

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



# CERN

*Centro Europeo per la Ricerca Nucleare*



***Fondato nel 1954 da 12 stati europei (tra i quali l'Italia), oggi ha 23 stati membri.  
Oltre 600 istituti e università sparse in tutto il mondo collaborano  
agli esperimenti presso il CERN.***

# CERN



***Scoperta dei bosoni  $W$  e  $Z_0$   
Carlo Rubbia e Simon Van Der Meer  
Premi Nobel 1984***



***World Wide Web inventato al CERN  
nel 1990 da Tim Berners-Lee***



***Scoperta del bosone di Higgs***

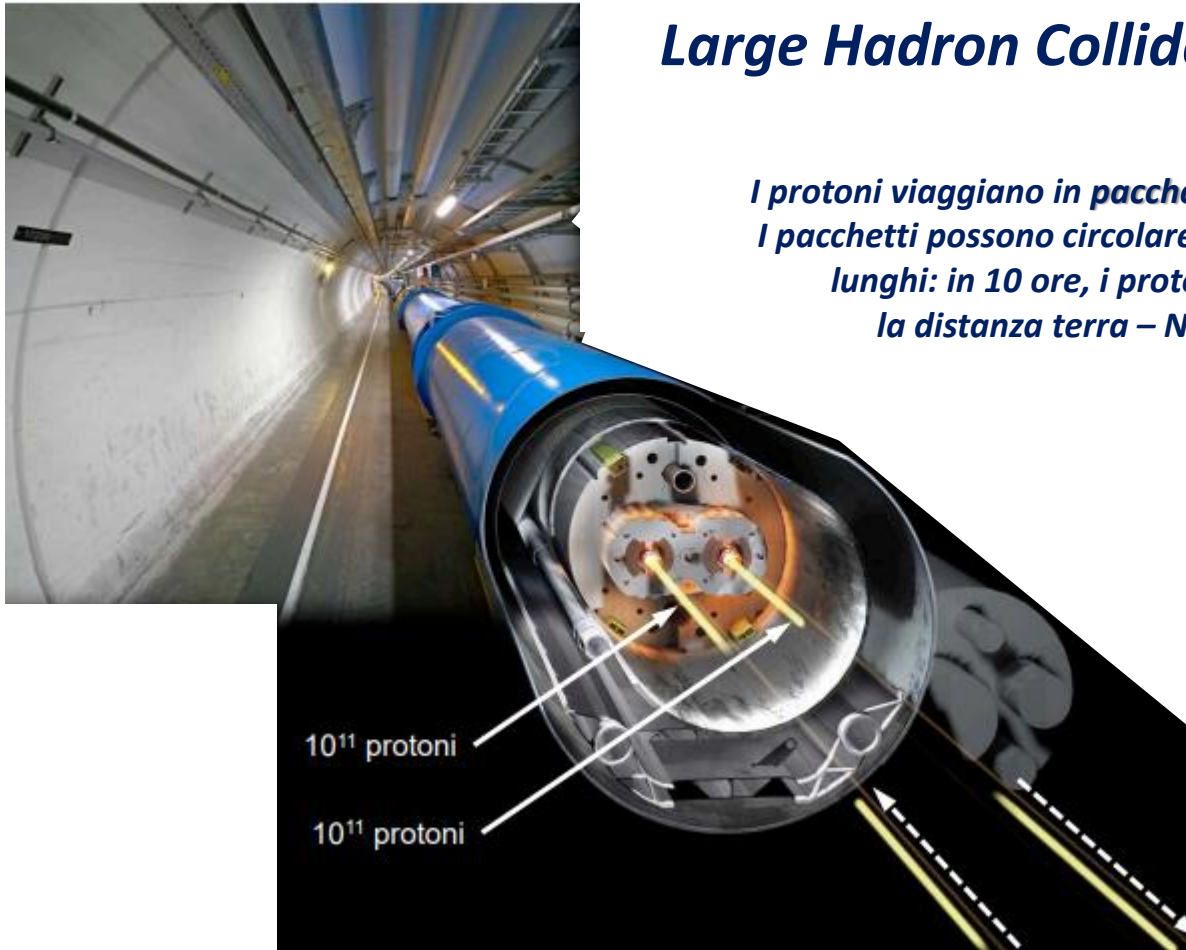
***Francois Englert e Peter Higgs  
Premi Nobel 2013***



# LHC

## Large Hadron Collider

*I protoni viaggiano in pacchetti separati temporalmente di 25ns.  
I pacchetti possono circolare ininterrottamente per tempi molto  
lunghi: in 10 ore, i protoni di LHC percorrono due volte  
la distanza terra – Nettuno, ben 9 miliardi di km!*



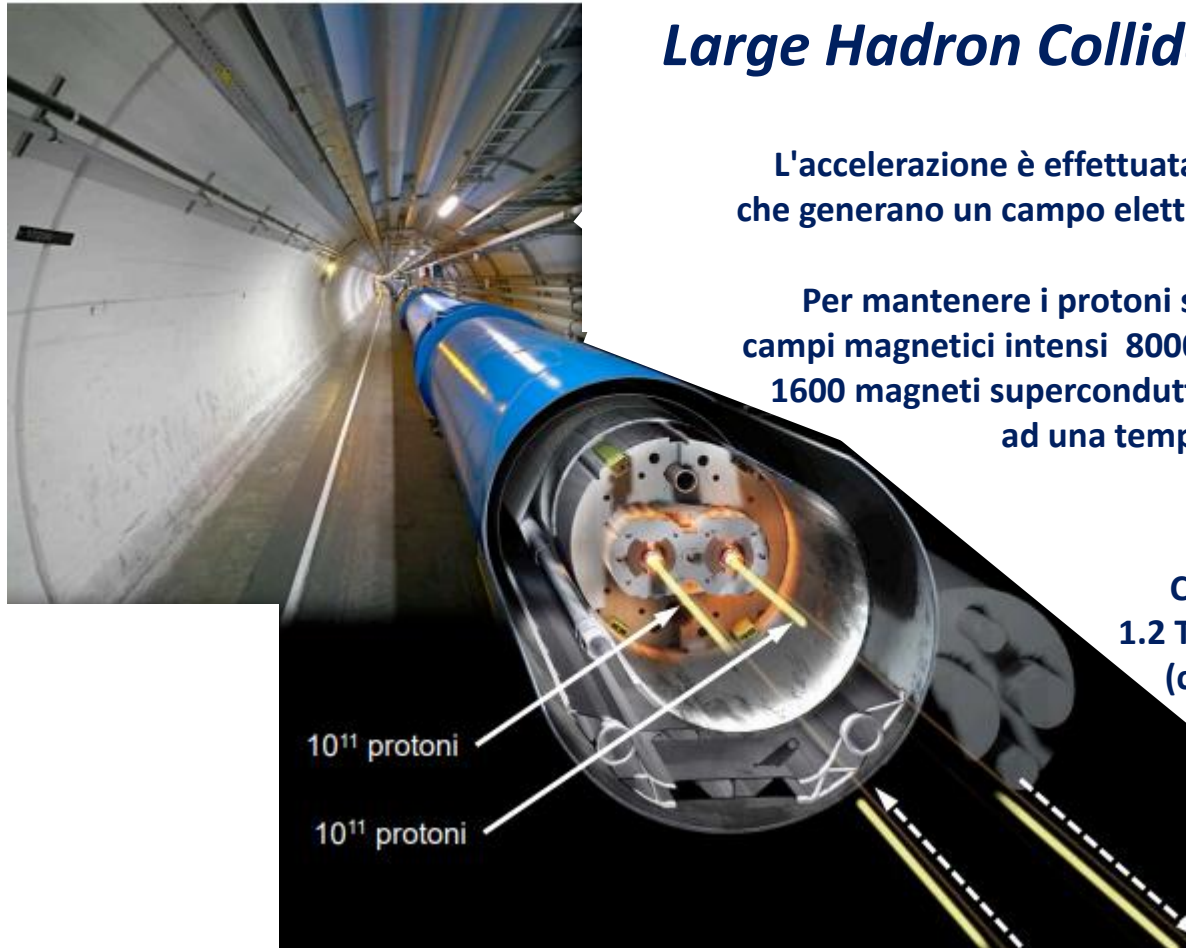
*Due fasci di protoni sono accelerati a velocità prossime a quella della luce  
lungo un anello di 27 km di circonferenza, costruito a circa 100 m sotto terra.*

## *Large Hadron Collider*

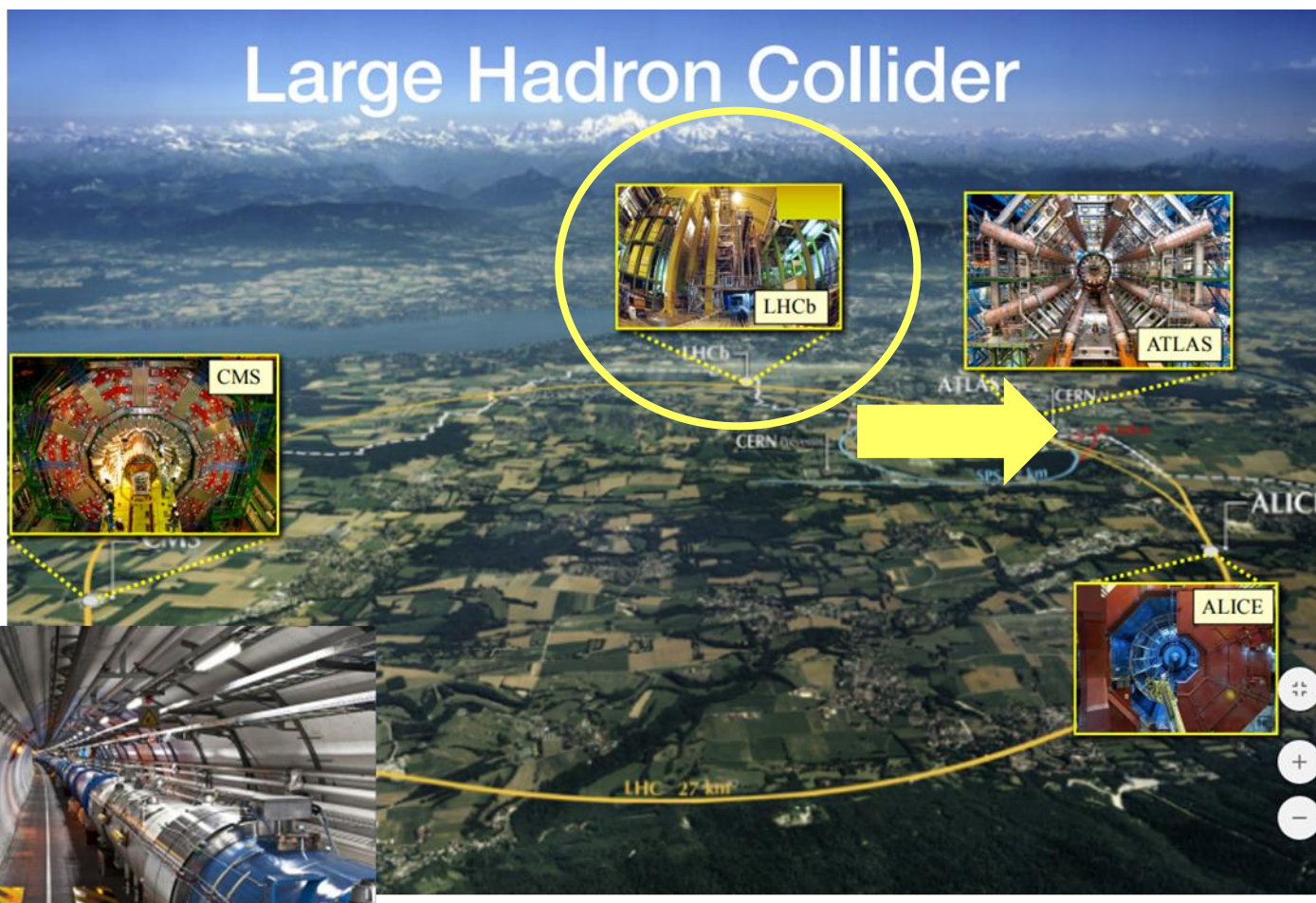
L'accelerazione è effettuata tramite cavità elettromagnetiche che generano un campo elettrico alternato ad altissima frequenza.

