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

MasterClass 2014 - Bologna

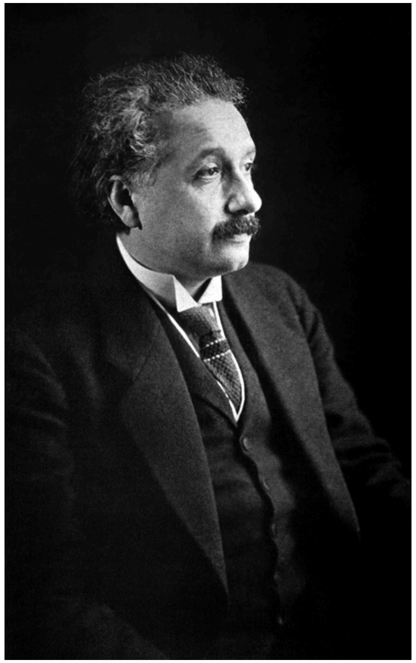
Angelo Carbone

Misura della vita media del D^0 ad LHCb

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

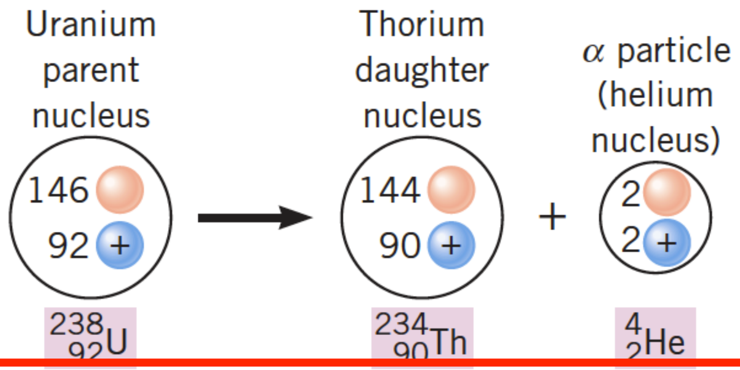
Cosa misuriamo oggi ?

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

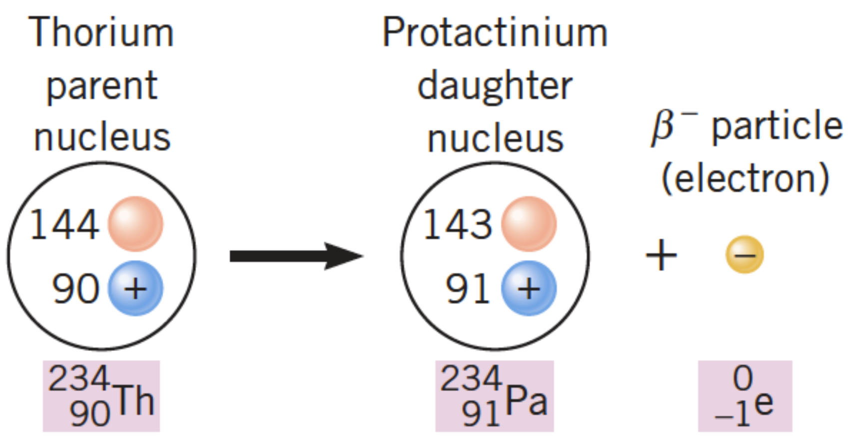
Quando un nucleo instabile o radioattivo si disintegra spontaneamente, emette una particella, per esempio



