

Masterclass 2021

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

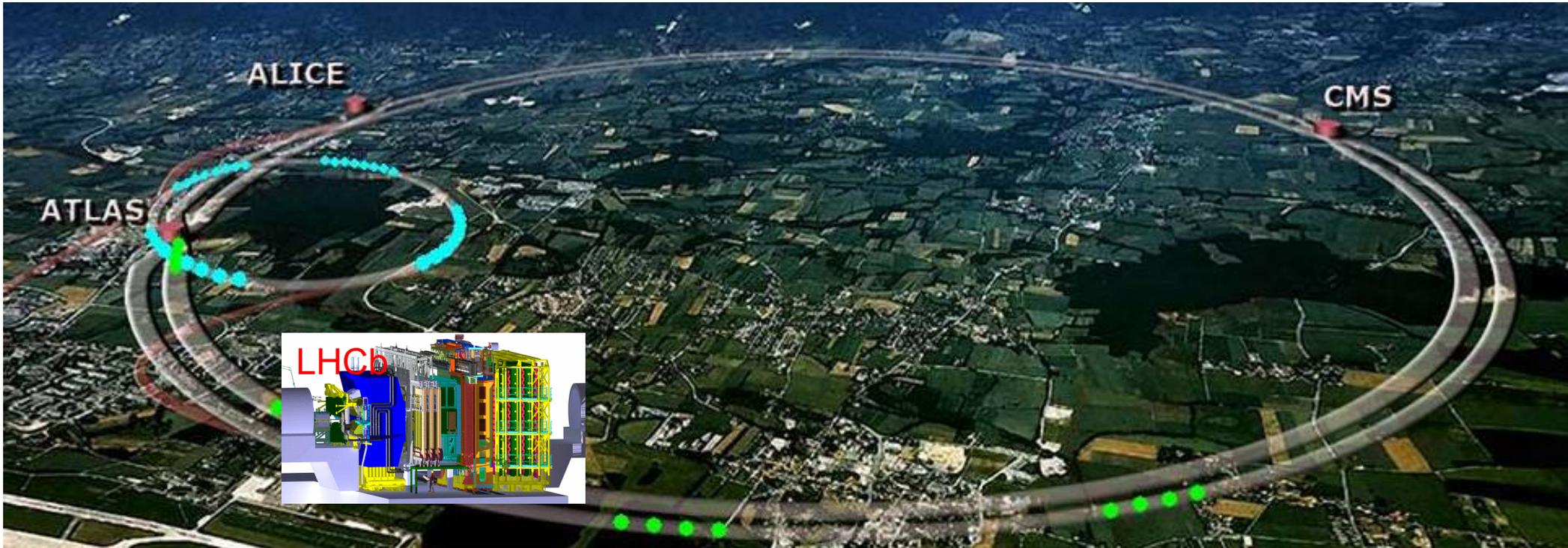
Prof. Marta Calvi

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

16-17 Febbraio 2021

L'esperienza LHCb

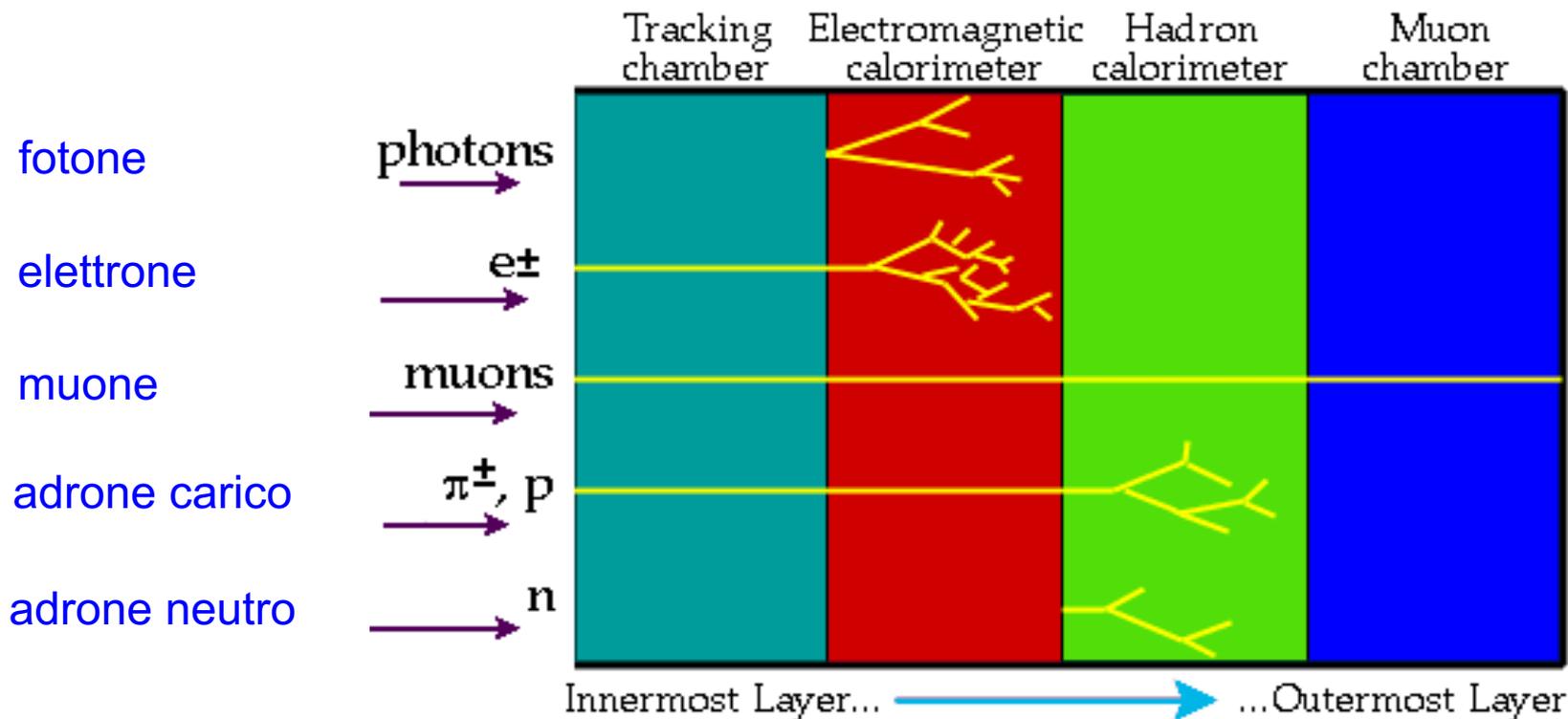
Large Hadron Collider beauty experiment



- L'esperienza LHCb è posto in uno dei 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.

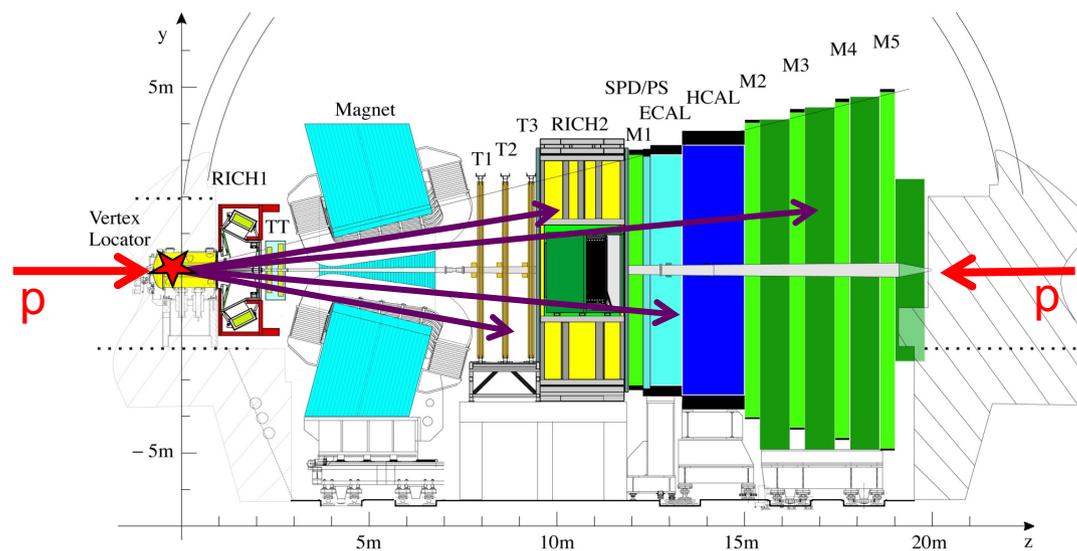
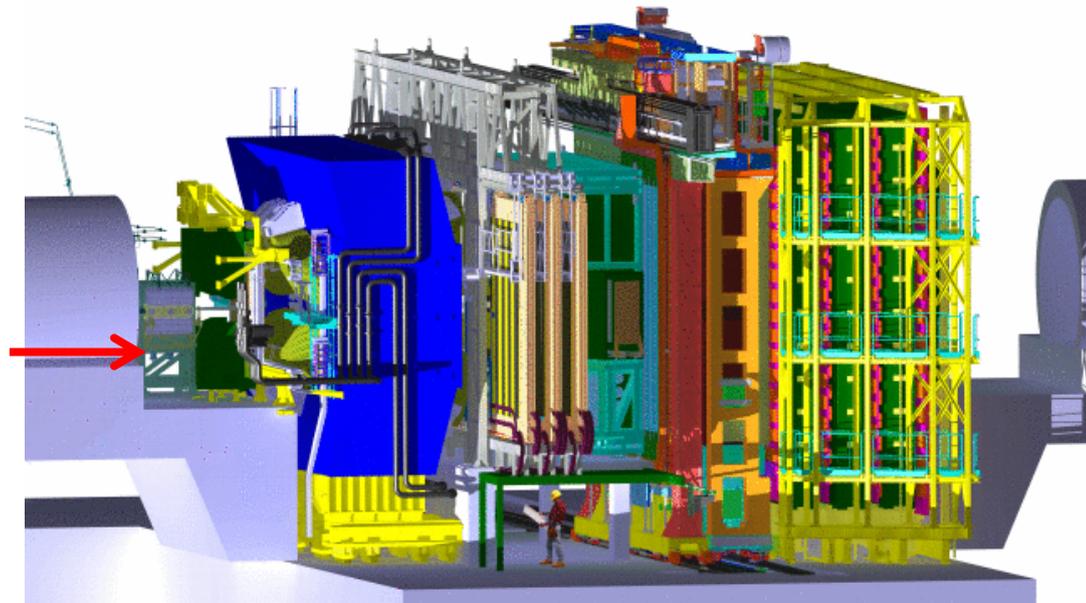
Come si rivelano le particelle ?

- 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.

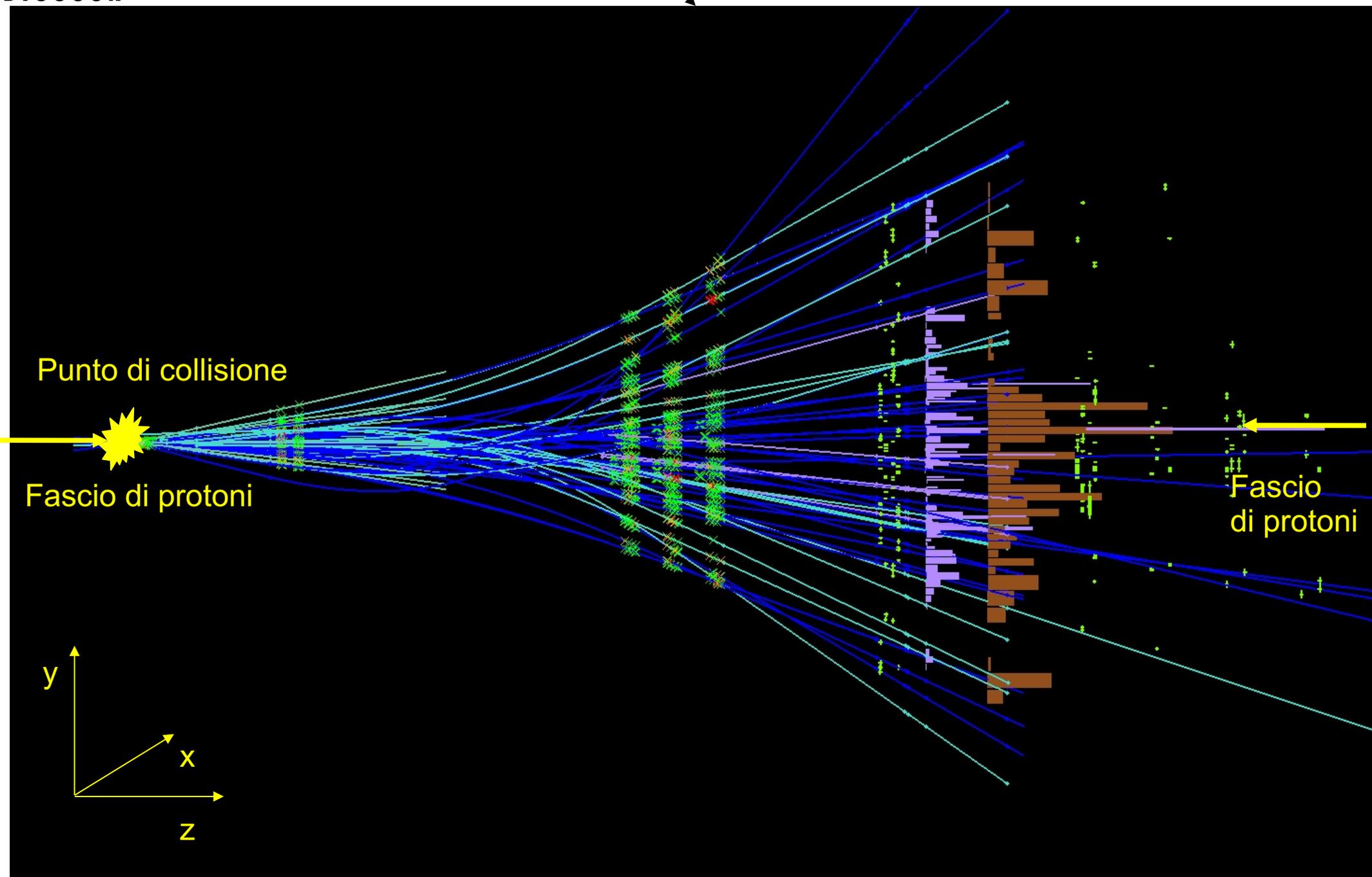


Il rivelatore LHCb

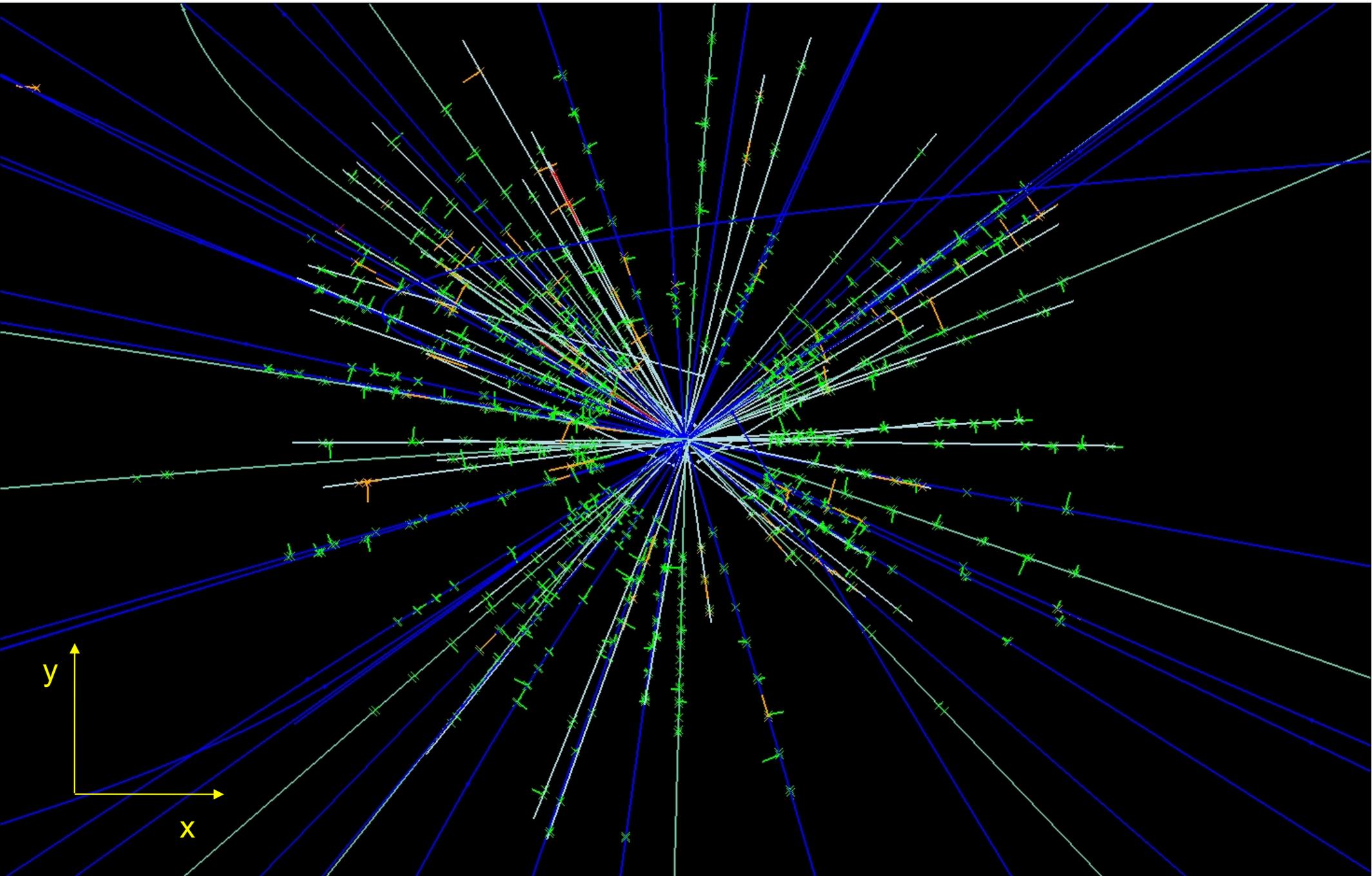
- LHCb è uno “spettrometro in avanti”
- Le collisioni tra protoni avvengono ad un estremo del rivelatore. Si osserva il flusso di particelle che si propaga da un lato.