Per mantenere i protoni sull'orbita circolare sono necessari campi magnetici intensi 80000 volte il campo magnetico terrestre; 1600 magneti superconduttori sono raffreddati con elio liquido ad una temperatura di  $-271.25^{\circ}\text{C}$ .

Consumo di energia elettrica CERN:  
1.2 TWh per anno, di cui 50% circa per LHC  
(consumo di circa 300000 abitazioni)



*Due fasci di protoni sono accelerati a velocità prossime a quella della luce lungo un anello di 27 km di circonferenza, costruito a circa 100 m sotto terra.*



*I due fasci di protoni collidono in quattro punti ove sono collocati i 4 esperimenti principali.*

*LHCb è uno degli esperimenti operanti all'acceleratore LHC e studia in particolare le proprietà delle (anti-)particelle contenenti i quark beauty (b) e charm (c) prodotte nelle collisioni p-p.*



# L'esperimento LHCb: Large Hadron Collider beauty

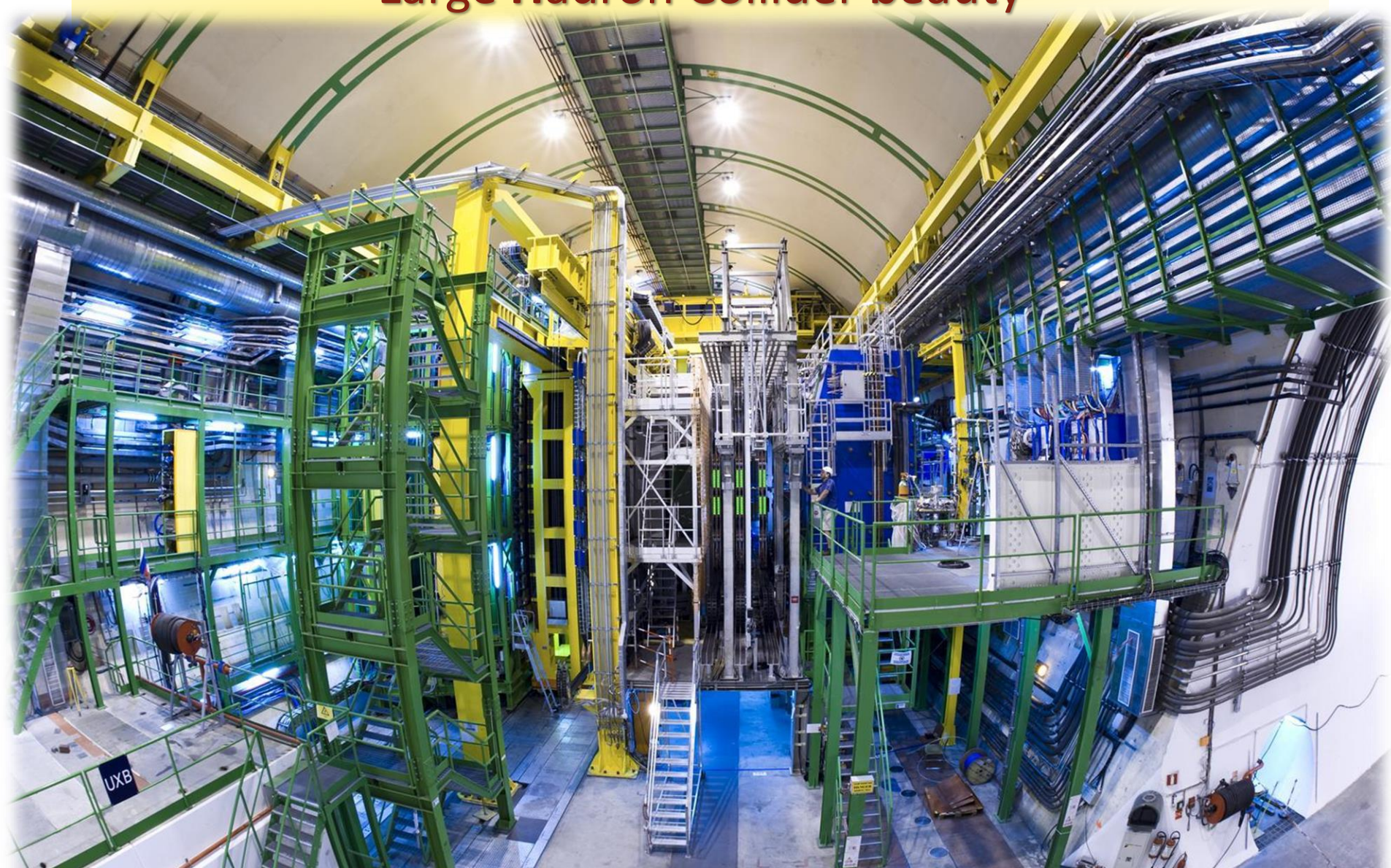


*Il nostro universo è costituito essenzialmente da materia.  
Sappiamo peraltro che, al momento del Big Bang, circa 14 miliardi di anni fa,  
materia e anti-materia sono state prodotte in egual quantità.  
Dove è finita l'anti-materia?*

*L'esperimento LHCb è stato progettato per studiare se vi siano differenze  
nel comportamento di particelle ed antiparticelle contenenti i quark b e c  
tali da spiegare perché la natura preferisca la materia all'antimateria  
e far luce così su uno dei misteri fondamentali del nostro universo.*



# L'esperimento LHCb: Large Hadron Collider beauty

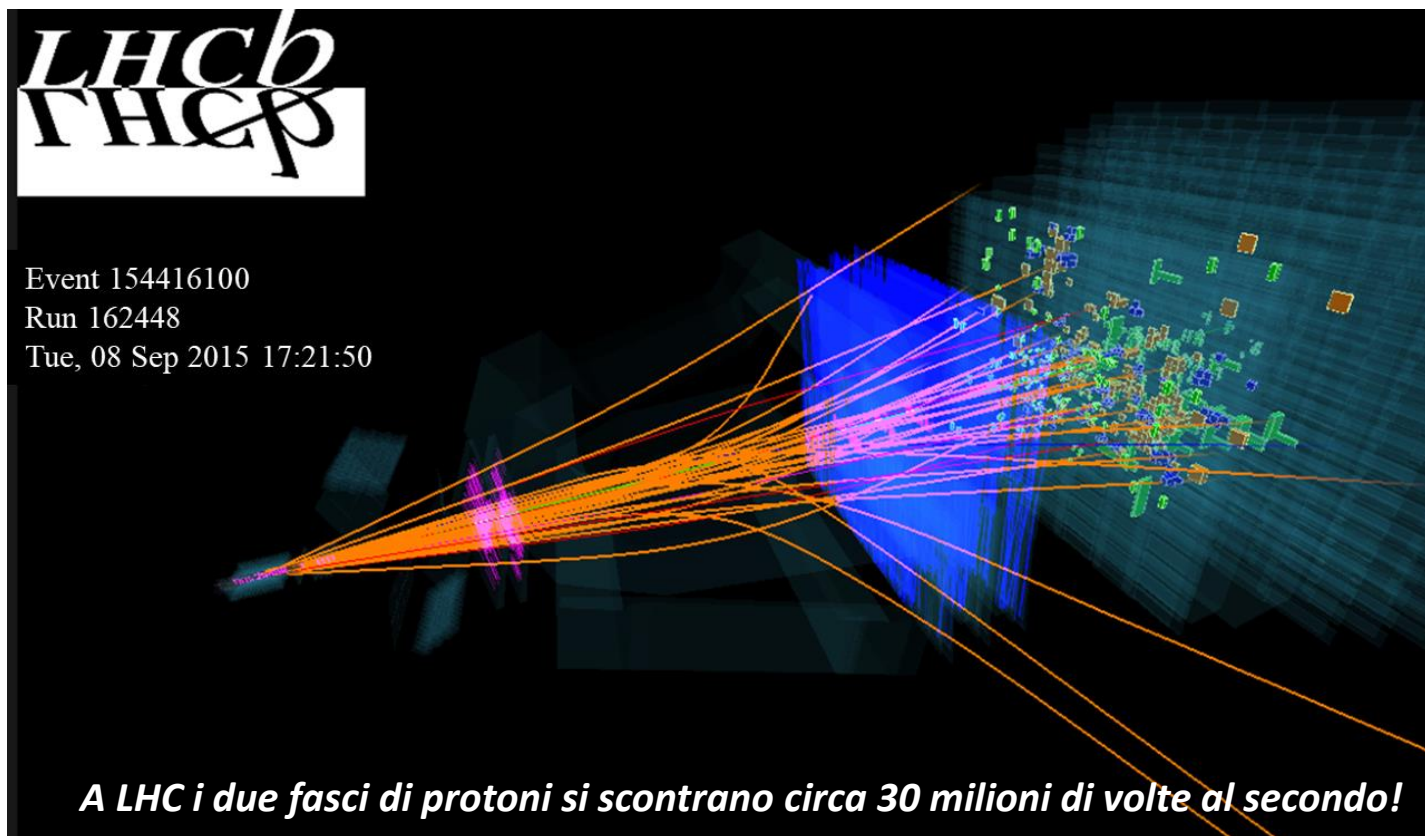


***Apparato sperimentale: lunghezza circa 20 m, altezza 10 m, ha una massa di circa 5600 tonnellate!***





*Cosa succede quando due fasci di protoni di altissima energia vengono fatti collidere?*

