

Scienziati per un giorno verificando la teoria della relatività ristretta di Einstein

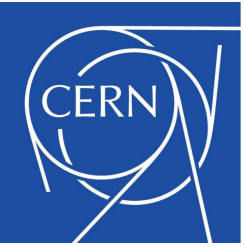
MasterClass 2022 - Bologna

Stefano Perazzini

(stefano.perazzini@bo.infn.it)



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

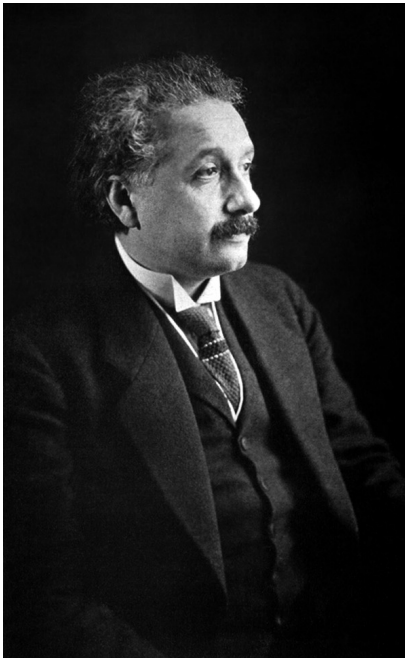


Ma Einstein aveva ragione?



Oggi voi verificherete sperimentalmente una delle teorie più importanti della fisica moderna

La teoria della relatività ristretta di Einstein



“Il tempo è relativo, il suo unico valore è dato da ciò che noi facciamo mentre sta passando.”

ALBERT EINSTEIN



Cosa misuriamo oggi ?



Oggi misureremo la vita media di una particella
che si chiama D^0

Come si misura un tempo?

$$\text{tempo} = \frac{\text{spazio}}{\text{velocità}}$$

Che cosa è la vita media?

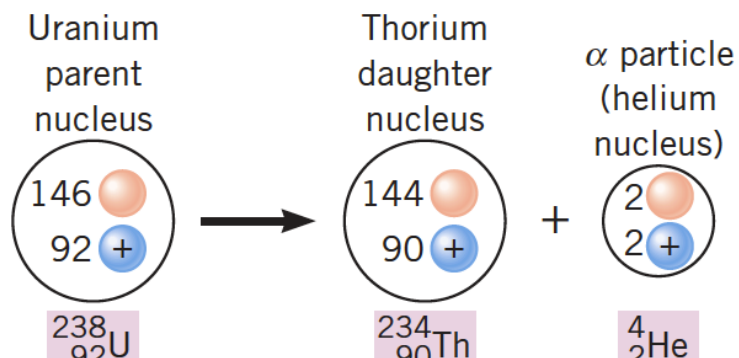
**E' il tempo che in media trascorre prima che
una particella decada**

Molte particelle che conosciamo sono instabili

Dopo un certo intervallo di tempo decadono

Voi conoscete già questo fenomeno, per esempio i decadimenti radioattivi dei nuclei

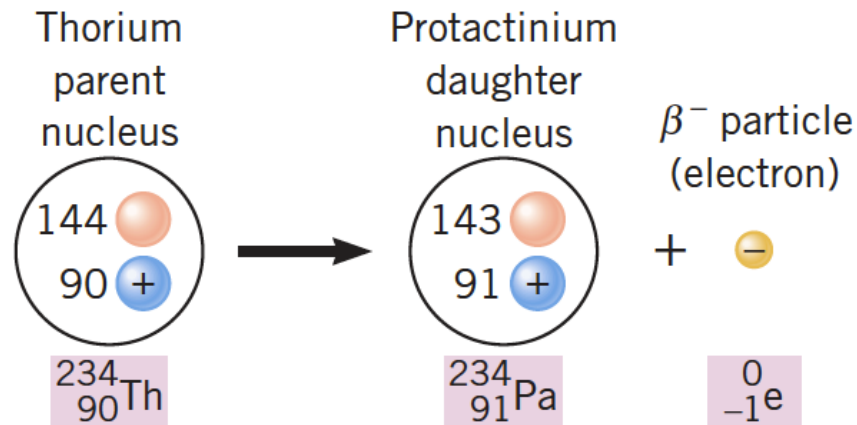
Quando un nucleo instabile o radioattivo si disintegra spontaneamente, emette una particella, per esempio



Decadimento α

La particella α è l'atomo di Elio

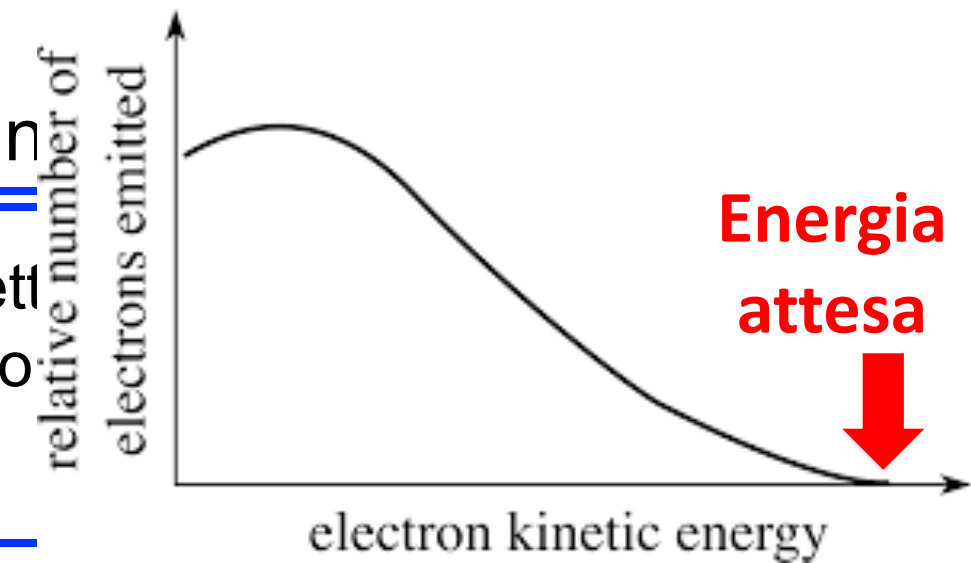
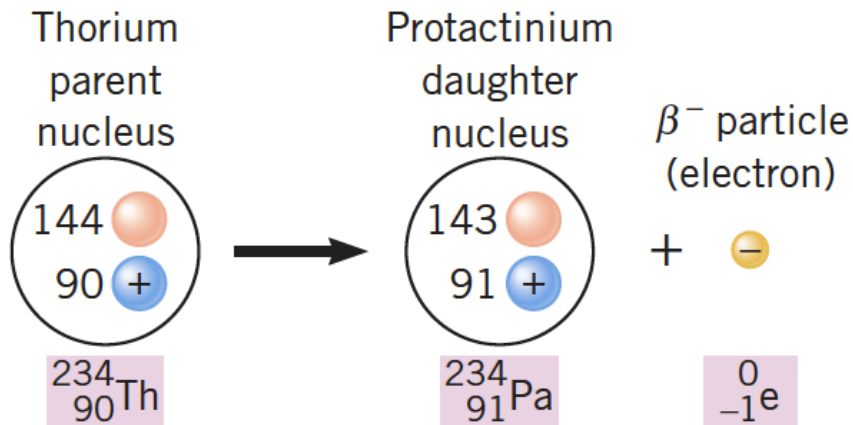
Il decadimento β



neutrone \rightarrow protone + elettrone

L'elettrone è creato quando il neutrone decade
In questo modo il numero atomico dell'atomo cresce e
l'elettrone fugge via dall'atomo

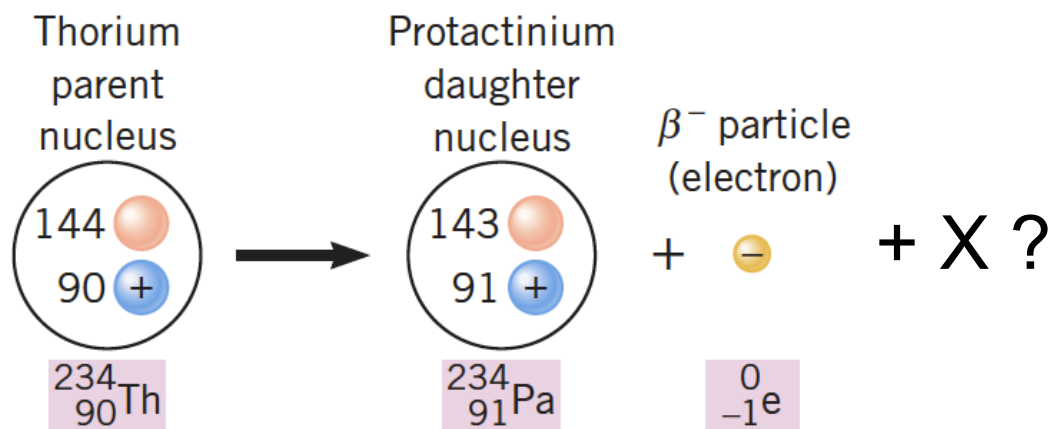
Il decadimento β



L'elett
In questo

ne
decade
no cresce e

Il decadimento β

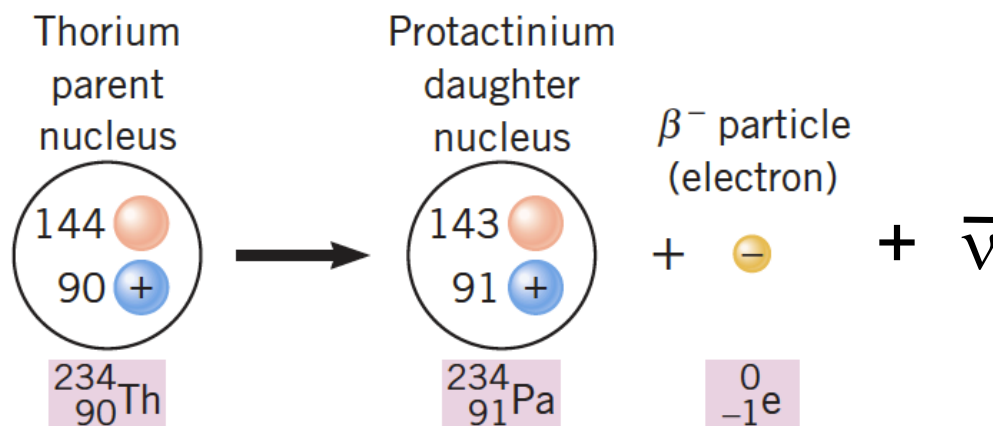


neutrone \rightarrow protone + elettrone + X ?

Quando avviene il decadimento, una certa quantità di energia è prodotta. Poiché l'energia si conserva questa deve essere totalmente trasmessa all'elettrone. Sperimentalmente si osserva che l'energia dell'elettrone non è sufficiente a conservare l'energia.

Manca qualcosa?

Il decadimento β



neutrone \rightarrow protone + elettrone + $\bar{\nu}$

Questo mistero fece “impazzire” Wolfgang Pauli, il quale nel 1930 ipotizzò che insieme all’elettrone dovesse essere prodotta anche un’altra particella, il neutrino. La sua esistenza fu verificata sperimentalmente nel 1956



La forza elettrodebole



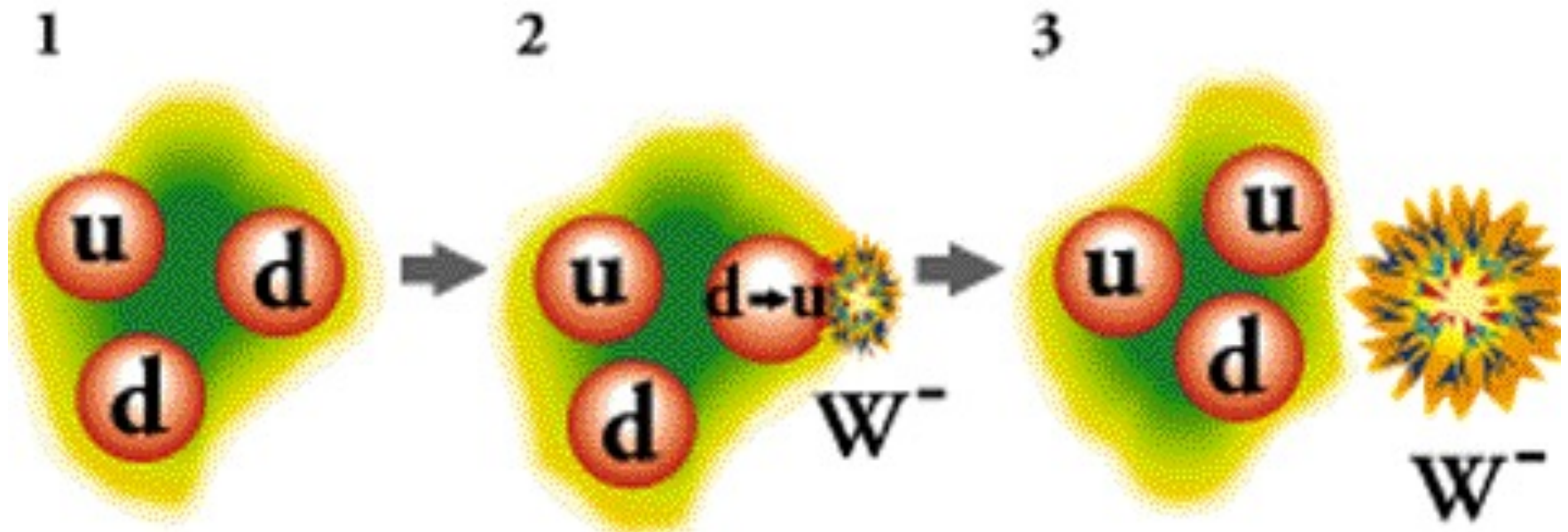
L'emissione del neutrino e dell'elettrone coinvolge una forza chiamata FORZA NUCLEARE DEBOLE.

Si chiama debole, perché è più debole della forza nucleare forte

E' noto che la forza nucleare debole e la forza elettromagnetica sono diverse manifestazioni della stessa forza, chiamata ELETTODEBOLE

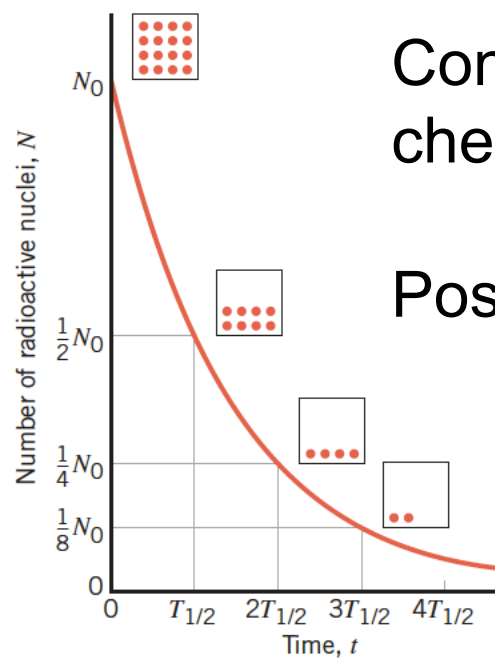
La teoria della forza elettrodebole fu sviluppata da Sheldon Glashow (1932–), Abdus Salam (1926–1996), and Steven Weinberg (1933–), i quali vinsero il premio Nobel nel 1979

Il decadimento β



Conoscere quando un singolo nucleo radioattivo in un gruppo di nuclei si disintegra, cioè decade, è come vincere al super enalotto!

I singoli decadimenti avvengono in maniera casuale



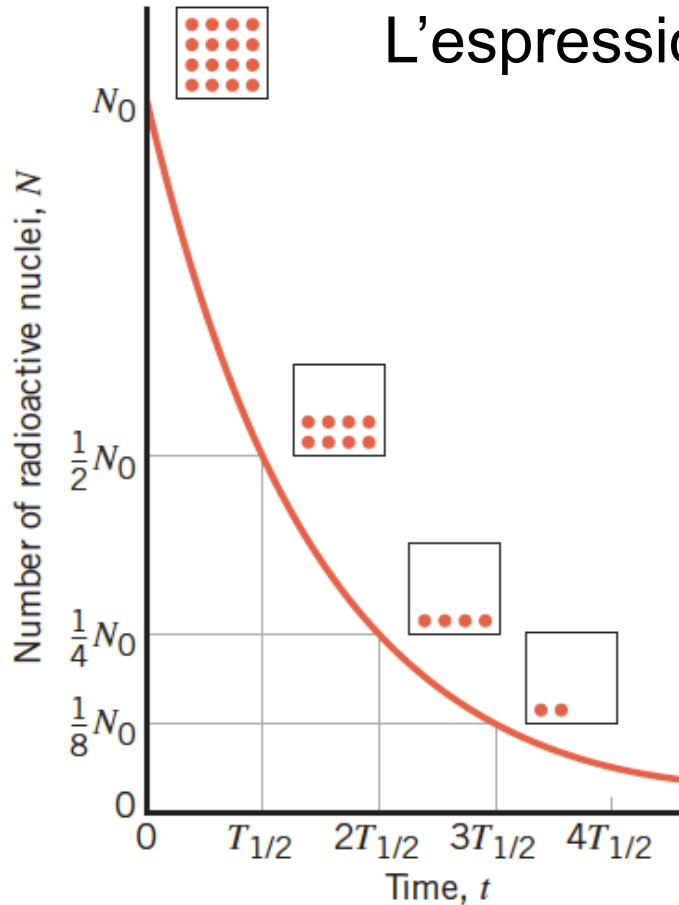
Con il passare del tempo il numero di nuclei N che decadono diminuisce esponenzialmente

Possiamo definire il tempo di dimezzamento $T_{1/2}$

Dopo $T_{1/2}$ metà dei nuclei presenti è decaduto

Table 31.2 Some Half-Lives for Radioactive Decay

Isotope		Half-Life
Polonium	${}_{84}^{214}\text{Po}$	$1.64 \times 10^{-4} \text{ s}$
Krypton	${}_{36}^{89}\text{Kr}$	3.16 min
Radon	${}_{86}^{222}\text{Rn}$	3.83 d
Strontium	${}_{38}^{90}\text{Sr}$	29.1 yr
Radium	${}_{88}^{226}\text{Ra}$	$1.6 \times 10^3 \text{ yr}$
Carbon	${}_{6}^{14}\text{C}$	$5.73 \times 10^3 \text{ yr}$
Uranium	${}_{92}^{238}\text{U}$	$4.47 \times 10^9 \text{ yr}$
Indium	${}_{49}^{115}\text{In}$	$4.41 \times 10^{14} \text{ yr}$



L'espressione matematica per descrivere questo andamento è

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

τ è la vita media

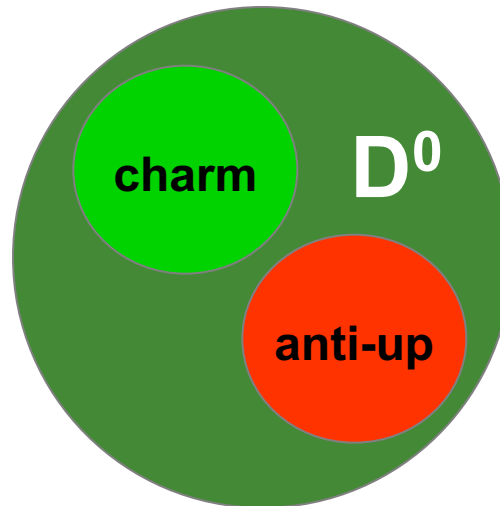
Oggi voi misurerete questa quantità per una particella chiamata D^0



La particella (il mesone) D^0



Il D^0 è costituito da un quark up e un quark charm

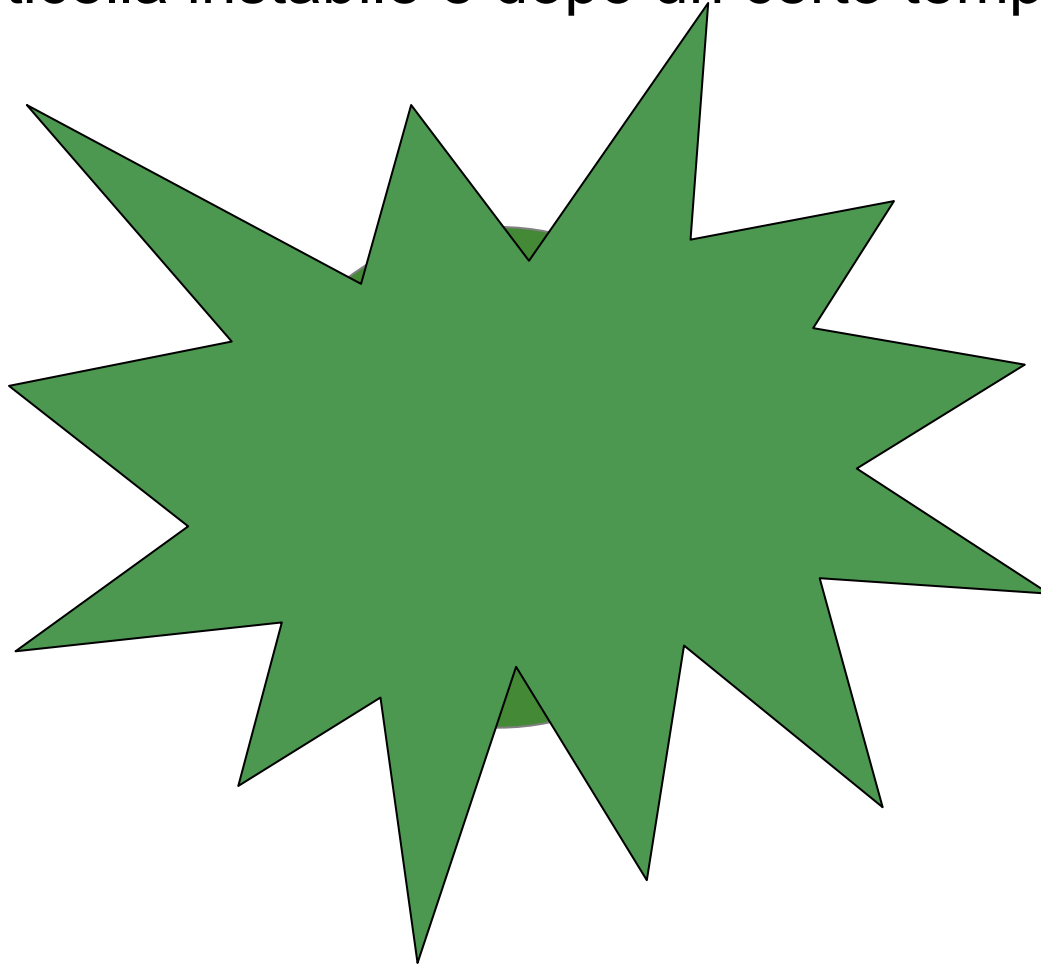




La particella (il mesone) D^0

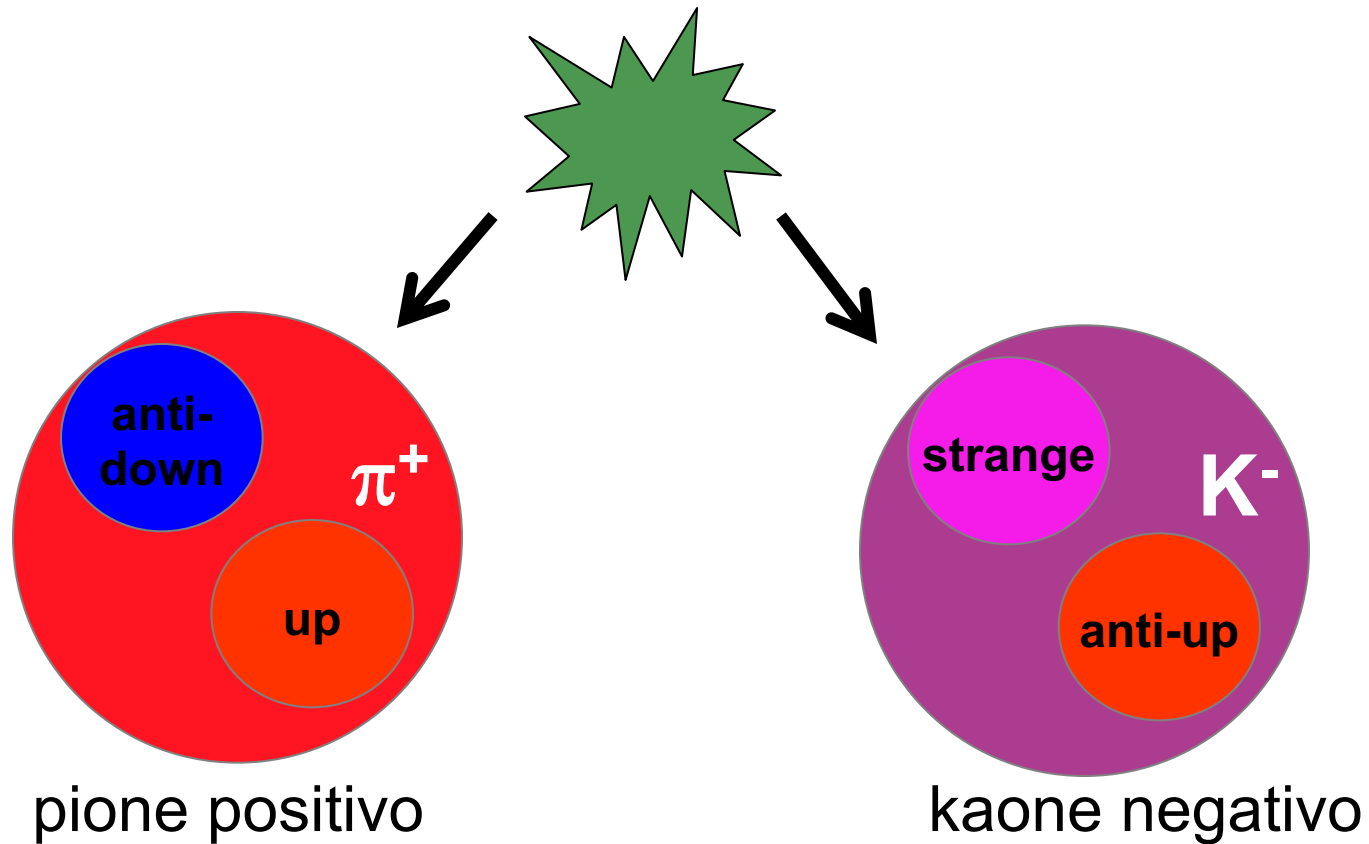


E' una particella instabile e dopo un certo tempo decade...