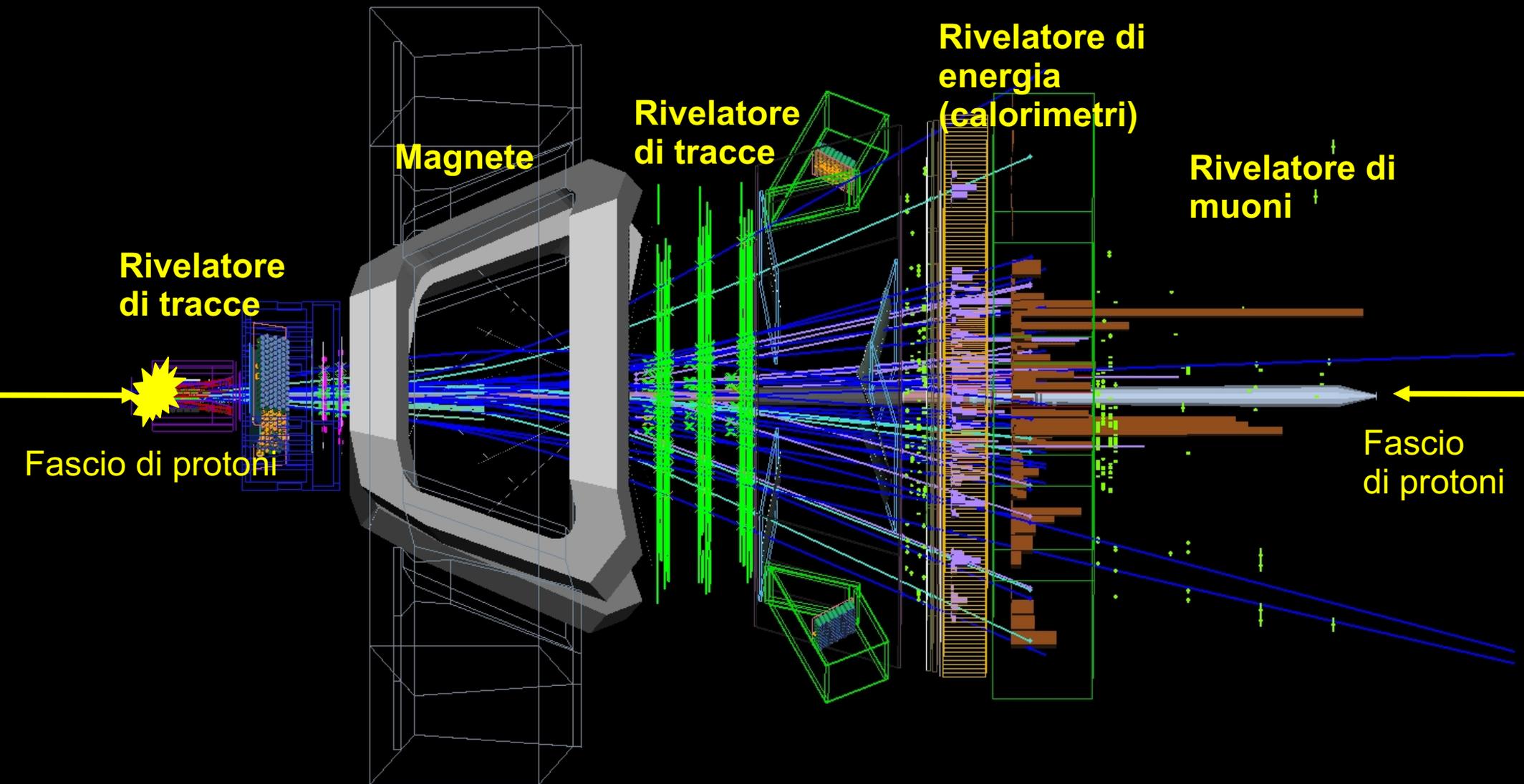
Una collisione in LHCb



Una collisione in LHCb

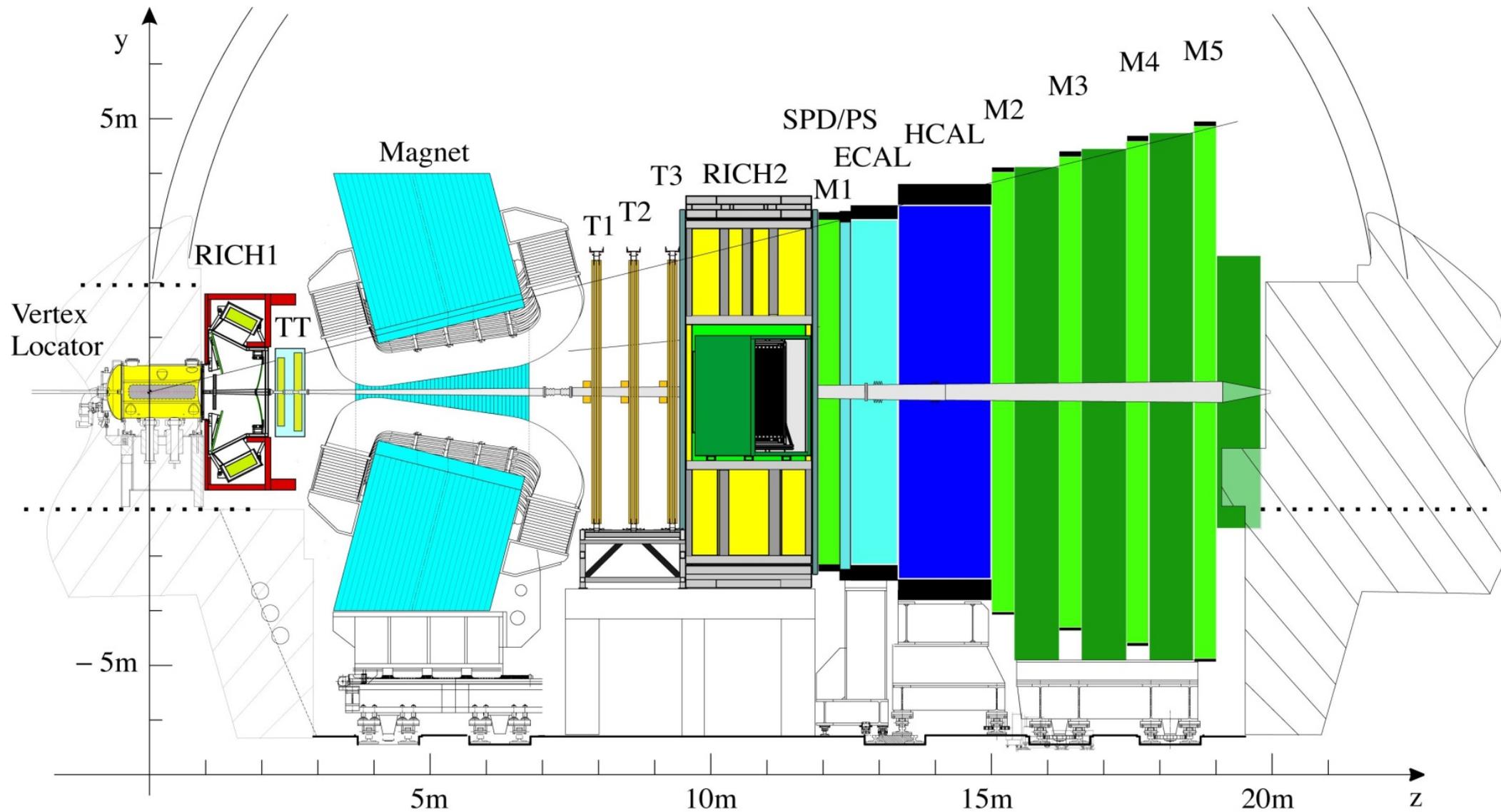


Come vede le particelle il rivelatore LHCb?