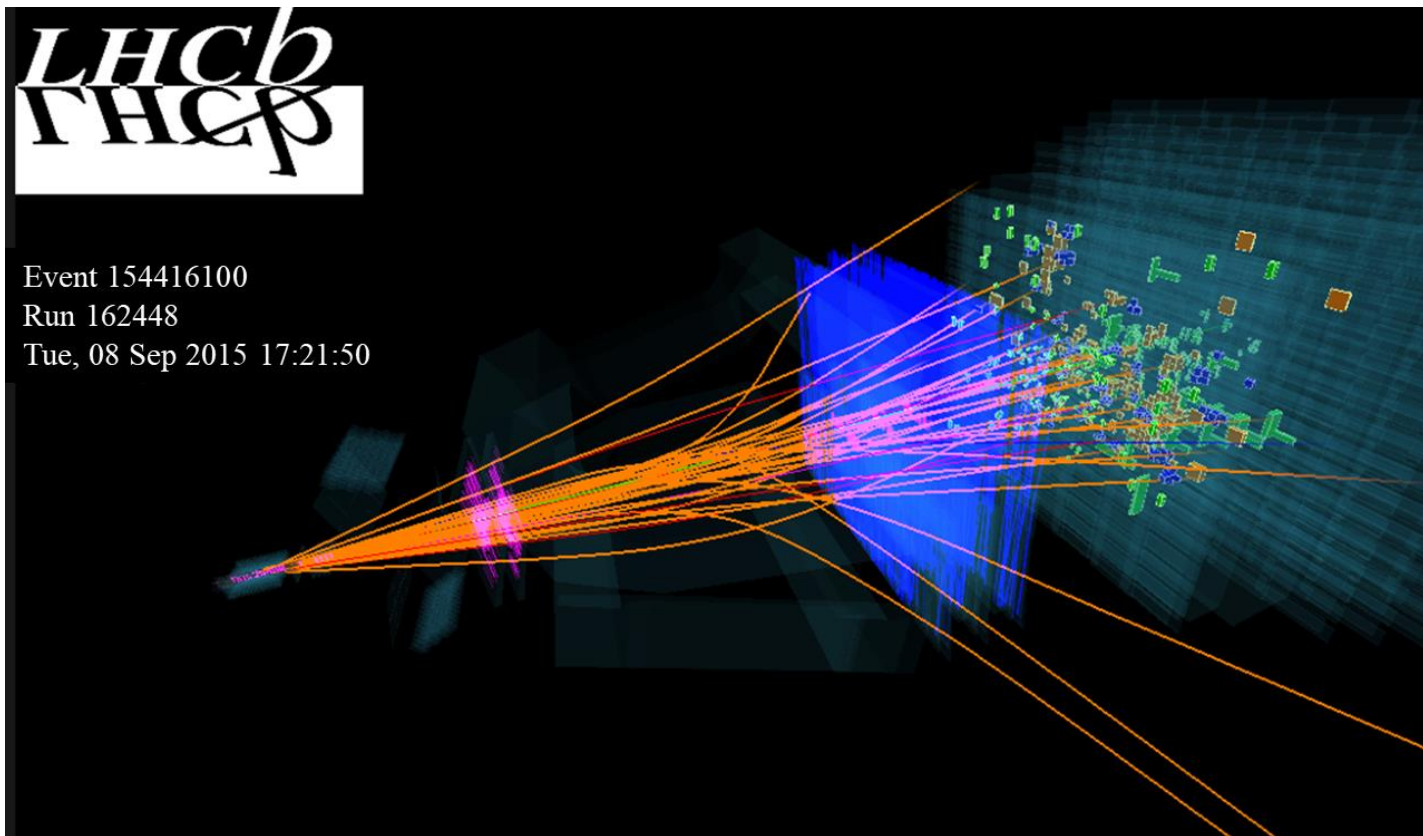


*Si producono tantissime particelle! Molte di queste particelle possono essere rivelate grazie alle tracce da esse lasciate in uno o più rivelatori che compongono l'apparato sperimentale.*

*In figura, è rappresentato un tipico evento (collisione protone-protone) registrato da LHCb.*



*Cosa succede quando due fasci di protoni di altissima energia vengono fatti collidere?*



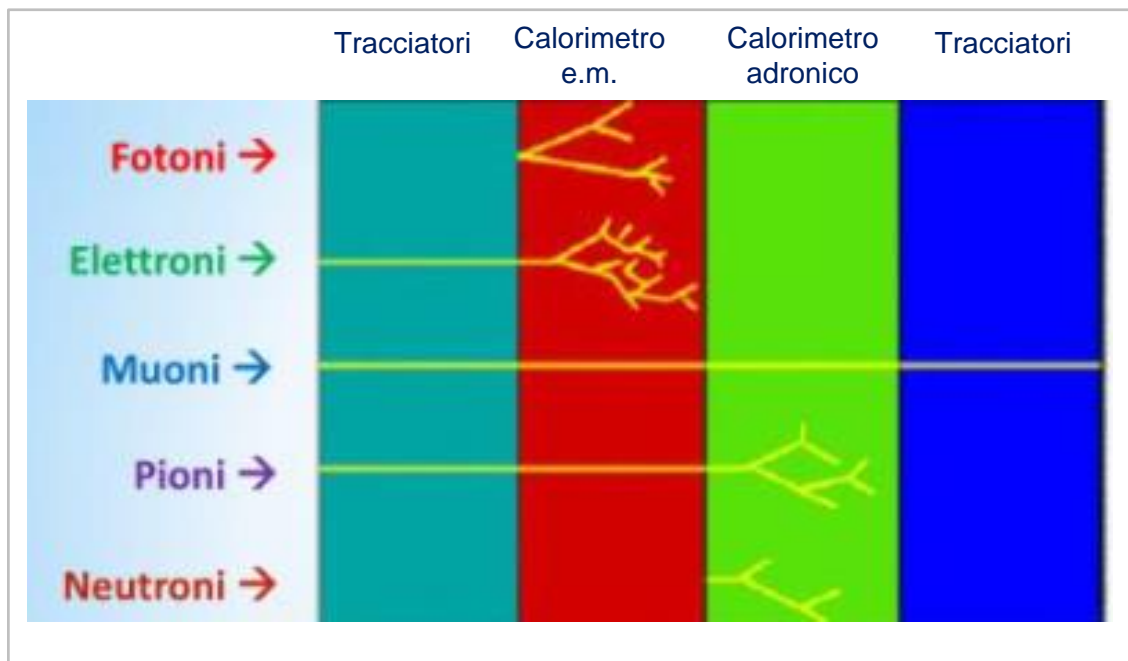
*Per ricostruire un evento, è necessario combinare le informazioni registrate da diversi rivelatori che ci permettono di misurare le proprietà delle particelle prodotte nelle interazioni.*

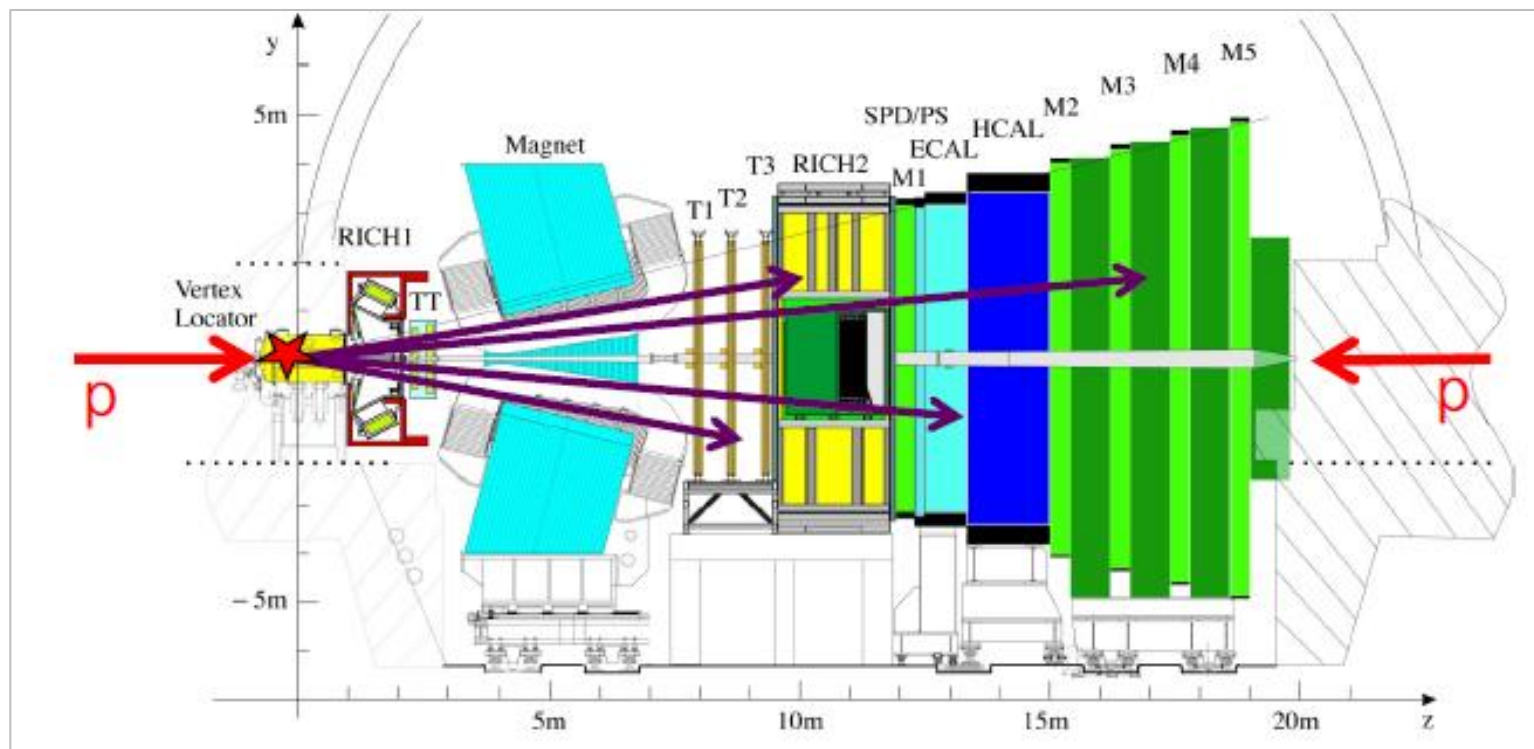


# Come si rivelano le particelle?



- Le particelle vengono rivelate e identificate grazie ai diversi meccanismi di interazione con la materia.
- Un apparato sperimentale come LHCb è tipicamente costituito da tanti rivelatori, ciascuno sensibile ad una particolare caratteristica delle particelle che lo attraversano.

