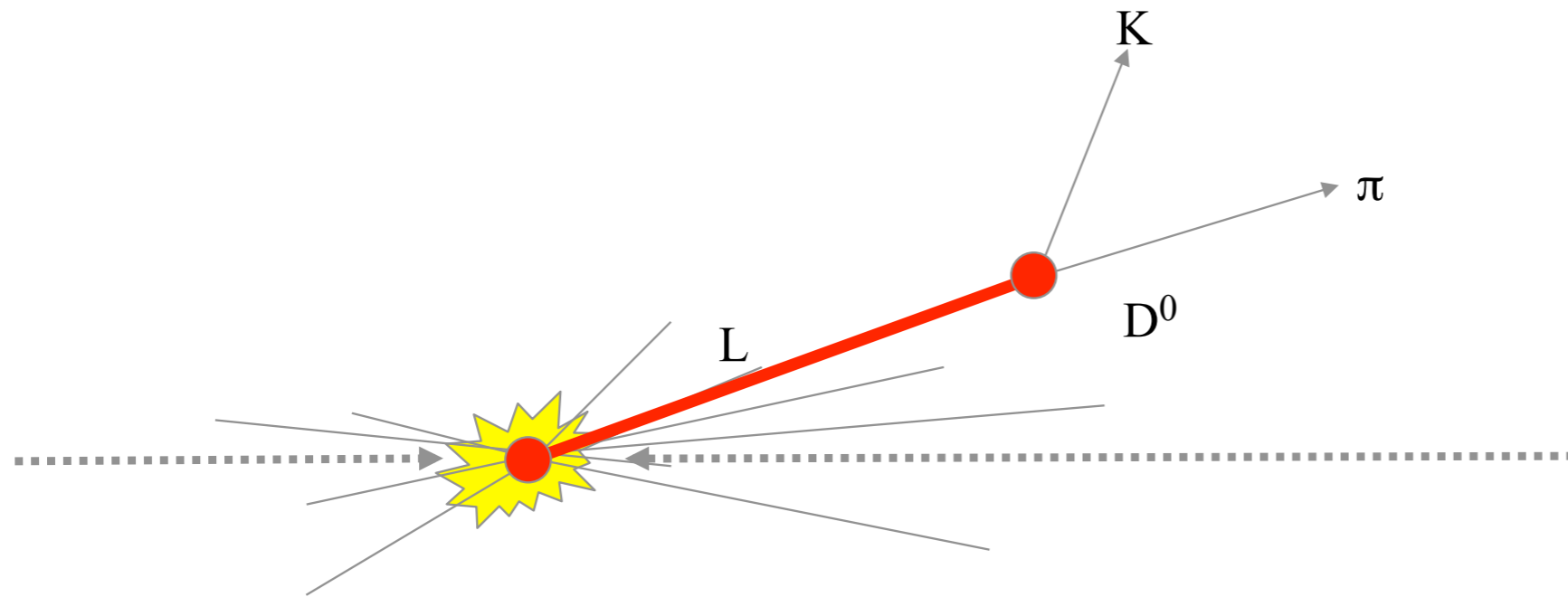
# Scala logaritmica

La scala logaritmica serve per apprezzare meglio le differenze su vari ordini di grandezza!



SCIENCE TIP: LOG SCALES ARE FOR QUITTERS WHO CAN'T FIND ENOUGH PAPER TO MAKE THEIR POINT *PROPERLY*.