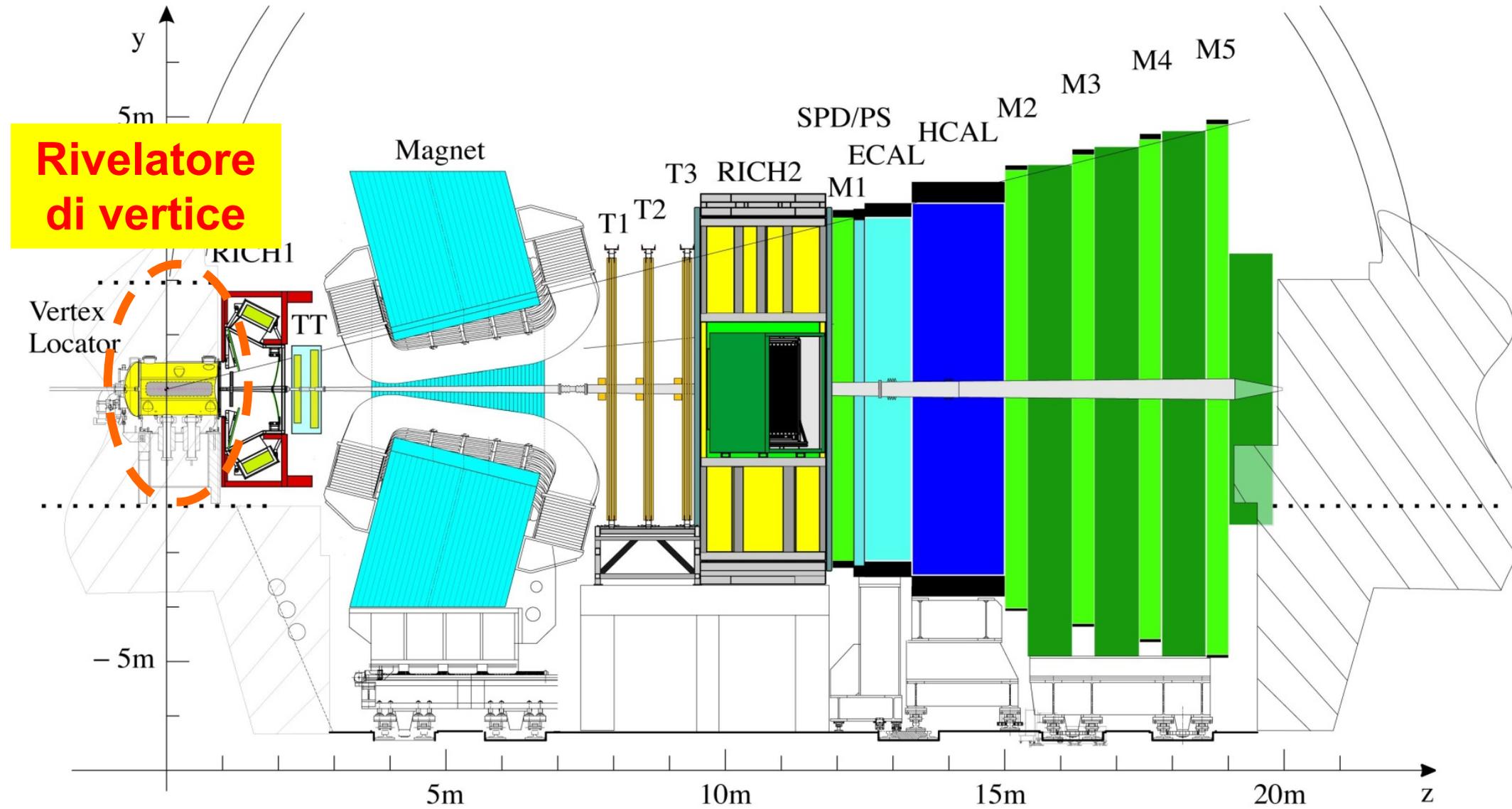




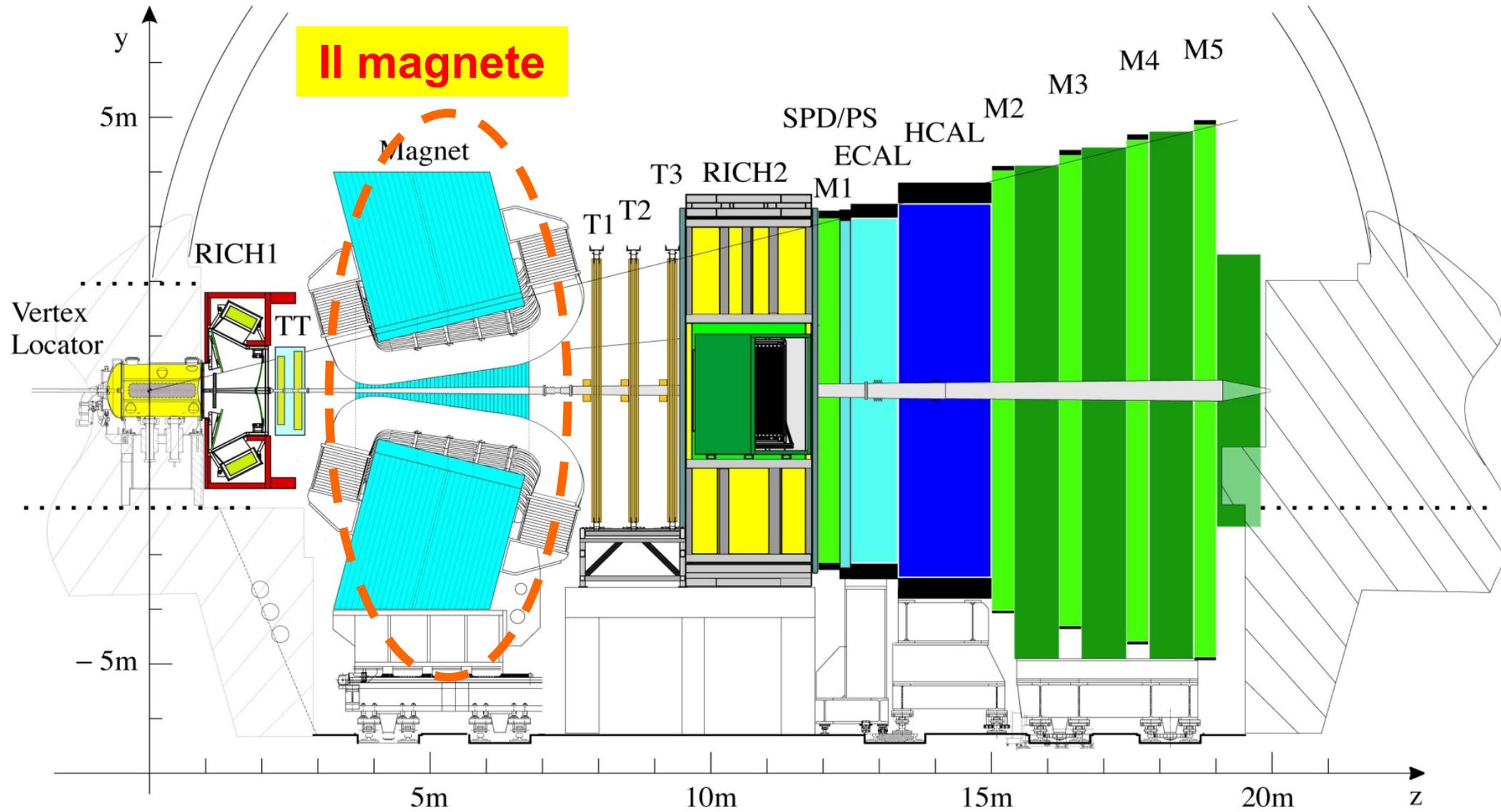
LHCb = LHC beauty experiment

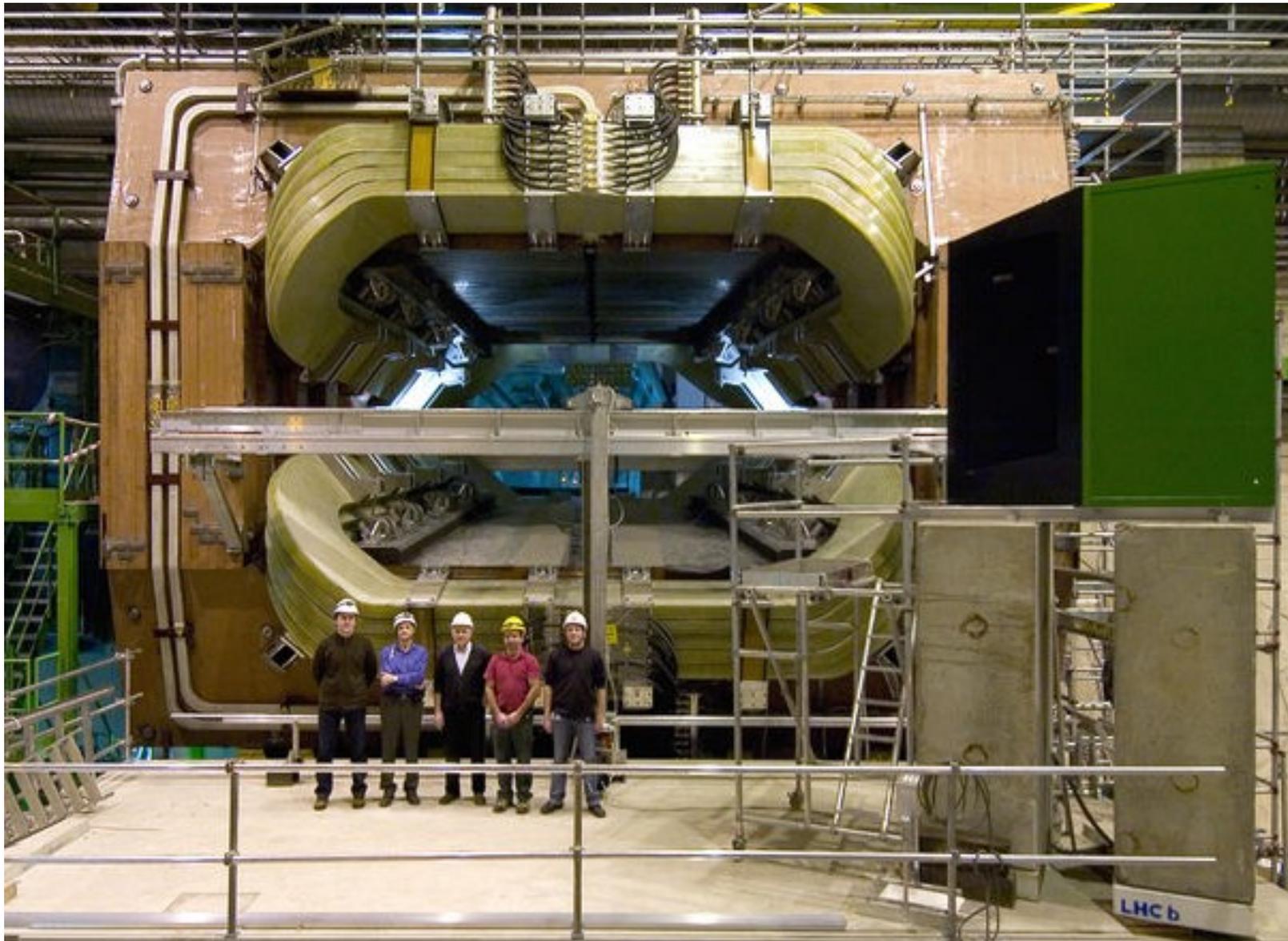


LHCb = LHC beauty experiment

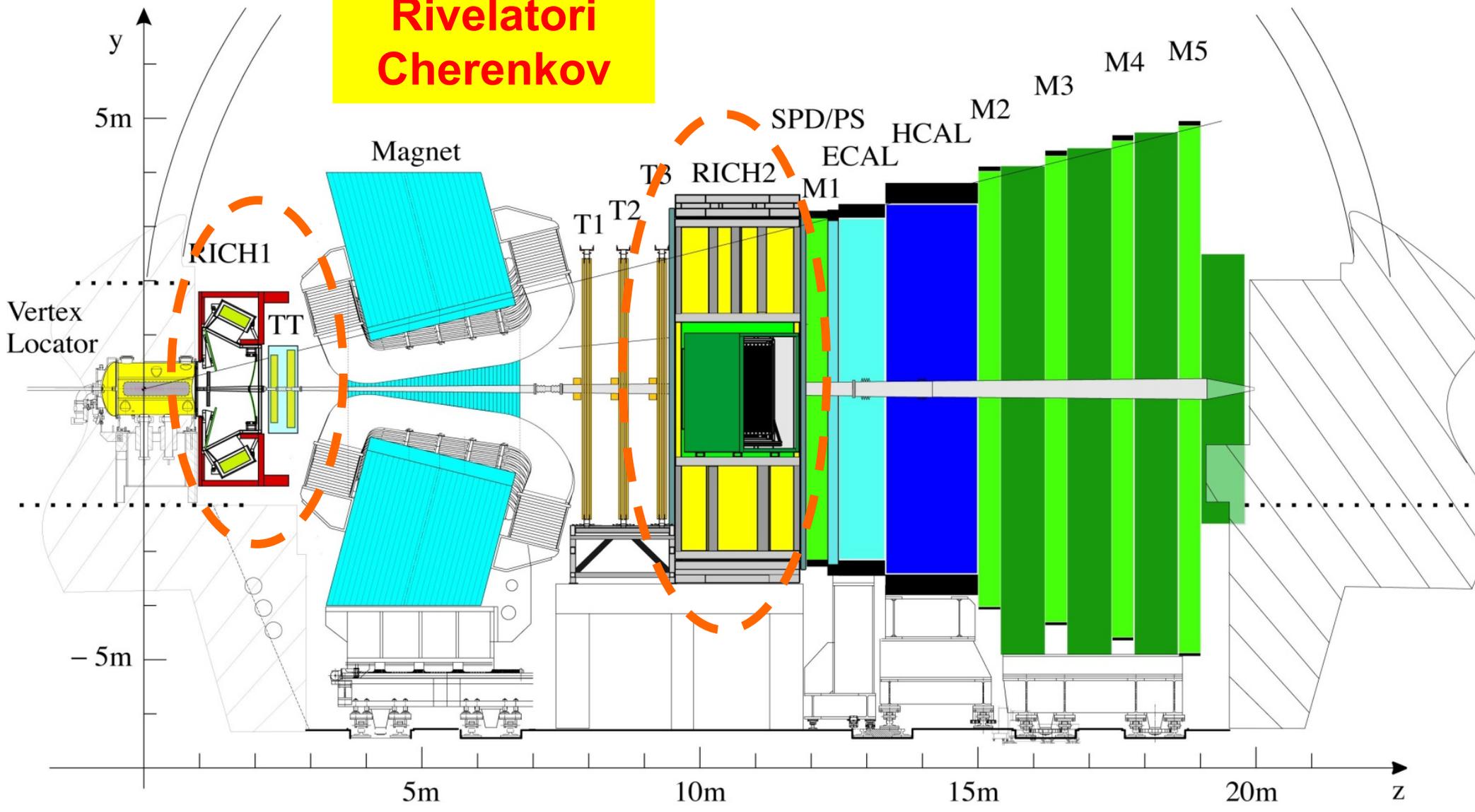


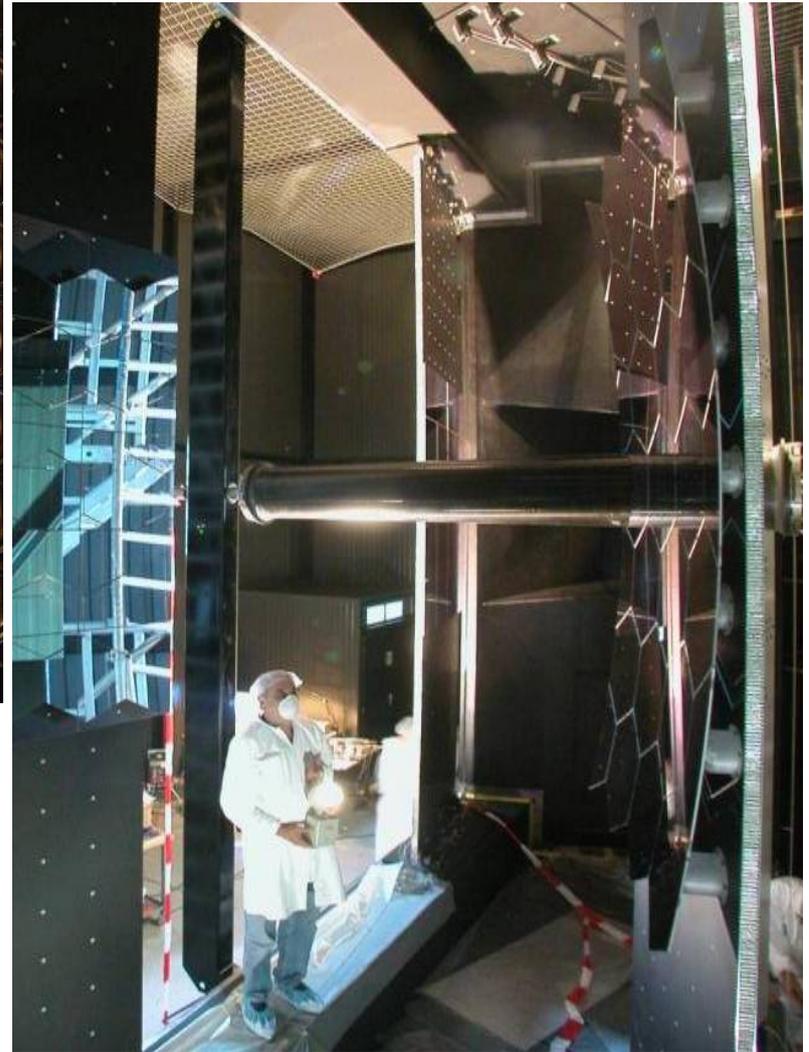


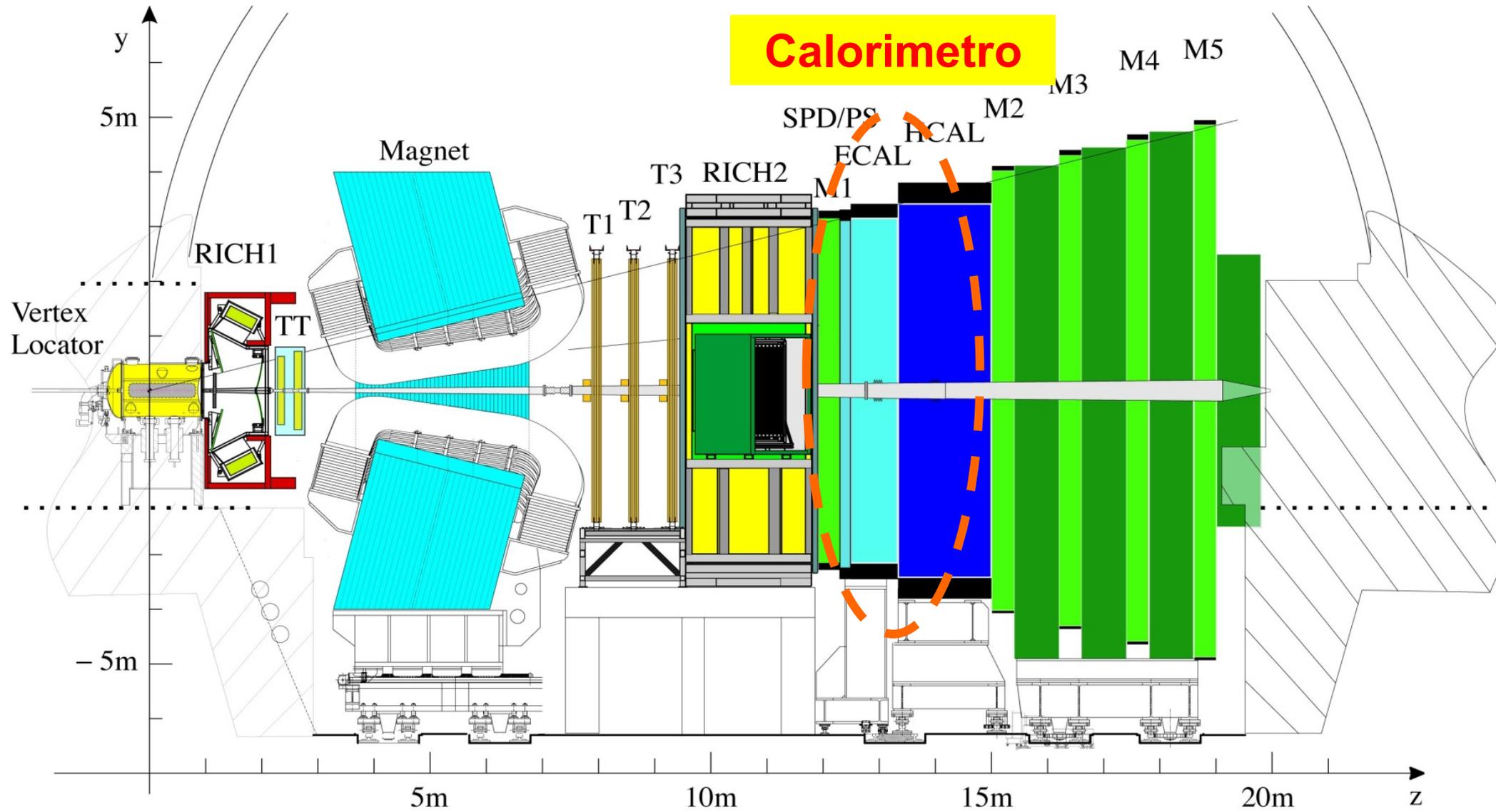


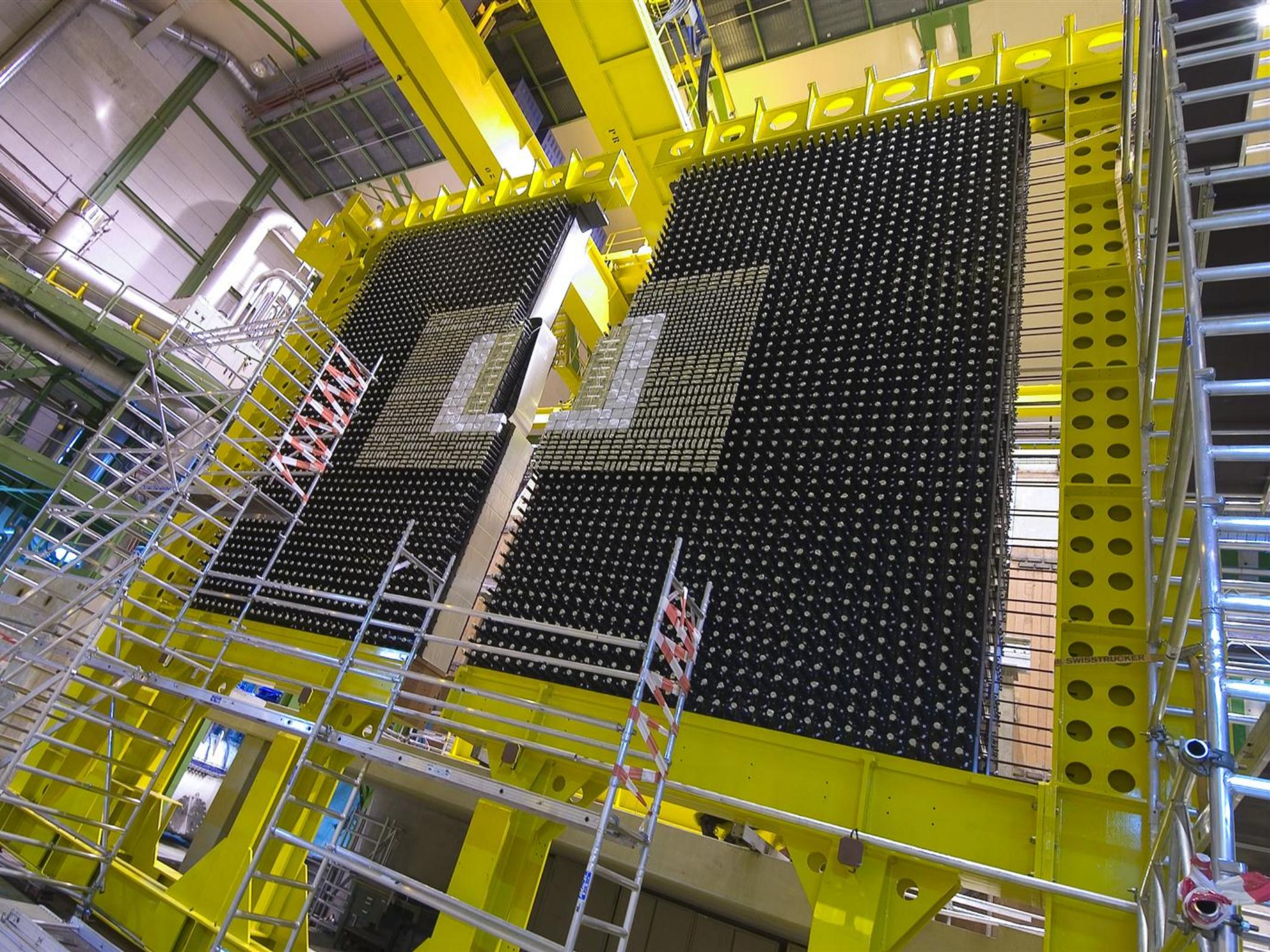


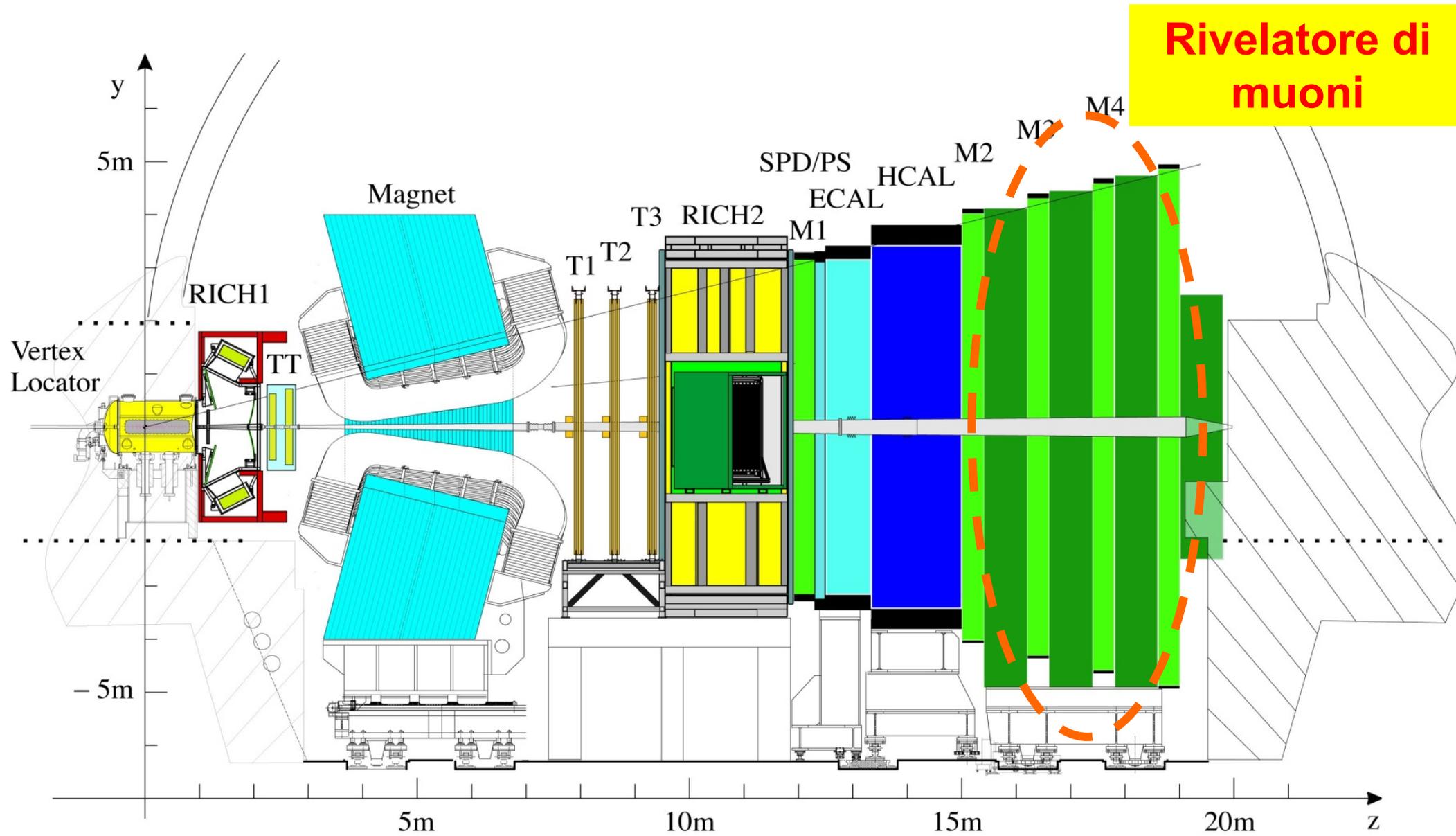
Rivelatori Cherenkov











Esercizio Masterclass



- Nell'esercizio 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**



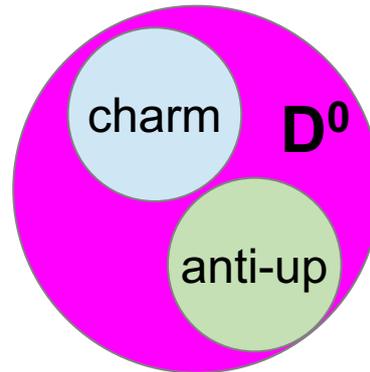
La particella D^0



- 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 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.