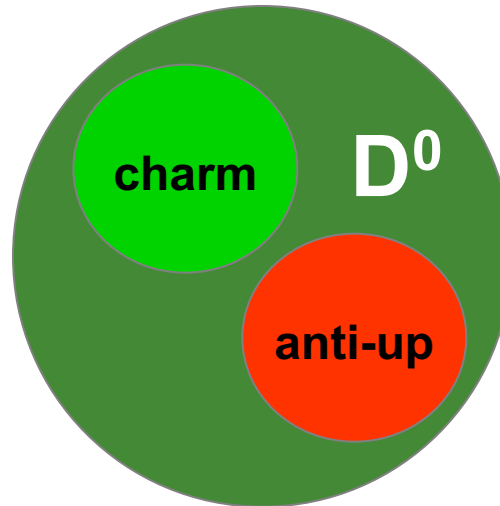
La particella (il mesone) D^0

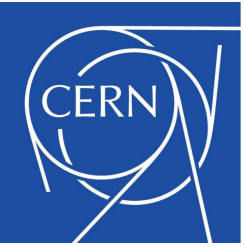
... in un kaone negativo e un pione positivo



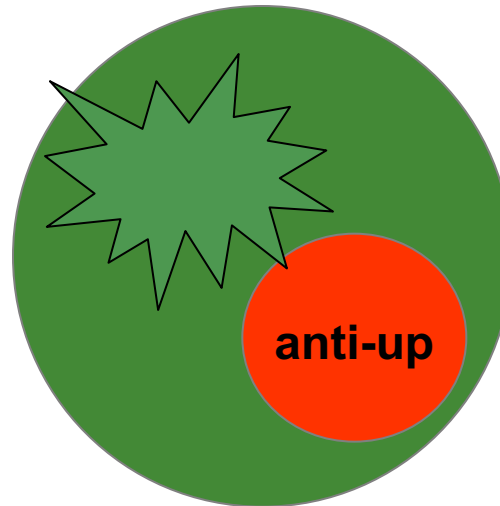


Cosa succede quando un D^0 decade?



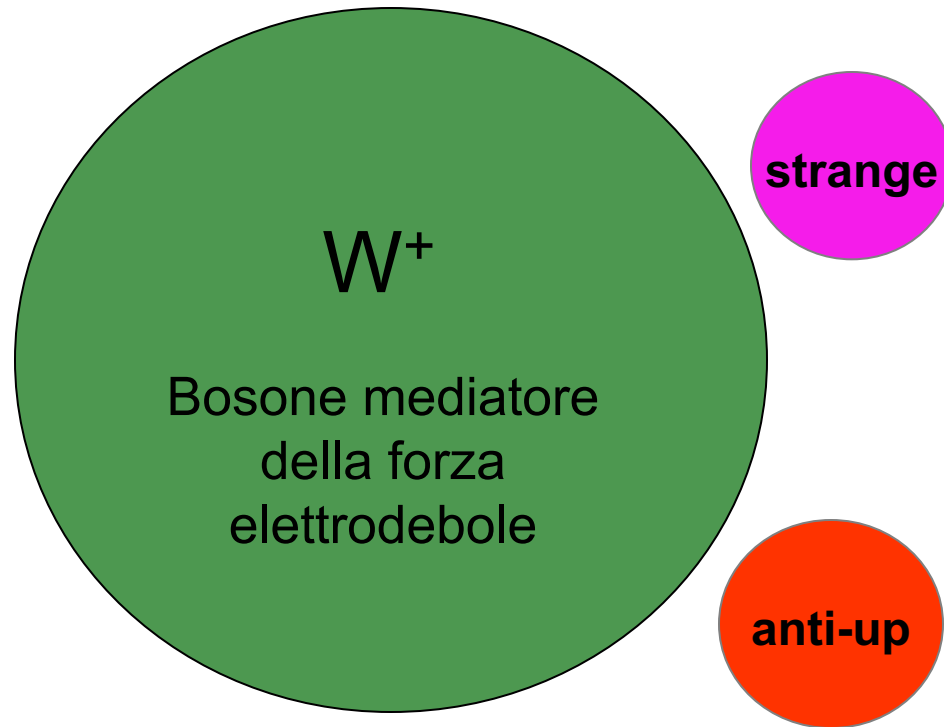


Cosa succede quando un D^0 decade?



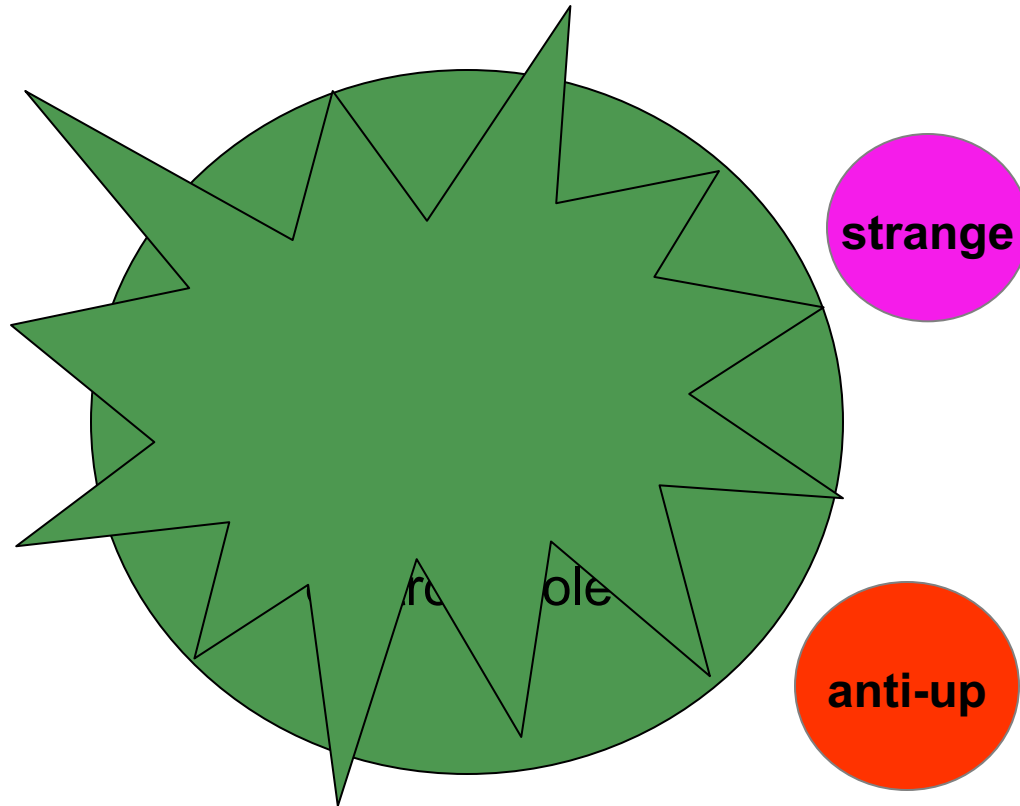


Cosa succede quando un D^0 decade?



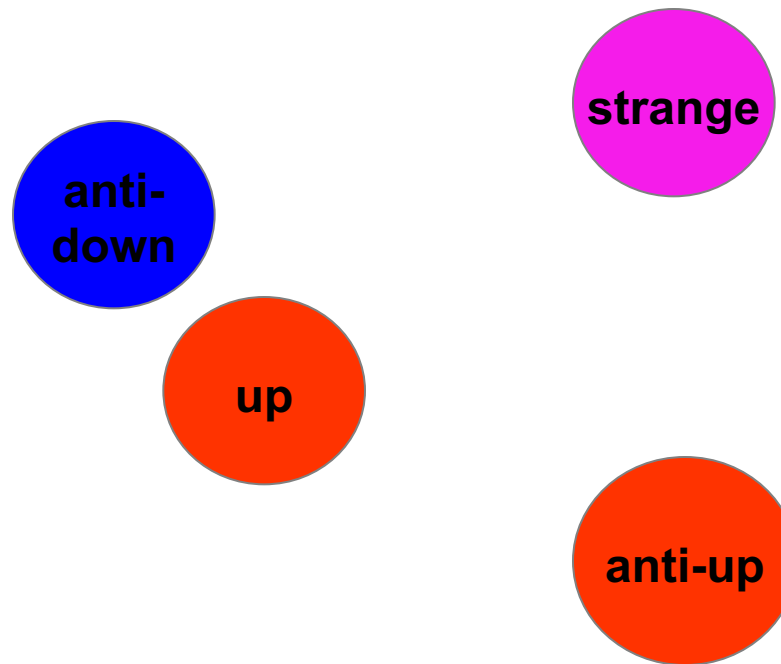


Cosa succede quando un D^0 decade?



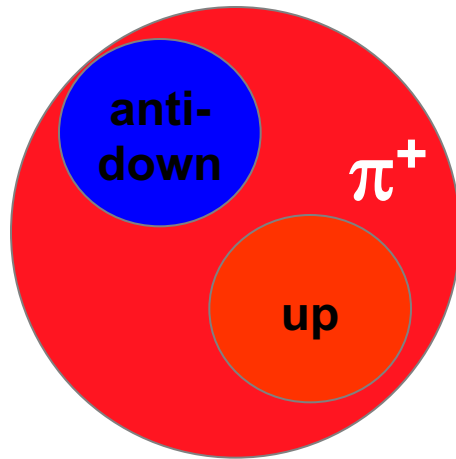


Cosa succede quando un D^0 decade?

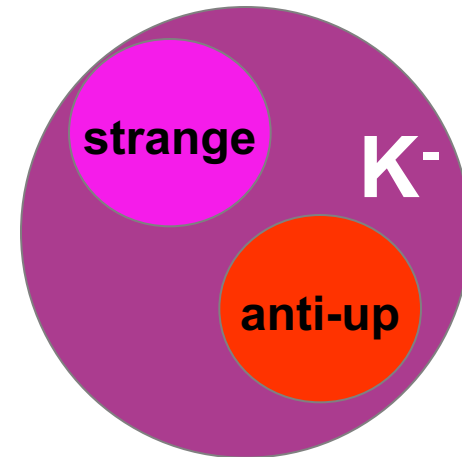




Cosa succede quando un D^0 decade?



pione positivo



kaone negativo

Come descriviamo questo processo noi fisici?

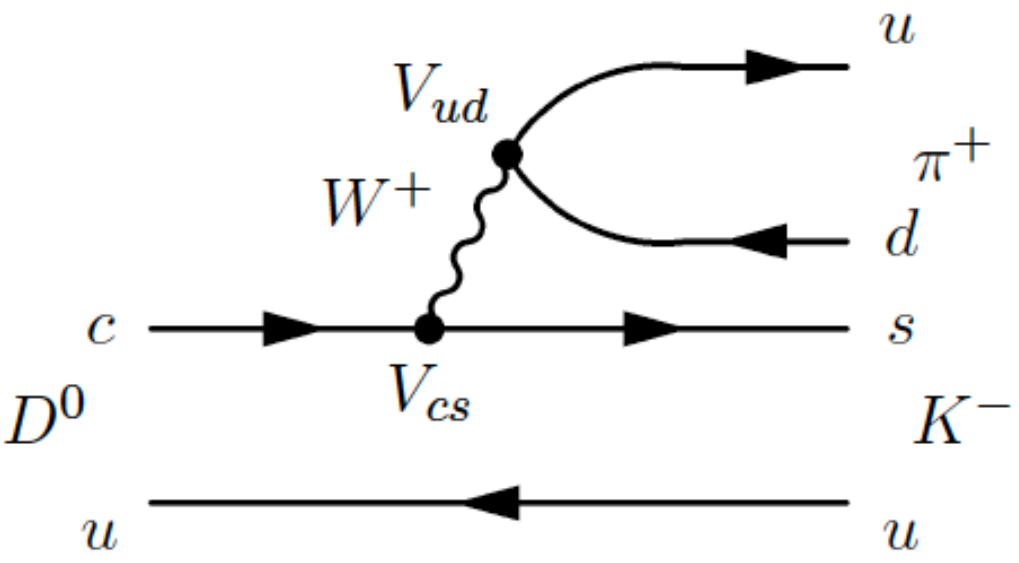
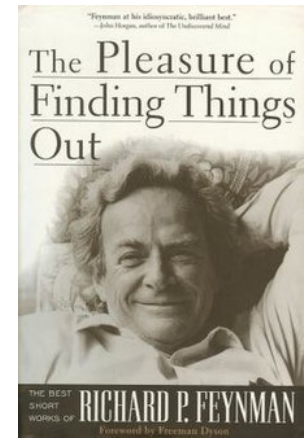
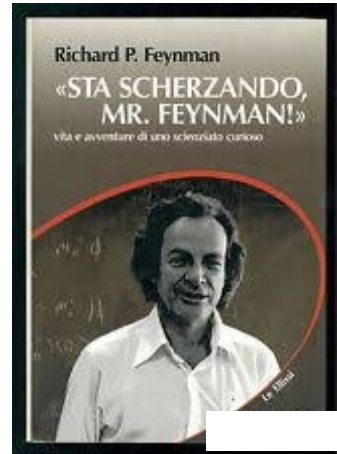
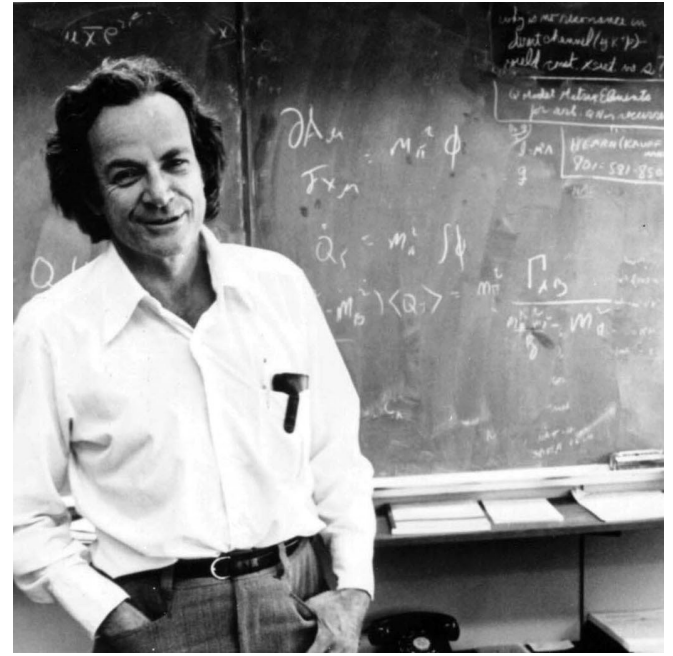


Diagramma di Feynman





Digressione su Feynmann



Cargo Cult Science

by RICHARD P. FEYNMAN

Some remarks on science, pseudoscience,
and learning how to not fool yourself.
Caltech's 1974 commencement address.

<http://calteches.library.caltech.edu/51/2/CargoCult.pdf>



Fisici per un giorno



Oggi misuriamo in quanto tempo avviene tutto questo!

Secondo voi quanto tempo ci impiega mediamente il D^0 a decadere?

anni? giorni? ore? minuti? secondi? milli-secondi (10^{-3} s)? micro-secondi (10^{-6} s)? nano-secondi (10^{-9} s)? pico-secondi (10^{-12} s)?

Dove facciamo la misura?



presso l'esperimento LHCb al CERN di Ginevra



Il mistero della scomparsa dell'anti-materia

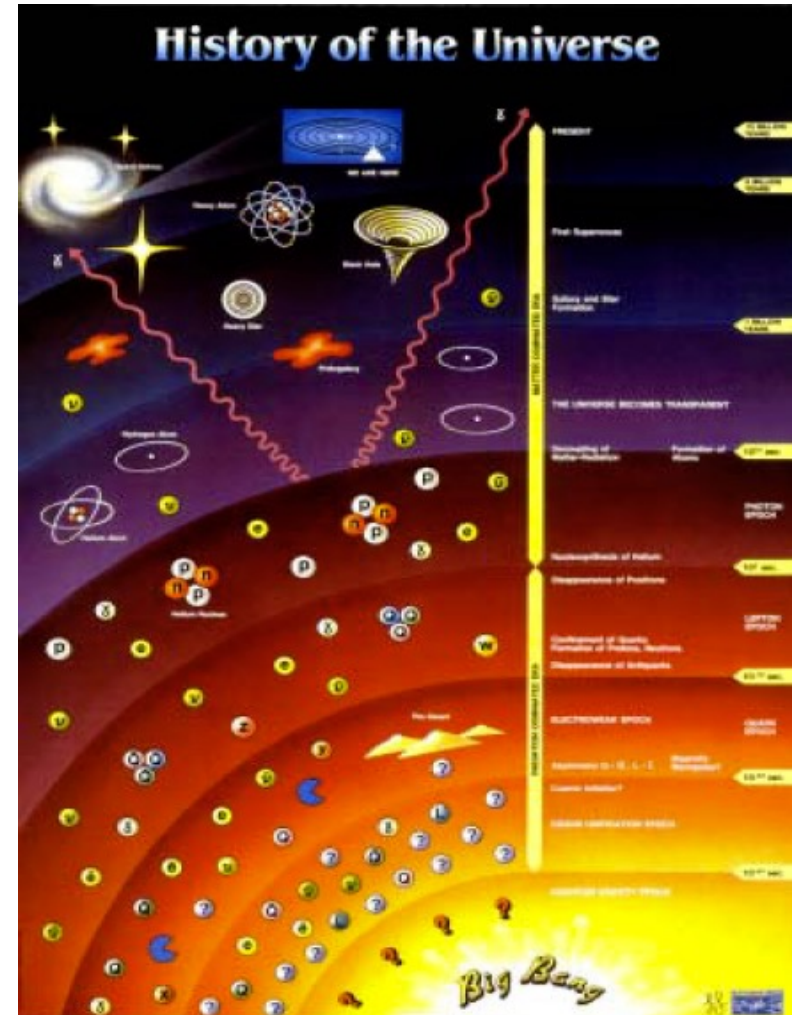


All'esperimento LHCb cerchiamo di capire perché l'Universo che osserviamo oggi è costituito di **materia** e non da **anti-materia**

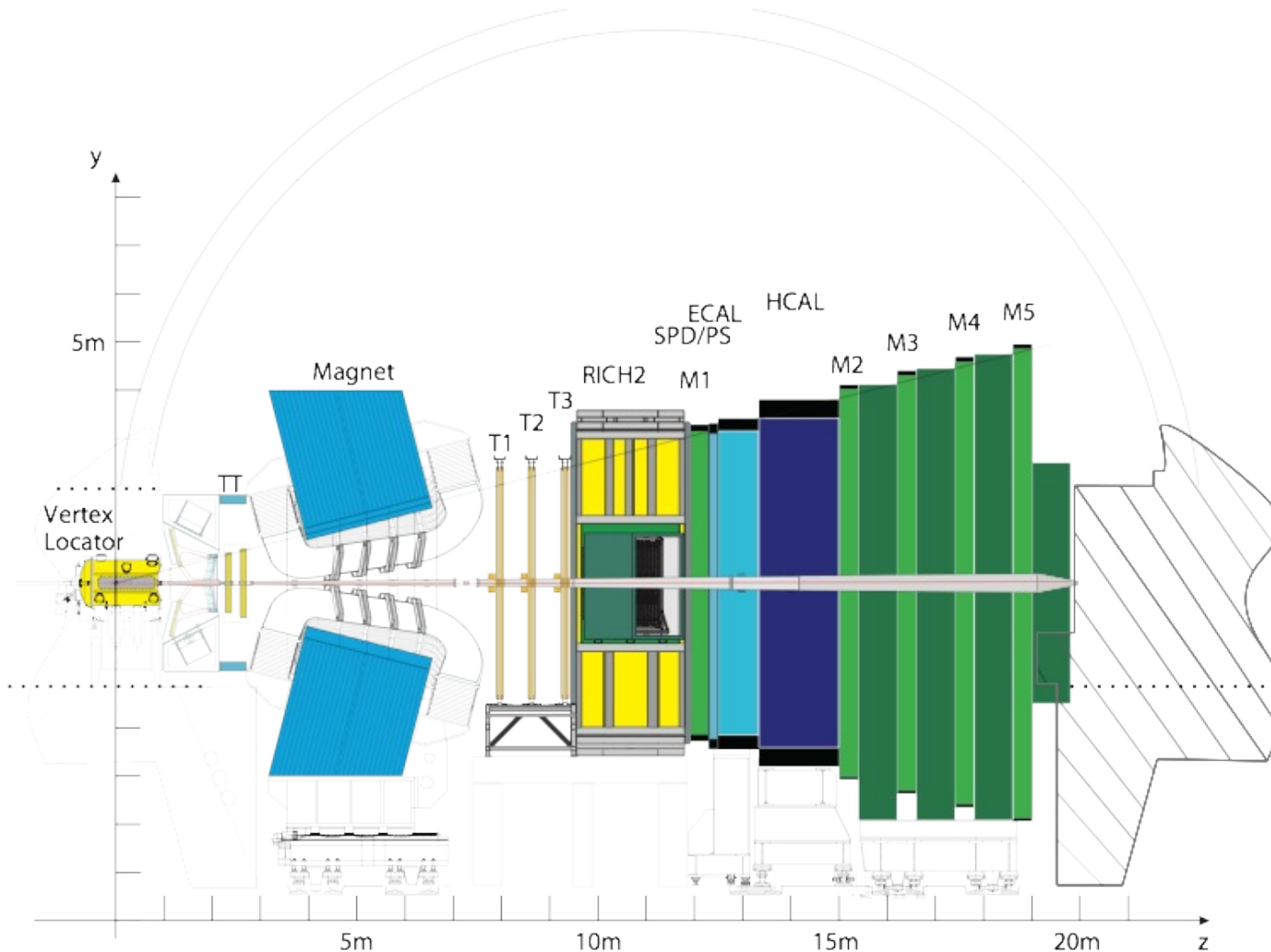
Sappiamo che all'origine dell'Universo la materia e l'anti-materia erano presenti in quantità uguale