# Tempo di decadimento ( $\tau$ )

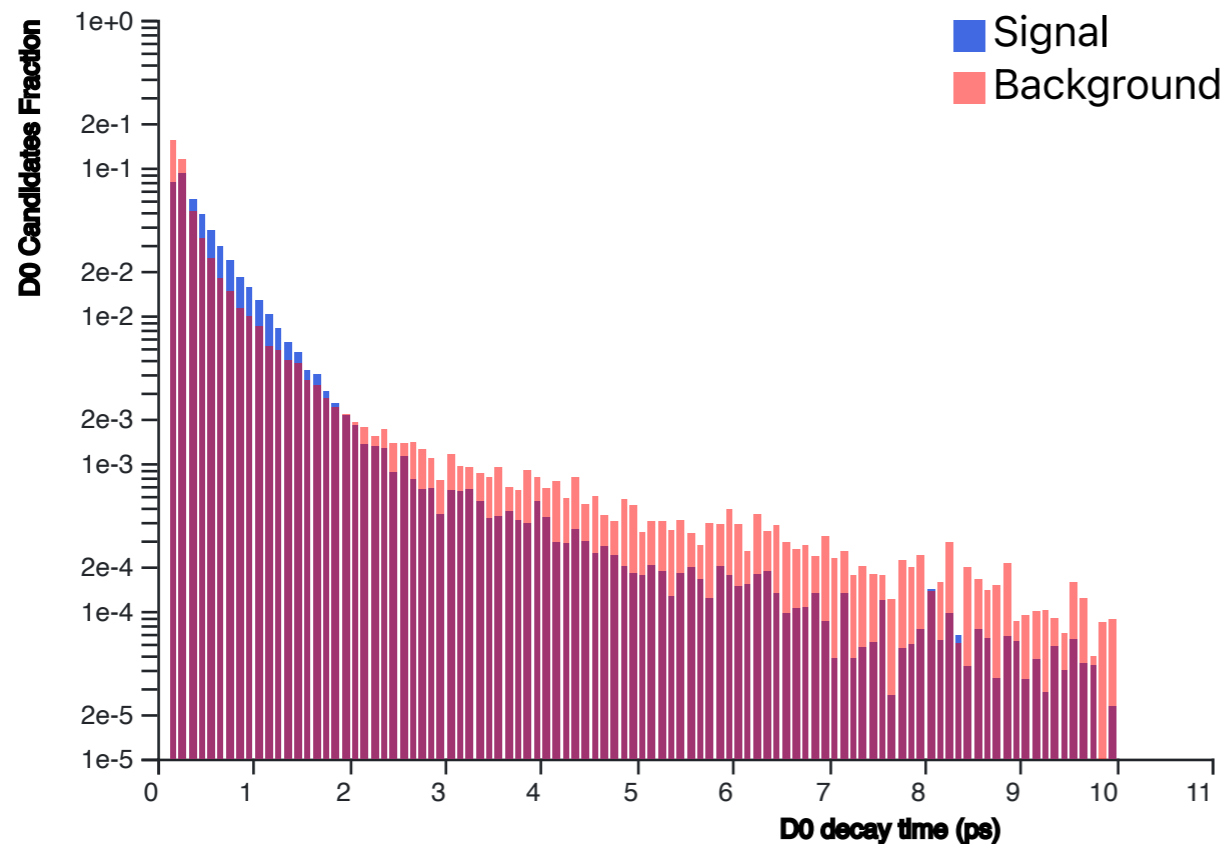


Il tempo di decadimento si calcola a partire dalla **lunghezza di volo  $L$**  :

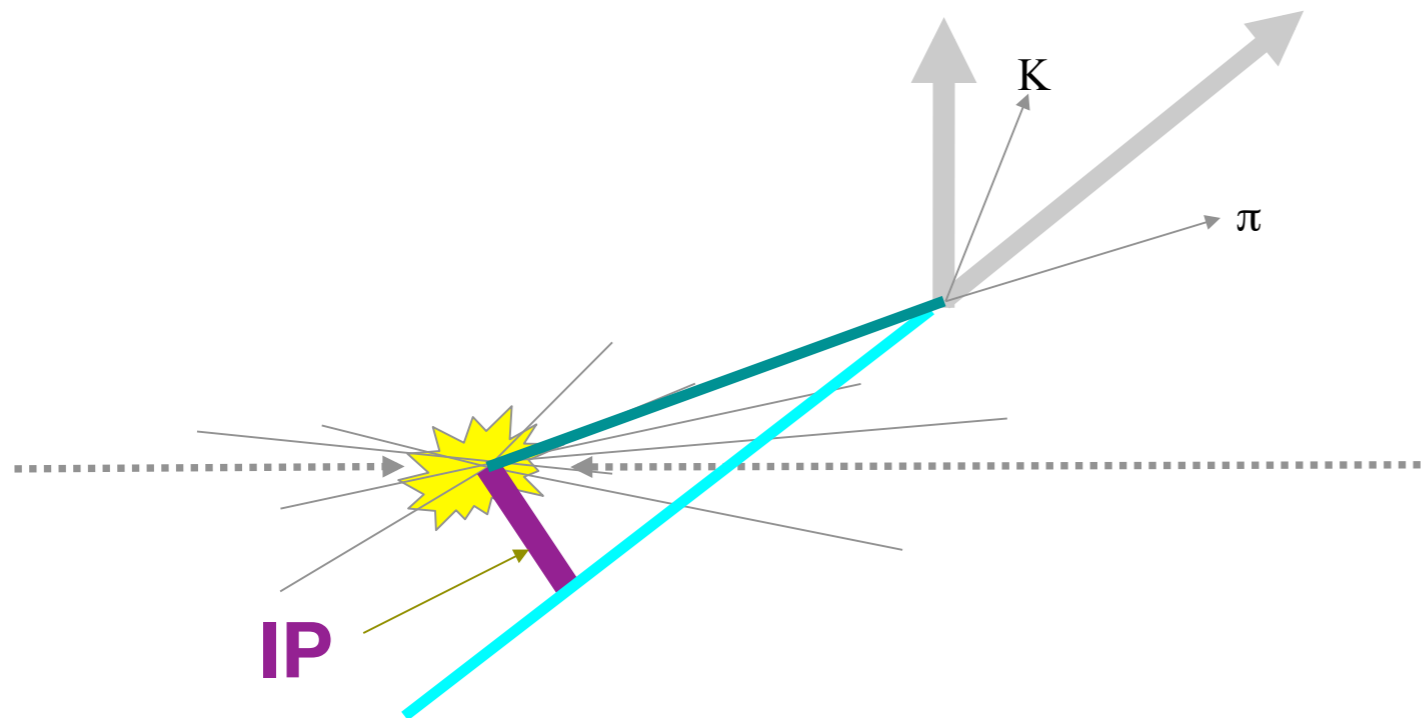
$$\tau = \frac{L}{\beta\gamma c} = \frac{Lm}{pc}$$