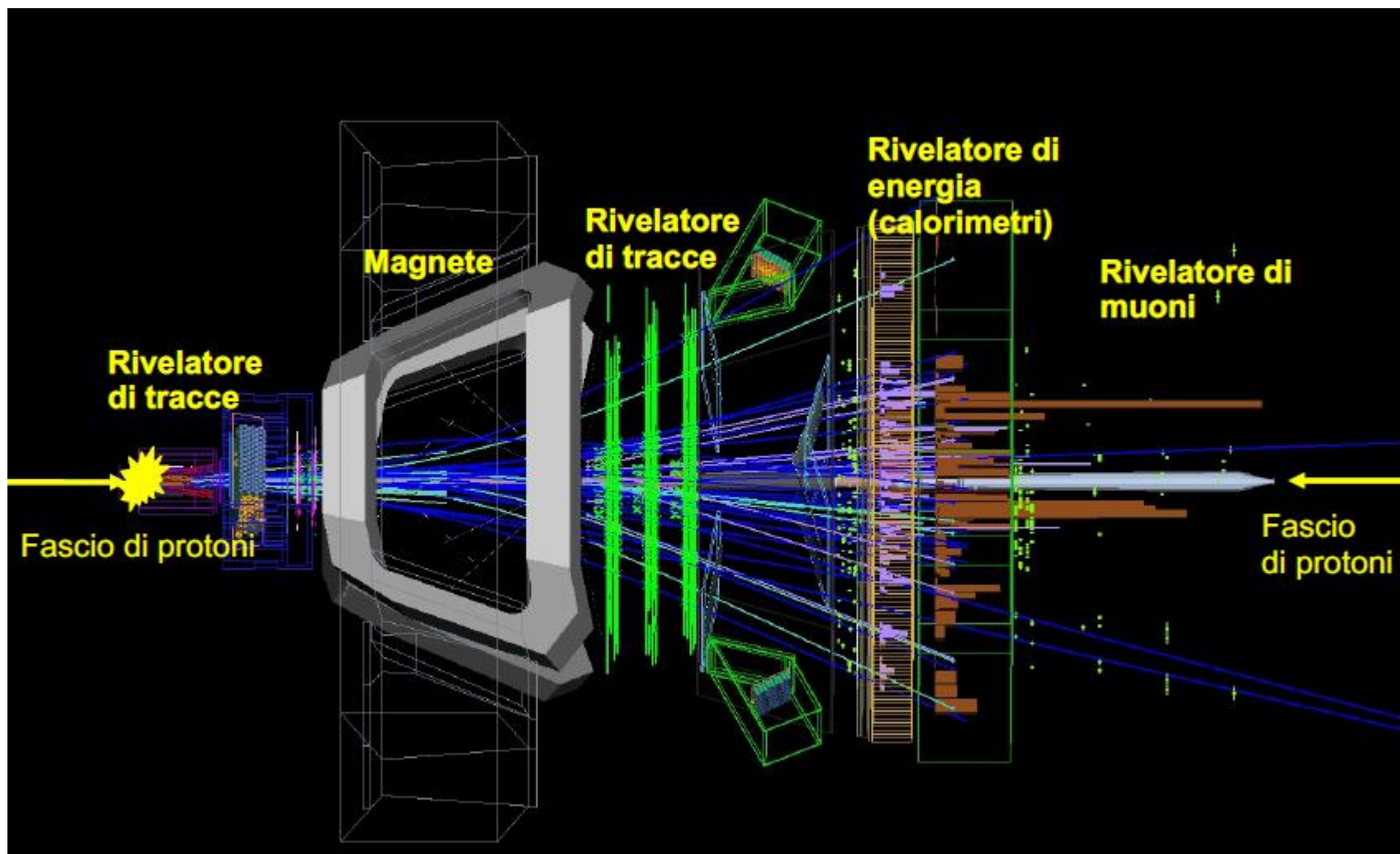




***Spettrometro in avanti***

*in grado di misurare particelle prodotte ad angoli relativamente piccoli (entro  $\sim 15^\circ$ )  
rispetto alla direzione dei fasci collidenti*

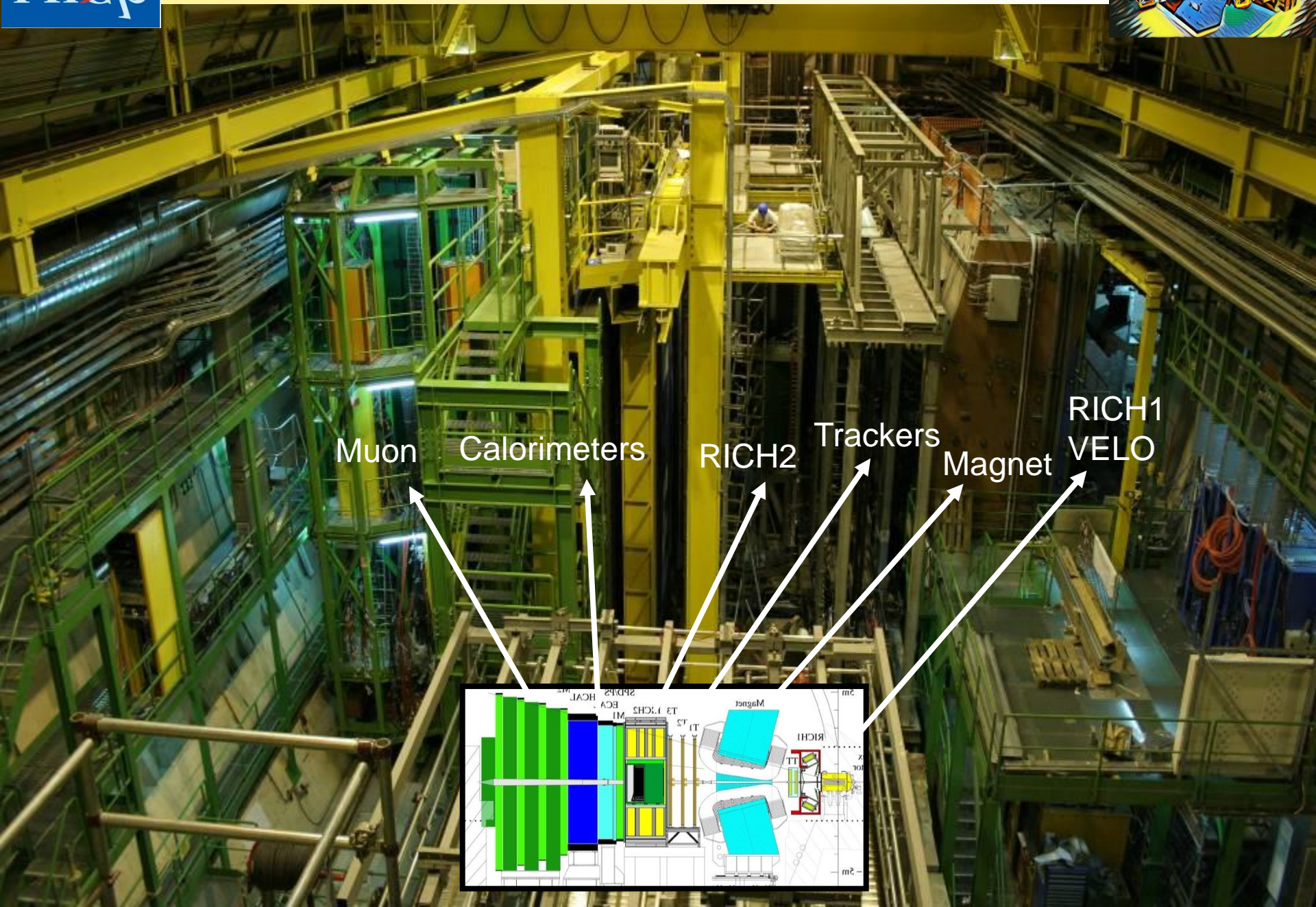




*Il rivelatore LHCb è costituito da una serie di sotto-rivelatori di diverso tipo, posizionati in successione al di là del punto di interazione.*



# L'esperimento LHCb



Muon

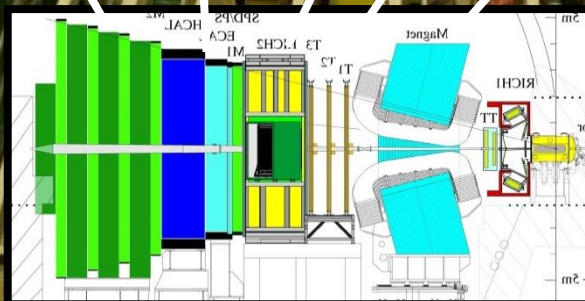
Calorimeters

RICH2

Trackers

Magnet

RICH1  
VELO







**Oggi utilizzerete un campione di dati raccolti dall'esperimento LHCb in collisioni protone-protone all'acceleratore LHC.**

**L'esercizio sarà diviso in due parti.**

- **PRIMA PARTE: selezionare le particelle  $D^0$  prodotte nelle interazioni**
- **SECONDA PARTE: misurare la vita media della particella  $D^0$**

# La particella $D^0$



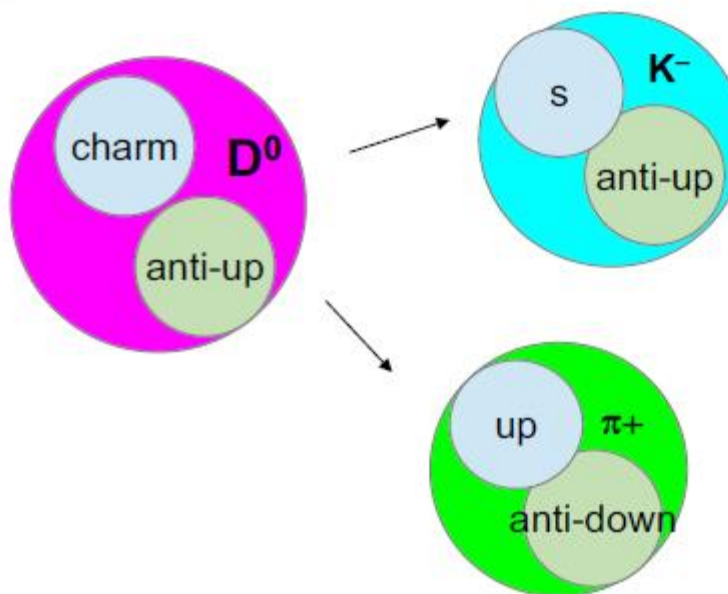
La particella  $D^0$  è un mesone (=adrone composto da quark e antiquark) prodotto copiosamente nelle interazioni protone-protone ad LHC.