Oggi sappiamo che la materia e l'anti-materia non si comportano esattamente allo stesso modo, ma non siamo ancora in grado di spiegare il mistero della scomparsa dell'anti-materia

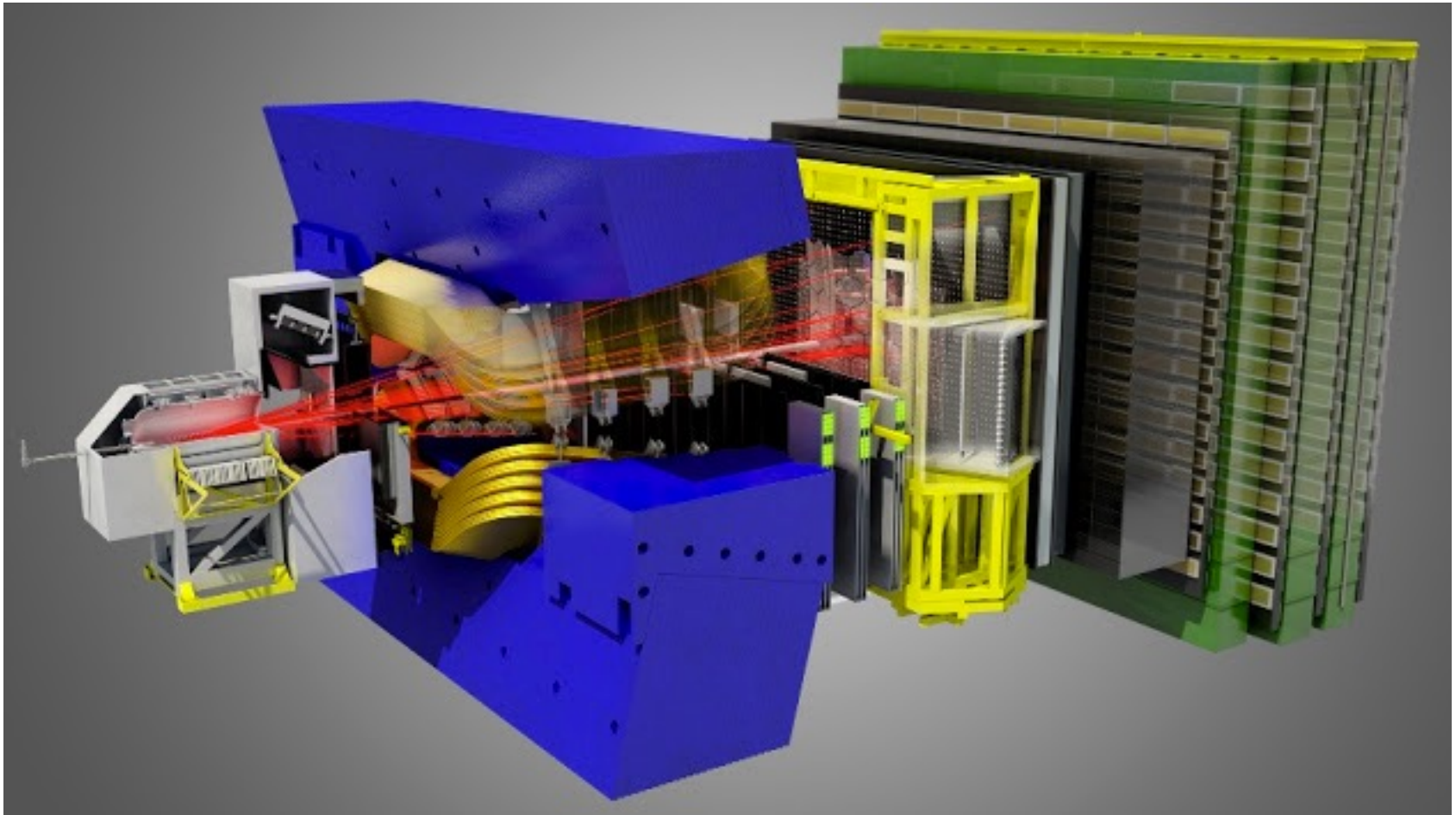
Per fortuna materia e antimateria si comportano diversamente altrimenti noi non esisteremmo



Il rivelatore LHCb



Il rivelatore LHCb

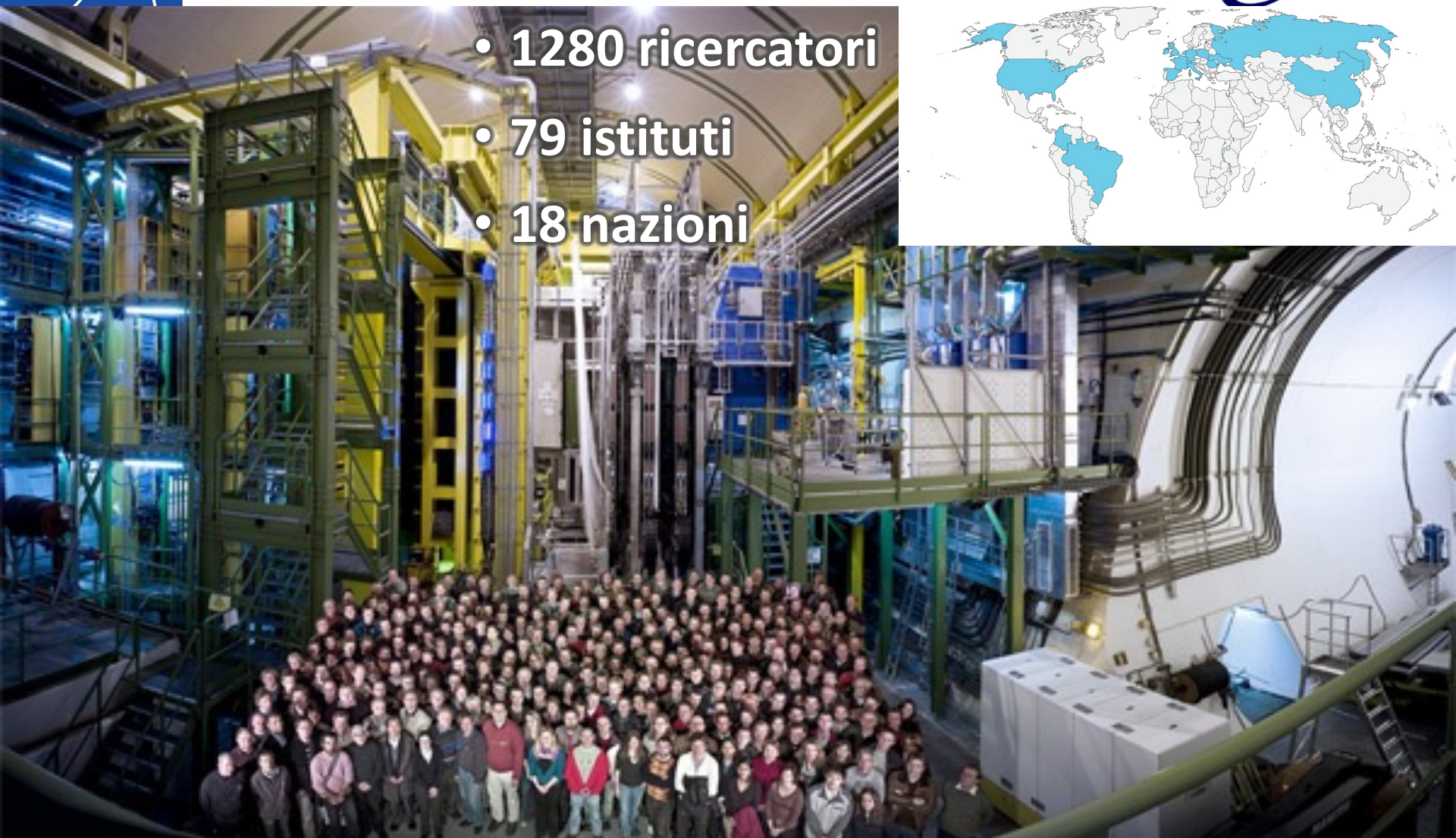


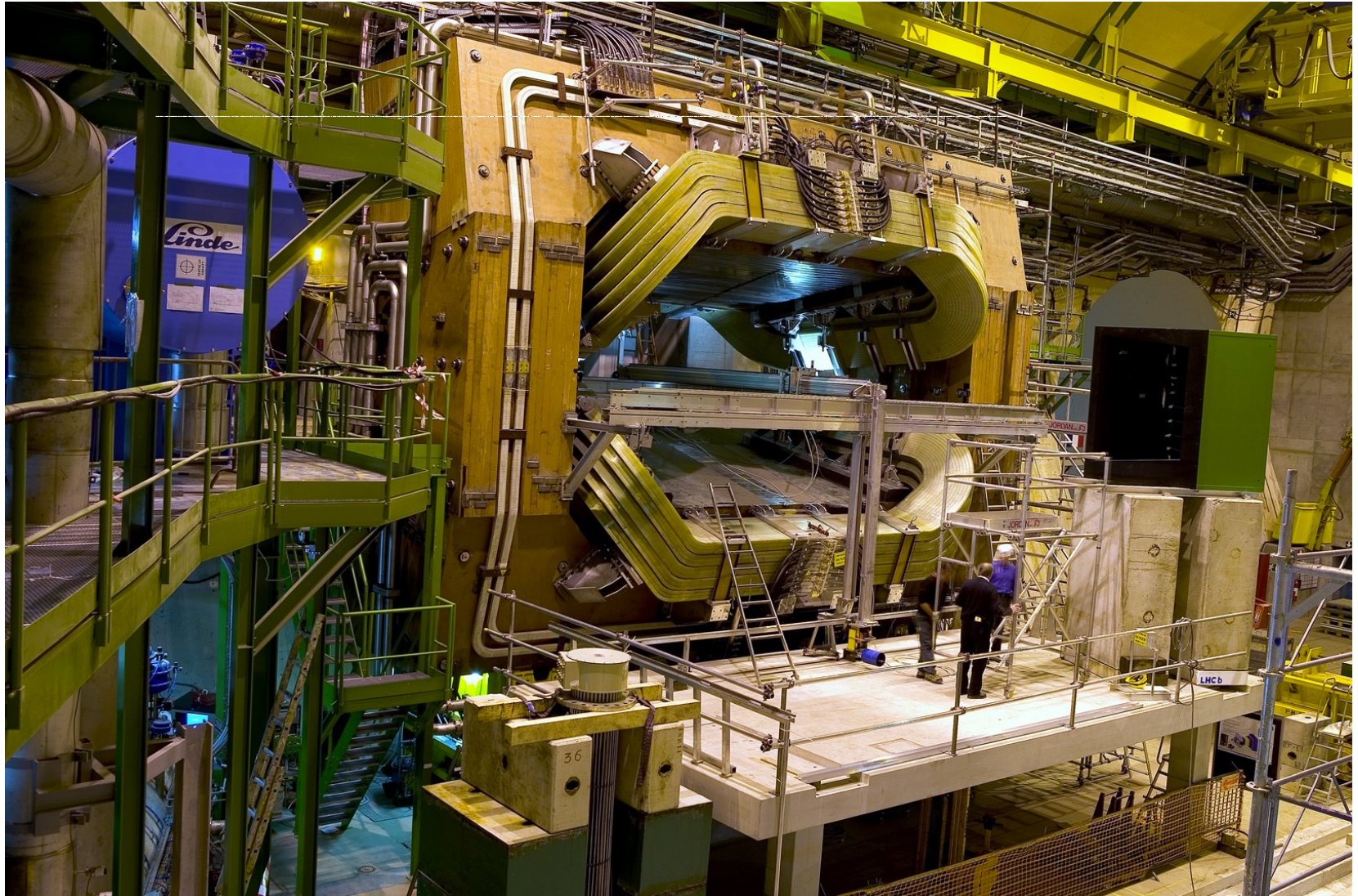


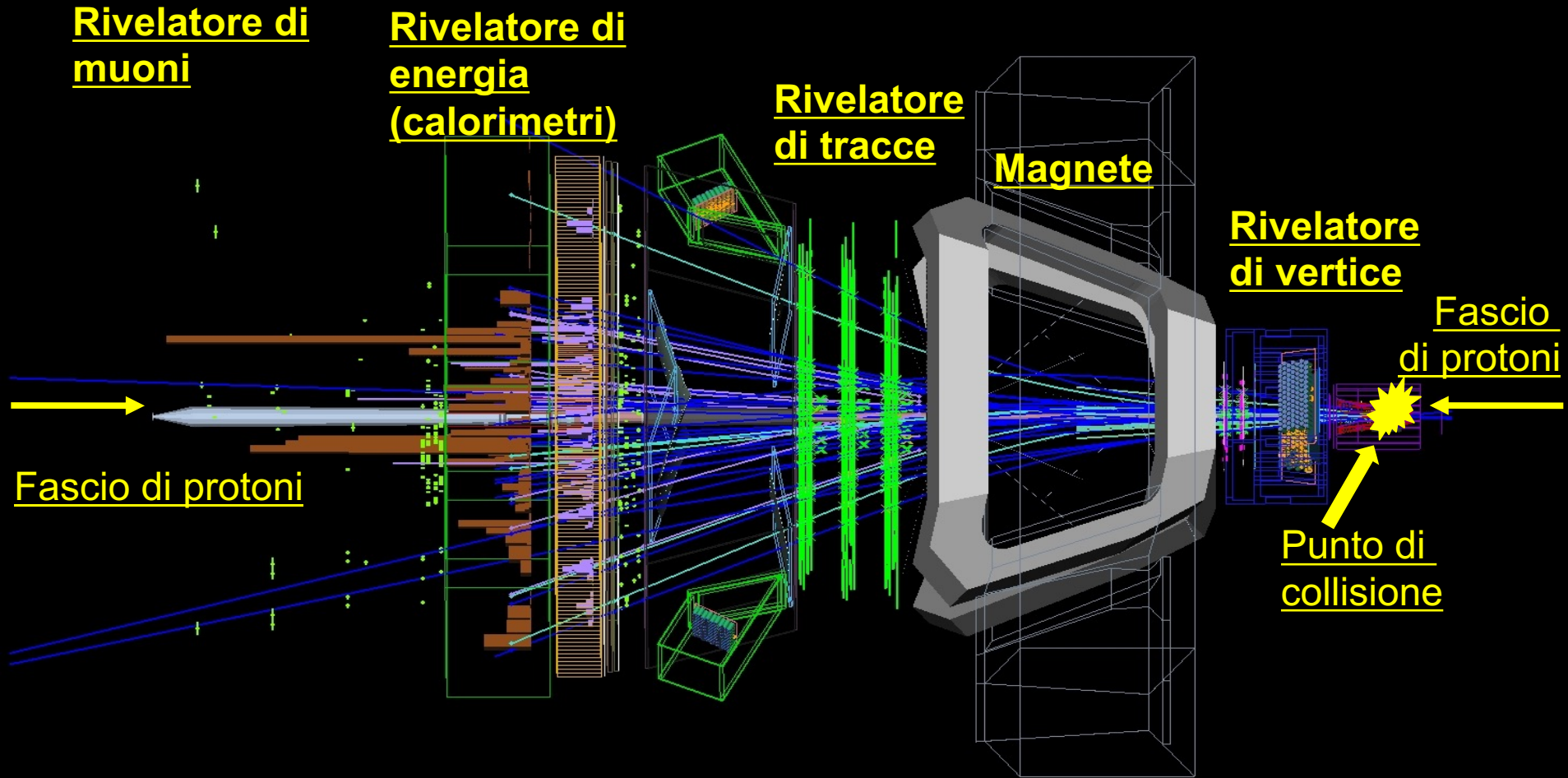
Il rivelatore LHCb e i fisici



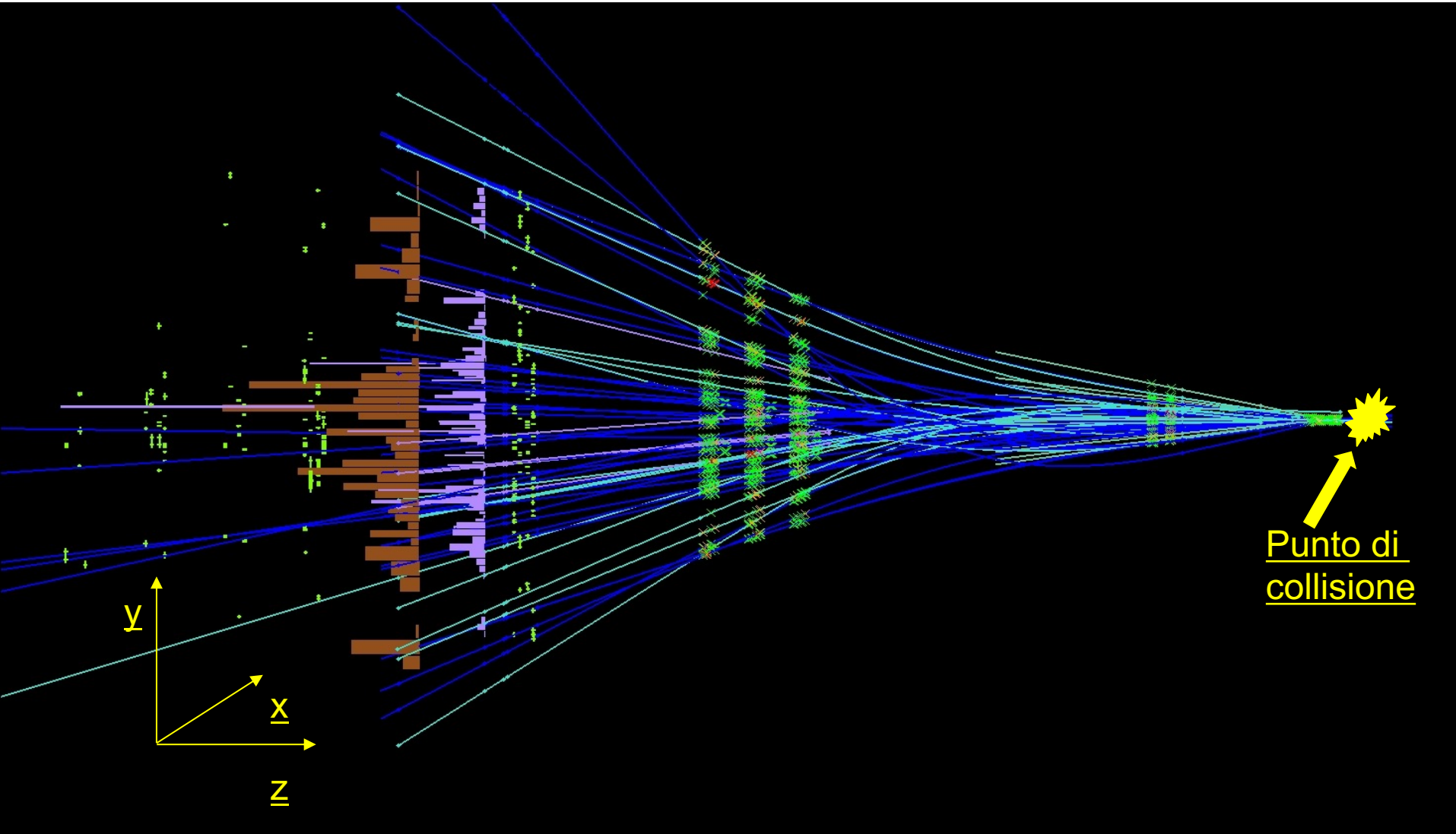
- 1280 ricercatori
- 79 istituti
- 18 nazioni



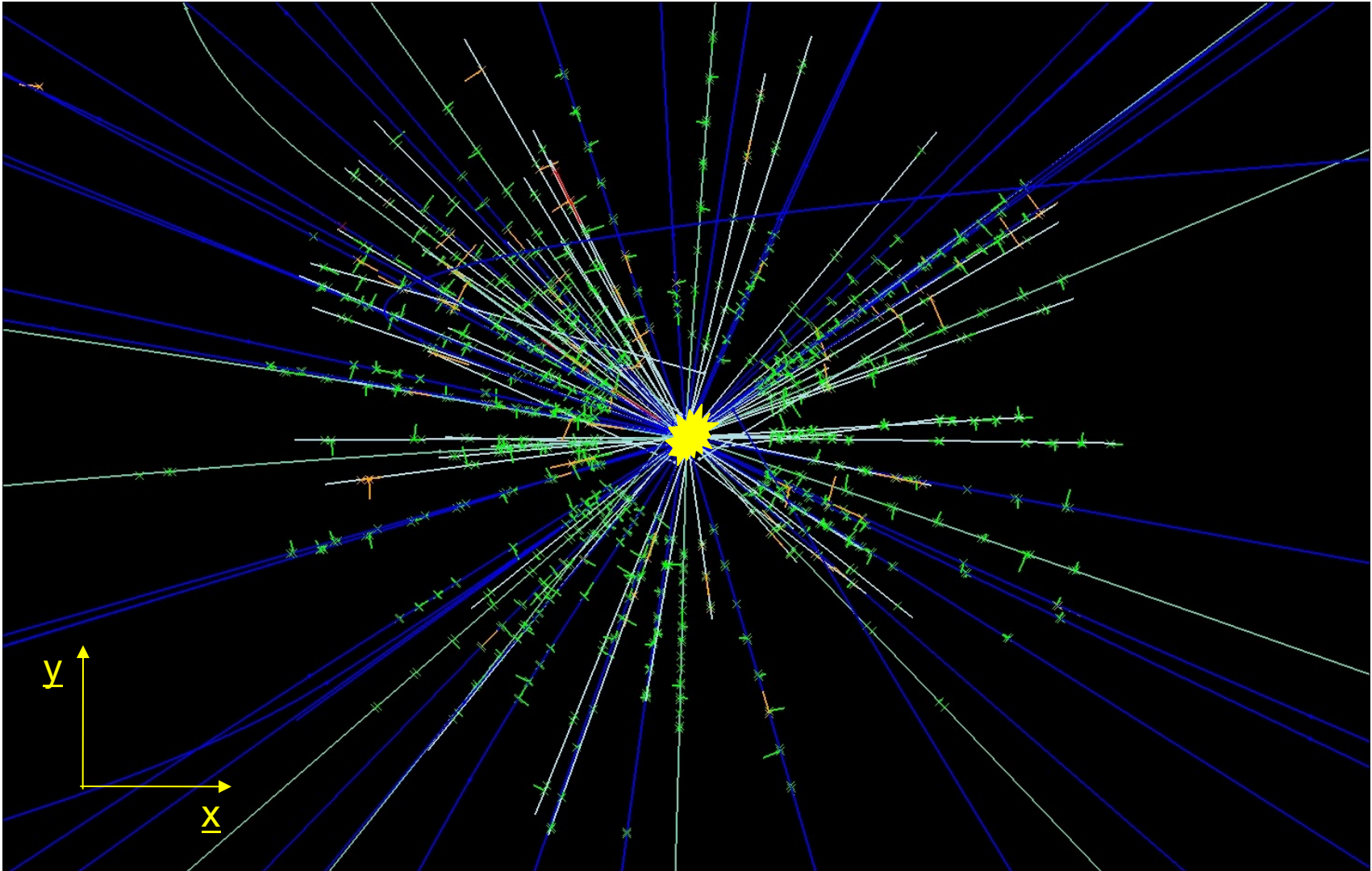




Una collisione a LHCb



Una collisione a LHCb



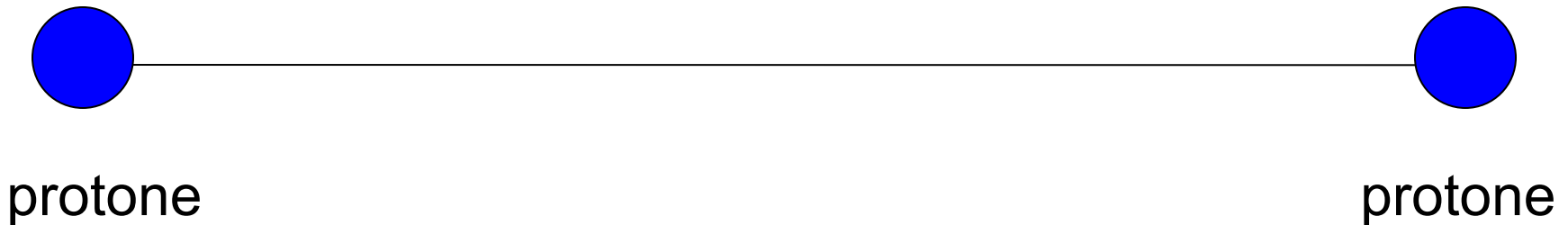


Da dove arriva il D^0 ?