Il **segnale** tende ad avere  $\tau$  più grande

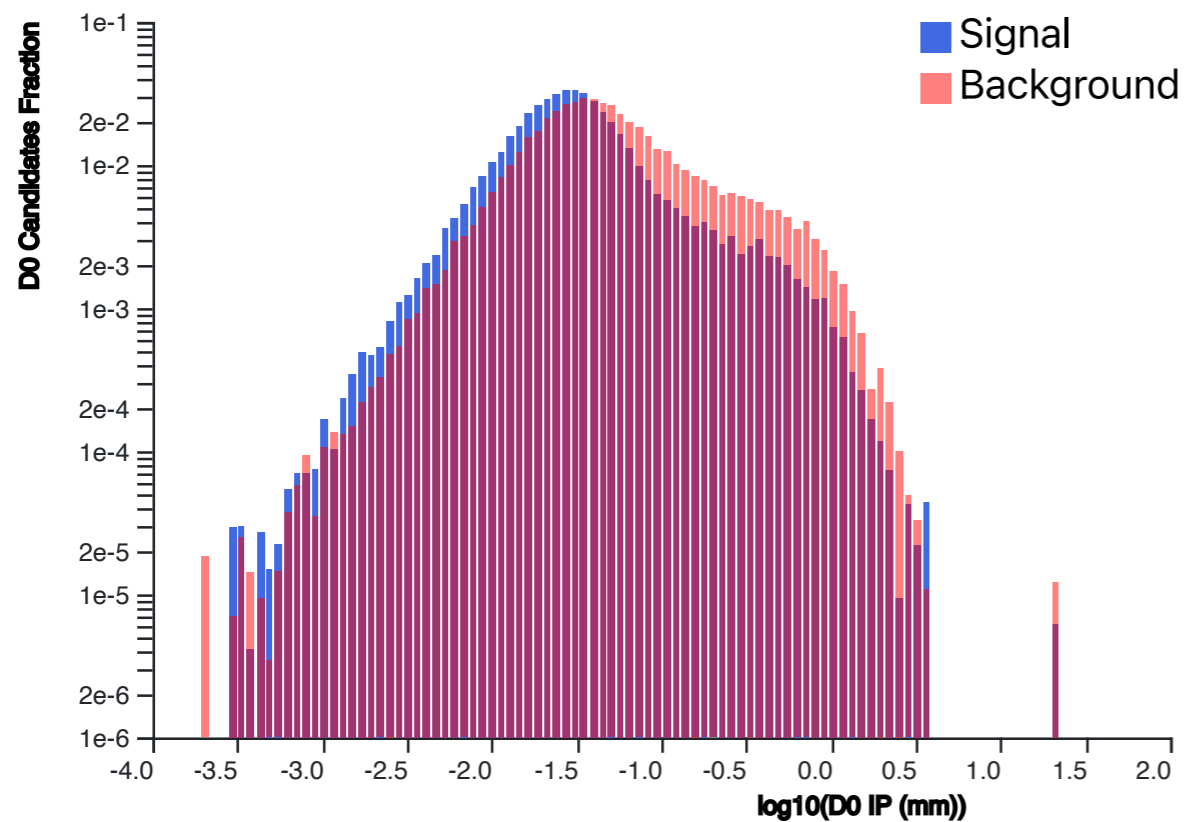
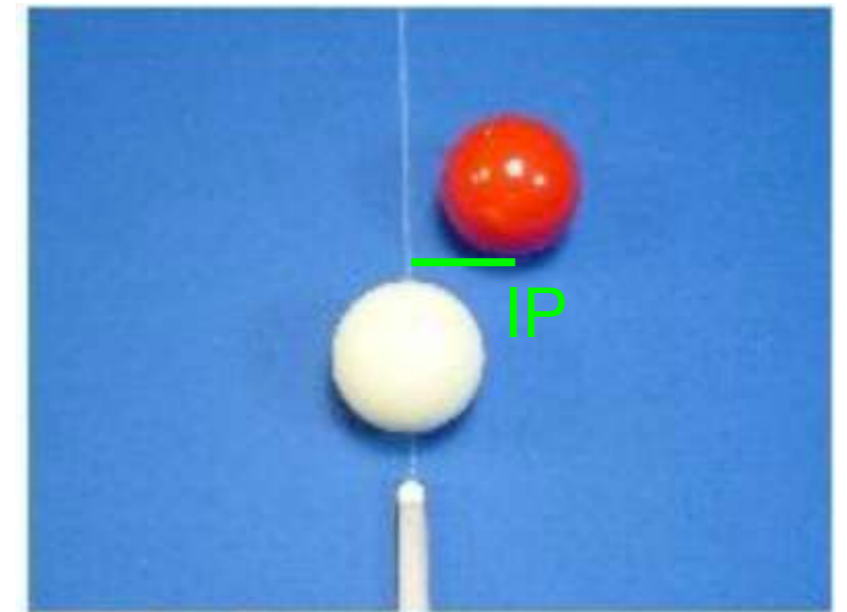
NB: la **vita media** è 0.4 ps, ma il **tempo di decadimento** del  $D^0$  è casuale!