E' una particella elettricamente neutra.

E' una particella instabile: dopo aver percorso distanze  $\sim$  mm, decade (si disintegra) in particelle più leggere, per esempio un kaone e un pione.

In media una  $D^0$  sopravvive  $\sim 0.4 \times 10^{-12}$  s, meno di un picosecondo!

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

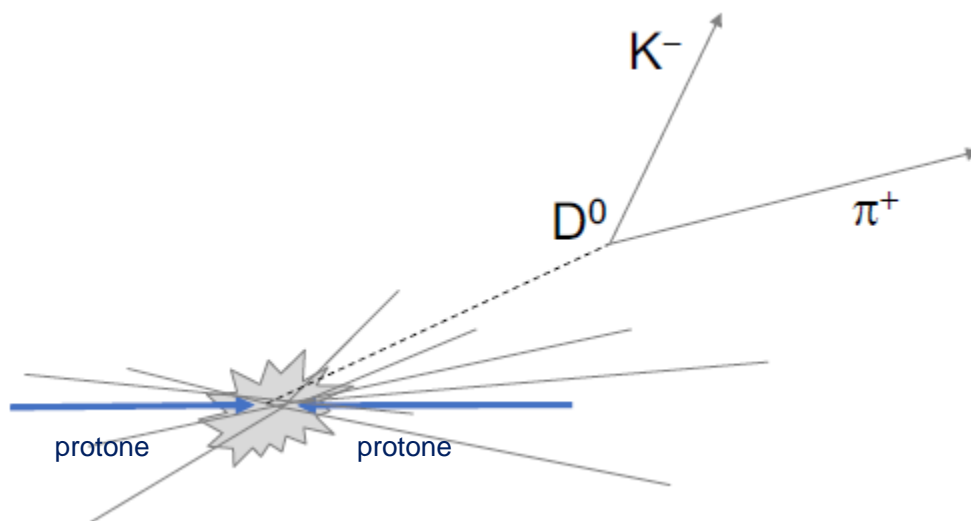


# La particella $D^0$ : come rivelarla



La particella  $D^0$  non lascia traccia nell'apparato sperimentale di LHCb.  
Essa può essere rivelata a partire dalle tracce delle due particelle (kaone e pione) in cui decade.

Kaone e pione sono particelle elettricamente cariche e percorrono una distanza sufficiente per essere rivelate e identificate nel rivelatore LHCb.



Poiché la particella  $D^0$  è elettricamente neutra,  
il kaone e il pione devono avere carica elettrica opposta.



# La particella $D^0$ : come rivelarla



Dalla fisica *classica* (la fisica che si studia a scuola), sappiamo che un corpo di massa  $m$  e velocità  $v$  possiede un'energia cinetica pari a:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{p^2}{2m}$$

con  $p = mv$  impulso (o momento o quantità di moto).

La massa della particella può quindi essere calcolata come:

$$m = \frac{p^2}{2E}$$

a partire dalla misura della sua energia e del suo impulso.

**Queste relazioni non sono più valide per particelle che viaggiano a velocità prossime alla velocità della luce nel vuoto  $c \sim 300,000$  km/s.**

# La particella $D^0$ : come rivelarla



**Per particelle che viaggiano a velocità prossime alla velocità della luce  
 $c \sim 300,000 \text{ km/s}$ , l'energia risulta pari a:**

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

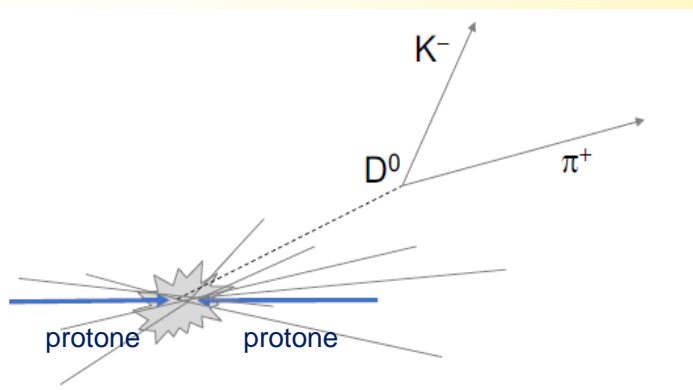
**La massa della particella può quindi essere calcolata come:**

$$mc^2 = \sqrt{E^2 - p^2 c^2}$$

# La particella $D^0$ : come rivelarla



La particella  $D^0$  può essere rivelata a partire dalla misura dell'energia e dell'impulso del kaone e del pione prodotti nel decadimento:



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

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

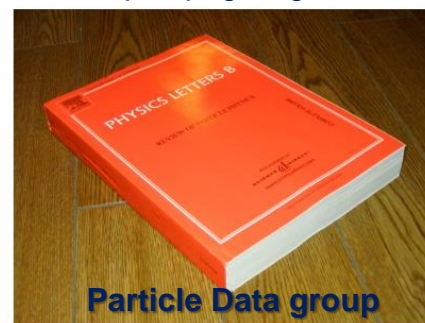
$$m_{D^0}c^2 = \sqrt{E_{D^0}^2 - p_{D^0}^2c^2}$$

Il valore della massa della particella  $D^0$ , misurata da diversi esperimenti, è:

$$m_{D^0} = (1864.83 \pm 0.05) \text{ MeV}/c^2$$

<https://pdg.lbl.gov/>

Incerteza sulla misura





# Cosa è l'elettronVolt?



Si definisce elettronVolt l'energia acquistata da una particella con carica elettrica pari a quella dell'elettrone ( $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ ), accelerata da una differenza di potenziale elettrico pari a 1 Volt:

$$1eV = 1.6 \times 10^{-19} J$$

In fisica spesso si utilizzano multipli dell'eV:

$$1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$$

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$$

$$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$$

$$1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$$

**I protoni di LHC sono accelerati fino ad una energia di quasi 7 TeV!**



**Il valore della massa della particella  $D^0$  è**

$$m_{D^0} = 1864.8 MeV/c^2$$

**A quanti kg corrisponde?**







**Il valore della massa della particella  $D^0$  è**

$$m_{D^0} = 1864.8 MeV/c^2$$

**A quanti kg corrisponde?**

$$m_{D^0} \approx 3.3 \times 10^{-27} kg$$

**Per confronto, la massa di un protone è pari a  $1.67 \times 10^{-27} kg$  ( $938 MeV/c^2$ ),  
la massa di un elettrone è  $9.11 \times 10^{-31} kg$  ( $511 keV/c^2$ ).**



Oggi utilizzerete un campione di dati raccolti dall'esperimento LHCb in collisioni protone-protone all'acceleratore LHC.

L'esercizio sarà diviso in due parti.

- **PRIMA PARTE:** selezionare le particelle  $D^0$  prodotte nelle interazioni
- **SECONDA PARTE:** misurare la vita media della particella  $D^0$





## ESERCIZIO MASTERCLASS: PARTE I

- Collegarsi all'indirizzo <https://lhcb-d0.web.cern.ch/>

- Inserire i propri dati
- Selezionare la combinazione
- Cliccare il tasto *Save*

- Cliccare su *Event Display*



Event Display



D0 Lifetime



## Event Display Exercise

Event handler  
event\_5\_0.json

previous

next

View

☐ Zoom

☒ Detector

☐ Help

View

☐ Auto rotate

Legend

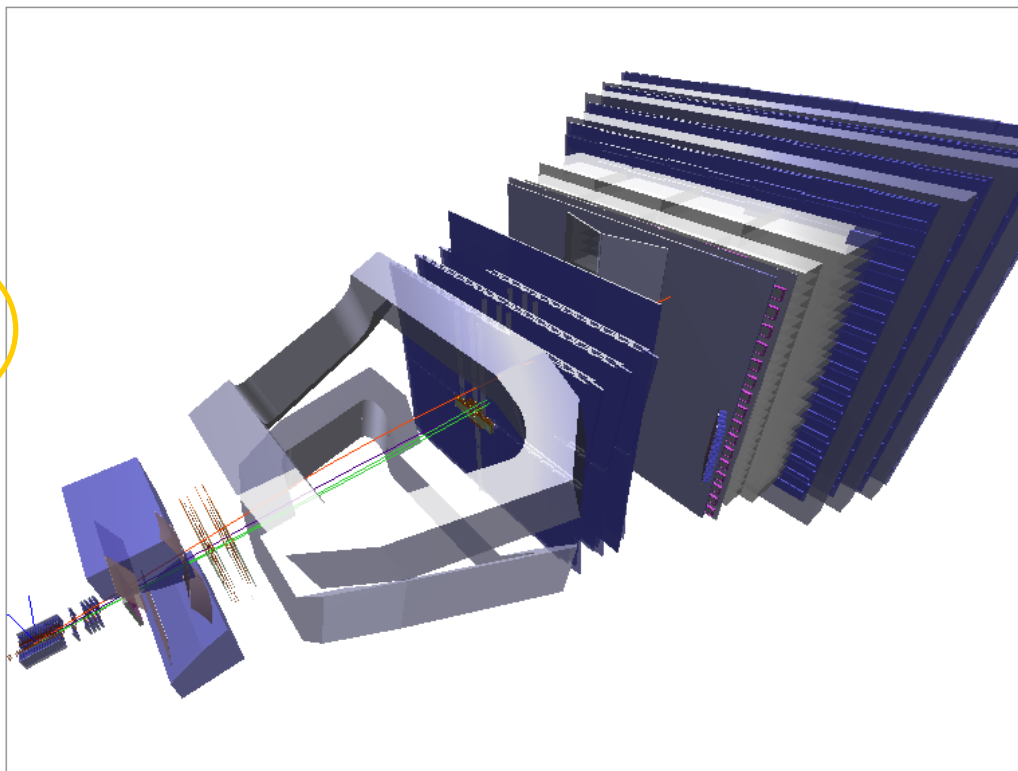
K<sup>-</sup> —

K<sup>+</sup> —

pi<sup>+</sup> —

pi<sup>-</sup> —

D<sup>0</sup> —



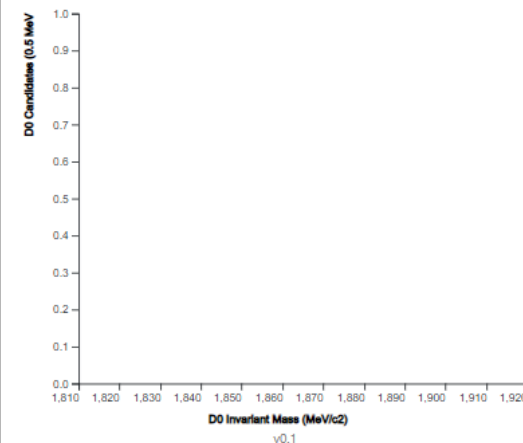
Particle information	
E	MeV
chi2	
ipchi2	
mass	MeV/c <sup>2</sup>
name	
ZFstM	