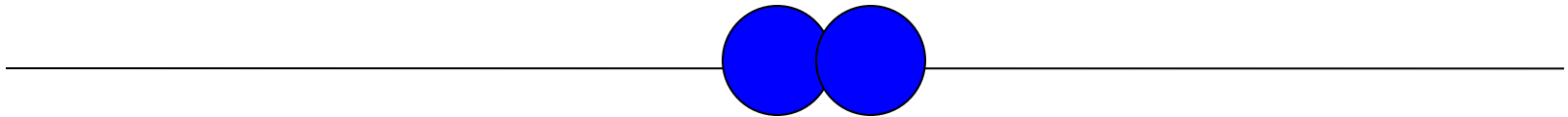
Per misurare la vita media del D^0 dobbiamo rivelare i D^0 , ma prima di cercarli devono essere prodotti

Come vengono prodotti?



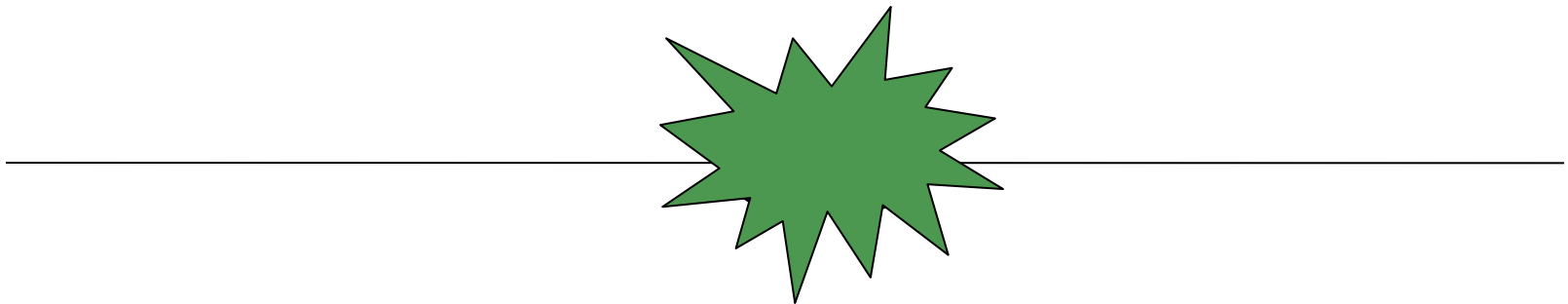


Da dove arriva il D^0 ?



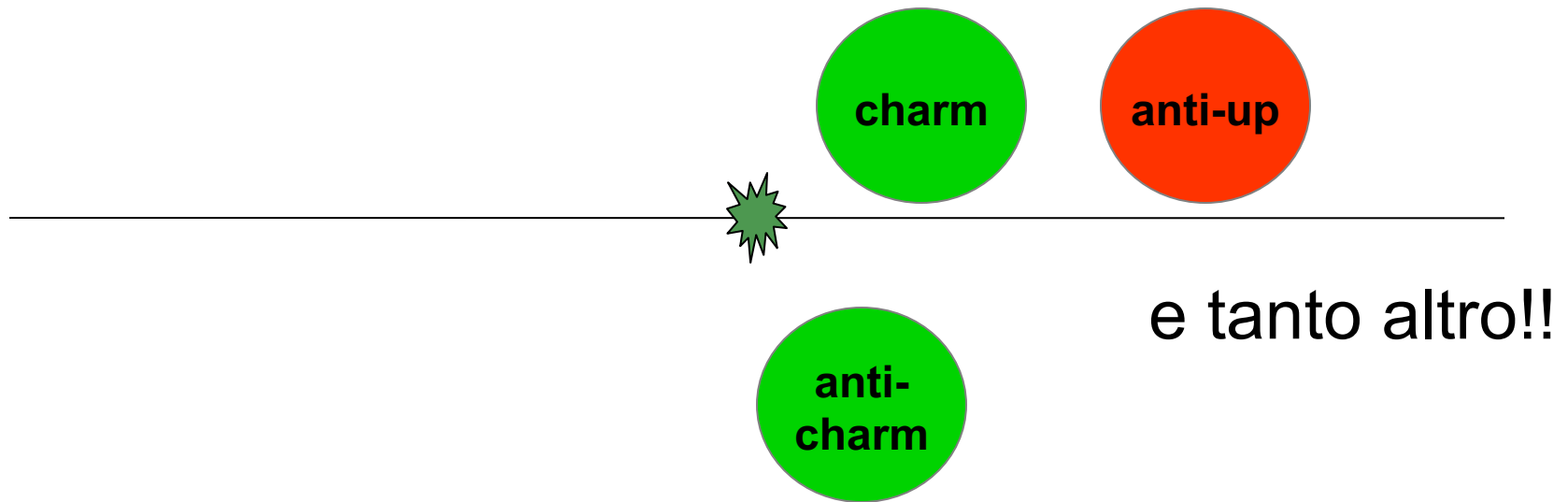


Alla ricerca di D^0

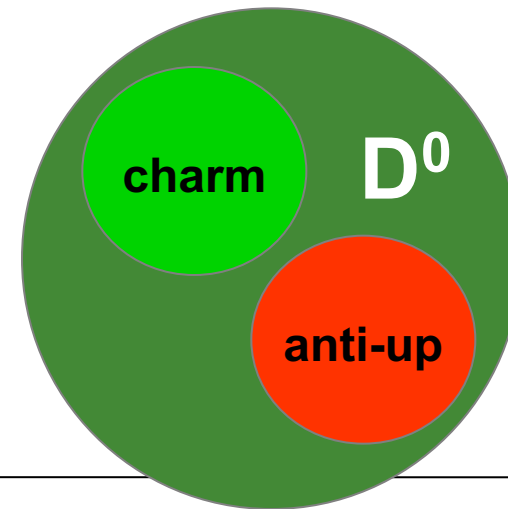




Da dove arriva il D^0 ?



Da dove arriva il D^0 ?

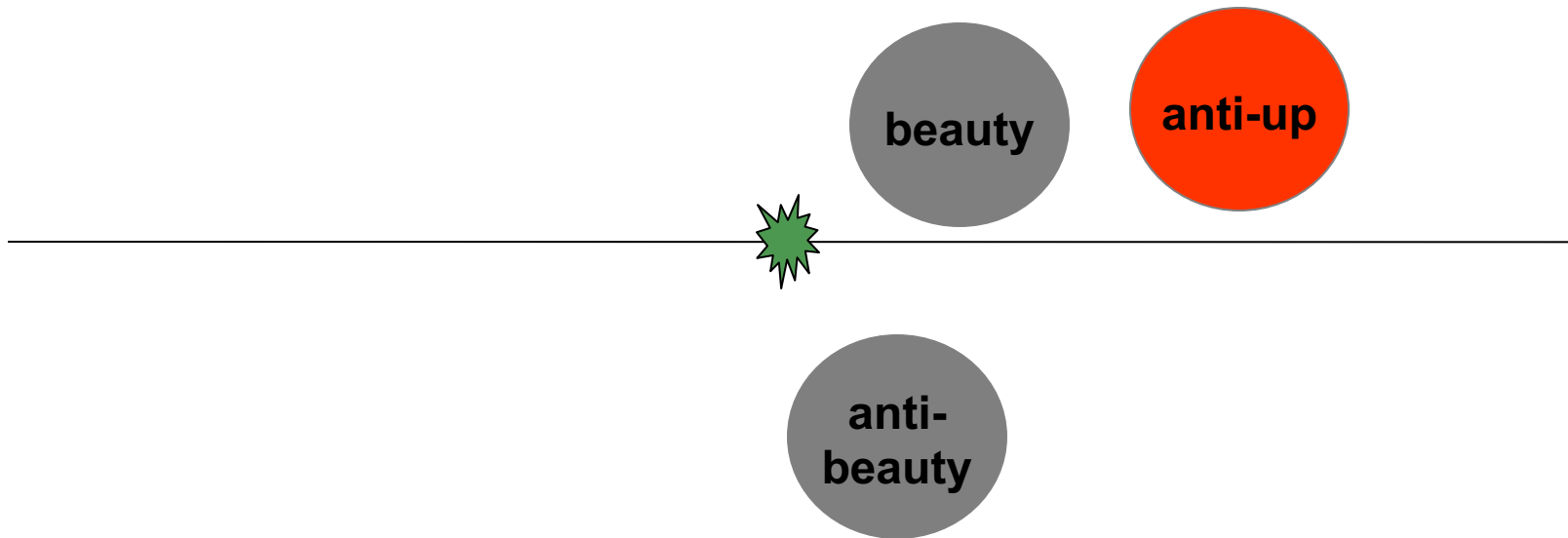


e tanto altro!!

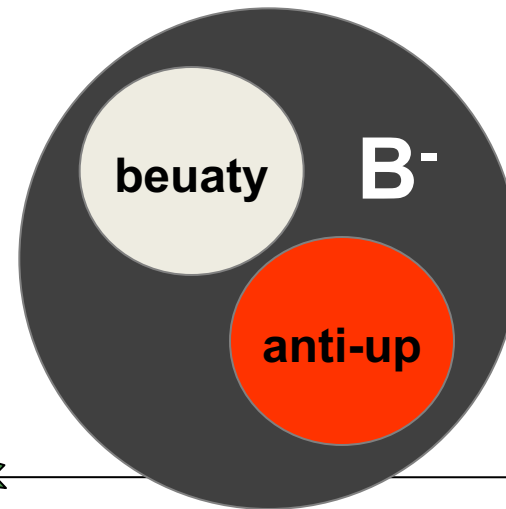
... e poi il D^0 decade in K^- e π^+
(ma questo già lo sappiamo)

Da dove arriva il D^0 ?

Quando i protoni collidono può anche accadere questo!

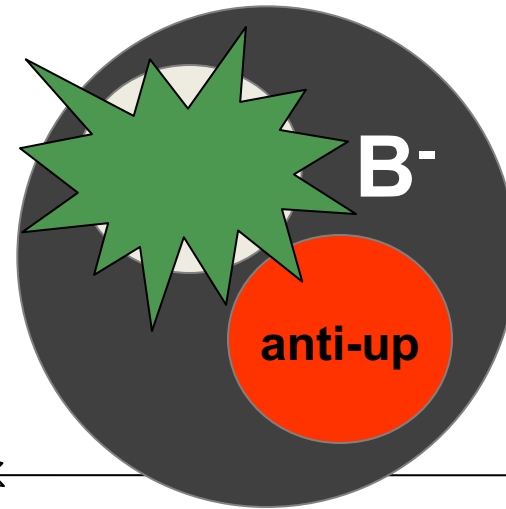


Da dove arriva il D^0 ?



dalla interazione protone-protone si produce una particella chiamata B^- ...

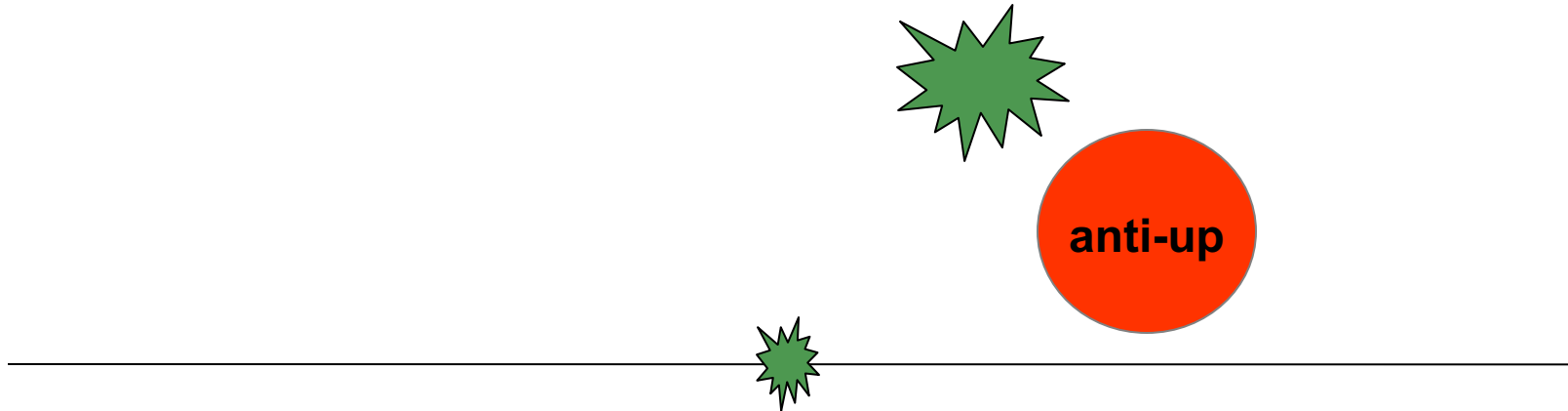
Da dove arriva il D^0 ?



... che dopo un po' decade...

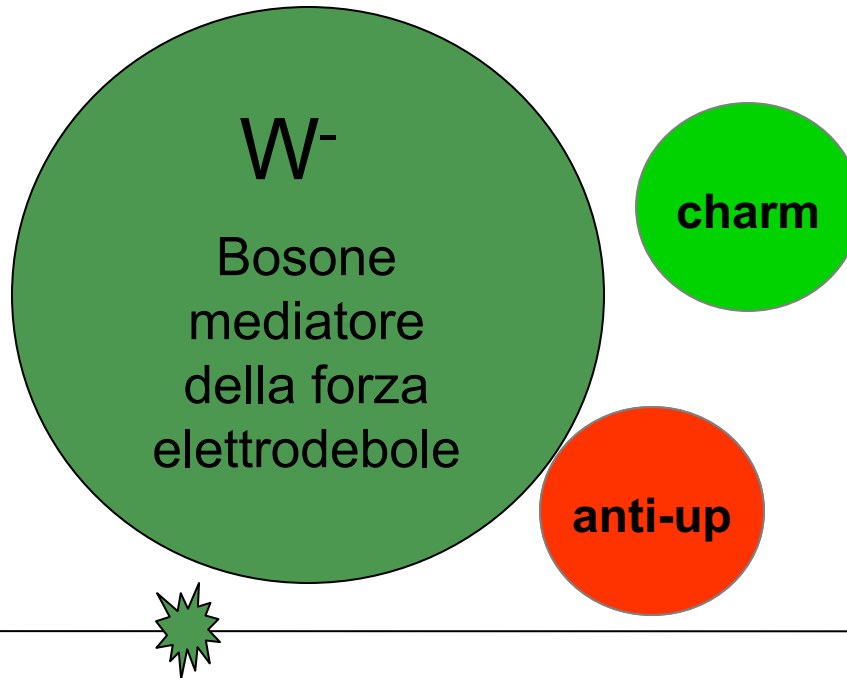


Da dove arriva il D^0 ?



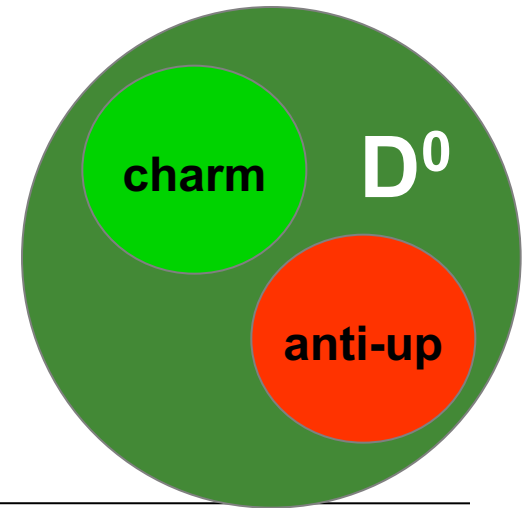
... che dopo un po' decade...

Da dove arriva il D^0 ?



... nel bosone W^-

Da dove arriva il D^0 ?

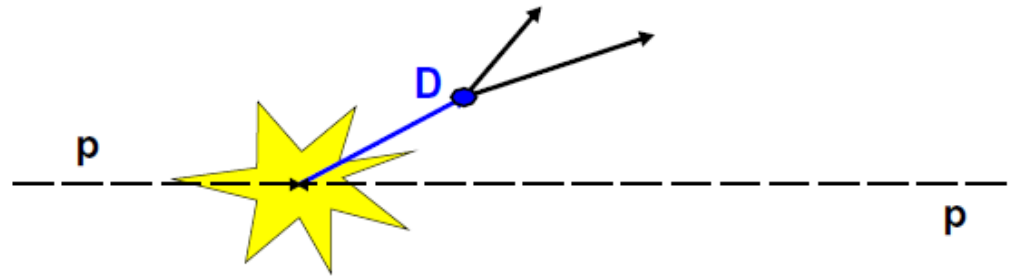


+ altro

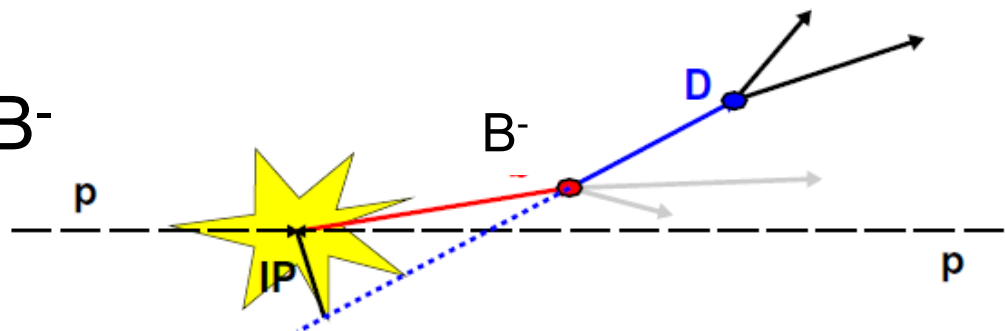
si forma così il D^0
(che poi decade...)

Quindi riassumendo il D^0 può essere prodotto nell'interazione protone-protone in almeno due modi:

Produzione diretta



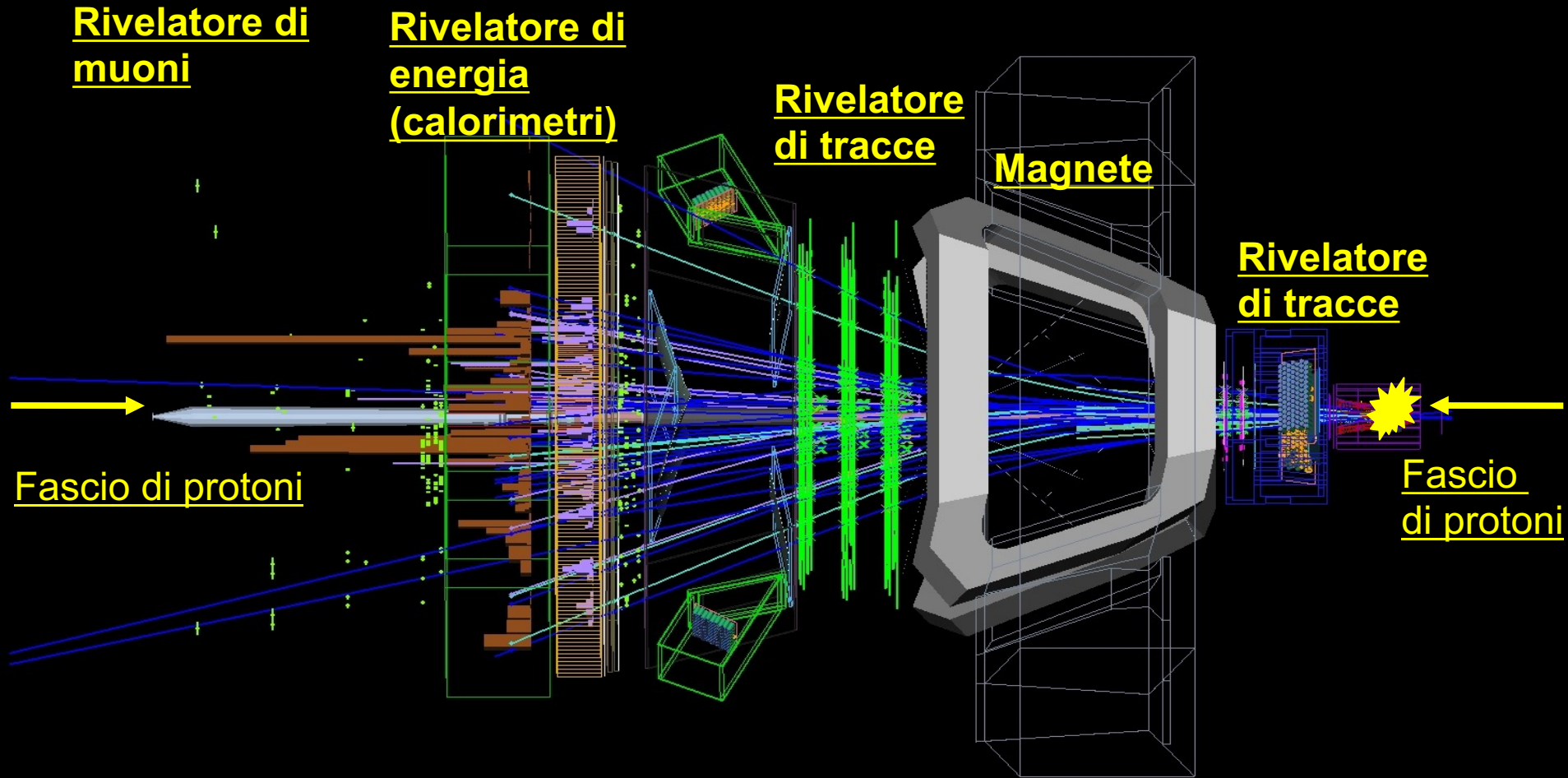
Produzione dal decadimento di una particella (mesone) B^-



PAUSA

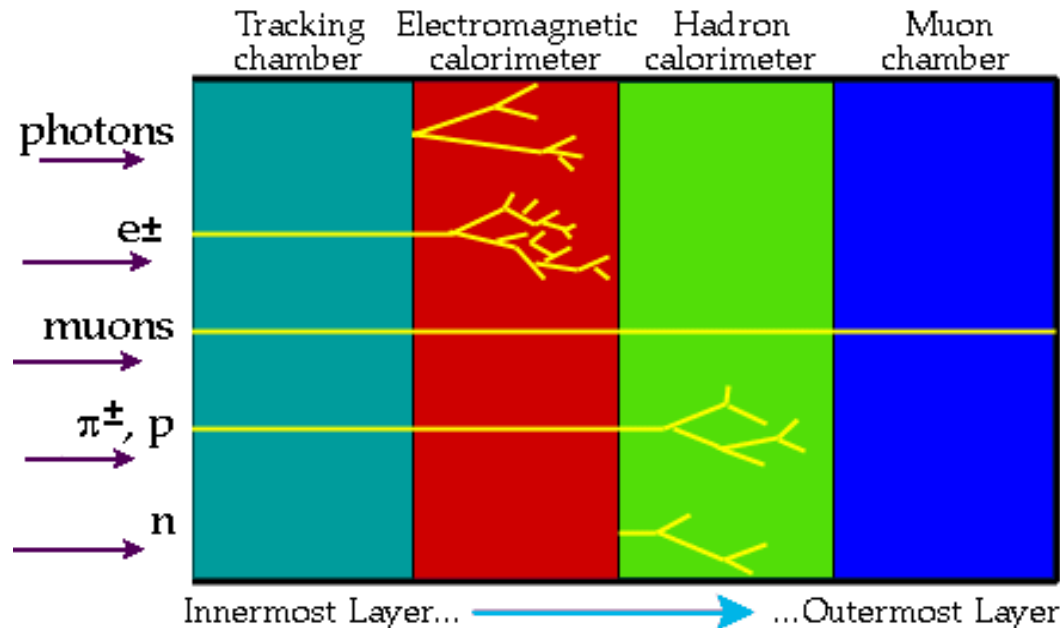
- Domande...