# Parametro d'impatto (IP)



Minima distanza tra il vertice primario e la direzione del  $D^0$



Il **segnale** tende ad avere IP più piccolo

NB: usiamo il  $\log_{10}(\text{IP})$  sull'asse x!

# Scelta dei tagli

Variable

range

D<sup>0</sup> PT

2.5 20

D<sup>0</sup> TAU

0 10

D<sup>0</sup> IP

-4 1.5

Refresh

Dalla barra sinistra è possibile selezionare il range delle variabili in modo da rimuovere quanto più fondo possibile

Attenzione: i tagli sulle variabili rimuoveranno anche una parte del segnale!  
→ trovare il giusto **compromesso**

Otteniamo finalmente la distribuzione del tempo di decadimento del segnale, sulla quale possiamo eseguire un fit

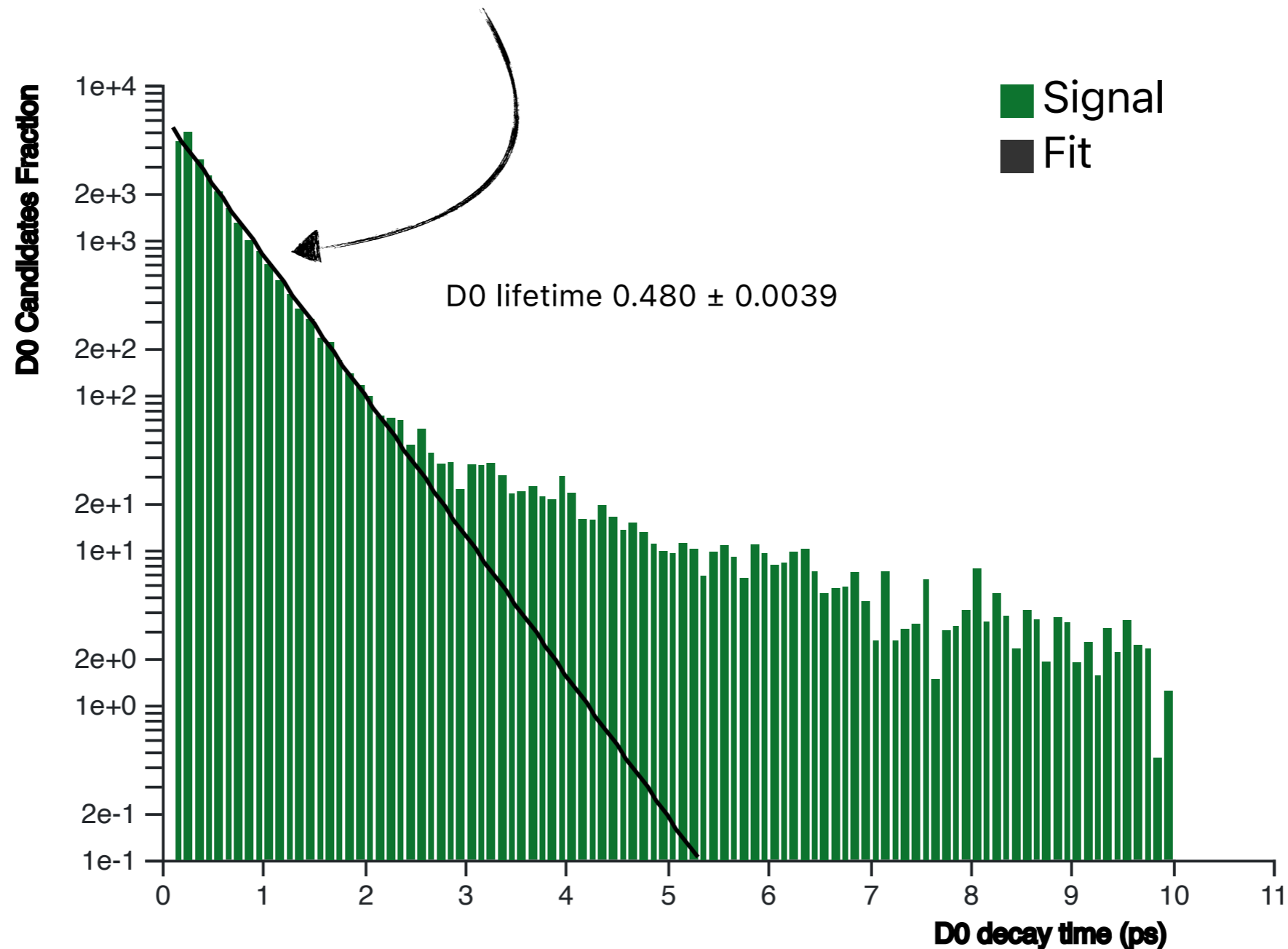


# Fit al tempo di decadimento



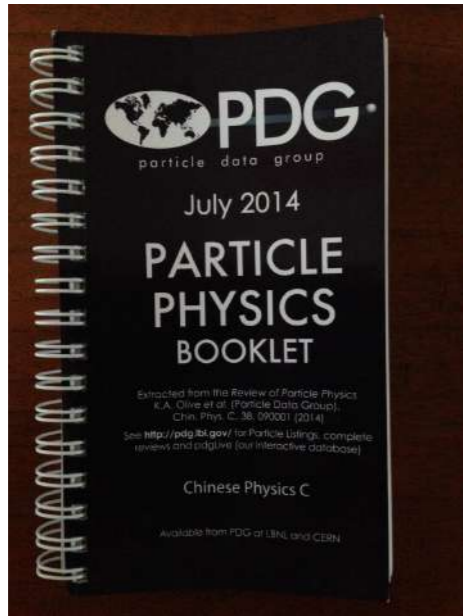
Il modello per il fit questa volta è la funzione esponenziale decrescente (linea nera):

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



Dal fit otteniamo il parametro  $\tau$ , ovvero la vita media del  $D^0$

# Il risultato del fit è in accordo con il PDG?



Prendiamo il testo sacro  
Anche disponibile su: <https://pdg.lbl.gov/>

E cerchiamo il  $D^0$  :  
Interactive listings → mesons → charmed

**CHARMED MESONS** INSPIRE search  
( $C = \pm 1$ )  
 $D^+ = c \bar{d}$ ,  $D^0 = c \bar{u}$ ,  $\bar{D}^0 = \bar{c} u$ ,  $D^- = \bar{c} d$ , similarly for  $D^*$ 's

---

$D^0$   $I(J^P) = 1/2(0^-)$

See related review:

[D<sup>0</sup> -  \$\bar{D}^0\$  Mixing](#) PDF

---

<a href="#">D<sup>0</sup> MASS</a>	$1864.84 \pm 0.05$ MeV	∨
<a href="#">m<sub>D<sup>±</sup></sub> - m<sub>D<sup>0</sup></sub></a>	$4.822 \pm 0.015$ MeV	∨
<a href="#">D<sup>0</sup> MEAN LIFE</a>	$(4.101 \pm 0.015) \times 10^{-13}$ s	∨