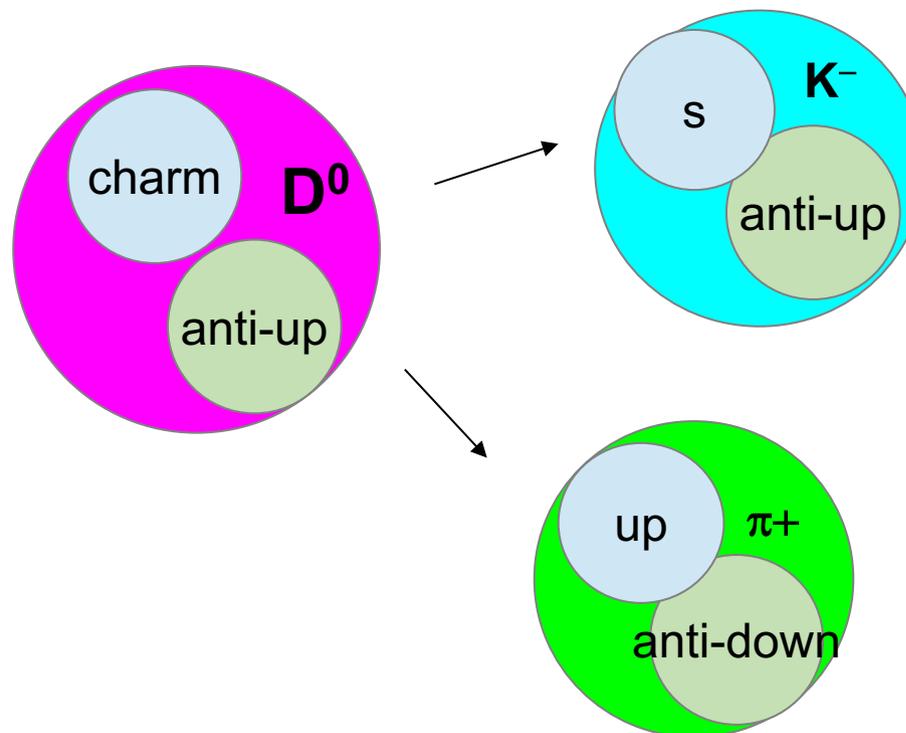
La particella D^0

- 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: un **kaone di** carica negativa (K^-) e un **pione** di carica positiva (π^+)



Per l'anti-particella:

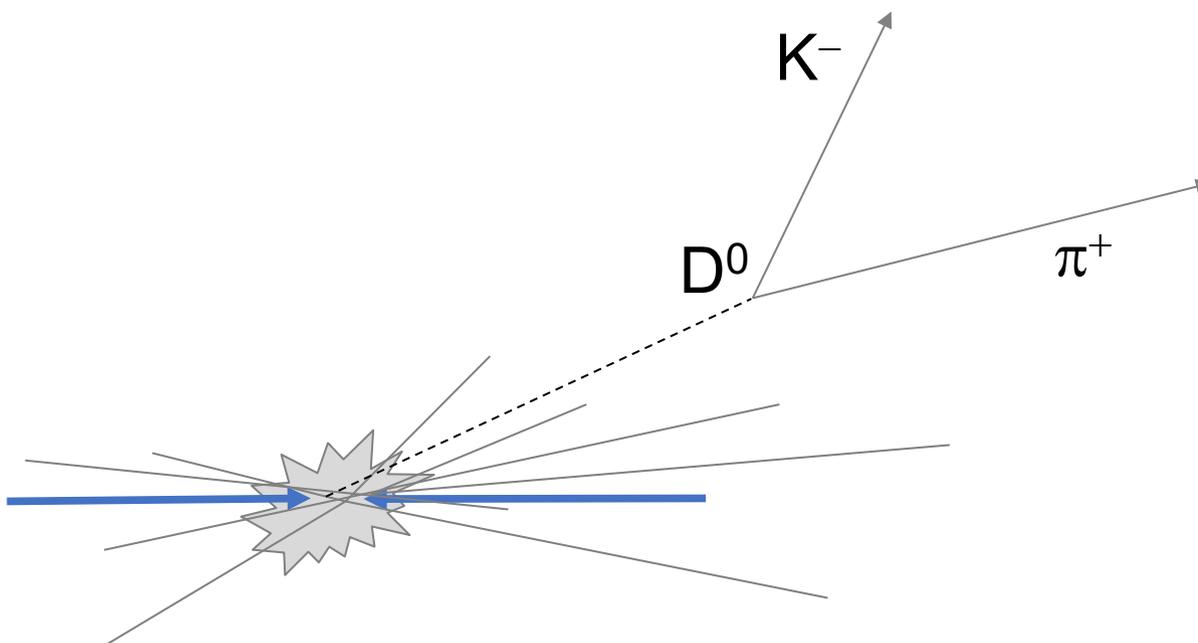


Esercizio Masterclass: prima parte

- I dati che userete contengono *eventi* (= prodotti di 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?

Con un campo magnetico!

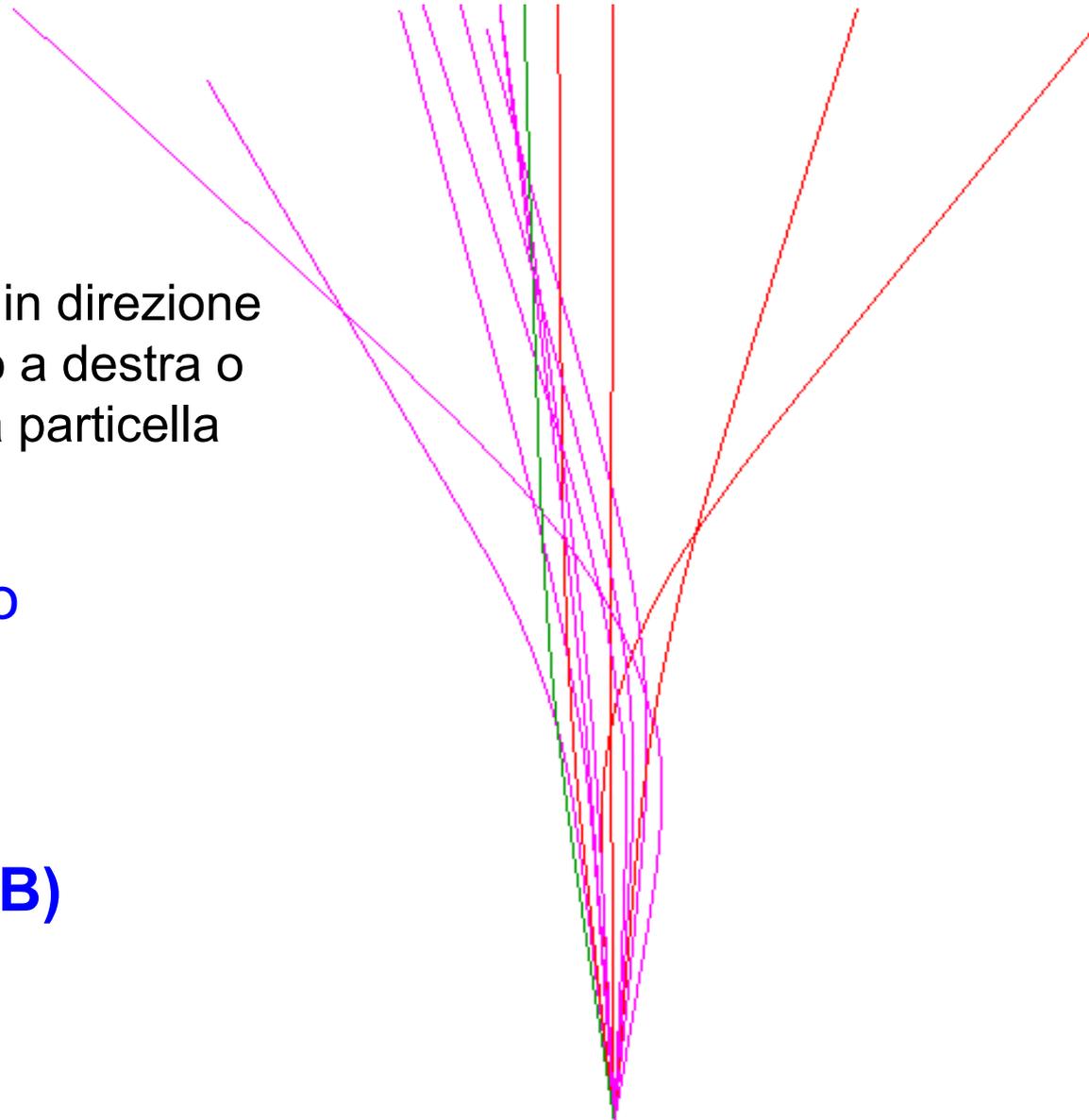
- Se è presente un campo magnetico in direzione entrante nel foglio: le tracce curvano a destra o sinistra, a seconda della carica della particella
- Particelle con carica positiva o negativa curvano in direzione opposta:

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

q = carica

v = velocità

B = campo magnetico



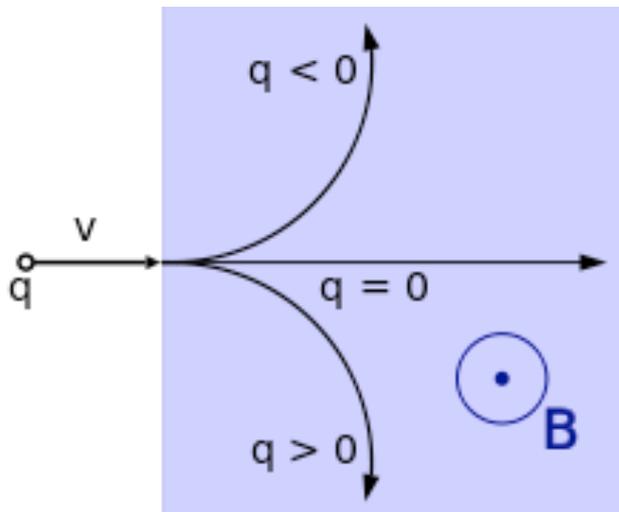
Curvatura in campo magnetico

- La curvatura 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**)

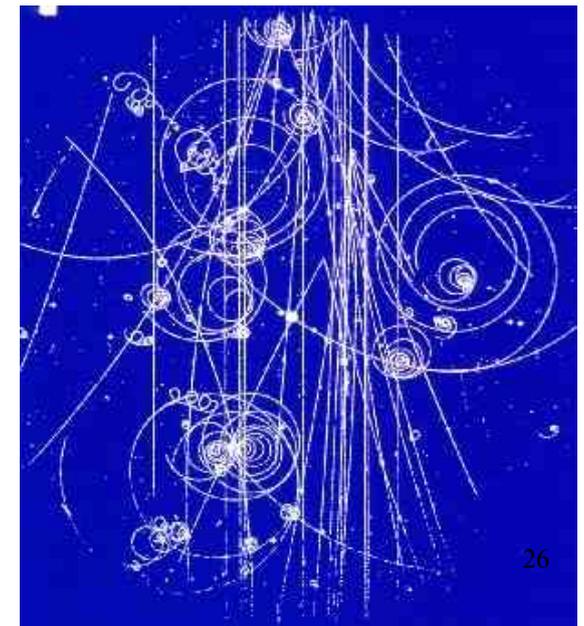


Grande raggio

→ 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

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v}$$

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

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

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

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

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

Energia e massa

- 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 si possono ricavare momento, energia e quindi massa della particella D^0

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

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

Esercizio Masterclass

Prima parte:

Dovrete individuare le due tracce
che compongono un D^0

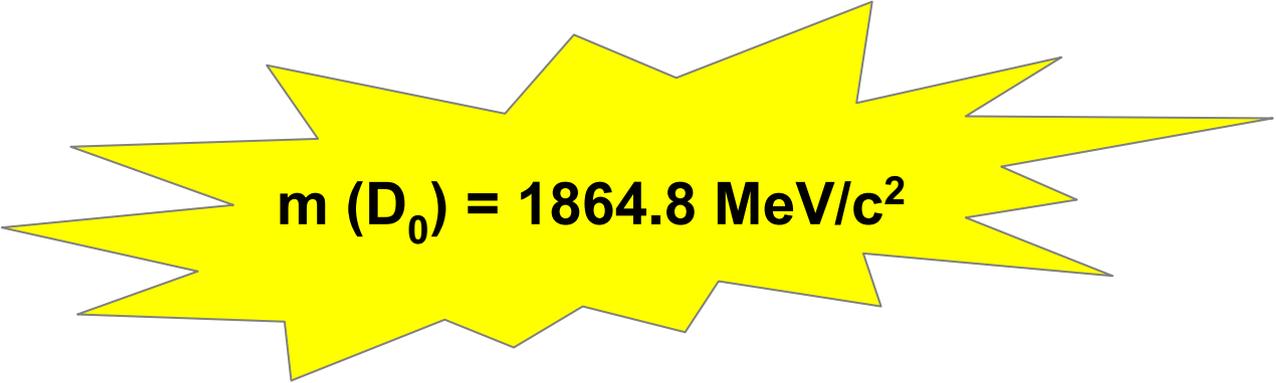
- ✓ un kaone e un pione
- ✓ di carica elettrica opposta
- ✓ la massa della particella
composta deve risultare uguale
a quella della particella D^0

.... proprio uguale??

Il programma calcolerà
per voi la massa della
particella composta 😊

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

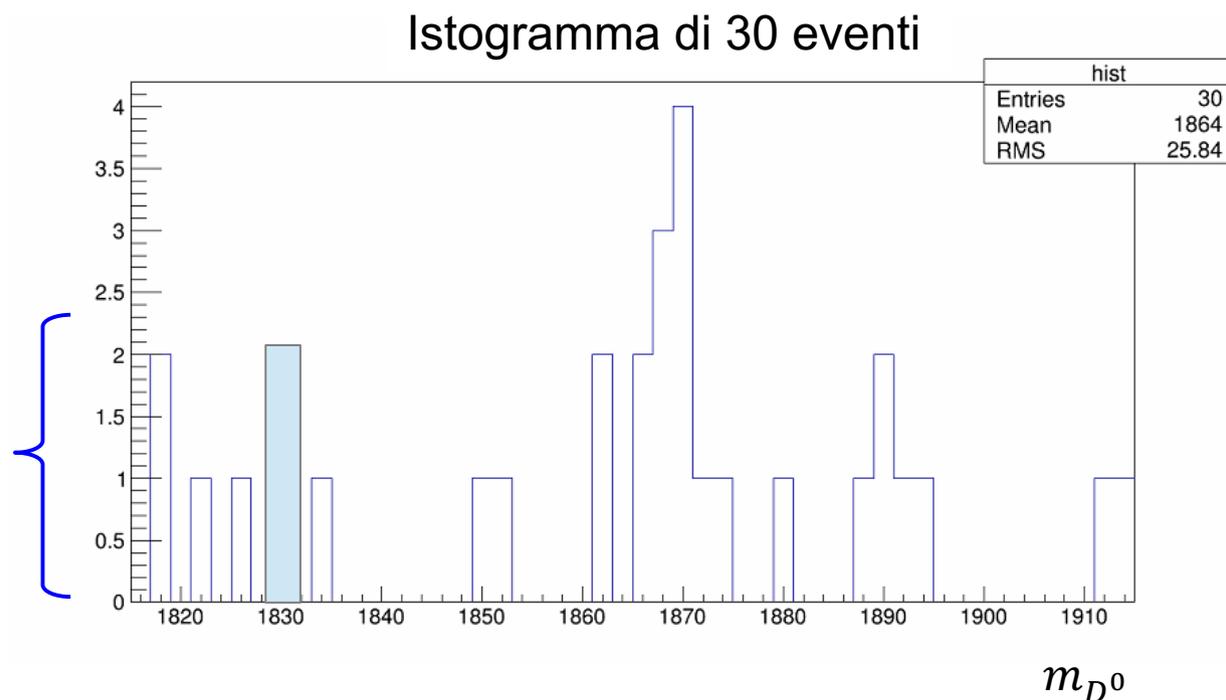
Una parentesi: come rappresentiamo i risultati delle misure? Gli istogrammi

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

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

Inserire i propri dati

Scegliere la combinazione

Cliccare Save

Scegliere il primo esercizio



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

Event Display Exercise

Event handler
 event_1_0.json

previous

next

View

Zoom

Detector

Help

View ▾

Auto rotate

—●—

Legend

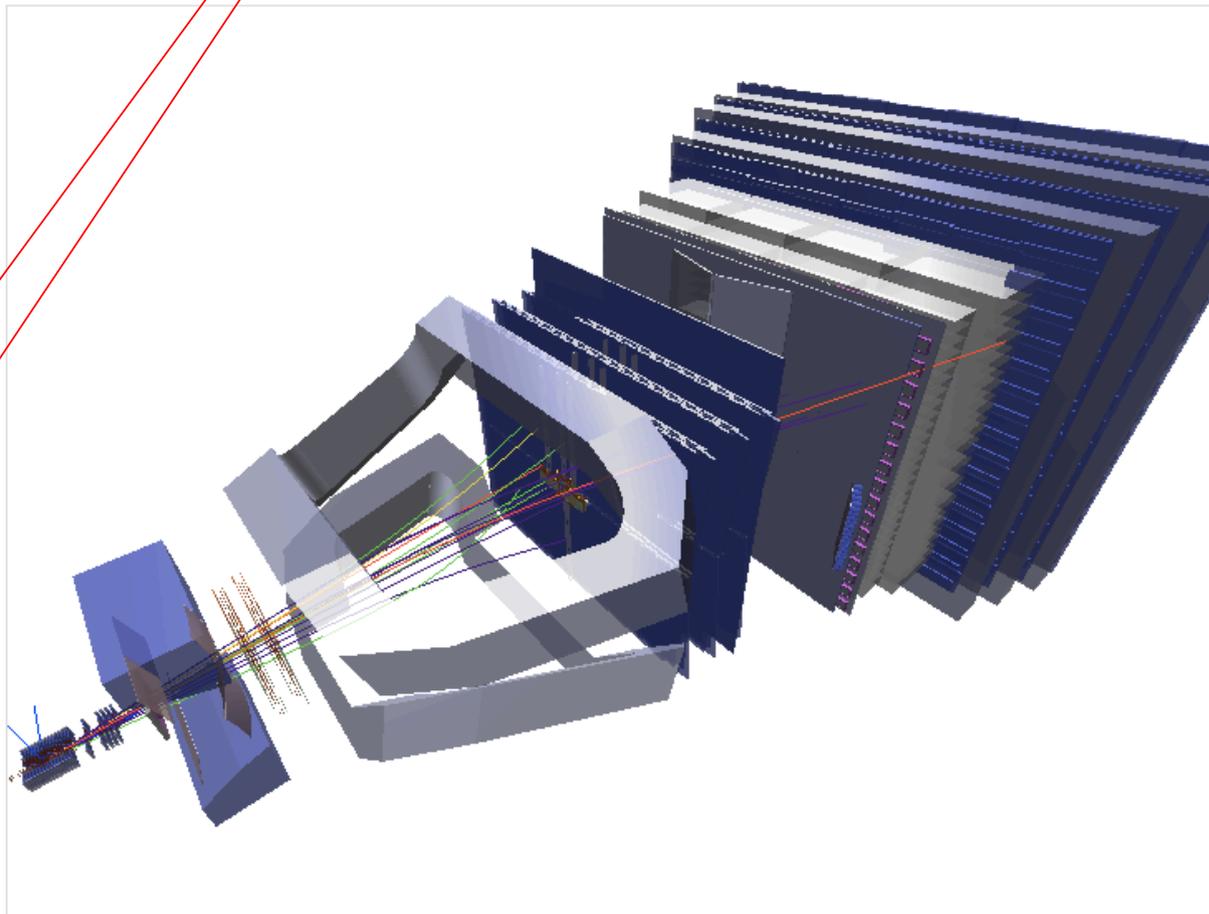
K⁻ —

K⁺ —

pi⁺ —

pi⁻ —

D⁰ —



Particle information

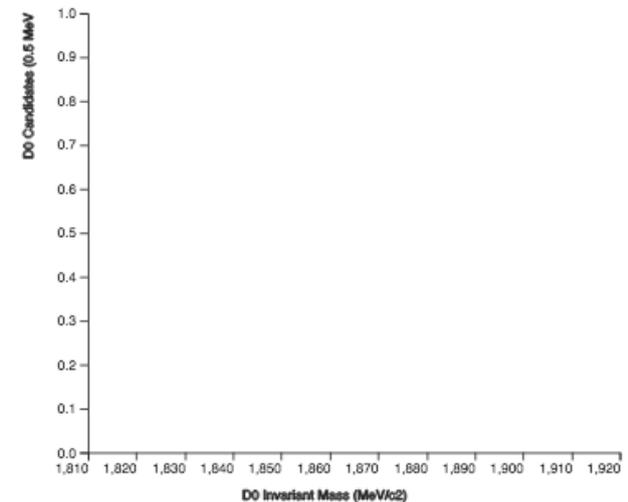
E	4555.439 MeV
chi2	0.775
ipchi2	5.767
mass	139.570 MeV/c ²
name	pi ⁺
ZFstM	94.103

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*

LHCb Masterclass

Event Display Exercise

Event handler
event_1_0.json

previous

next

View

Zoom

Detector

Help

View ▾

Auto rotate

Legend

K⁻ —

K⁺ —

pi⁺ —

pi⁻ —

D⁰ —



Particle information

E	23057.251 MeV
chi2	1.003
ipchi2	6.051
mass	493.677 MeV/c ²
name	K ⁻
ZFstM	124.088