Come si rivela un D^0 ?



Come si rivela un D^0 ?

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





Come si rivela un D^0



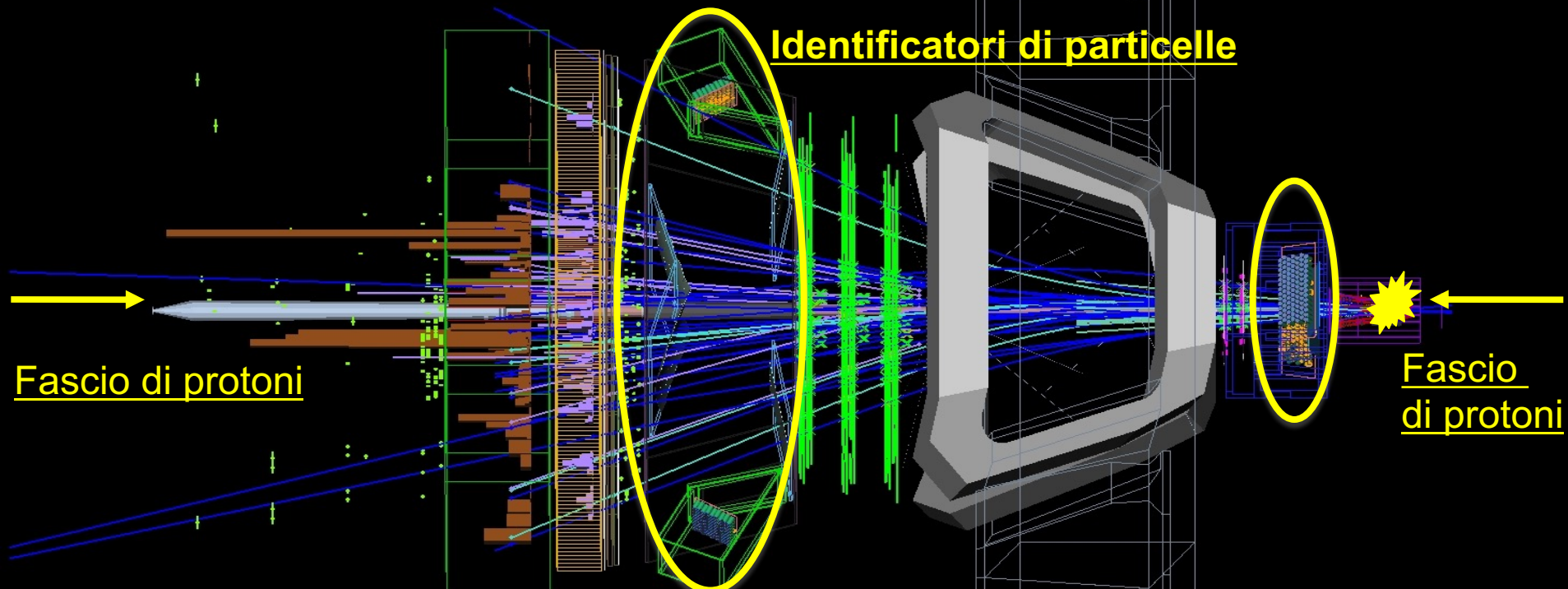
Abbiamo detto che il D^0 decade dopo un certo intervallo di tempo

Possiamo quindi rivelare i suoi prodotti di decadimento



Ma come riconosciamo che i prodotti di decadimento provengono proprio dal D^0 ?

Dobbiamo prima trovare un K^- e un π^+
tra le tante tracce prodotte da una interazione p-p



LHCb ha dei rivelatori dedicati a questo, ad ogni traccia
carica gli viene assegnata la sua identità
(questa parte viene gratis per voi oggi)

Dal PDG

$$I(J^P) = \frac{1}{2}(0^-)$$

$$m_{D^0} = 1864.86 \pm 0.13 \text{ MeV}$$

$$m_{D^\pm} - m_{D^0} = 4.76 \pm 0.10 \text{ MeV} \quad (S = 1.1)$$

Mean life $\tau =$

$$|m_{D_1^0} - m_{D_2^0}| = (1.44_{-0.50}^{+0.48}) \times 10^{10} \hbar \text{ s}^{-1}$$

$$(\Gamma_{D_1^0} - \Gamma_{D_2^0})/\Gamma = 2y = (1.60_{-0.26}^{+0.25}) \times 10^{-2}$$



Secondo la teoria della relatività, la differenza tra l'energia e l'impulso di una particella è una quantità immutabile

$$m^2 = E^2 - |\mathbf{p}|^2$$

Dal PDG

$$I(J^P) = \frac{1}{2}(0^-)$$

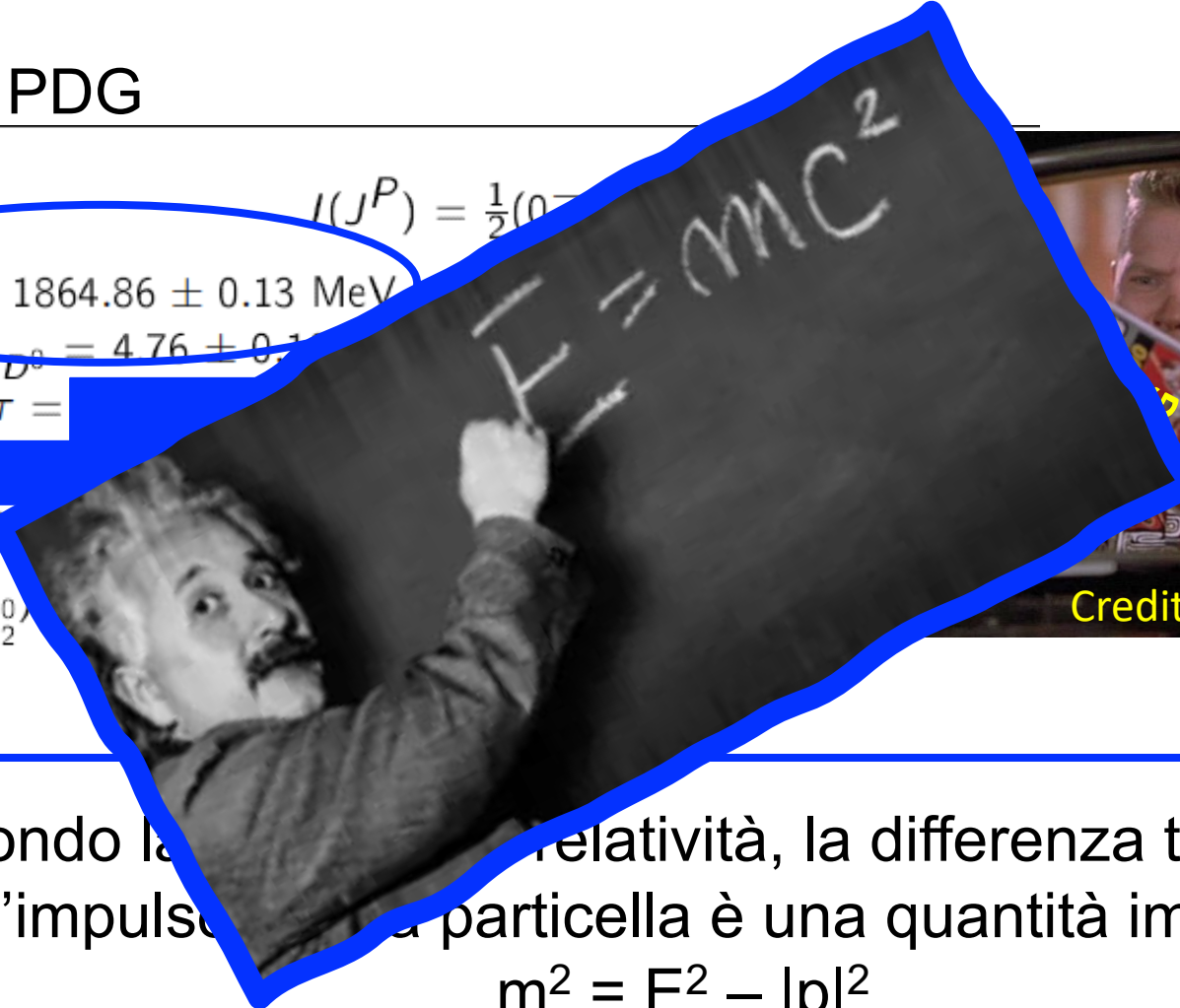
Mass $m = 1864.86 \pm 0.13 \text{ MeV}$

$m_{D^\pm} - m_{D^0} = 4.76 \pm 0.13 \text{ MeV}$

Mean life $\tau =$

$|m_{D_1^0} - m_{D_2^0}|$

$(\Gamma_{D_1^0} - \Gamma_{D_2^0})$



Credits to: Back to the future

Secondo la relatività, la differenza tra l'energia
e l'impulso di una particella è una quantità immutabile

$$m^2 = E^2 - |p|^2$$

Riconoscere il D^0

D^0

$$I(J^P) = \frac{1}{2}(0^-)$$

Mass $m = 1864.86 \pm 0.13$ MeV

$$m_{D^\pm} - m_{D^0} = 4.76 \pm 0.10 \text{ MeV} \quad (S = 1.1)$$

Mean life $\tau =$

$$|m_{D_1^0} - m_{D_2^0}| = (1.44^{+0.48}_{-0.50}) \times 10^{10} \hbar \text{ s}^{-1}$$

$$(\Gamma_{D_1^0} - \Gamma_{D_2^0})/\Gamma = 2y = (1.60^{+0.25}_{-0.26}) \times 10^{-2}$$

$$|q/p| = 0.88^{+0.16}_{-0.15}$$

Quanto pesa un D^0 ?

3.1×10^{-27} Kg

$$K^- \pi^- 2\pi^+ \text{ average relative strong phase } \delta^{K 3\pi} = (118^{+60}_{-50})^\circ$$



L'impulso (quantità di moto) di una particella

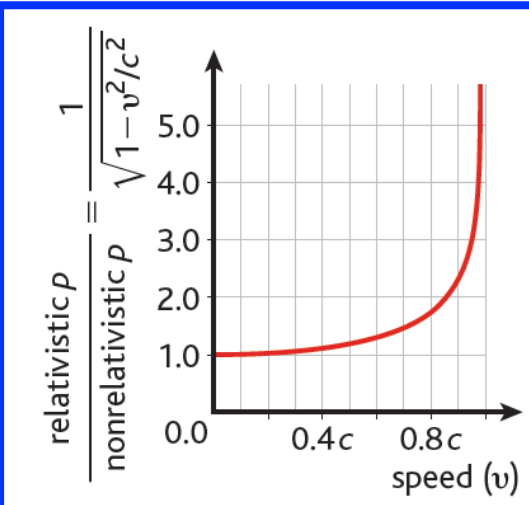


Secondo la teoria della relatività, la differenza tra l'energia e l'impulso di una particella è una quantità immutabile

$$m^2 = E^2 - |p|^2$$

In fisica classica: $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$

In fisica relativistica (particelle che viaggiano a velocità prossime a quelle della luce), la formula è un po' più complicata complicata:



$$\vec{p} = \gamma \cdot m \cdot \vec{v}$$

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

Per particelle non relativistiche, cioè si ha

$$v \ll c$$

$$\frac{v^2}{c^2} \rightarrow 0, \gamma \rightarrow 1$$

La massa del D^0

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

$m^2 = E^2 - |p|^2$ vale anche per i prodotti di decadimento delle particelle visto che energia ed impulso si devono conservare

La massa del K^- e la massa del π^+ le conosciamo con ottima precisione, basta guardare il PDG!

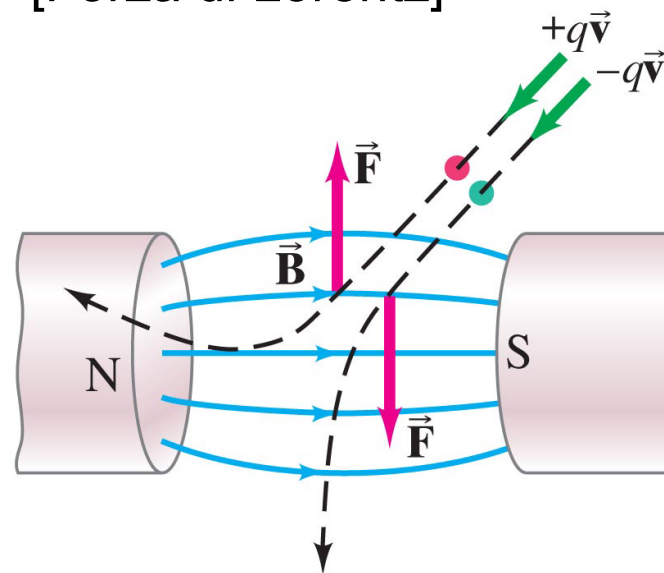
Dobbiamo quindi misurare l'impulso (la quantità di moto) delle due particelle

Come si misura l'impulso di una particella carica?

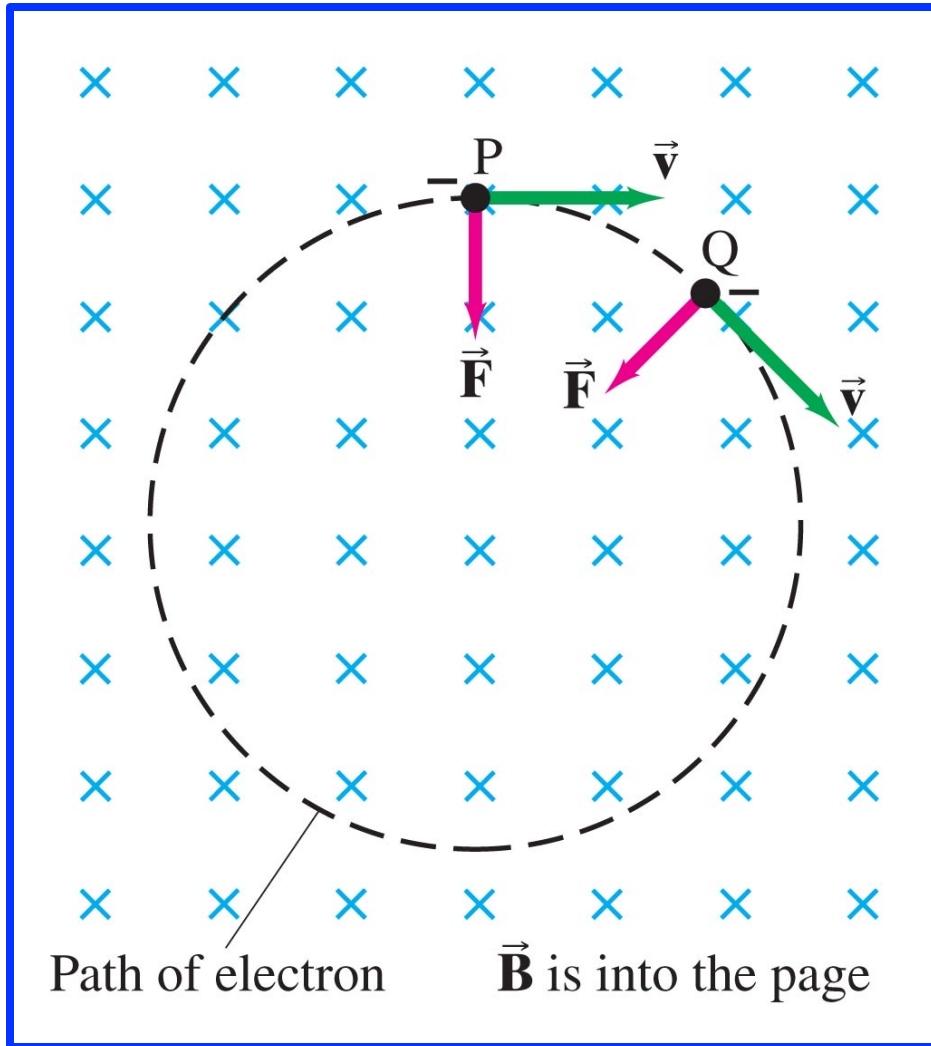
Una particella carica che attraversa un campo magnetico è soggetta ad una forza perpendicolare alla direzione della sua velocità e del campo magnetico. La direzione della forza dipende dal segno della carica

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

[Forza di Lorentz]



Come si misura l'impulso di una particella carica?



$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

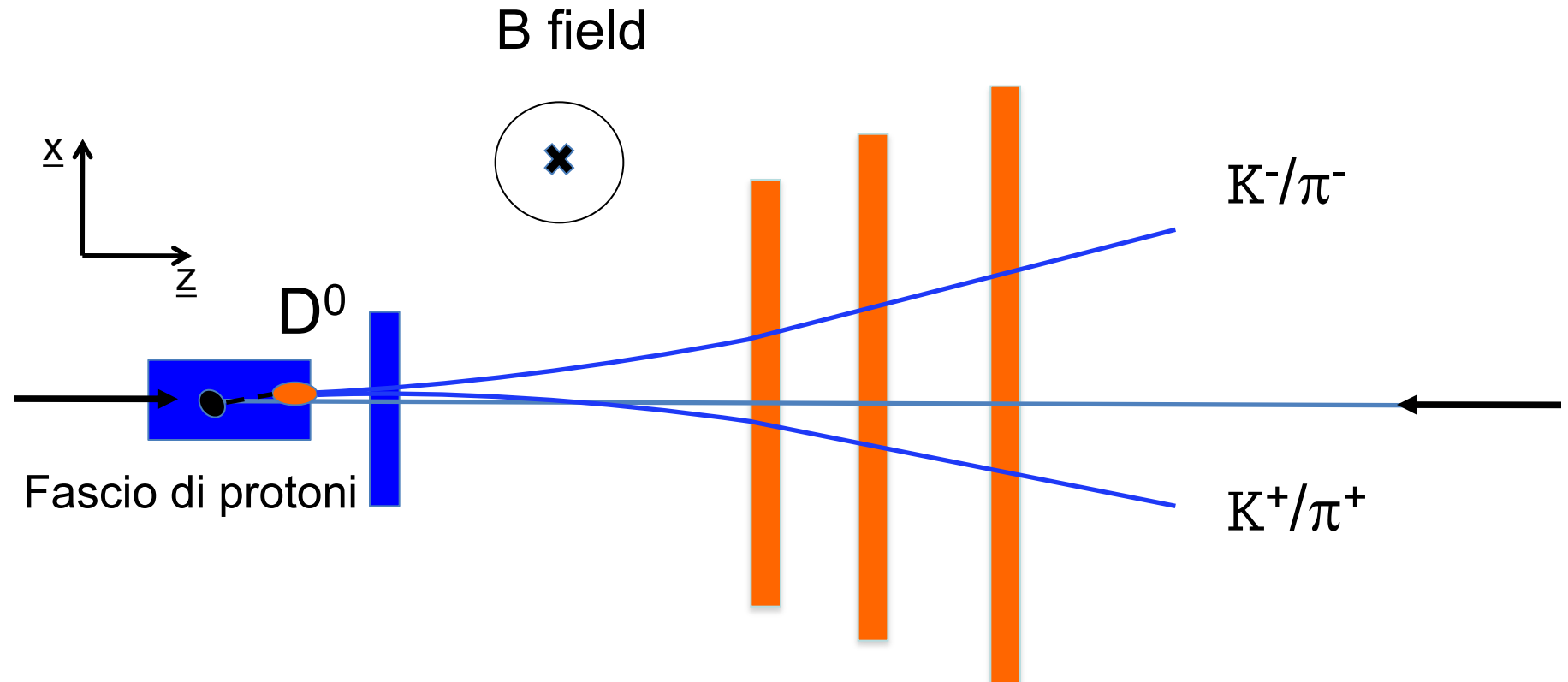
Se \vec{v} e \vec{B} sono perpendicolari il prodotto vettoriale diventa

$$F = qvB$$

$$F = ma \Rightarrow a = \frac{v^2}{R}$$

$$qvB = m \frac{v^2}{R} \Rightarrow R = \frac{p}{qB}$$

Come si misura l'impulso di una particella carica?



La presenza del campo magnetico ci permette:

- 1) di capire se la particella carica è positiva o negativa
- 2) dalla curvatura della particella misuriamo l'impulso della particella

$$p = RqB$$

Come si rivela un D^0 ?