Decadimento α

La particella α è l'atomo di Elio

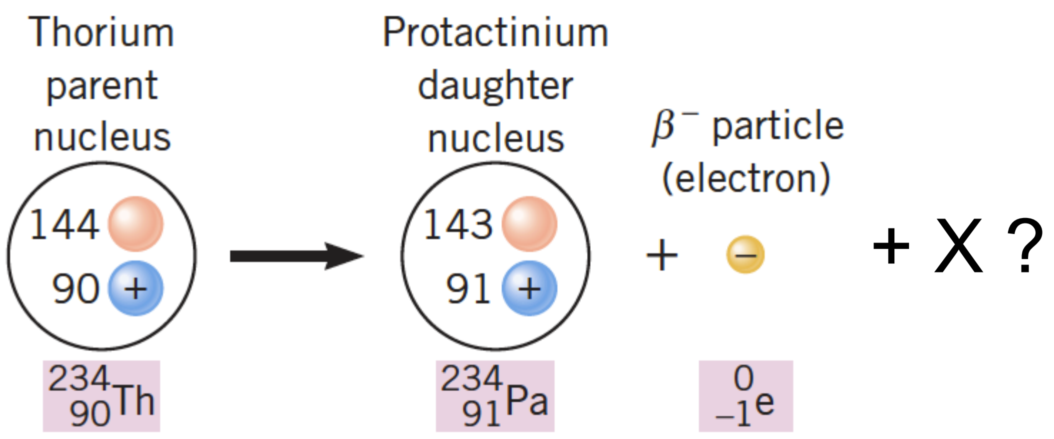
Il decadimento β



neutrone → 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

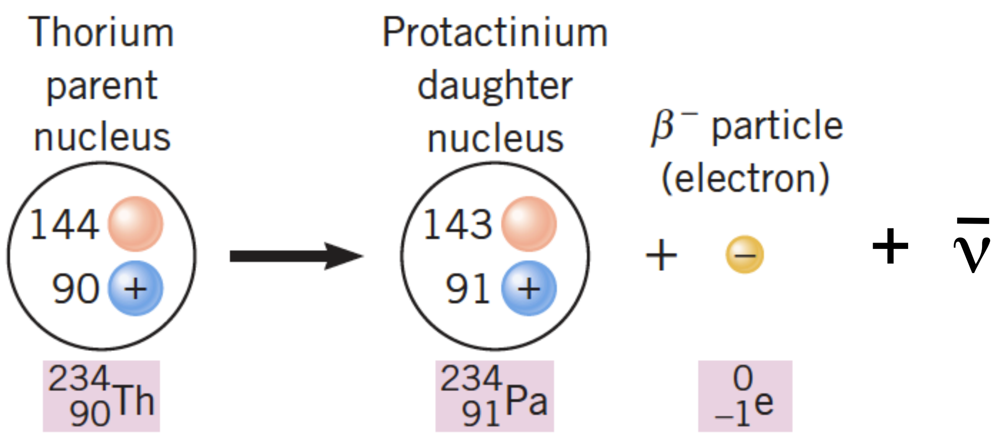
Il decadimento β



neutrone → 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 → 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

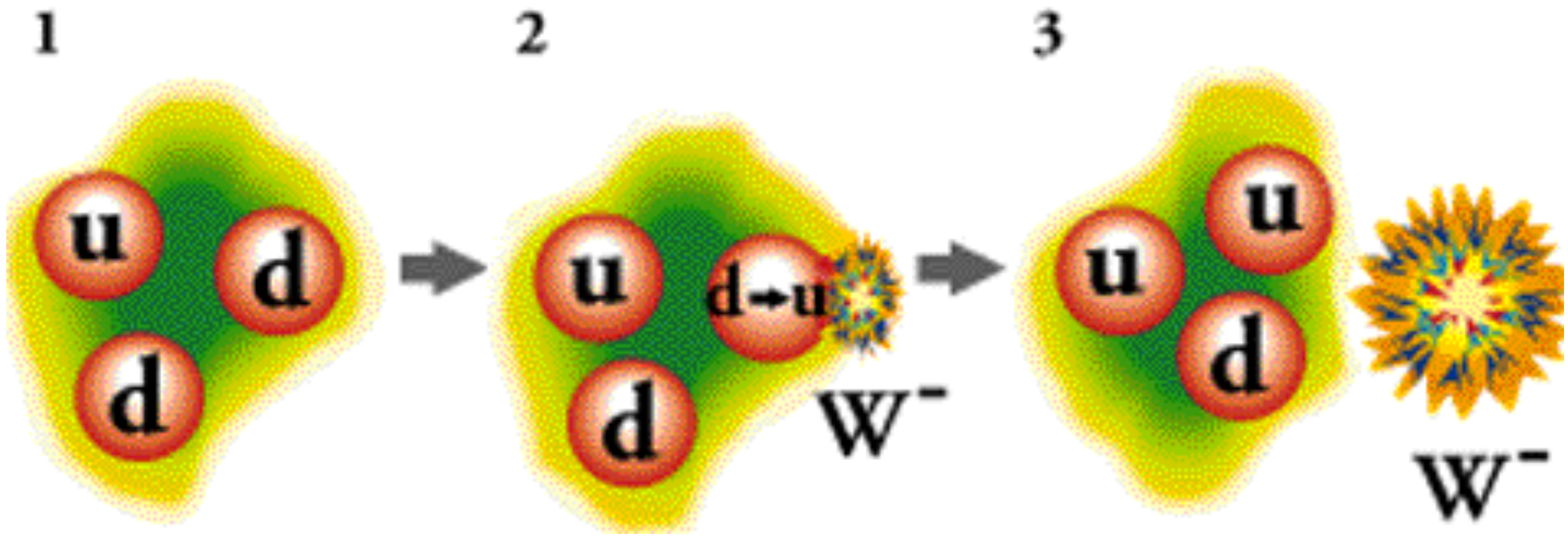
L'emissione del neutrino e dell'elettrone coinvolge una forza chiamata FORZA NUCLEARE DEBOLE.