My particles

Mass

MeV/c<sup>2</sup>

Add







## Event Display Exercise

Event handler  
event\_5\_0.json

previous

next

View

- ☐ Zoom
- ☐ Detector
- ☐ Help

View ▼

☐ Auto rotate

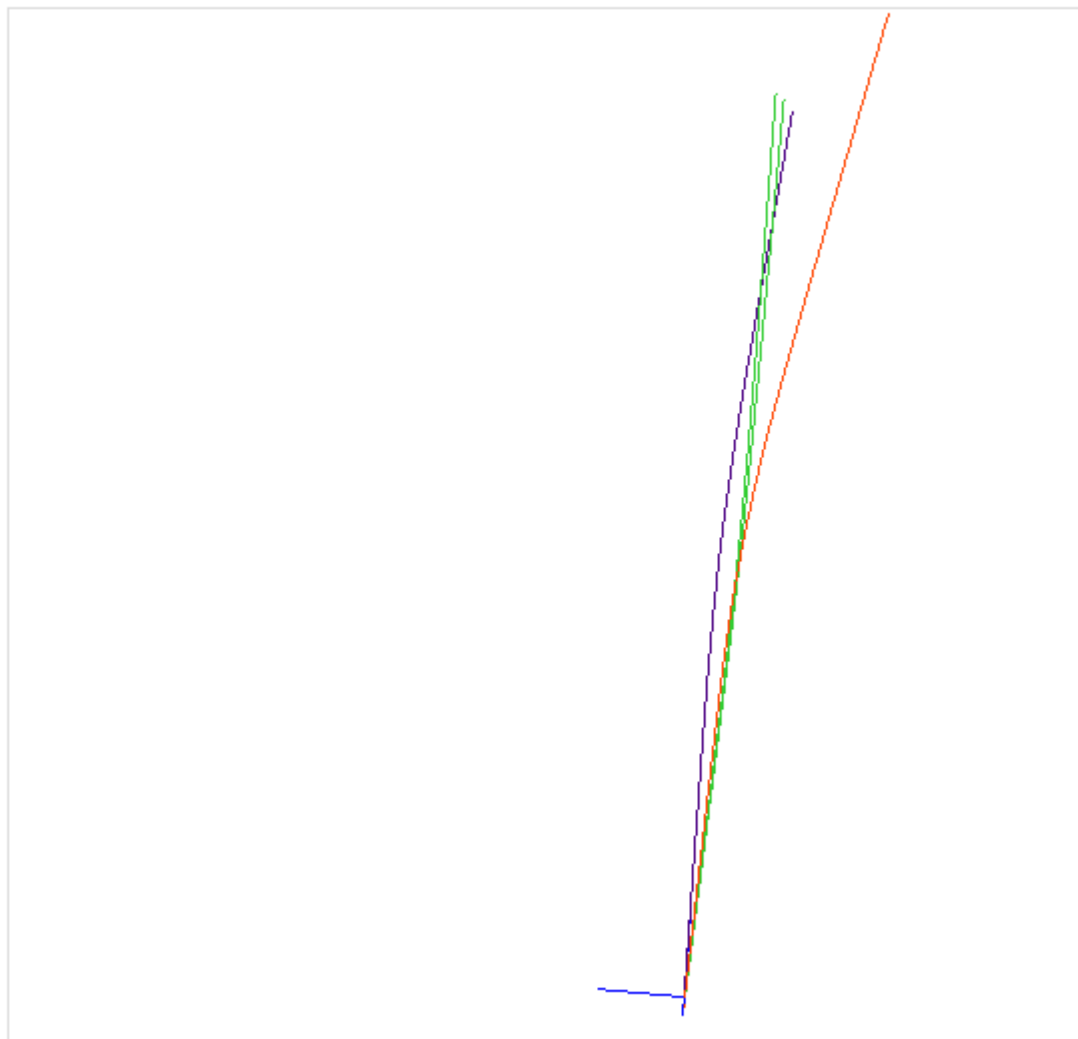


Legend

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

Read instructions

Download JSON





Posizionando il mouse sulla traccia di una particella,  
ne compaiono le proprietà nel box a destra.  
*Cliccando sulla traccia, la particella viene selezionata.*

[About](#)  
[Language](#)

## Event Display Exercise

Event handler  
event\_5\_0.json

previous

next

View

☐ Zoom

☐ Detector

☐ Help

View ▼

☐ Auto rotate

—●—

Legend

K<sup>-</sup> —

K<sup>+</sup> —

pi<sup>+</sup> —

pi<sup>-</sup> —

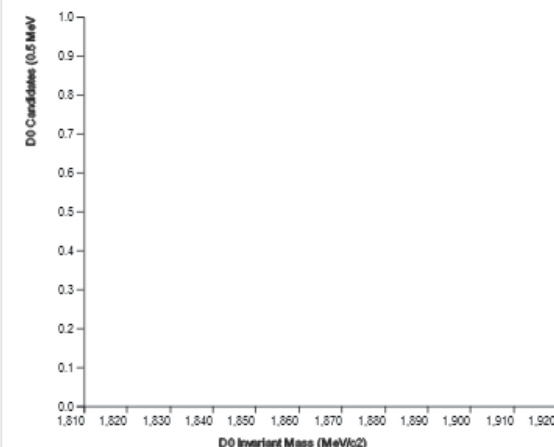
D<sup>0</sup> —

Read instructions

Download JSON



Particle information			My particles	
<b>E</b>	7887.708	MeV	K <sup>-</sup>	
<b>chi2</b>	1.041			
<b>ipchi2</b>	12.935			
<b>mass</b>	493.677	MeV/c <sup>2</sup>	Mass	
<b>name</b>	K <sup>-</sup>		MeV/c <sup>2</sup>	
<b>ZFstM</b>	-70.502		Add	



v0.1

Copyright © 2019 CERN



Posizionando il mouse sulla traccia di una particella,  
ne compaiono le proprietà nel box a destra.  
*Cliccando sulla traccia, la particella viene selezionata.*

[About](#)  
[Language](#)

LHCb Masterclass

## Event Display Exercise

Event handler  
event\_5\_0.json

previous

next

View

☐ Zoom

☐ Detector

☐ Help

View ▼

☐ Auto rotate

— ● —

Legend

K<sup>-</sup> —

K<sup>+</sup> —

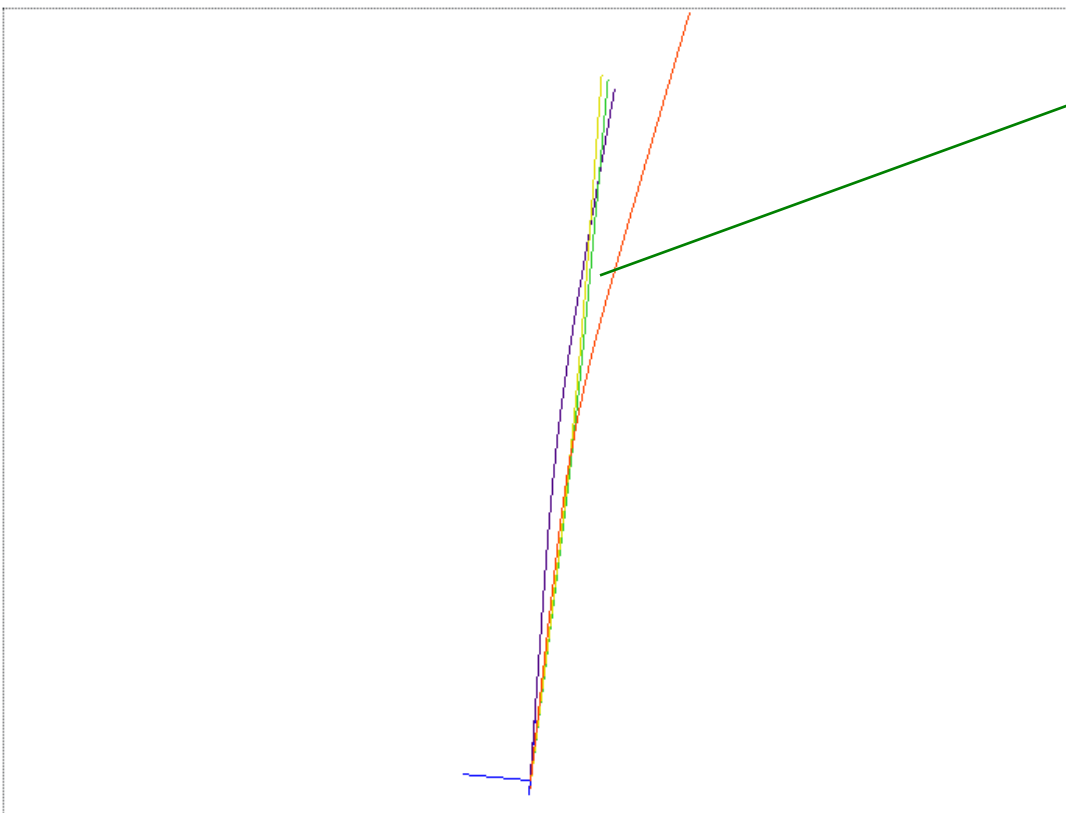
pi<sup>+</sup> —

pi<sup>-</sup> —

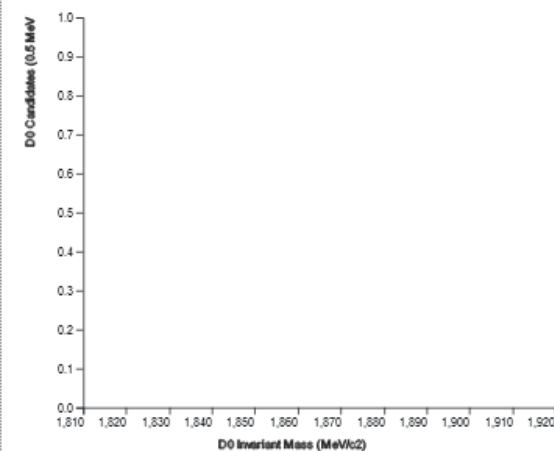
D<sup>0</sup> —

[Read instructions](#)

[Download JSON](#)