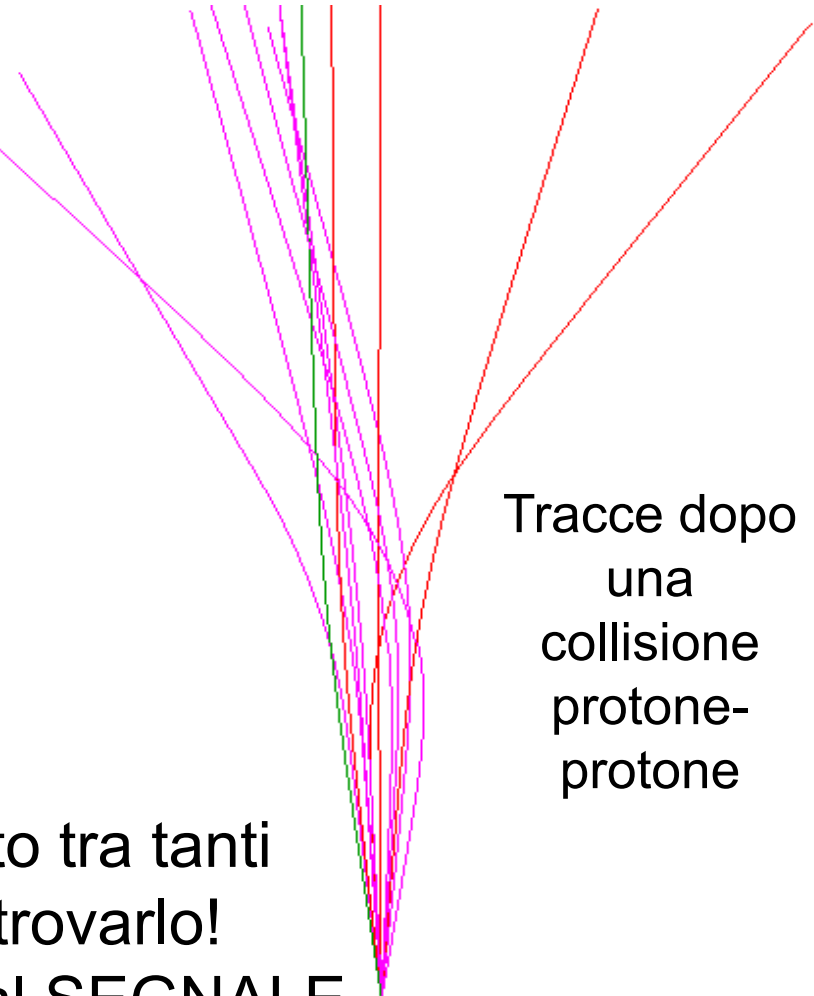
- ✓ Abbiamo identificato i K e i π
- ✓ Abbiamo misurato l'impulso delle tracce
- ✓ Abbiamo identificato le tracce negative e le tracce positive grazie alla curvatura delle tracce indotta dal campo magnetico

Ora possiamo combinare tutti i K^- e i π^+ per misurare la massa a partire dall'impulso delle singole tracce e vedere se il valore è quello del D^0



Come si rivela un D^0 ?

- ✓ Ma in un evento quanti K^- e i π^+ ci sono?
- ✓ Se nell'evento c'è un D^0 abbiamo
 - ✓ un K^- e un π^+ che vengono da D^0 SEGNALE
 - ✓ tanti K^- e i π^+ prodotti direttamente dall'interazione protone-protone FONDO



Tracce dopo
una
collisione
protone-
protone

Quindi il nostro segnale è nascosto tra tanti eventi di fondo! Non sarà facile trovarlo!

Il FONDO può essere anche simile al SEGNALE



Come si rivela un D^0 ?



Abbiamo qualche informazione in più per distinguere il
SEGNALE dal FONDO ?

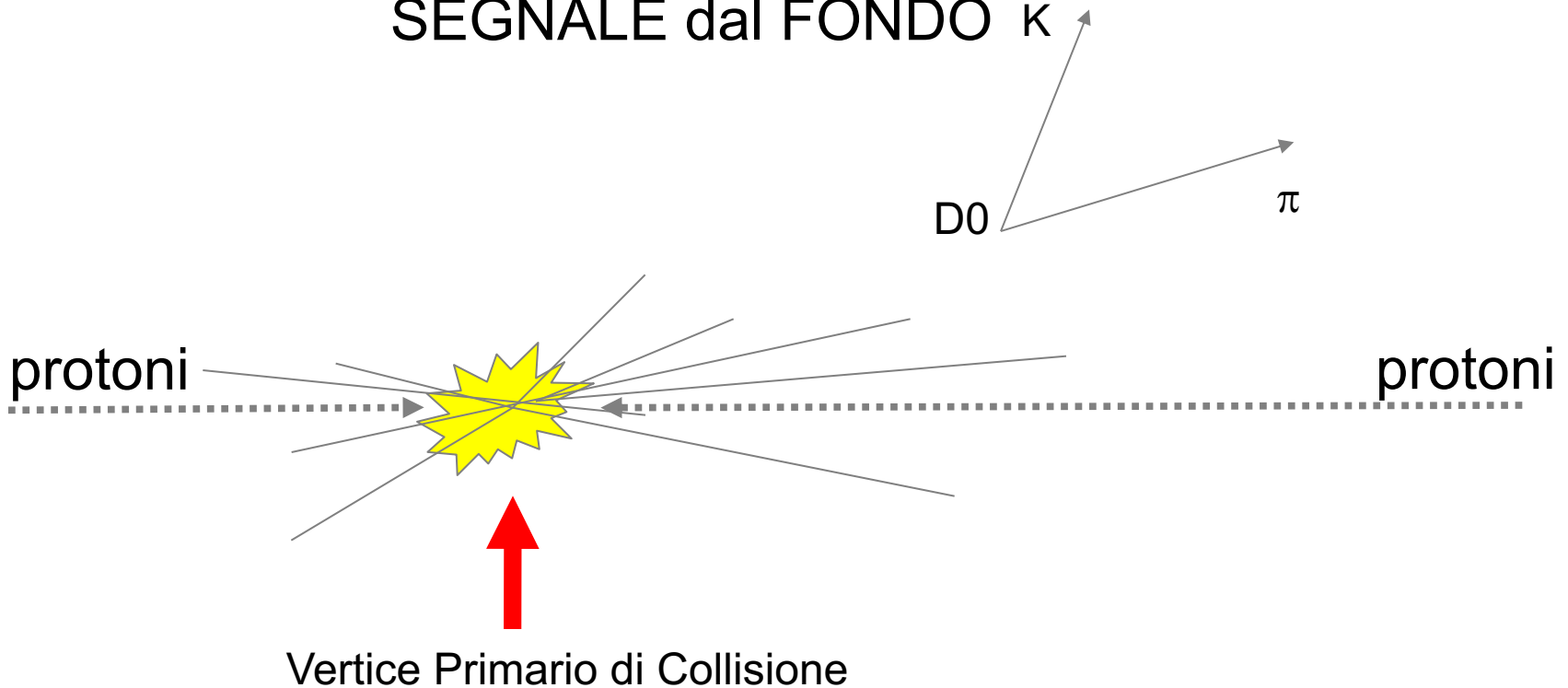
Abbiamo detto che il D^0 decade dopo un po' di tempo

Quindi percorre un certo spazio

$$x = v \cdot t$$

Come si rivela un D^0 ?

Il D^0 decade »lontano« dal dove i protoni collidono
Allora abbiamo qualche speranza per distinguere il
SEGNALE dal FONDO κ

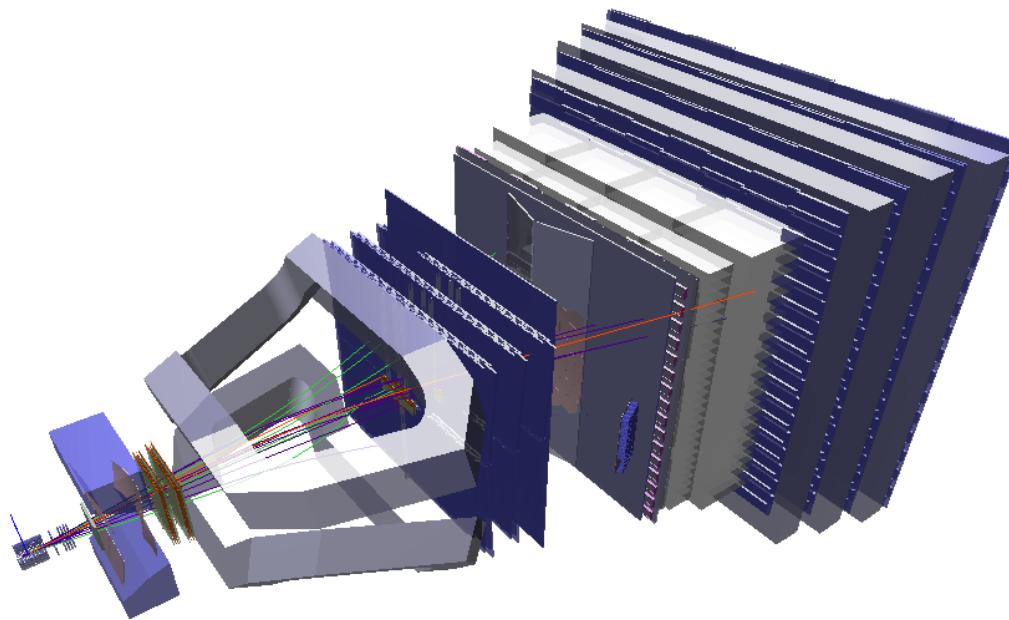


Come si rivela un D^0 ?

Il D^0
Allor

dono
iere il

proto
.....



→
 π

.....
protoni

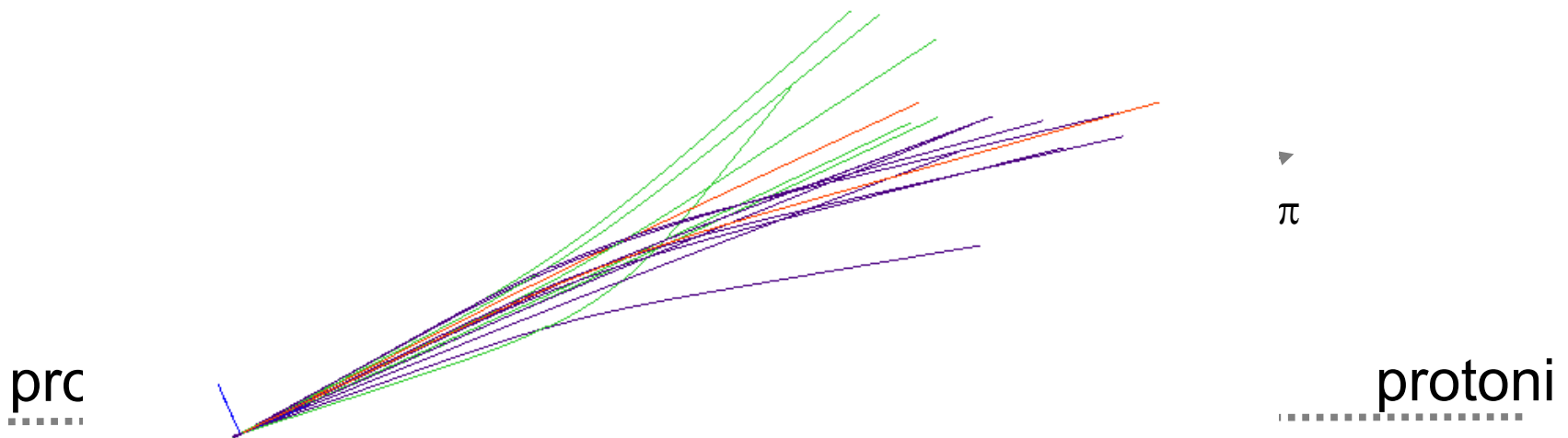
■
Vertice Primario di Collisione



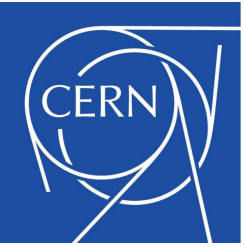
Come si rivela un D^0 ?



Il D^0 decade «lontano» dal dove i protoni collidono
Al e il



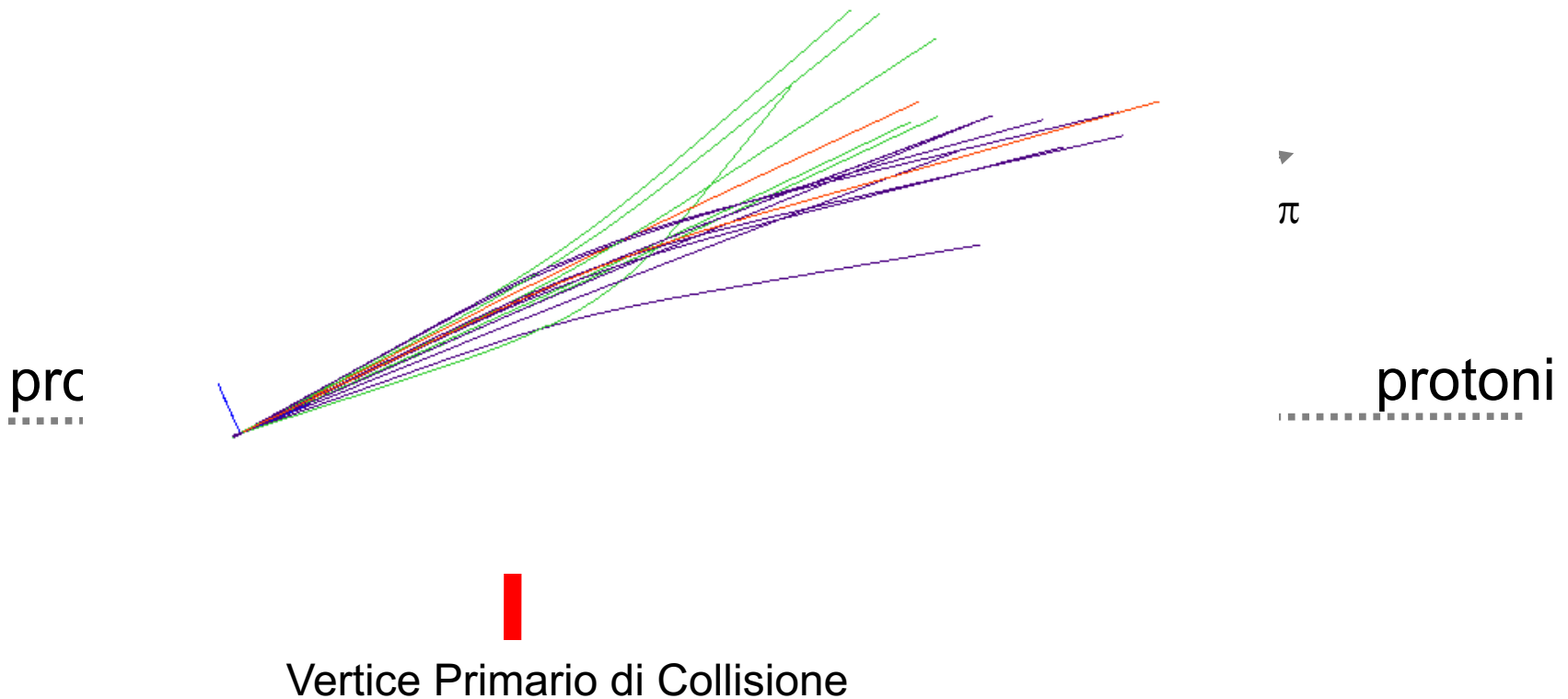
|
Vertice Primario di Collisione



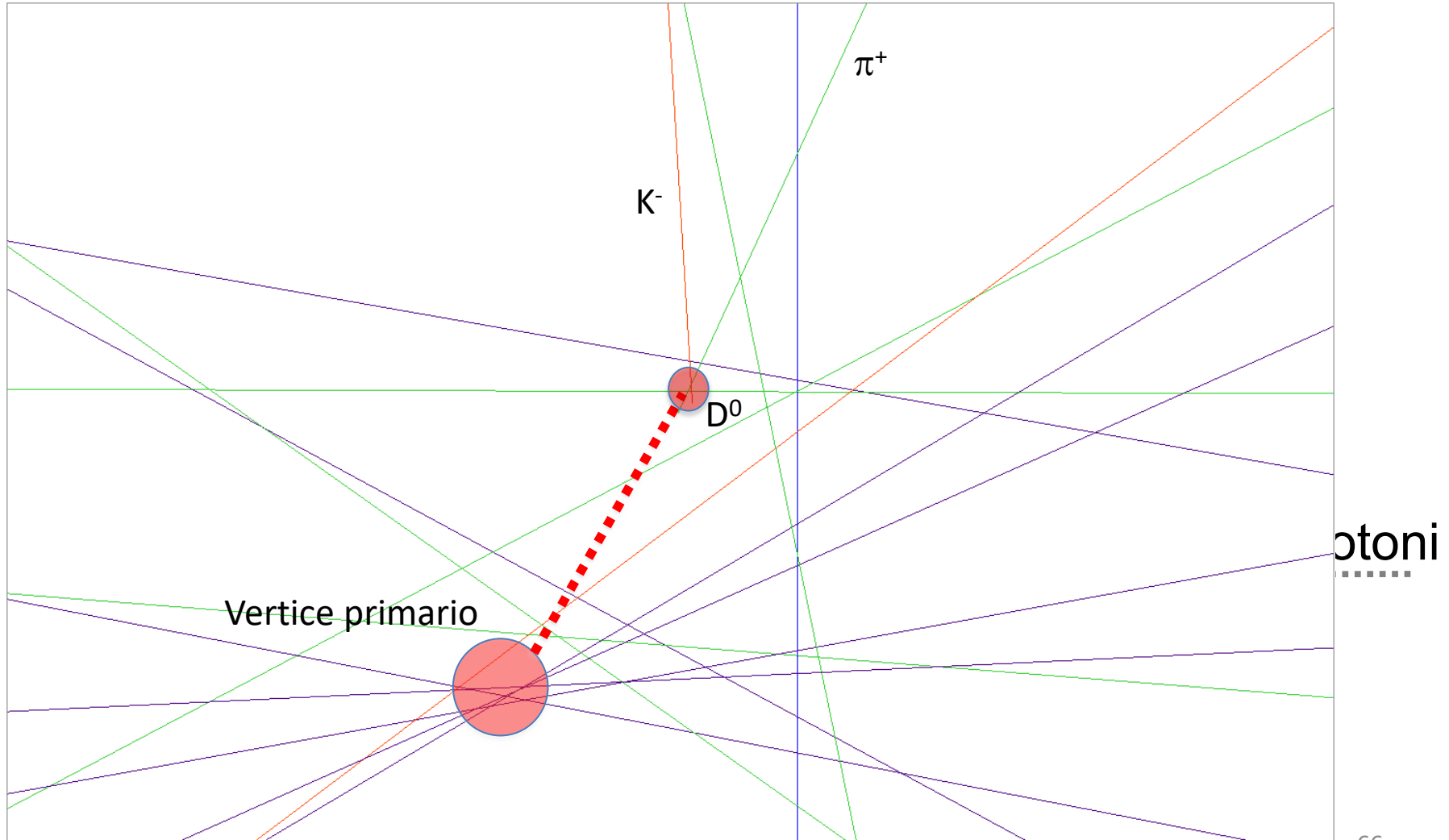
Come si rivela un D^0 ?



Il D^0 decade «lontano» dal dove i protoni collidono
Al e il



Come si rivela un D^0 ?





Come si misura la vita media del D^0 ?



Siamo sicuri che questa formula è corretta per il nostro caso?

$$x = v \cdot t$$



Come si misura la vita media del D^0 ?



Siamo sicuri che questa formula è corretta per il nostro caso?

$$x = v \cdot t$$



Chiediamolo ad Albert!



Come si misura la vita media del D^0 ?



Siamo sicuri che questa formula è corretta per il nostro caso?

$$x = v \cdot t$$



“Se il D^0 si muove ad una velocità prossima a quella della luce la vita media che misuri nel sistema di riferimento del D^0 non è la stessa di quella che misuri tu a Ginevra mentre la vedi volare”

$$x = \gamma \cdot \beta \cdot c \cdot \tau$$

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

FINE PRIMA PARTE

- Domande...



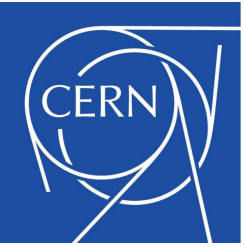
L'ESERCIZIO DI OGGI



Obiettivi dell'esercizio



l obiettivo: riempire un istogramma con eventi di massa del D^0 , selezionando un K e un π per ogni evento



I OBIETTIVO



- ✓ Il programma visualizza le tracce ricostruite dopo una interazione protone-protone in LHCb
- ✓ Dovete trovare tra tutte le tracce di un evento
 - ✓ una coppia K^- e un π^+ (o un $K^+\pi^-$)
 - ✓ la cui misura degli impulsi quando opportunamente combinata ha un valore di massa prossimo a quello della massa del D^0
 - ✓ Il punto in cui le tracce K^- e un π^+ si intersecano (vertice di decadimento) sia distaccato dal vertice primario (quella da cui vengono la maggior parte delle tracce)



I OBIETTIVO



Quando abbiamo riconosciuto molti eventi, li salviamo e facciamo un istogramma della massa, cosa otteniamo?



(che cosa è un istogramma?)

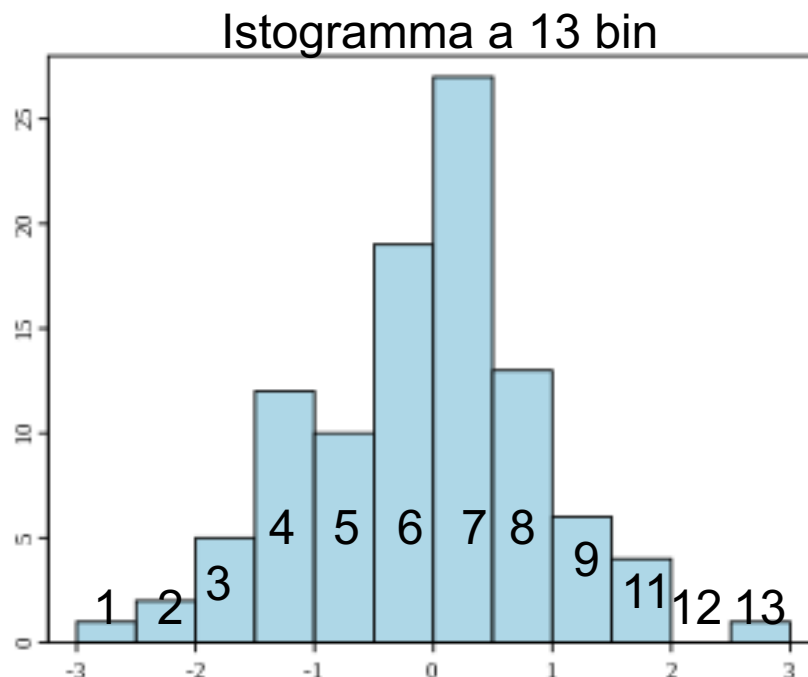


Se facciamo n misure di una stessa grandezza, possiamo classificarla in “bin”.