# Vita media in funzione del parametro d'impatto

Variable range

D<sup>0</sup> PT

D<sup>0</sup> TAU

D<sup>0</sup> IP

Refresh

1. Ridurre IP massimo

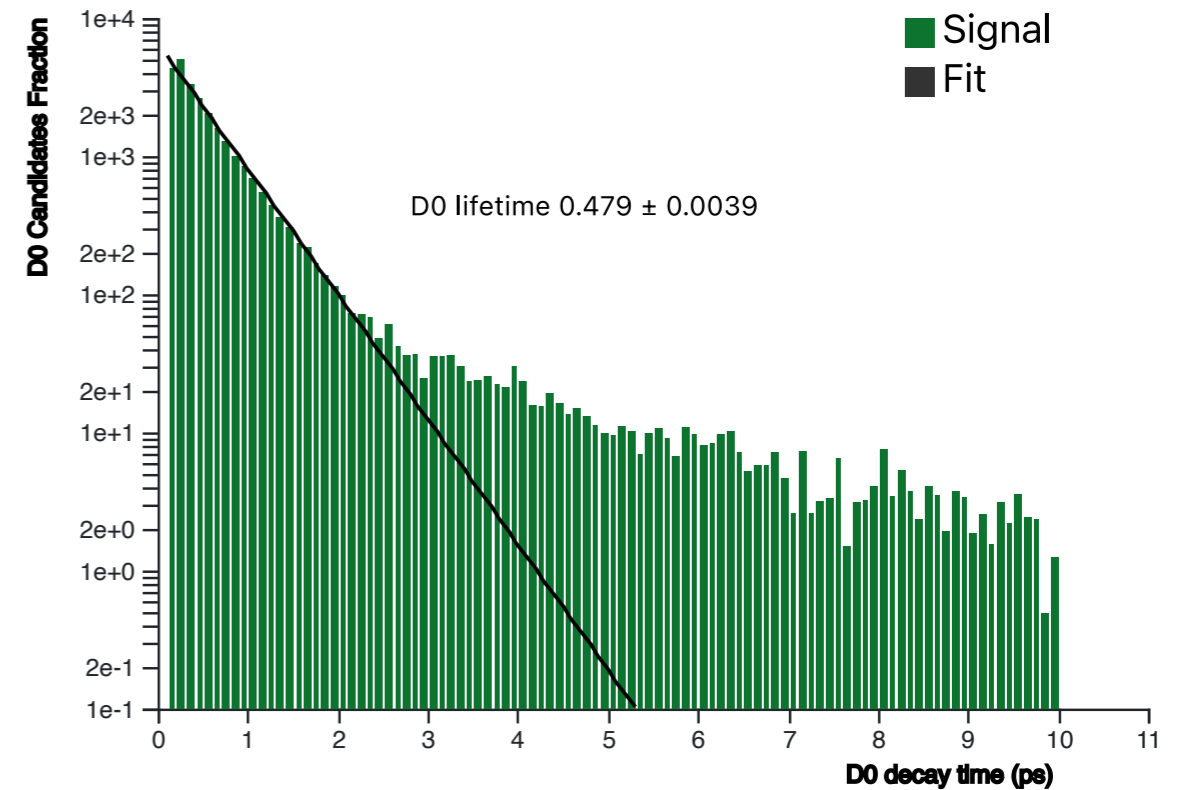
2. Ripetere il fit

3. Salvare il risultato

Time fit

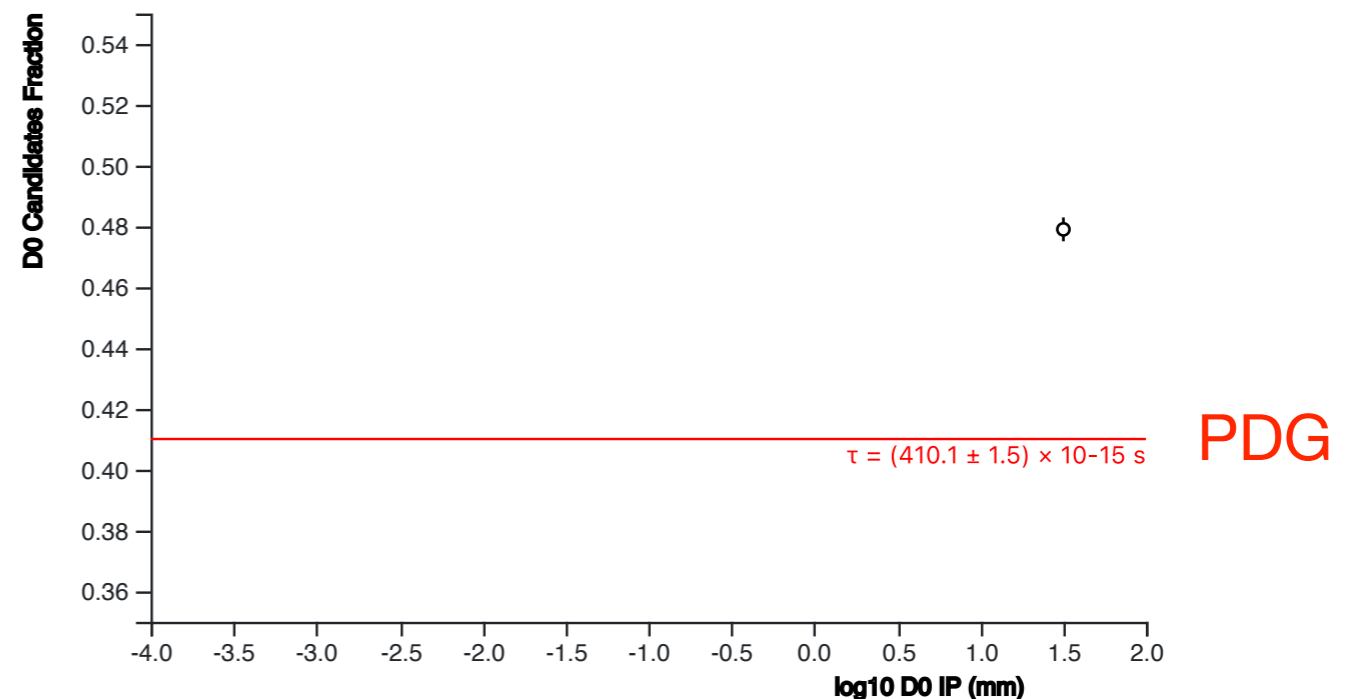
Fit result (ps)	Fit Error