Particle information			My particles	
<b>E</b>	28002.204	MeV	K <sup>-</sup>	
<b>chi2</b>	0.996		pi <sup>+</sup>	
<b>ipchi2</b>	0.319			
<b>mass</b>	139.570	MeV/c <sup>2</sup>	Mass	
<b>name</b>	pi <sup>+</sup>		<b>1854.675</b>	MeV/c <sup>2</sup>
<b>ZFstM</b>	-40.634			
			<a href="#">Add</a>	



v0.1

Copyright © 2019 CERN





## Event Display Exercise

Event handler  
event\_5\_0.json

previous

next

View

☐ Zoom

☐ Detector

☐ Help

View ▼

☐ Auto rotate

—●—

Legend

K<sup>-</sup> —

K<sup>+</sup> —

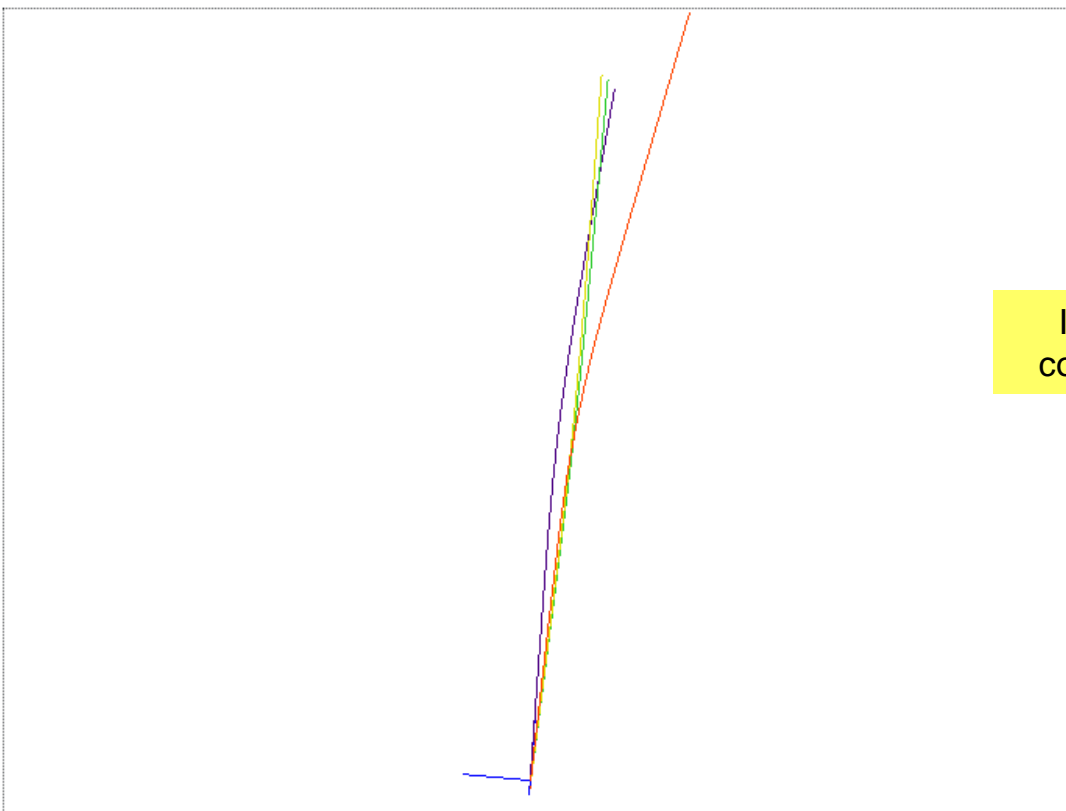
pi<sup>+</sup> —

pi<sup>-</sup> —

D<sup>0</sup> —

[Read instructions](#)

[Download JSON](#)



v0.1

Copyright © 2019 CERN

Particle information

<b>E</b>	28002.204	MeV
<b>chi2</b>	0.996	
<b>ipchi2</b>	0.319	
<b>mass</b>	139.570	MeV/c <sup>2</sup>
<b>name</b>	pi <sup>+</sup>	
<b>ZFstM</b>	-40.634	

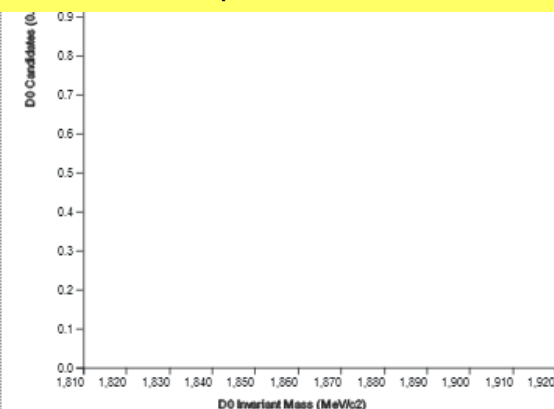
My particles

K<sup>-</sup>  
pi<sup>+</sup>

Mass  
**1854.675** MeV/c<sup>2</sup>

Add

Il programma calcola la massa della combinazione di particelle selezionate.





## Event Display Exercise

Event handler  
event\_5\_0.json

previous

next

View

☐ Zoom

☐ Detector

☐ Help

View ▼

☐ Auto rotate

Legend

K<sup>-</sup> —

K<sup>+</sup> —

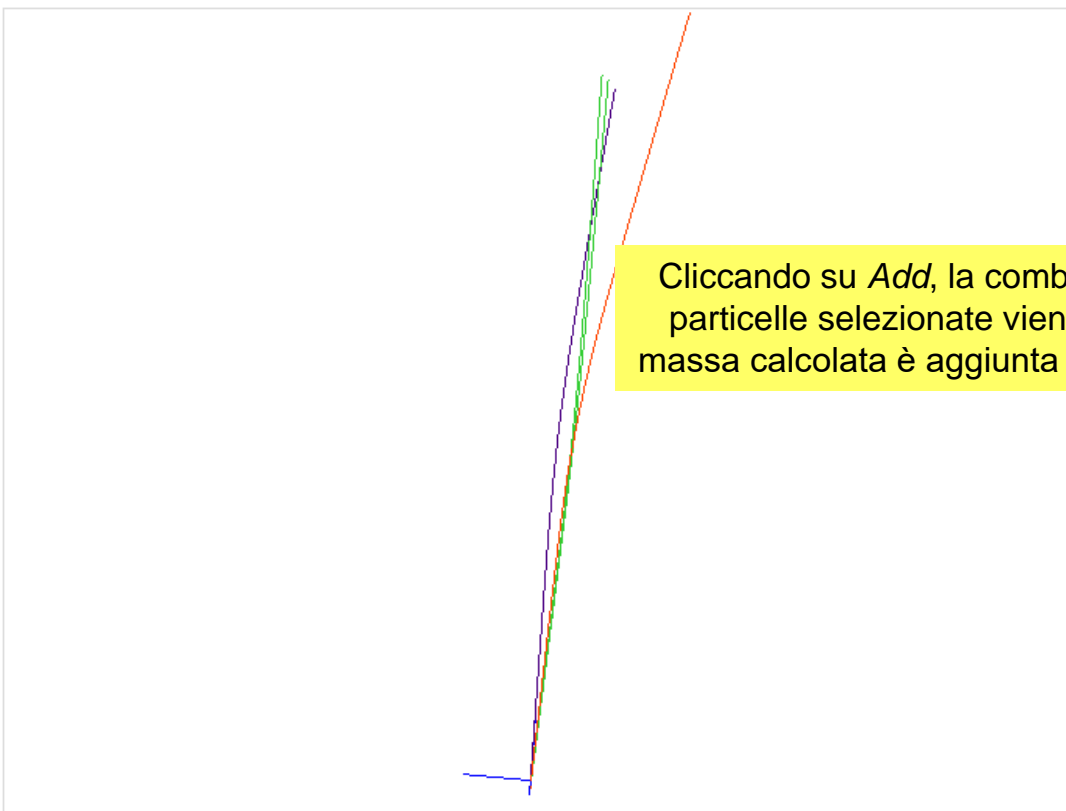
pi<sup>+</sup> —

pi<sup>-</sup> —

D<sup>0</sup> —

[Read instructions](#)

[Download JSON](#)



Cliccando su *Add*, la combinazione delle particelle selezionate viene salvata e la massa calcolata è aggiunta all'istogramma.

Particle information

<b>E</b>	28002.204	MeV
<b>chi2</b>	0.996	
<b>ipchi2</b>	0.319	
<b>mass</b>	139.570	MeV/c <sup>2</sup>
<b>name</b>	pi <sup>+</sup>	
<b>ZFstM</b>	-40.634	

My particles

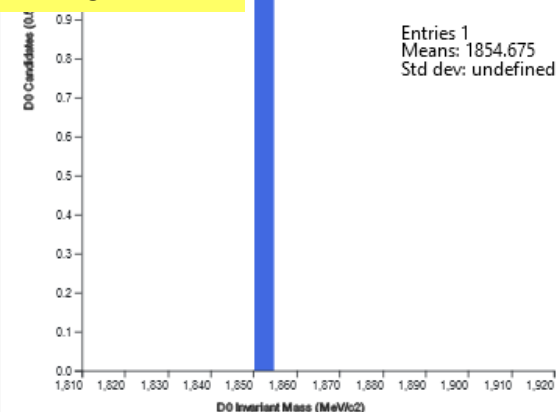
K<sup>-</sup>

pi<sup>+</sup>

Mass

**1854.675** MeV/c<sup>2</sup>

Add



v0.1

Copyright © 2019 CERN



## Event Display Exercise

Cliccando su *Next*, si passa all'evento successivo.