Un bin è un rettangolo del grafico

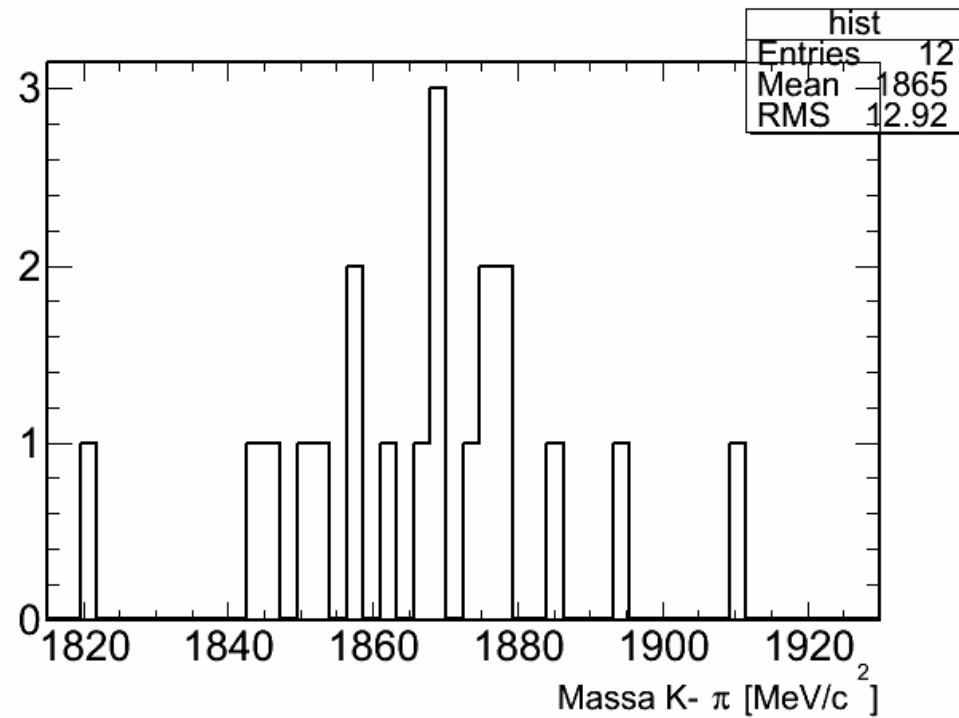
Se misuro $x = -0.2$ aumento di una unità il bin “6” all’interno dell’intervallo di

L’altezza di un rettangolo 6 rappresenta il numero di volte che la mia misura è all’interno della larghezza della base del bin 6





I OBIETTIVO





Obiettivi dell'esercizio



Il obiettivo: riempire un istogramma con eventi di massa del D^0 , selezionando un K e un π per ogni evento; una volta fatto mandare il file che scaricherete alla mia e-mail:

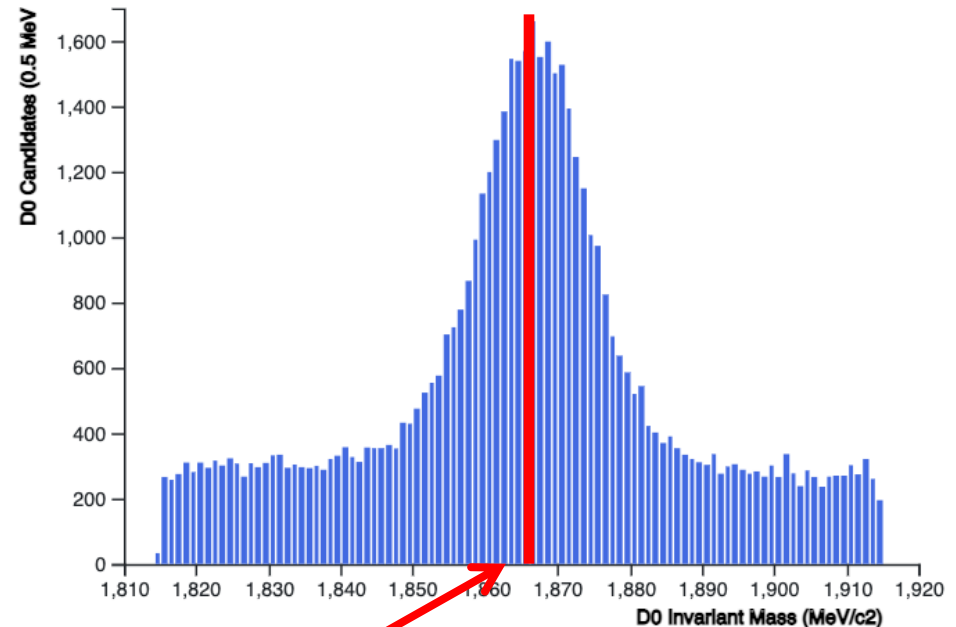
stefano.perazzini@bo.infn.it

Il obiettivo: misurare il valore della massa del D^0

Gli eventi da voi raccolti sono troppo pochi per fare una misura precisa. Il programma vi fornisce un istogramma con più eventi

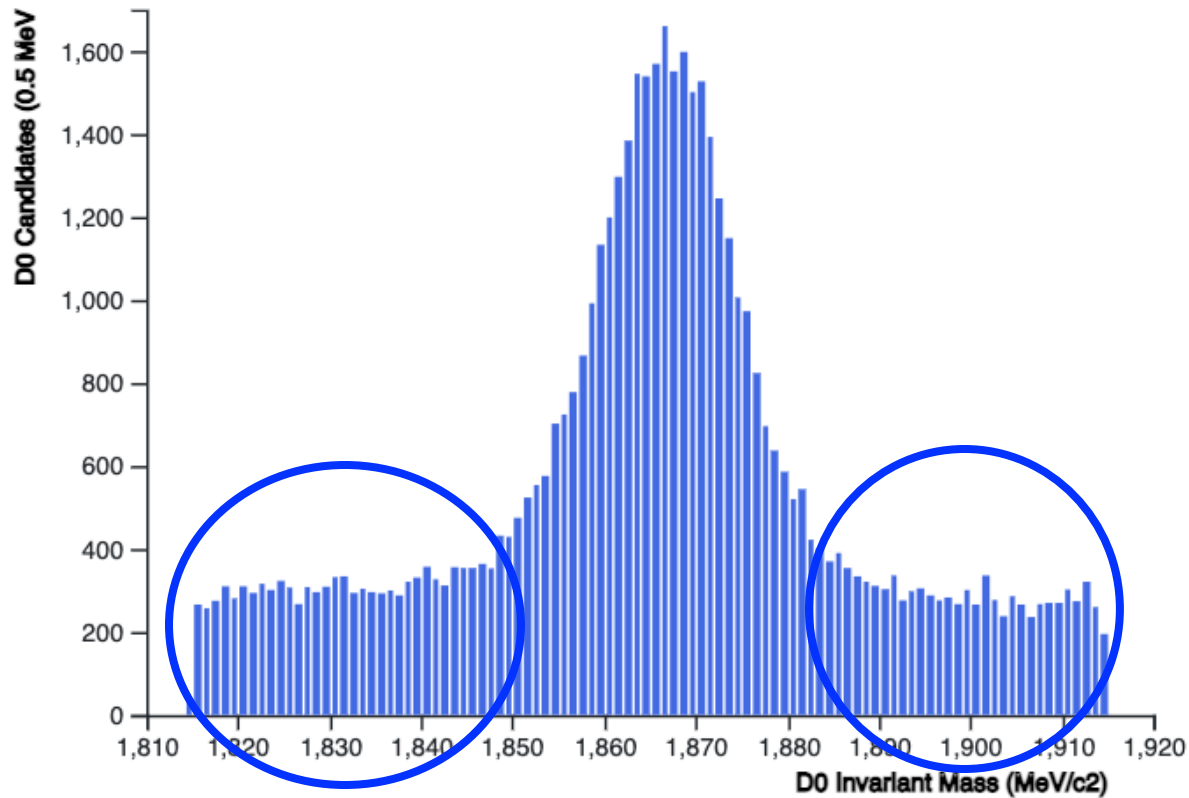
Ogni misura ha sempre un errore

Per diminuire l'errore bisogna aumentare il numero di misure



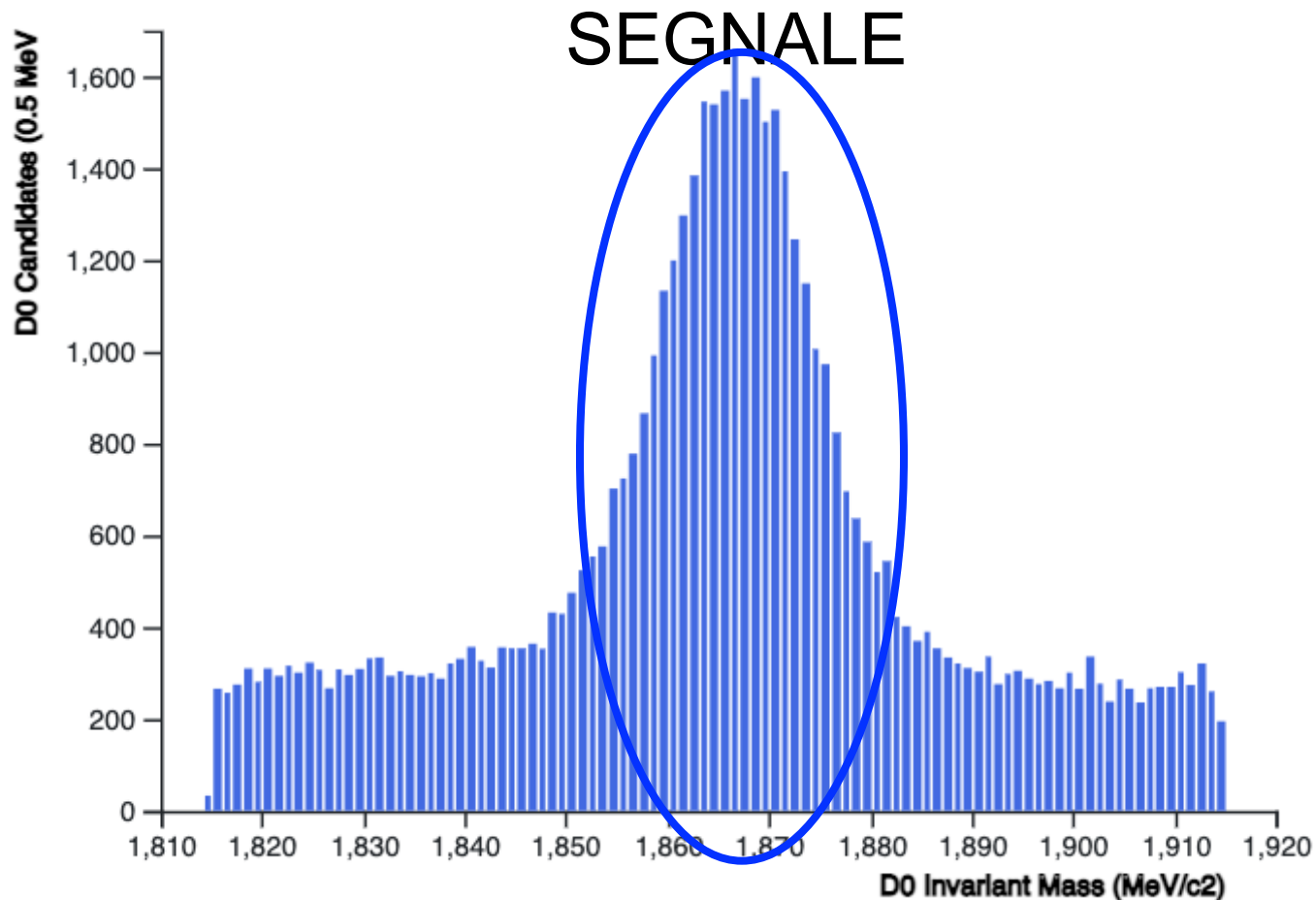
$$m(D_0) = (1864.84 \pm 0.17) \text{ MeV}/c^2$$

La distribuzione mostra due andamenti
FONDO



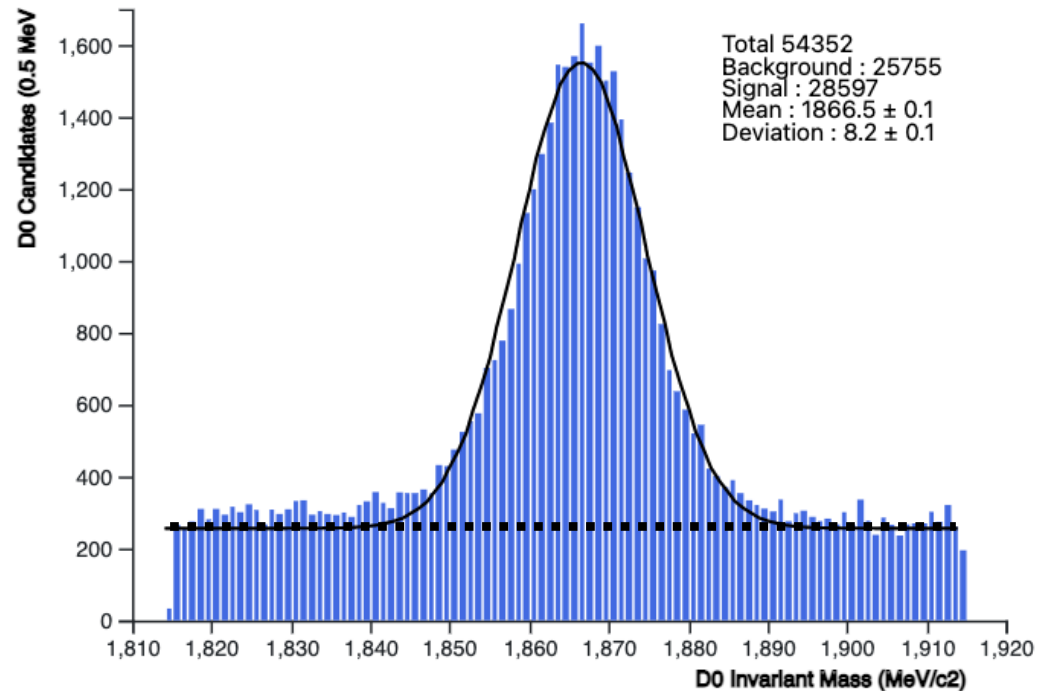
Come si rivela un D^0 ?

La distribuzione mostra due andamenti



II OBIETTIVO

Adattare (fare un fit) un
modello parametrico per il
SEGNALE → Gaussiana
FONDO → Retta

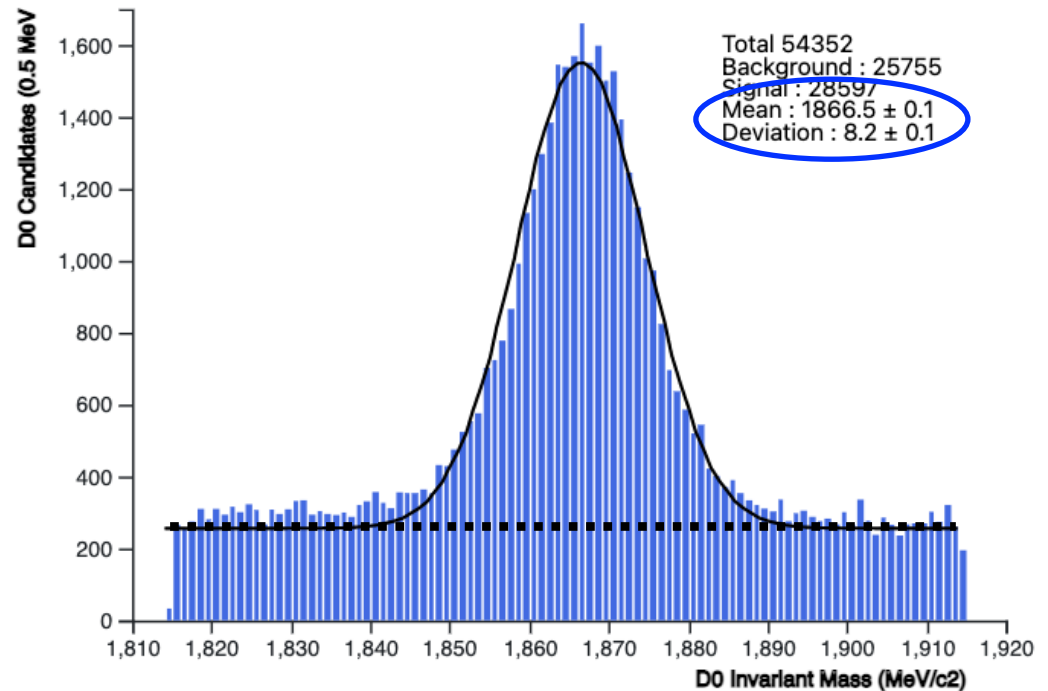


La procedura di “fit” cerca i valori dei parametri che
meglio si adattano ai dati

Il valore del parametro μ è la misura di massa del D^0

II OBIETTIVO

Adattare (fare un fit) un
modello parametrico per il
SEGNALE → Gaussiana
FONDO → Retta



La procedura di “fit” cerca i valori dei parametri che
meglio si adattano ai dati

Il valore del parametro μ è la misura di massa del D^0



Obiettivi dell'esercizio

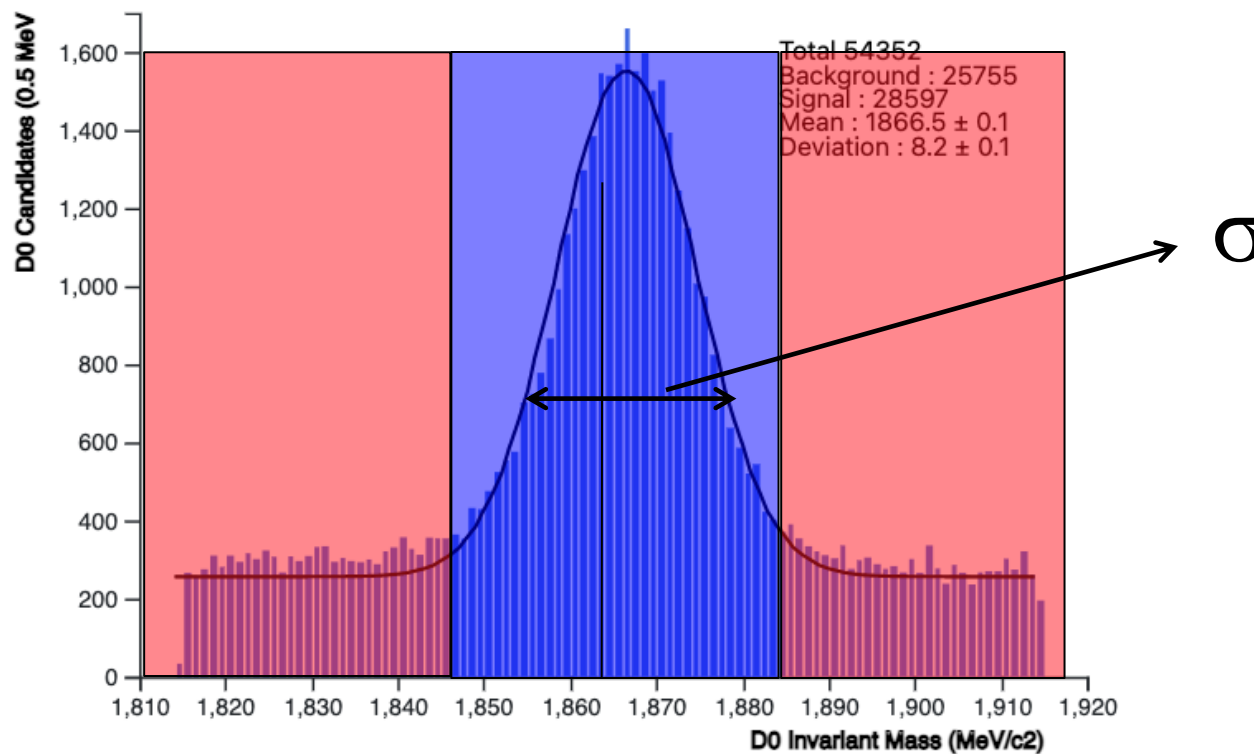


I obiettivo: riempire un istogramma con eventi di massa del D^0 , selezionando un K e un π per ogni evento

II obiettivo: misurare il valore della massa del D^0

III obiettivo: fare l'istogramma della tempo di decadimento, dell'impulso trasverso e del parametro d'impatto per il SEGNALE e per il FONDO

III OBIETTIVO

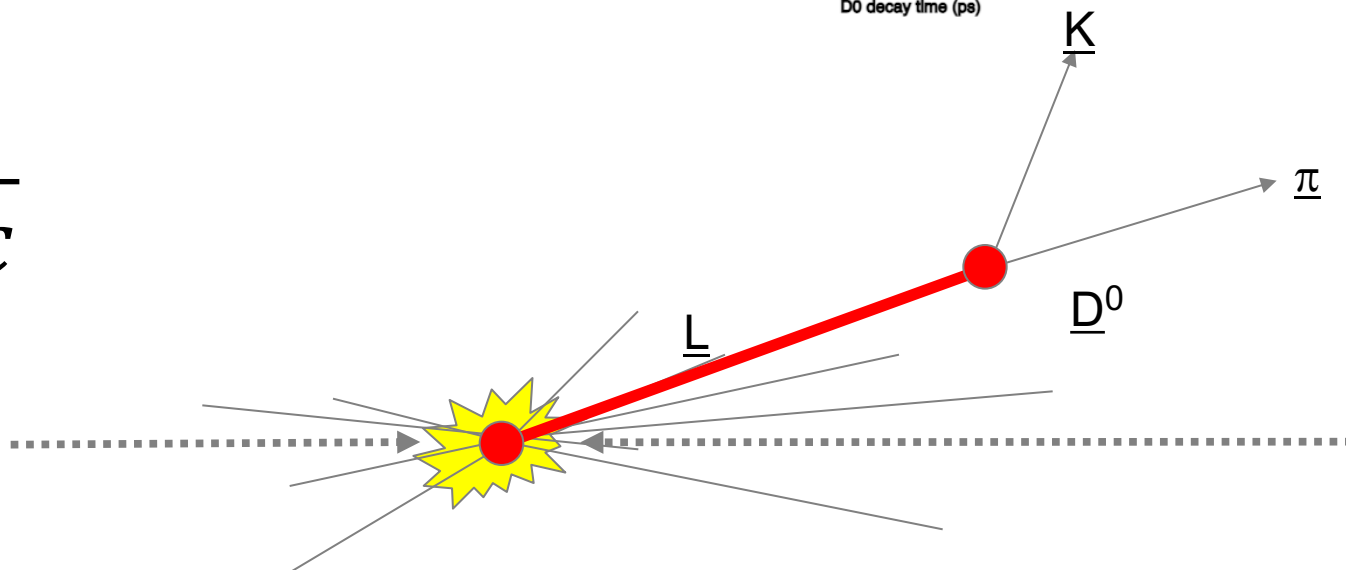
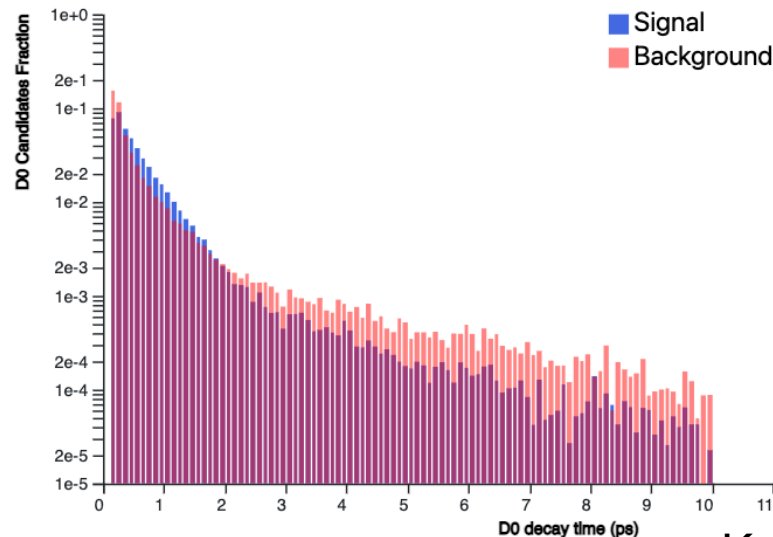


Selezioniamo la regione di FONDO e di SEGNALE
 La regione di SEGNALE può essere definita come 3
 volte la larghezza della Gaussiana (σ) che abbiamo
 ottenuto dal fit di prima
 In 3σ è contenuto il 99.% del SEGNALE

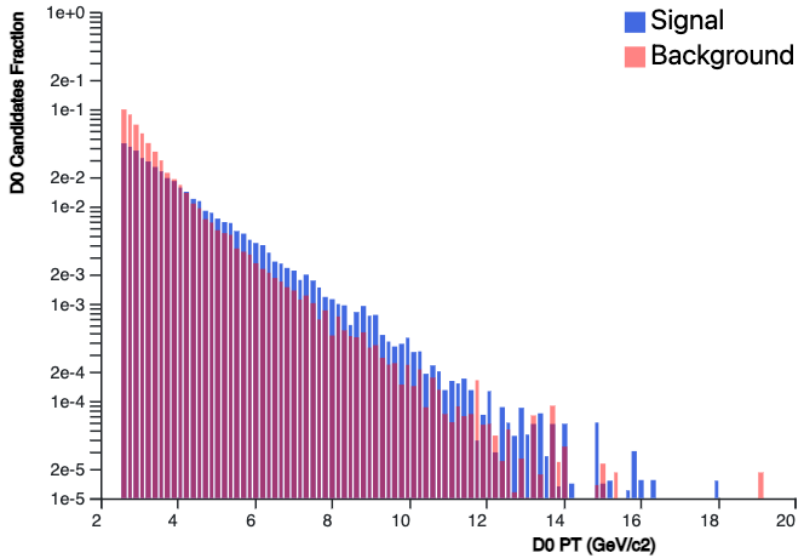
III OBIETTIVO

Misurando la distanza di volo del D^0 , possiamo fare l'istogramma del tempo di decadimento come suggerito da Albert!