0.479	0.0039

Save result



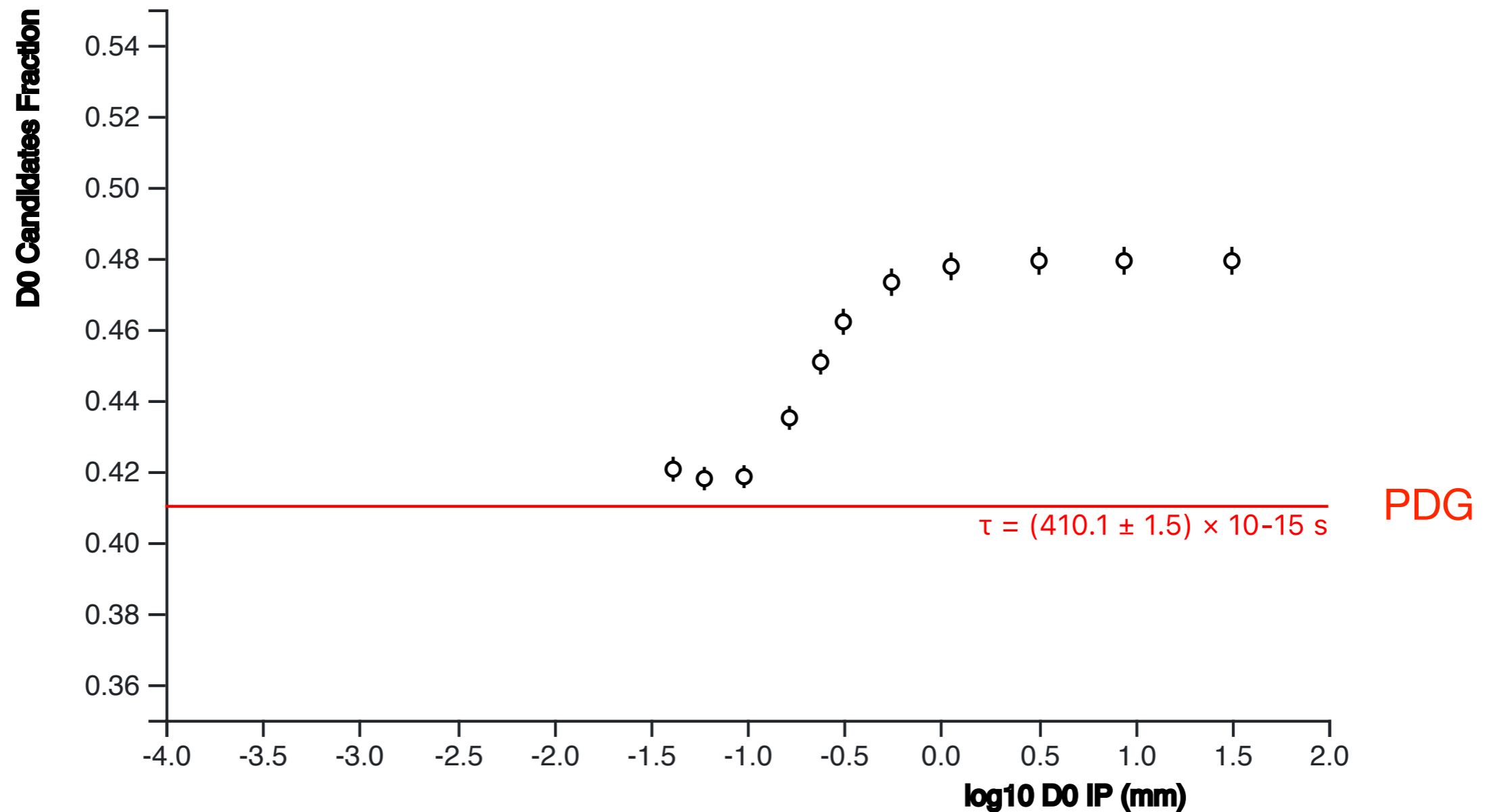
Il valore del fit viene aggiunto nel grafico in basso a destra

Continue ad abbassare IP a step di 0.2 e ripetete il fit salvando i risultati



# Risultato

La vita media dal fit diminuisce riducendo il parametro d'impatto, perché?