My particles

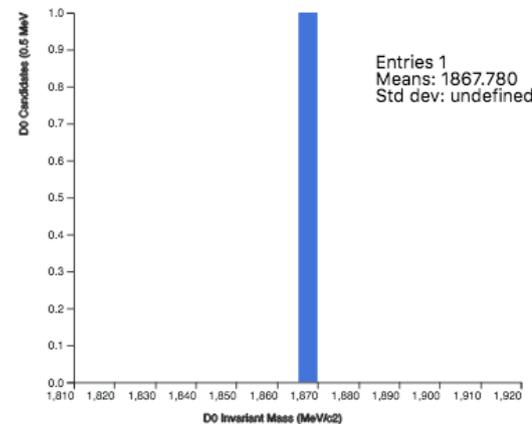
pi⁺

K⁻

Mass

1867.780 MeV/c²

Add



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

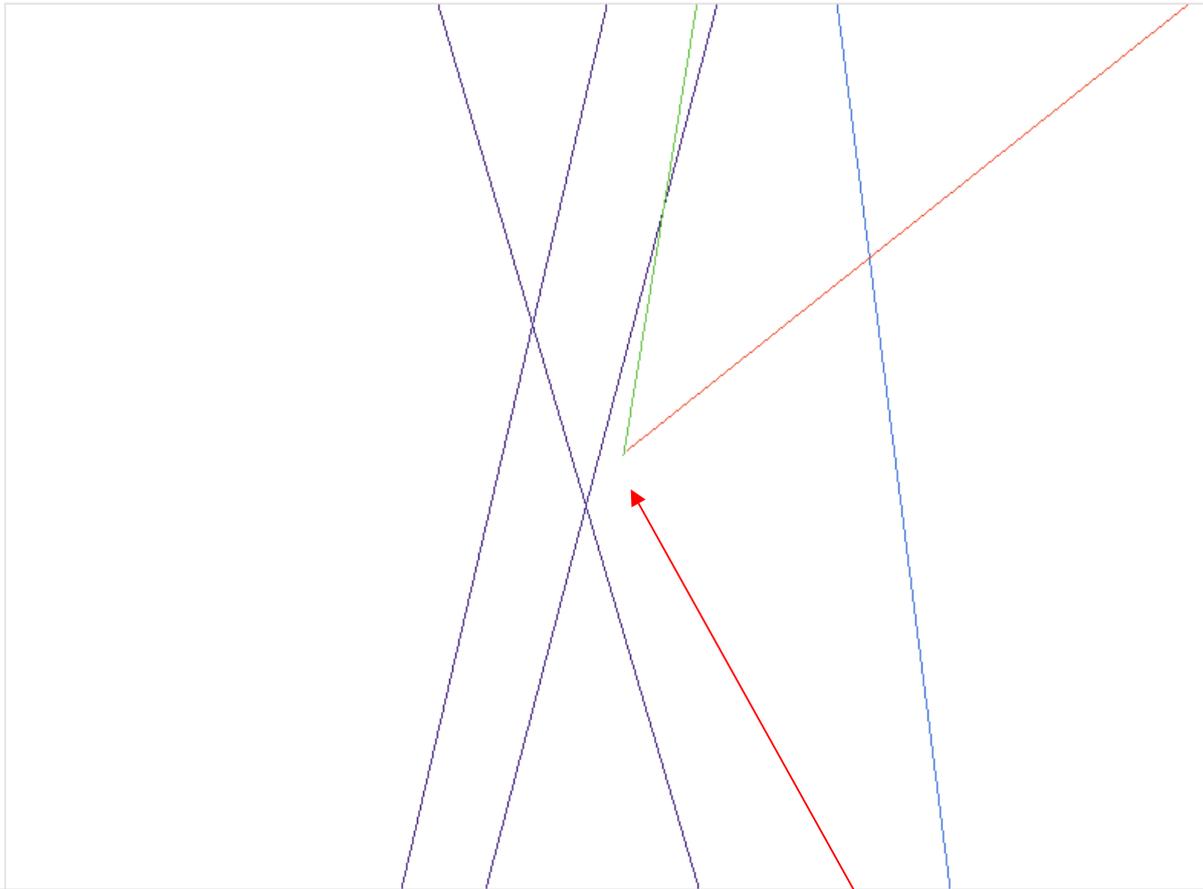
Perspective ▾

Auto rotate



Legend

- K⁻ —
- K⁺ —
- π⁺ —
- π⁻ —



Particle information

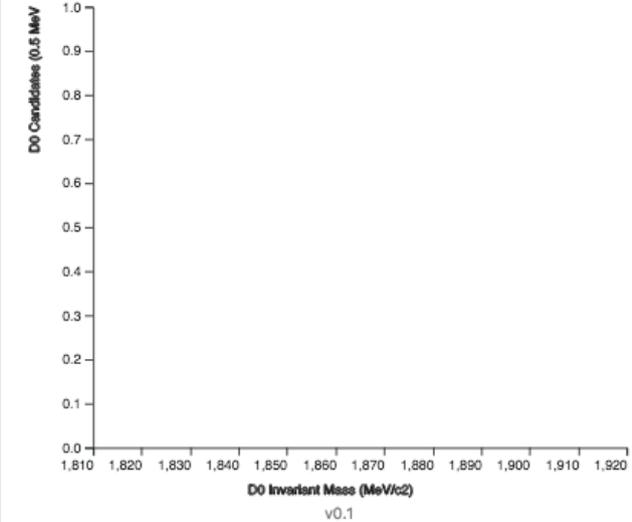
E	MeV
chi2	
ipchi2	
mass	MeV/c ²
name	
ZFstM	

My particles

Mass

MeV/c²

Add

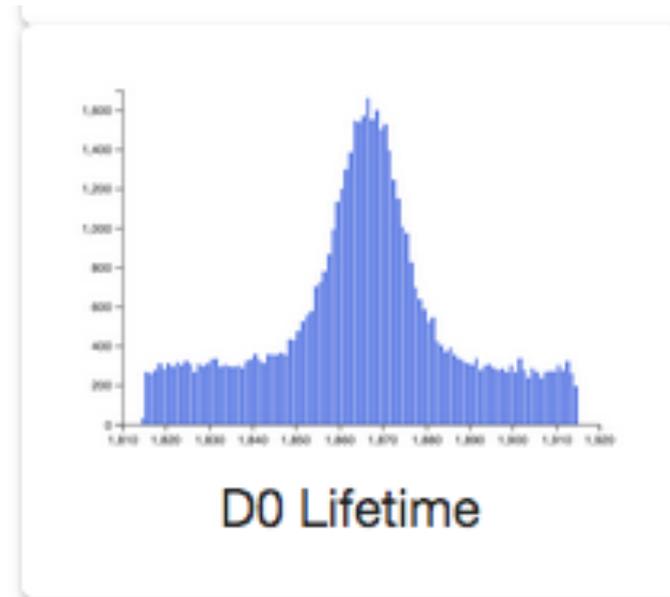


Vertice due tracce

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 per voi in modo da contenere un numero elevato di particelle D^0 .
- Tuttavia, poichè 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?

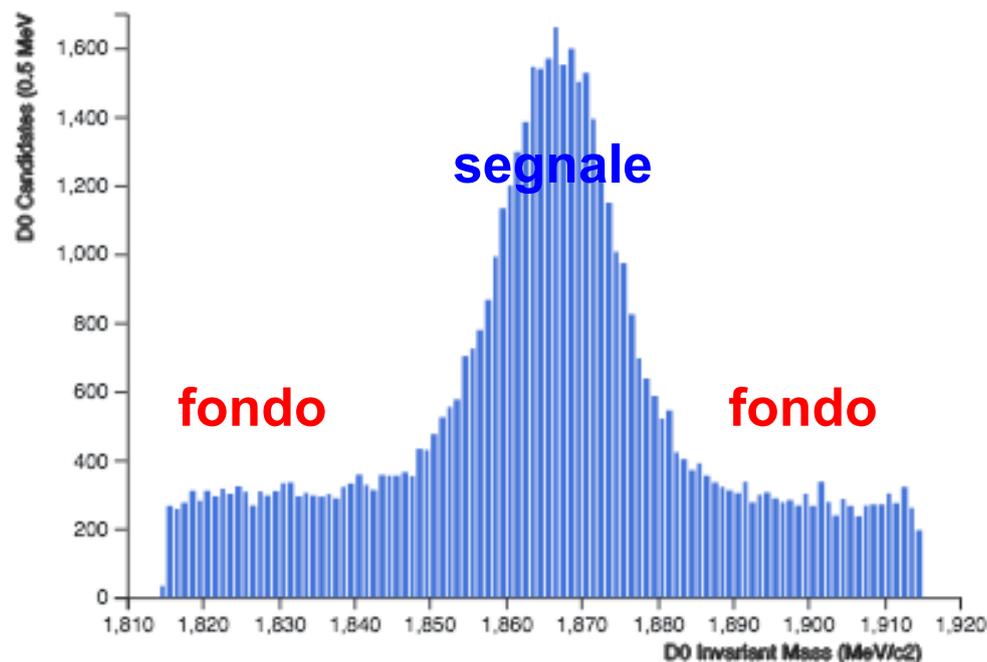
Utilizzo la distribuzione delle masse misurate per **sottrarre in modo “statistico”** gli eventi di fondo rimasti nel campione

Posso anche migliorare la selezione = tenere 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

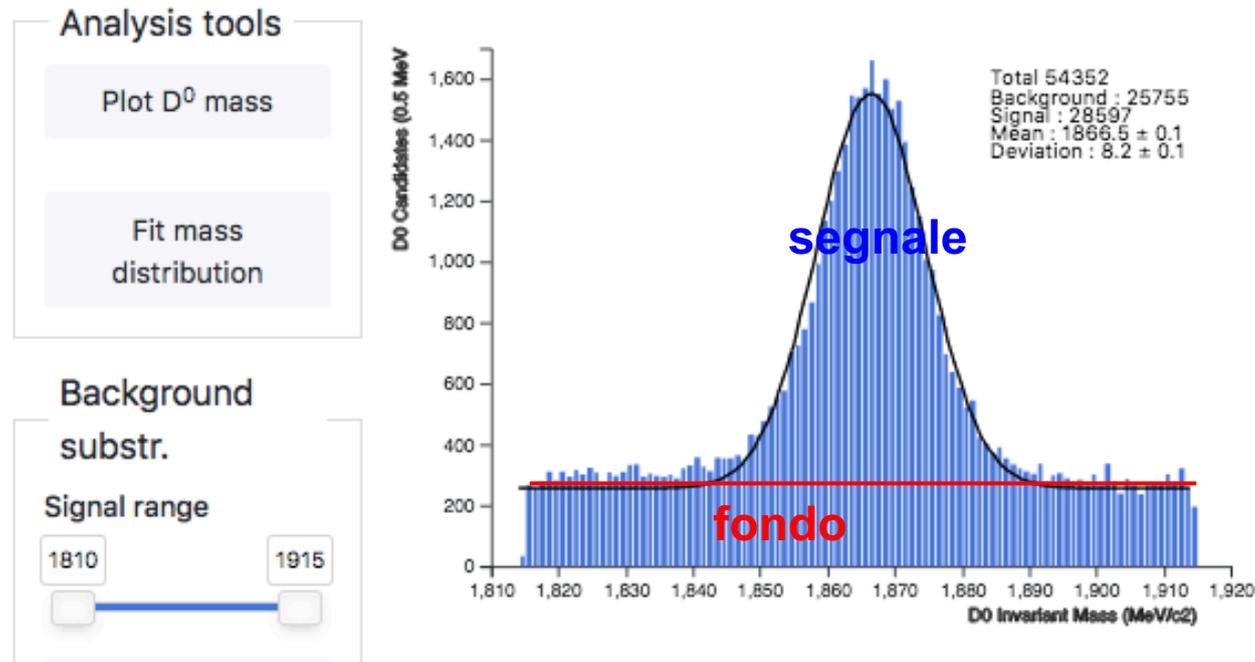


- La massa ricostruita per gli eventi di **segnale** ha valori più vicini al valore vero. L'insieme degli eventi di segnale costituisce pertanto “un picco” centrato sul valore vero.
- Gli eventi di **fondo** derivano da combinazioni casuali di tracce, la massa ricostruita può assumere qualsiasi valore,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

Plot D⁰ mass

Fit mass distribution

Background substr.

Signal range

1851 1882

Plot distributions

Variable range

D⁰ PT

2.5

20

D⁰ TAU

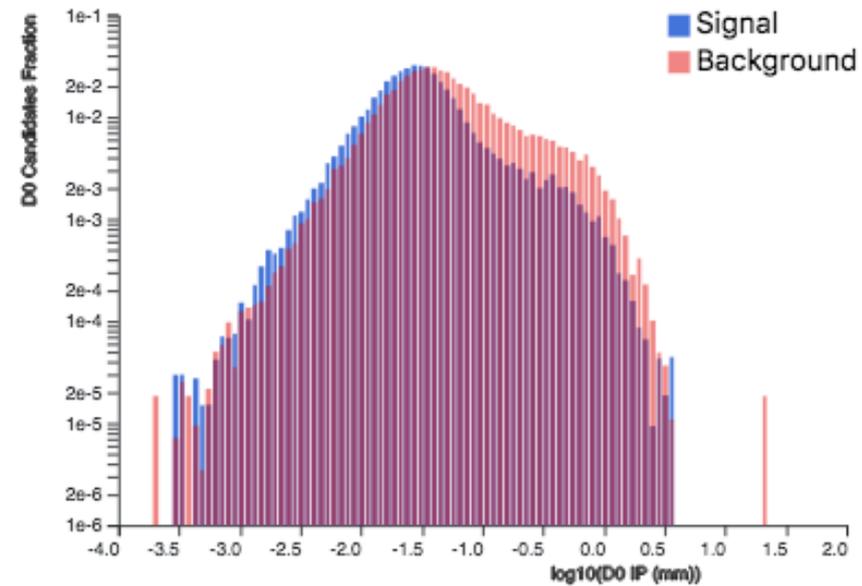
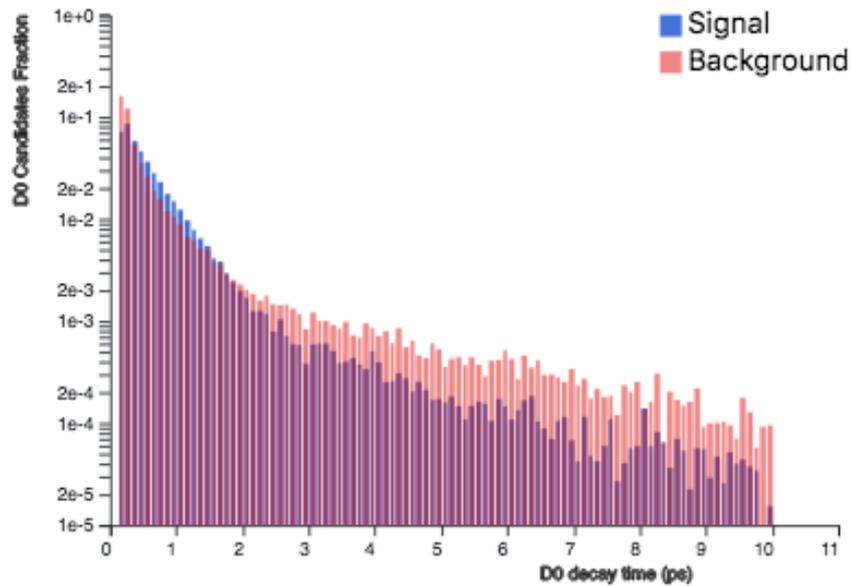
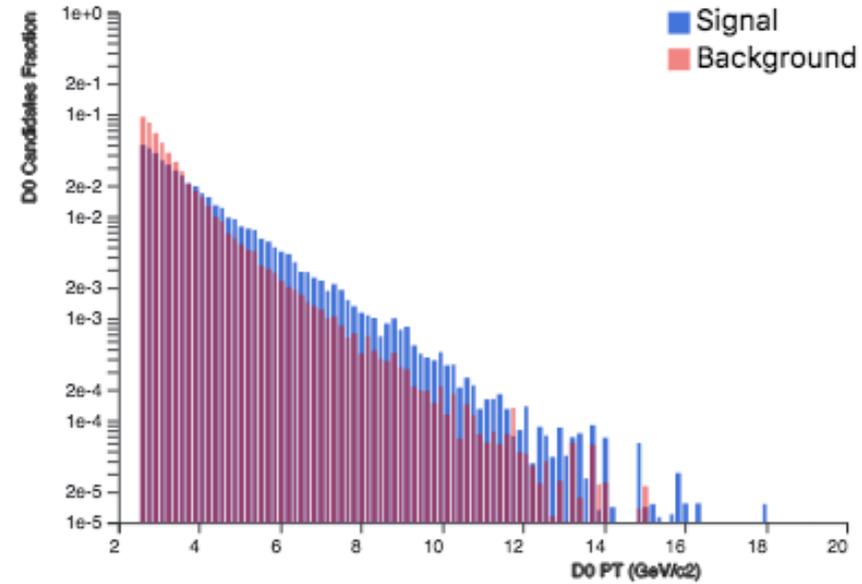
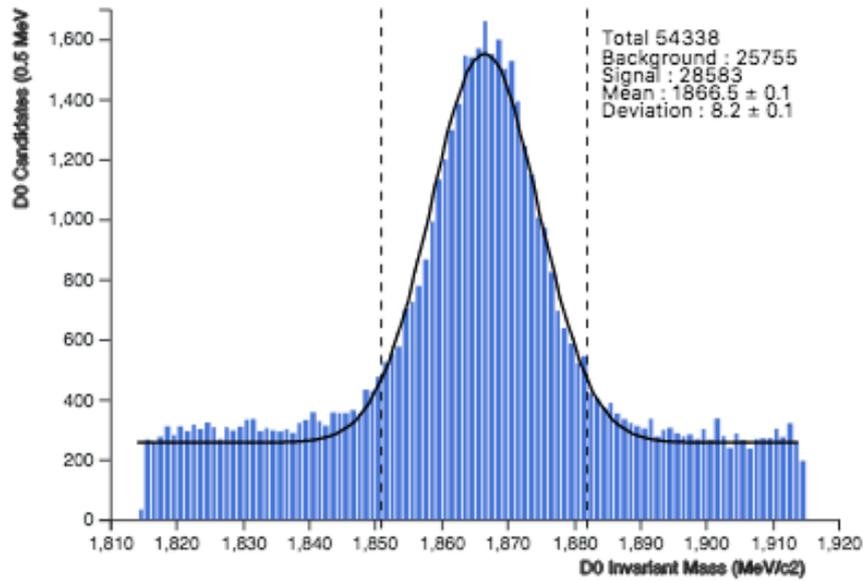
0