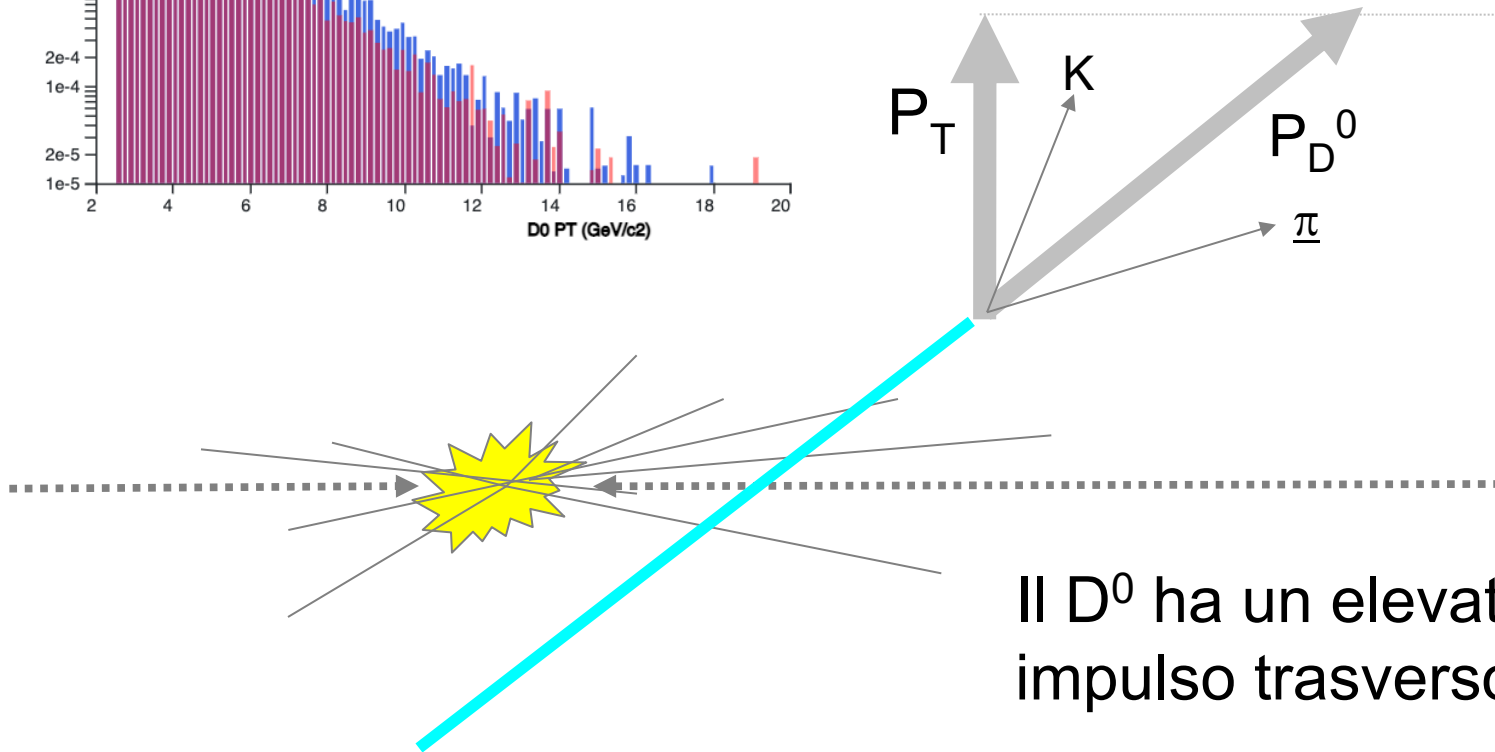
$$t = \frac{x}{\gamma c}$$



III OBIETTIVO

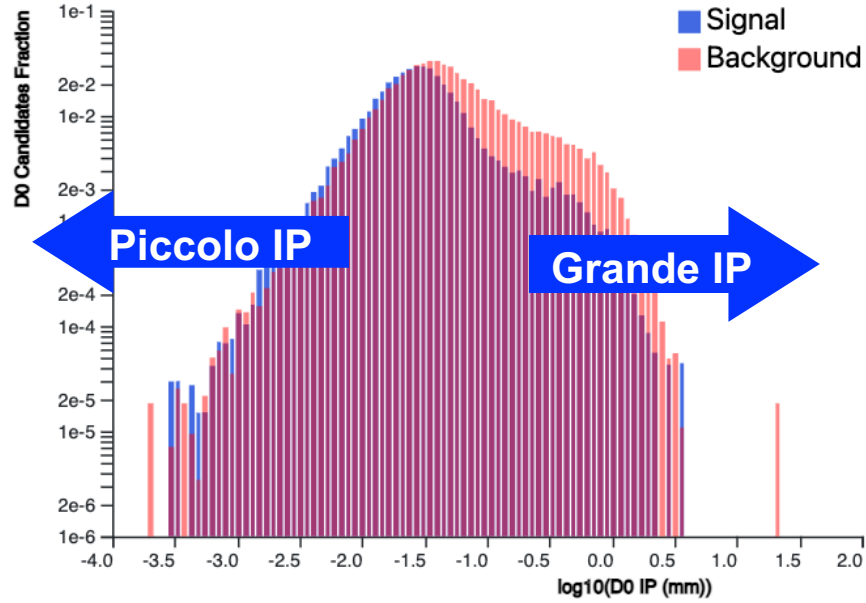


L'impulso trasverso

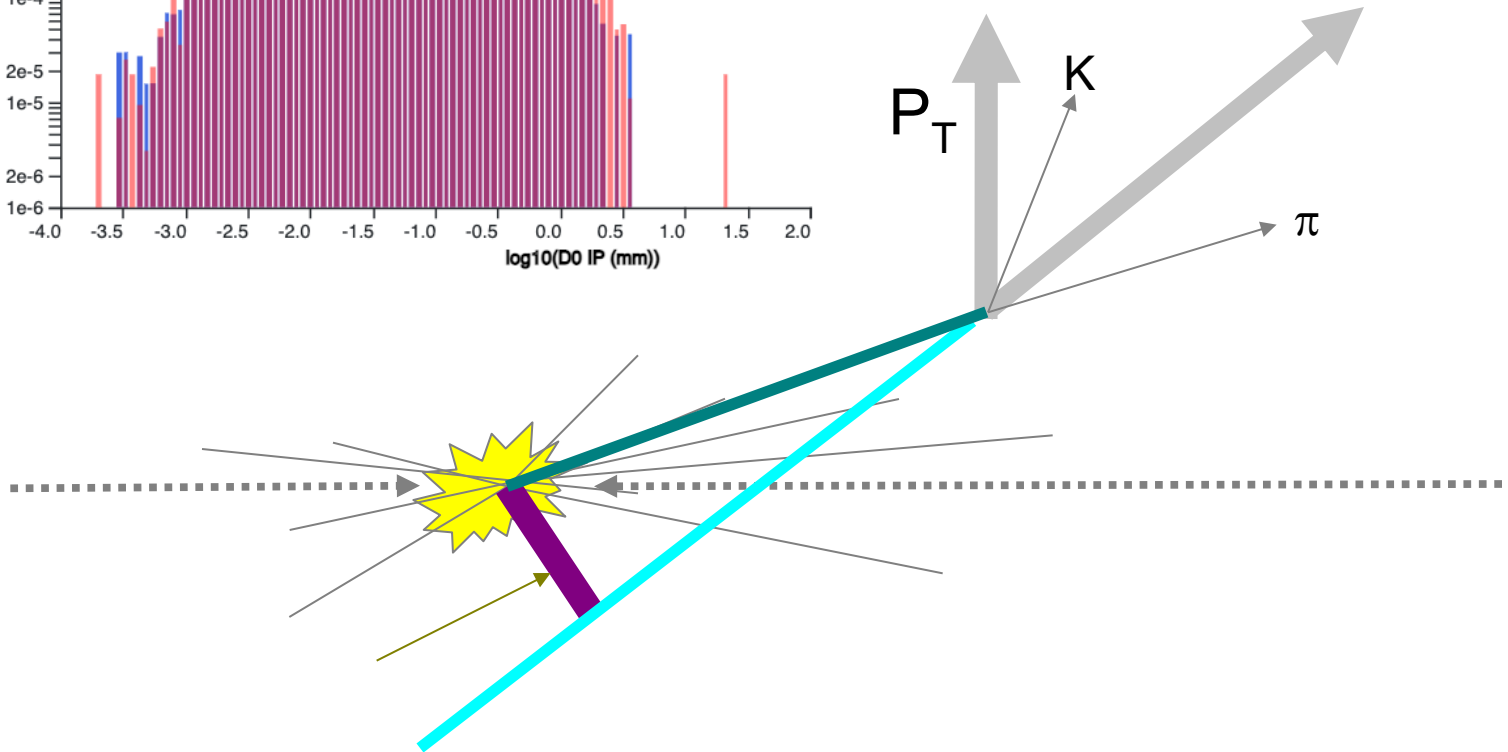


Il D^0 ha un elevato impulso trasverso

III OBIETTIVO



Parametro di Impatto (IP)





Obiettivi dell'esercizio



I obiettivo: riempire un istogramma con eventi di massa del D^0 , selezionando un K e un π per ogni evento

II obiettivo: misurare il valore della massa del D^0

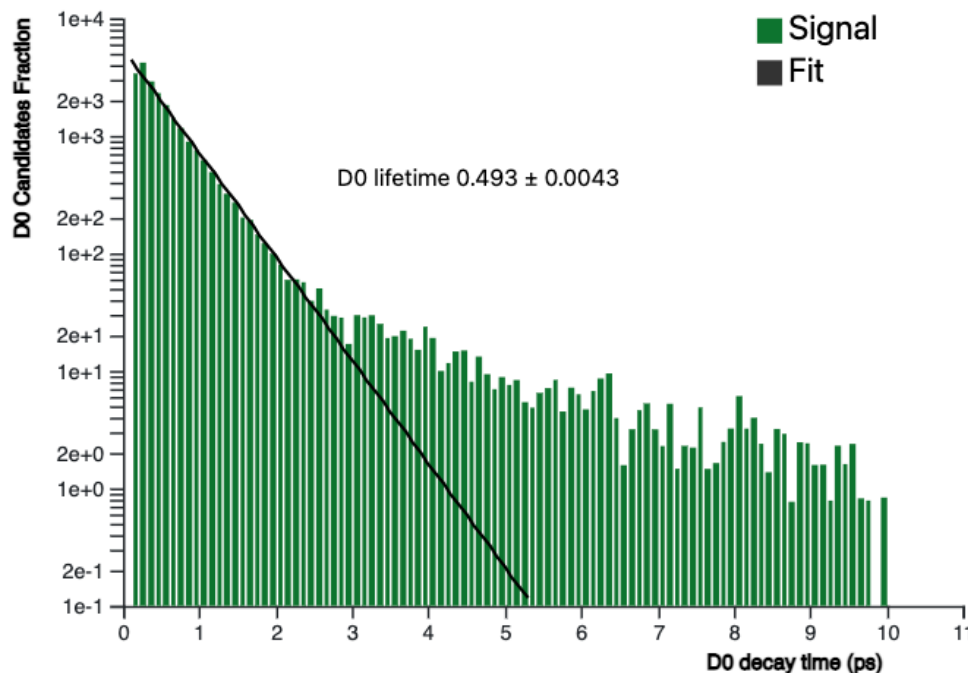
III obiettivo: fare l'istogramma della tempo di decadimento, dell'impulso trasverso e del parametro d'impatto per il SEGNALE e per il FONDO

IV: Misurare la vita media del D^0

N

Adattiamo la curva che
descrive l'andamento
del tempo di
decadimento

all'istogramma del
tempo di decadimento
del SEGNALE e
ottenendo la misura di τ



Confrontiamo il valore con
quello del PDG è corretto?



Obiettivi dell'esercizio



I obiettivo: riempire un istogramma con eventi di massa del D^0 , selezionando un K e un π per ogni evento

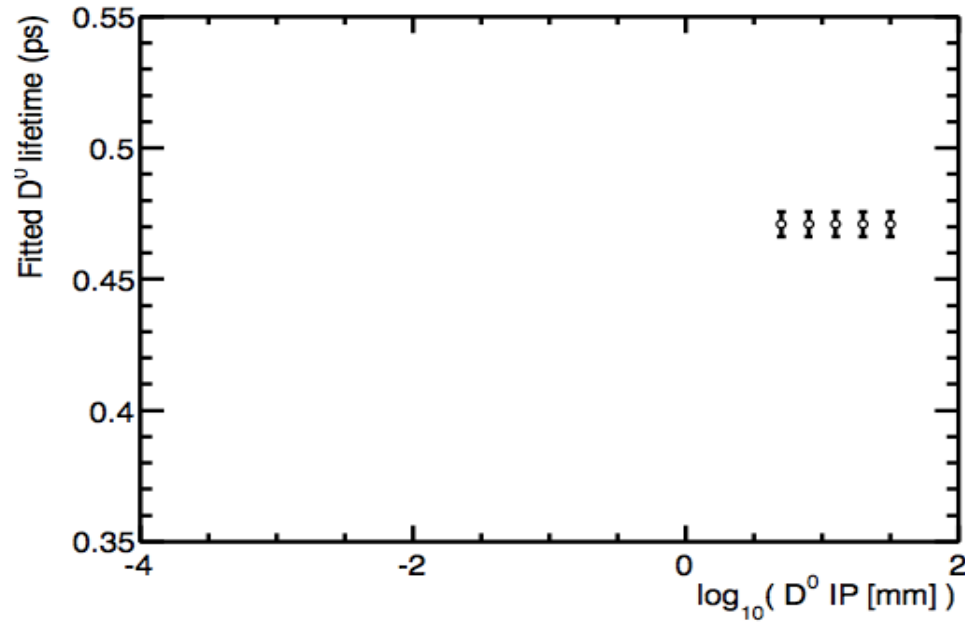
II obiettivo: misurare il valore della massa del D^0

III obiettivo: fare l'istogramma della tempo di decadimento, dell'impulso trasverso e del parametro d'impatto per il SEGNALE e per il FONDO

IV: Misurare la vita media del D^0

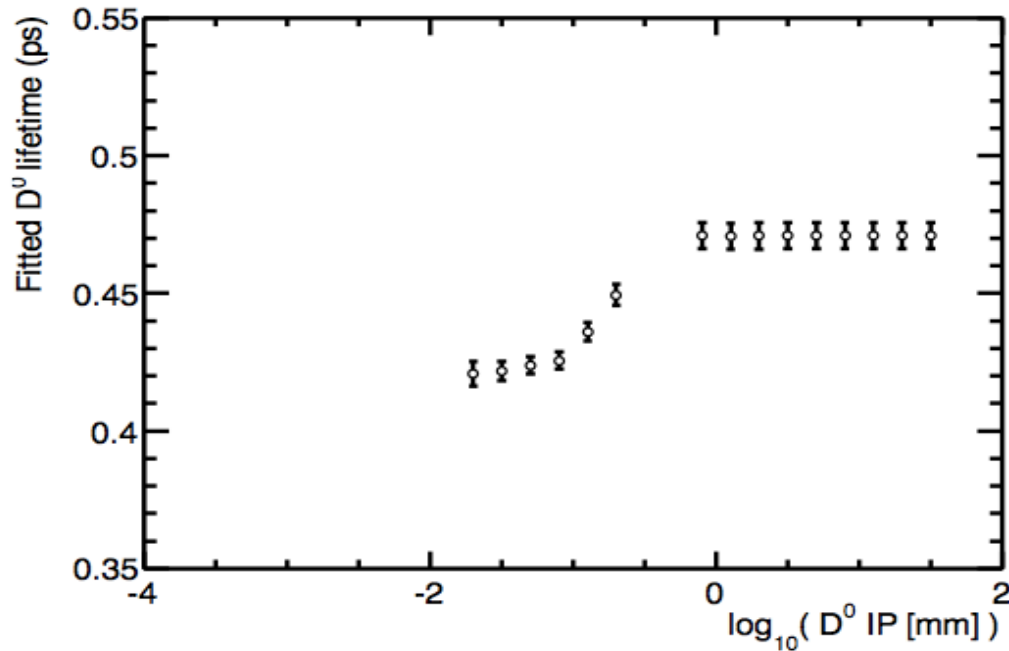
V: Grafico dell'andamento della vita media in funzione del parametro d'impatto

V OBIETTIVO



Rimuoviamo gli eventi con parametro d'impatto più grande, cosa succede?

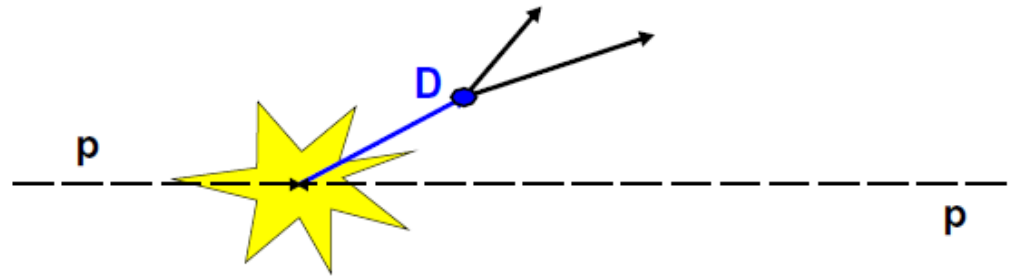
V OBIETTIVO



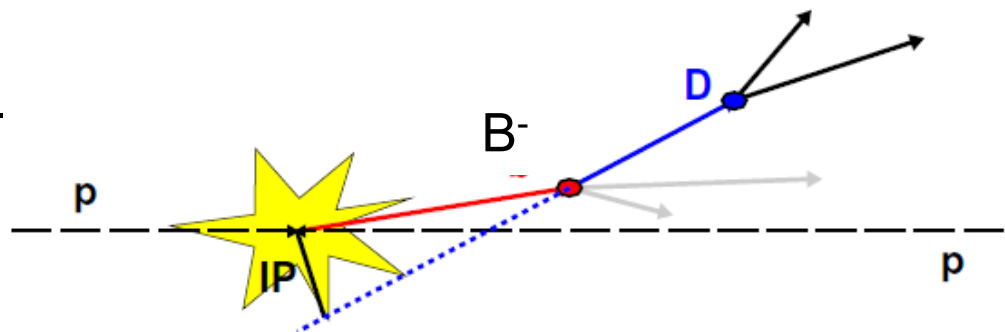
Il valore della vita media diminuisce. Perché?

Quindi riassumendo il D^0 può essere prodotto nell'interazione protone-protone:

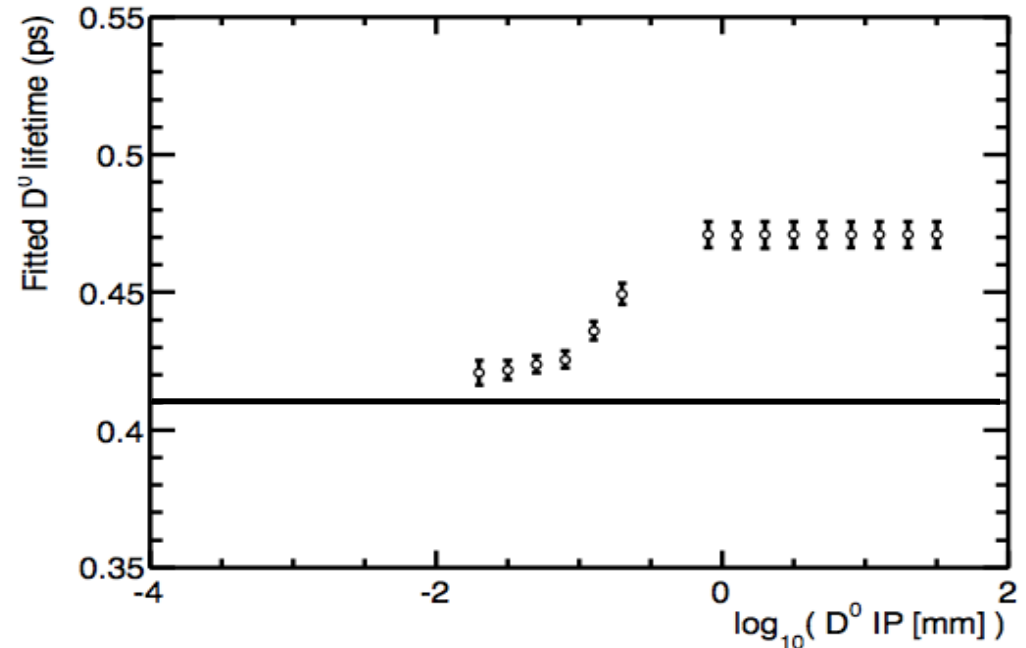
Produzione diretta



Produzione dal decadimento di una particella (mesone) B^-



Abbiamo rimosso i D^0 che sono decaduti da B^0 . Per questi eventi il tempo misurato è la somma del tempo di decadimento del B^0 più quella del D^0



Il valore di τ è più simile a quello del PDG, ma altri errori sistematici non sono stati considerati, per quello la nostra misura non è ancora compatibile con quella del PDG

BACKUP



Come si rivela un D^0 ?



D^0

$$I(J^P) = \frac{1}{2}(0^-)$$

Mass $m = 1864.86 \pm 0.13$ MeV

$m_{D^\pm} - m_{D^0} = 4.76 \pm 0.10$ MeV (S = 1.1)

Mean life $\tau = (410.1 \pm 1.5) \times 10^{-15}$ s

Sappiamo che le particelle viaggiano molto prossime alla velocità della luce

$$x = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s} \cdot 410 \times 10^{-15} \text{ s} = 155 \text{ } \mu\text{m}$$

Questa distanza è piccolissima, se il D^0 vola così poco non possiamo distinguere il SEGNALE da FONDO!

Ricordate il FONDO è molto più grande del SEGNALE

Sarebbe come cercare un ago in un paioio



Come si rivela un D^0 ?



Quindi

$$x = \gamma \cdot \beta \cdot c \cdot \tau$$

$$\gamma \cdot \beta = \frac{p}{m} \sim 40 \quad \text{Tipico valore di un } D^0 \text{ ad LHCb}$$

Allora la distanza che percorre un D^0 nel rivelatore è 40 volte più grande di quella che abbiamo calcolato prima!

$$x = 40 \cdot 3.0 \times 10^8 \text{ m/s} \cdot 410 \times 10^{-15} \text{ s} = 0.6 \text{ cm}$$