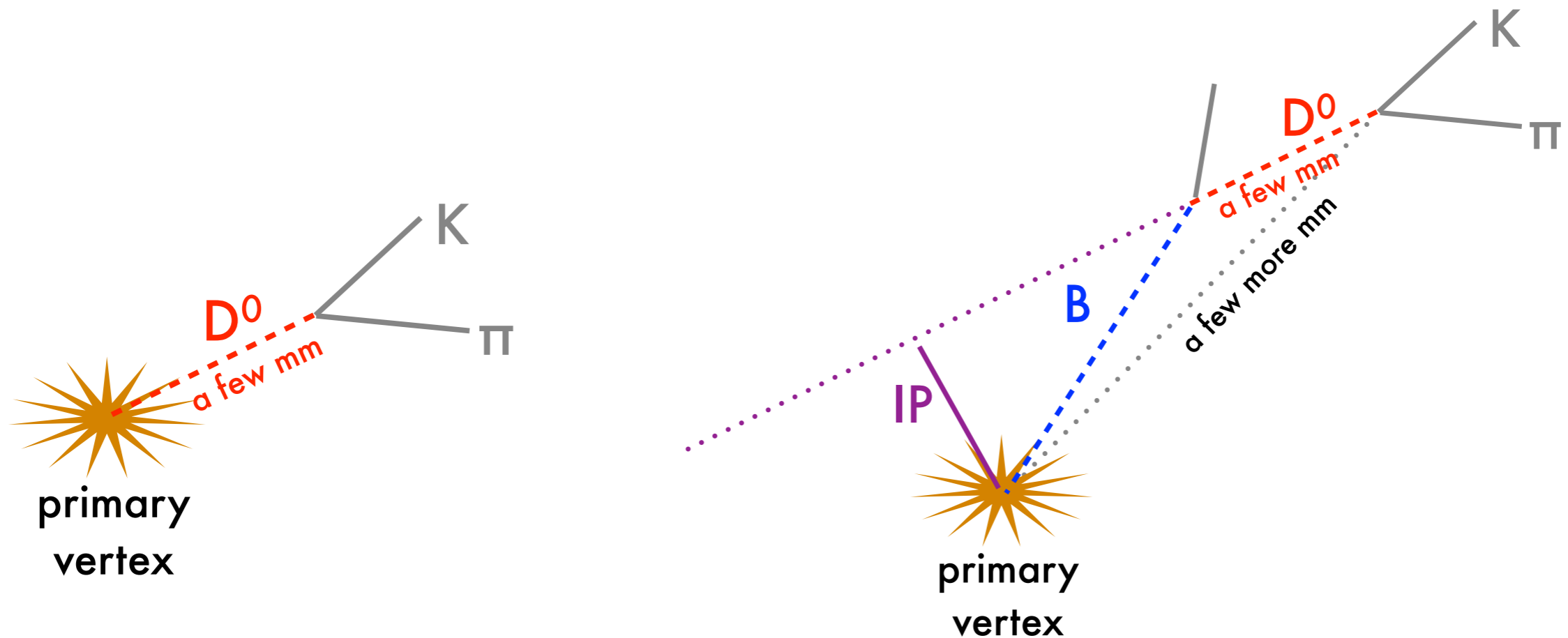


HINT: come vengono prodotti i  $D^0$  ?



# Produzione del $D^0$

Nella produzione secondaria stiamo sommando le vite medie, ottenendo un valore **sistematicamente** più alto

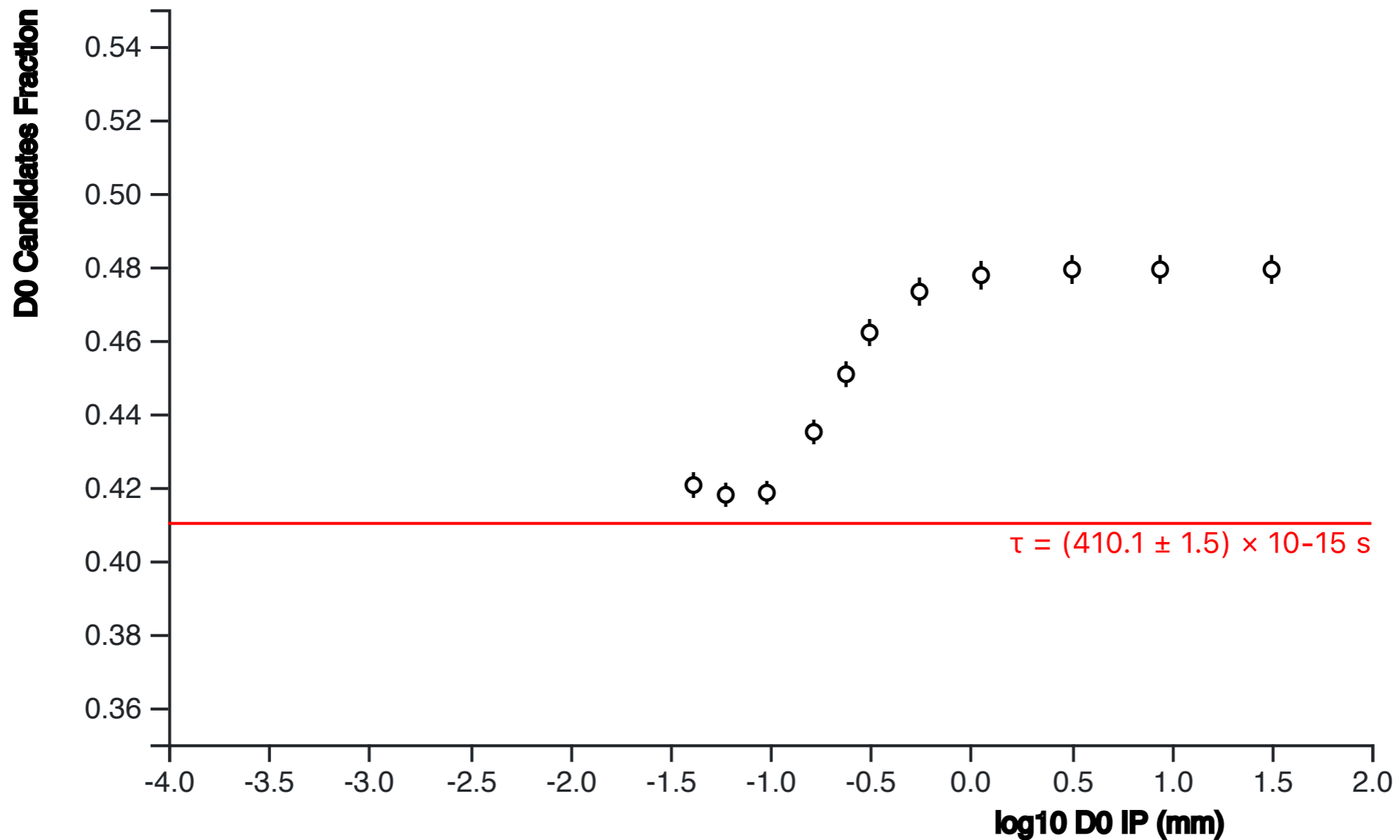


Produzione diretta

Produzione secondaria

Riducendo IP stiamo rimuovendo gli eventi in cui il  $D^0$  proviene dal decadimento di un  $B$  !

# Ci avviciniamo al valore corretto!



Riducendo l'IP il risultato si avvicina a quello del PDG.  
Restano alcuni **errori sistematici** che non abbiamo considerato