10

D⁰ IP

-4

1.5

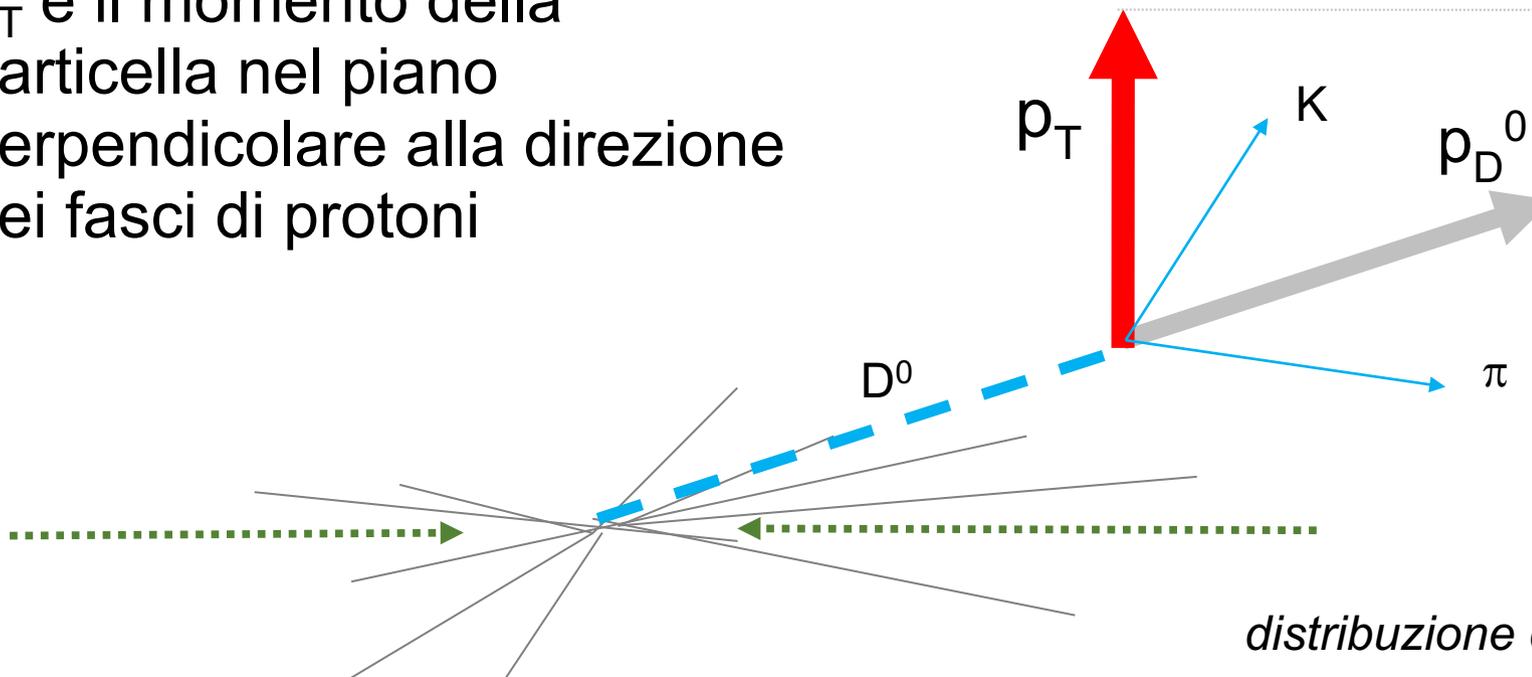


v0.1

Copyright © 2019 CERN

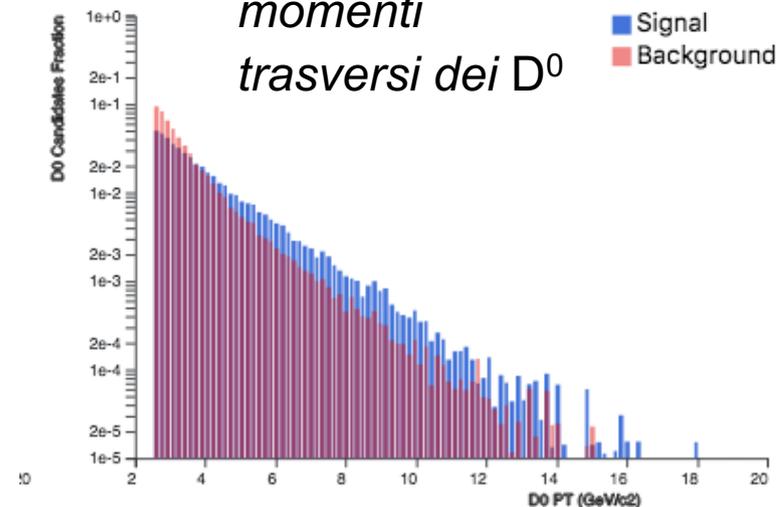
Momento trasverso p_T

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

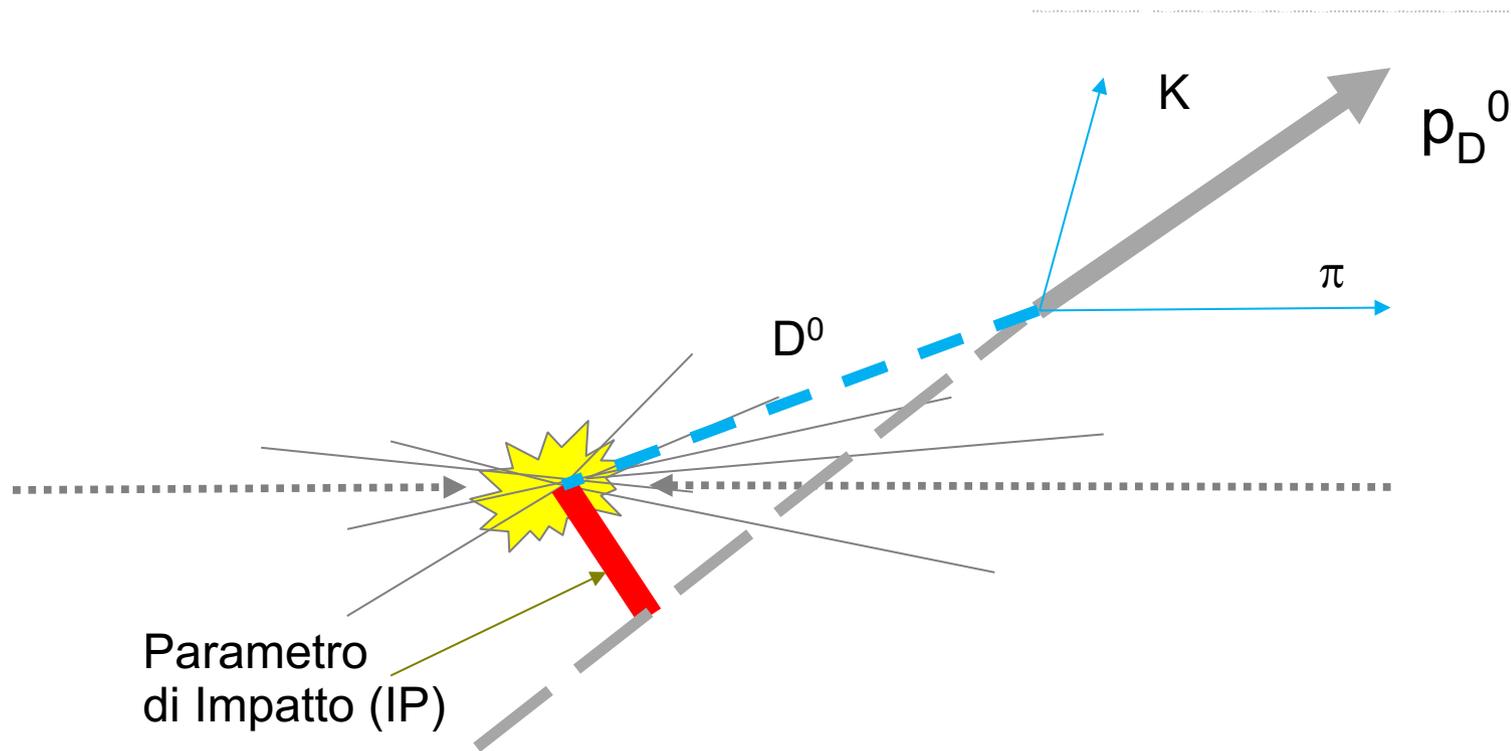


I veri D^0 hanno un momento trasverso elevato

*distribuzione dei
momenti
trasversi dei D^0*



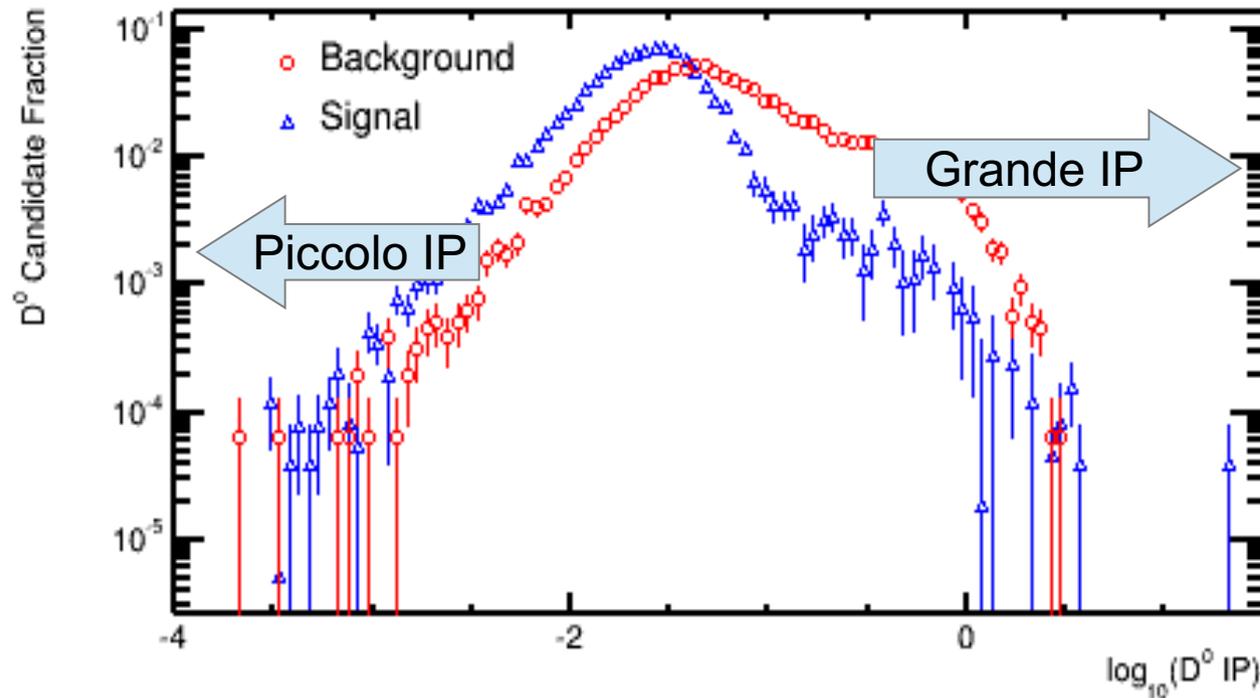
Parametro d'impatto IP



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 $IP \sim 0$

Parametro d'impatto IP



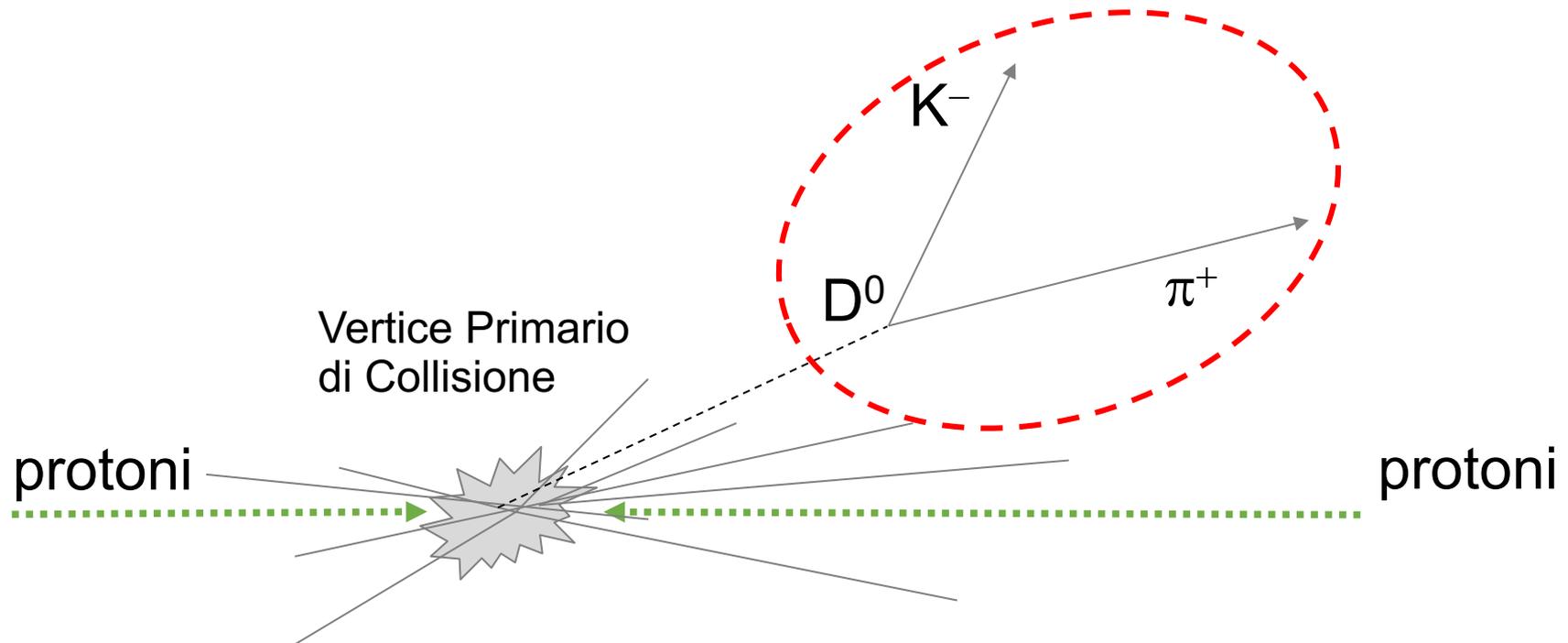
Per evidenziare meglio le differenze tra segnale e fondo mettiamo in grafico il logaritmo del parametro di impatto

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

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

Tempo di decadimento del D^0

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



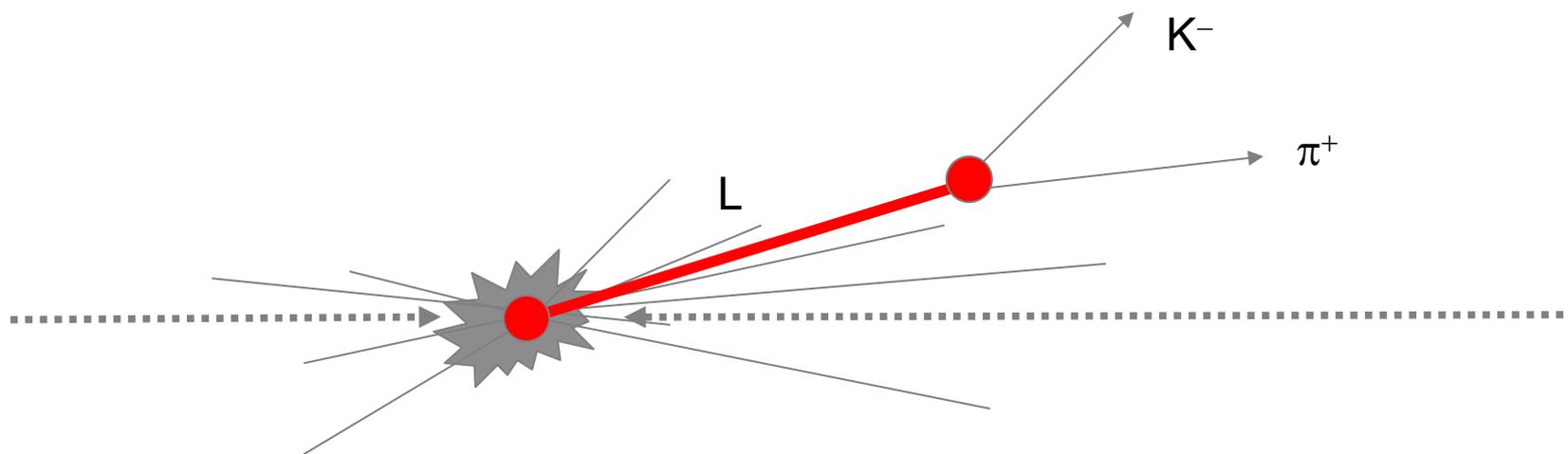
- Dopo quanto tempo decade il D^0 ?
- Come posso misurare questo tempo?
- Tutti i D^0 vivono lo stesso tempo?