Event handler  
event\_5\_1.json

previous

next

View

☐ Zoom

☐ Detector

☐ Help

View

☐ Auto rotate

Legend

K<sup>-</sup> —

K<sup>+</sup> —

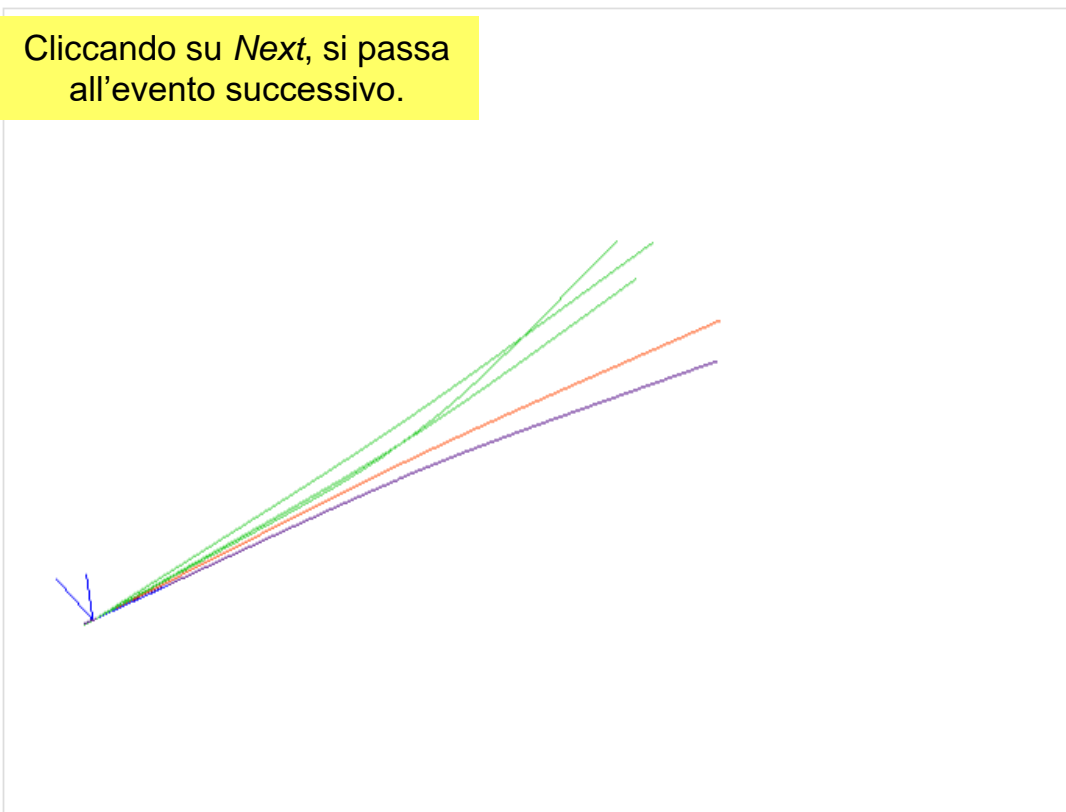
pi<sup>+</sup> —

pi<sup>-</sup> —

D<sup>0</sup> —

Read instructions

Download JSON



v0.1

Copyright © 2019 CERN

Particle information

E MeV

chi2

ipchi2

mass MeV/c<sup>2</sup>

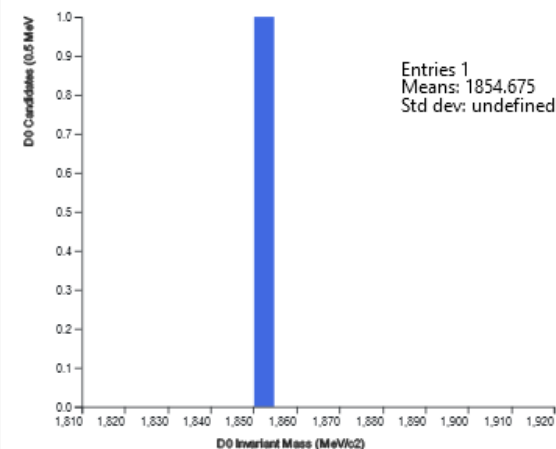
name

ZFstM

My particles

Mass MeV/c<sup>2</sup>

Add







LHCb Masterclass

## Event Display Exercise

Se la massa della combinazione di particelle selezionate si discosta in modo significativo dalla massa della  $D^0$ , cliccando su *Add*, compare un messaggio di errore.

Event handler  
event\_5\_1.json

previous

next

### View

- ☐ Zoom
- ☐ Detector
- ☐ Help

### View

☐ Auto rotate

### Legend

$K^-$  —

$K^+$  —

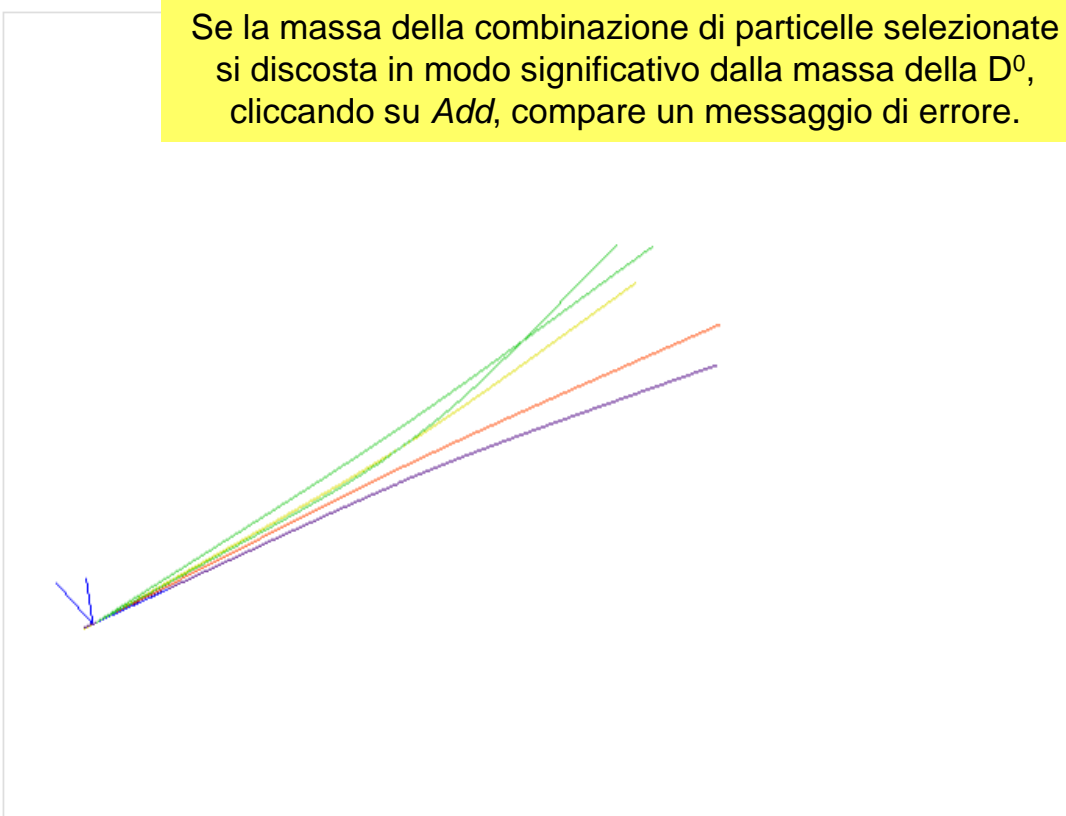
$\pi^+$  —

$\pi^-$  —

$D^0$  —

Read instructions

Download JSON



v0.1

Copyright © 2019 CERN

✖ Mass is not in range. Please, try again.

### Particle information

**E** 8305.193 MeV

**chi2** 1.486

**ipchi2** 16.301

**mass** 139.570 MeV/c<sup>2</sup>

**name** pi+

**ZFstM** 124.088

### My particles

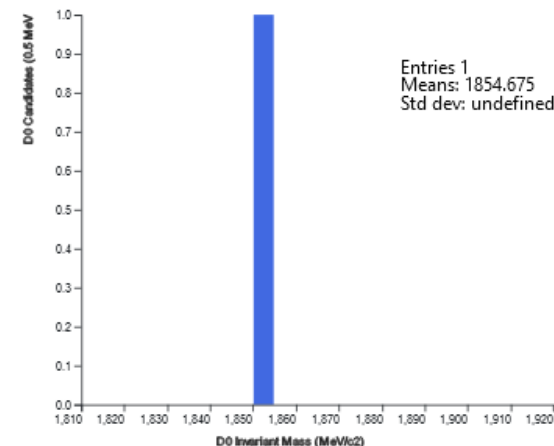
K-

pi+

### Mass

**1035.987** MeV/c<sup>2</sup>

Add





## Event Display Exercise

Event handler  
event\_5\_30.json

previous

next

View

Zoom

Detector

Help

View

Auto rotate

Legend

K<sup>-</sup>

K<sup>+</sup>

pi<sup>+</sup>

pi<sup>-</sup>

D<sup>0</sup>

Read instructions

Download JSON

Selezionando combinazioni di particelle con massa prossima a quella della D<sup>0</sup> per i diversi eventi del campione scelto, l'istogramma delle masse si aggiorna.

Particle information

E MeV

chi2

ipchi2

mass MeV/c<sup>2</sup>

name

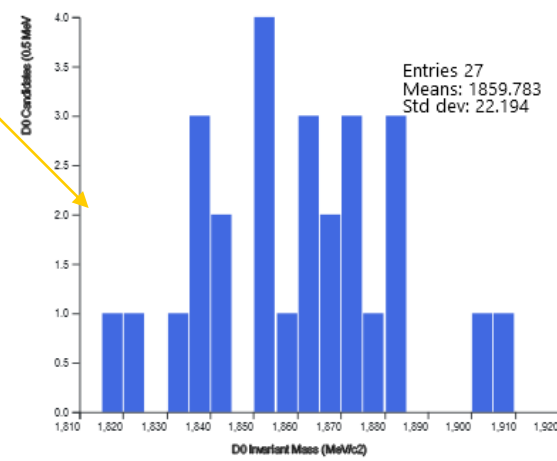
ZFstM

My particles

Mass

MeV/c<sup>2</sup>

Add



Entries 27  
Means: 1859.783  
Std dev: 22.194



## Event Display Exercise

- Analizzare gli eventi del campione selezionato.
- Salvare uno *screenshot* dell'istogramma ottenuto.



Particle information

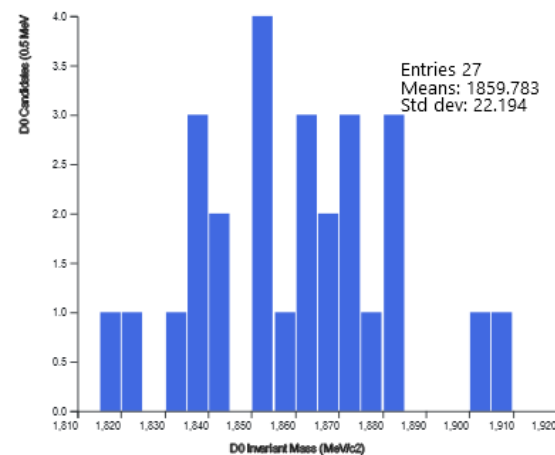
**E** MeV  
**chi2**  
**ipchi2**  
**mass** MeV/c<sup>2</sup>  
**name**  
**ZFstM**

My particles

Mass

MeV/c<sup>2</sup>

Add



v0.1





**ADESSO TOCCA A VOI!**  
**BUON LAVORO!!**

$$m_{D^0} = (1864.83 \pm 0.05) \text{MeV}/c^2$$