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 è di $\sim 0.4 \times 10^{-12}$ s

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

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

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

$$L = vt\gamma$$

- Ad LHC una particella D^0 ha velocità $v \sim 0.99919 c$
quindi $\gamma \sim 25$ cioè il D^0 vive 25 volte più a lungo che se fosse fermo.
- Quindi se vive 0.4×10^{-12} s un D^0 percorre in media uno spazio di
 $L = v t \gamma \sim (3 \times 10^8 \text{ m/s}) \times (0.4 \times 10^{-12} \text{ s}) \times 25 = 3 \text{ mm}$

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 (come per un isotopo radioattivo) è la **legge esponenziale**

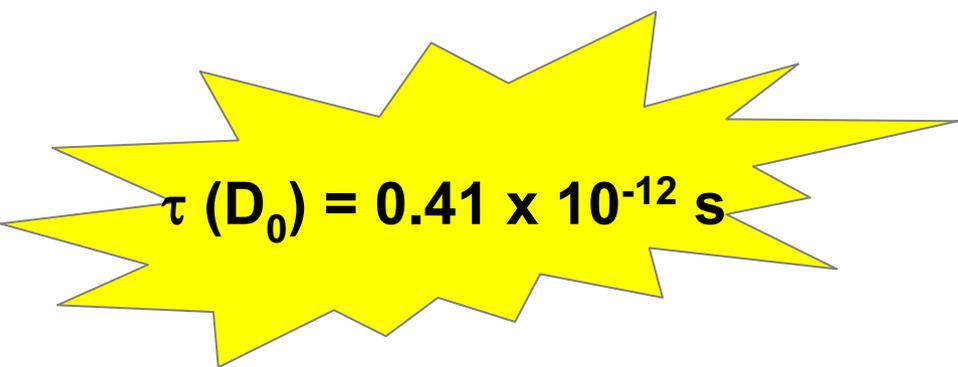
$$N(t) = N(0) e^{-t/\tau}$$

- $N(0)$ 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 perchè il numero di particelle diminuisca di un fattore $e^{-1} \sim 0.37$.

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 !

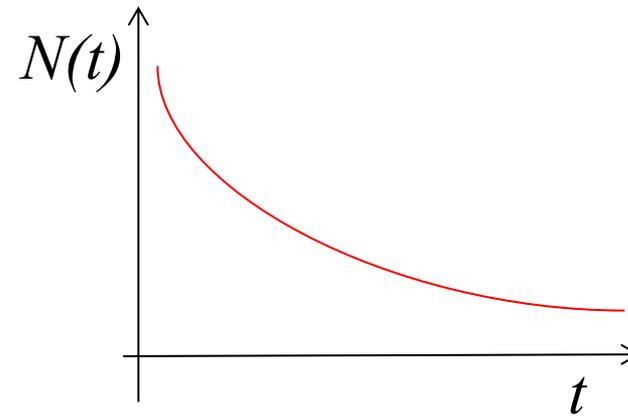

$$\tau(D^0) = 0.41 \times 10^{-12} \text{ s}$$

Valore della vita media D^0
misurato da diversi esperimenti

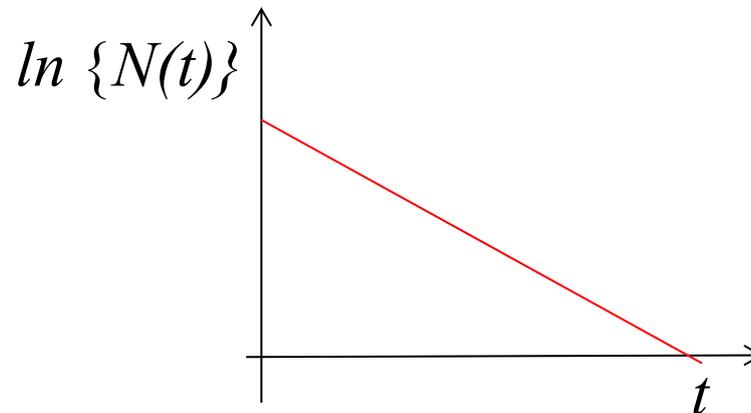
Una parentesi: la scala logaritmica

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

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

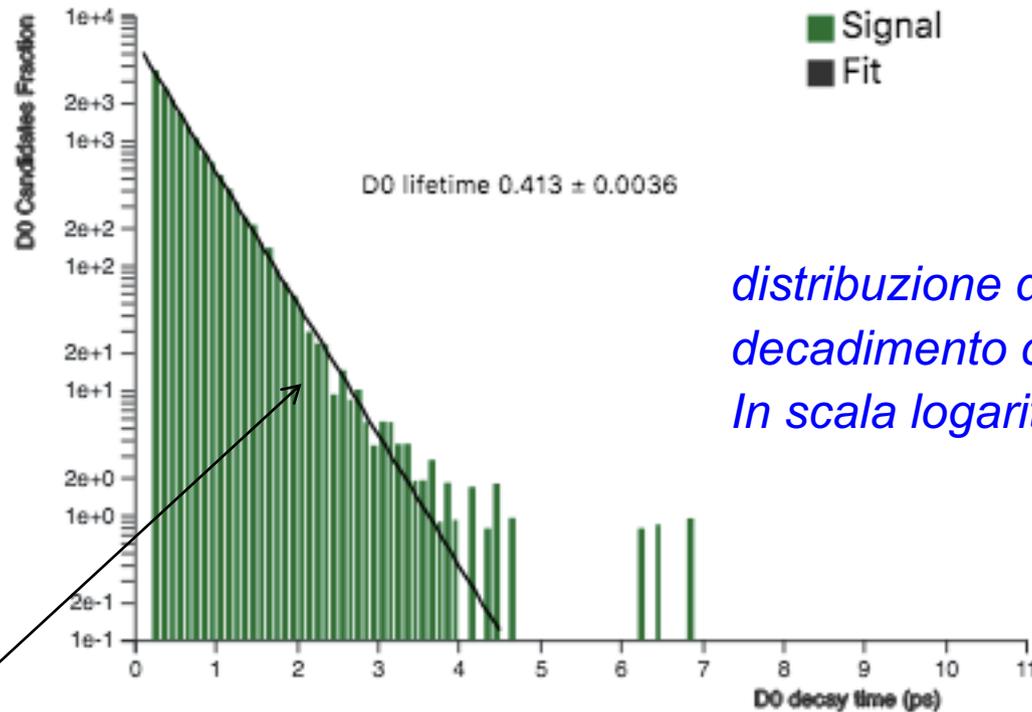


$$\begin{aligned} \ln \{N(t)\} &= \ln \{N(0) e^{-t/\tau}\} \\ &= \ln \{N(0)\} - t/\tau \end{aligned}$$



τ è semplicemente la 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

seconda parte dell'esercizio: misura della vita media del D^0

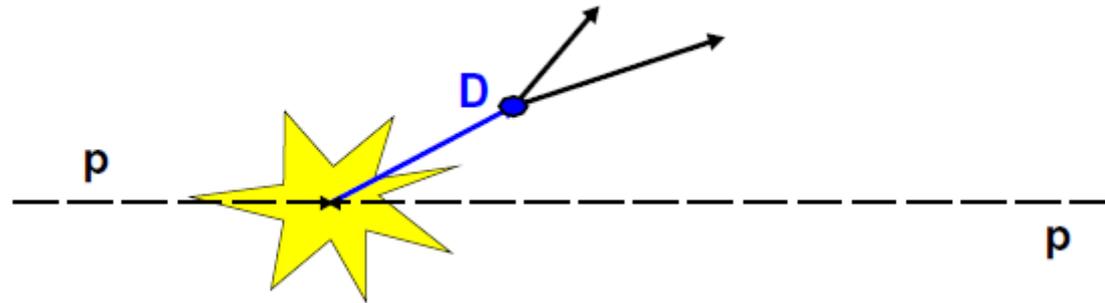
- ✓ Raccolgo un campione di D^0 .
 - ✓ Con un **fit alla distribuzione di massa** separo il segnale dal fondo
 - ✓ **Definisco l'intervallo** dei valori massa che definiscono la regione di segnale
 - ✓ Osservo i grafici delle distribuzioni di segnale e di fondo
 - ✓ Cerco di **minimizzare la quantità di fondo** variando il minimo /massimo valore accettato per p_T , IP e t (\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)

La produzione della particella D^0

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

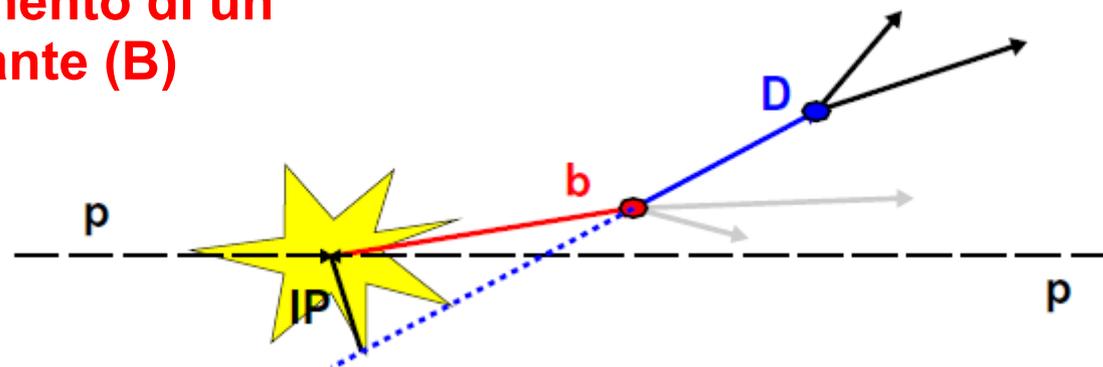
Produzione diretta

Il parametro d'impatto è nullo o piccolo



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

Il parametro d'impatto è grande



The end

Legge di decadimento

Processo statistico controllato da un singolo parametro

λ = costante di decadimento

$$\Delta N / N = - \lambda \Delta t$$

La variazione relativa del numero di particelle è costante, in intervalli di tempo costanti

$\lambda \Delta t$ probabilità di decadimento nell'intervallo Δt , costante

Se integro entrambi i termini dell'equazione trovo la legge esponenziale:

$$dN / N = - \lambda dt \quad \rightarrow \int_0^t dN / N = - \lambda \int_0^t dt'$$

$$\rightarrow \ln N(t) - \ln N(0) = - \lambda (t - 0)$$

$$\rightarrow \ln [N(t)/N(0)] = - \lambda t \quad \rightarrow N(t) / N(0) = e^{-\lambda t}$$

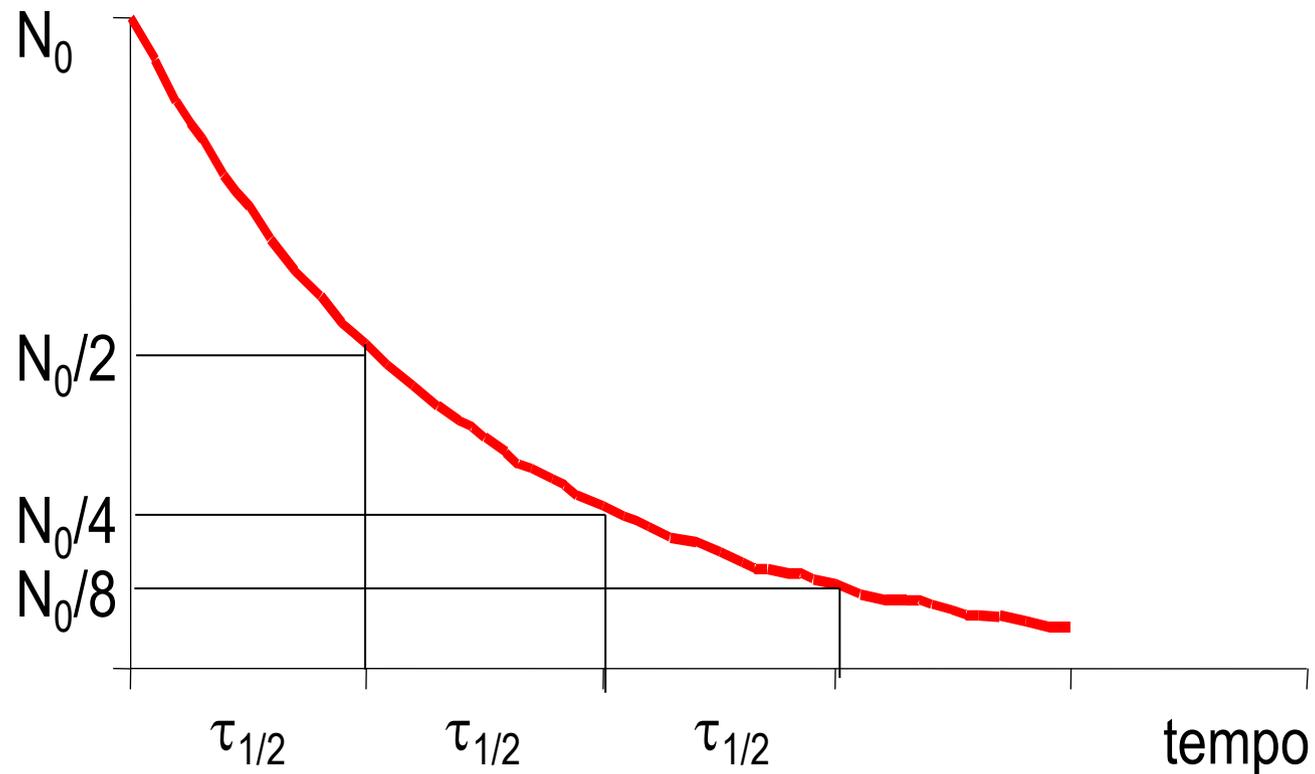
$$\rightarrow N(t) = N(0) e^{-\lambda t}$$

Legge di decadimento

$$N(t) = N(0) e^{-\lambda t} = N(0) e^{-t/\tau} \quad \tau = 1/\lambda \text{ vita media}$$

$$t = \tau \quad N(\tau) = N(0) e^{-1} = 0.37 N(0) \quad \text{numero dopo una vita media}$$

$$\tau_{1/2} = \ln(2)\tau \quad N(\tau_{1/2}) = N(0) e^{-\ln(2)} = 0.5 N(0) \quad \text{numero dopo un "tempo di dimezzamento"}$$



$$N(2 \tau_{1/2}) = N(0) e^{-2\ln(2)} = 0.25 N(0) \quad \text{numero dopo } 2 \tau_{1/2}$$

$$N(n \tau_{1/2}) = N(0) e^{-n \ln(2)} = (0.5)^n N(0) \quad \text{numero dopo } n \tau_{1/2}$$

L'**elettronvolt (eV)** è un'unità di misura dell'energia definita come l'energia guadagnata (o persa) dal un singolo elettrone che si muove nel vuoto tra due punti di una regione tra i quali vi è una differenza di potenziale elettrostatico di 1 volt.

$$1 \text{ eV} = 1,602176634 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Multipli:

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

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

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

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

La massa di un elettrone a riposo corrisponde a $511 \text{ keV}/c^2$

La massa di un protone a riposo corrisponde a $938 \text{ MeV}/c^2$