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

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

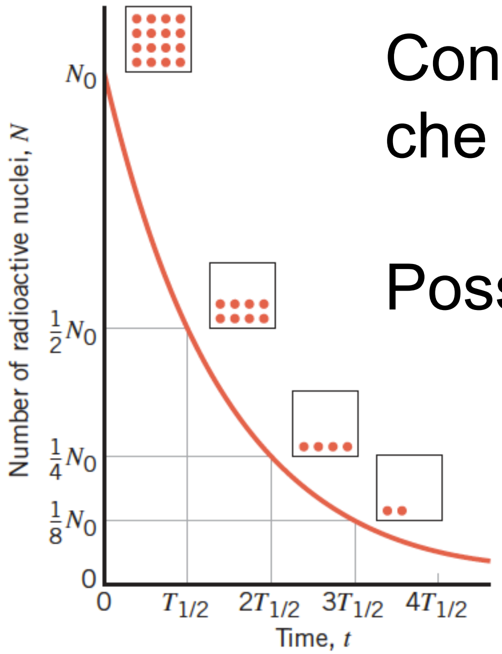
La teoria della forza elettrodebole fu sviluppata da Sheldon Glashow (1932–), Abdus Salam (1926–1996), and Steven Weinberg (1933–), i quali vinsero il premio Nobel nel 1979

Il decadimento β



Il tempo di decadimento

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 $T_{½}$

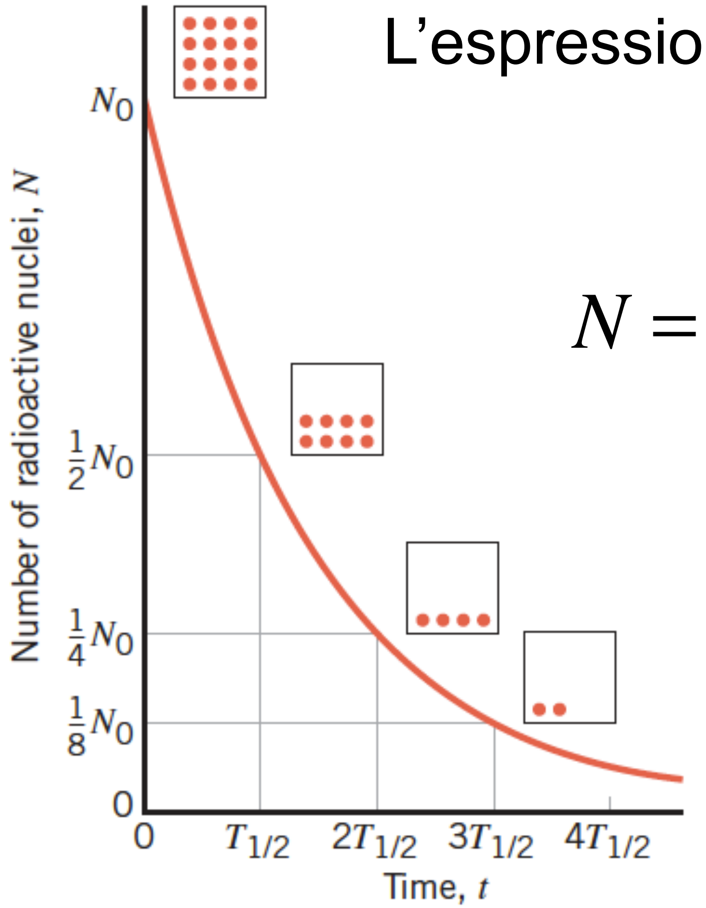
Dopo $T_{½}$ metà dei nuclei presenti è decaduto

Il tempo di decadimento

Table 31.2 Some Half-Lives for Radioactive Decay

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

Il tempo di decadimento



L'espressione matematica per descrivere questo andamento è

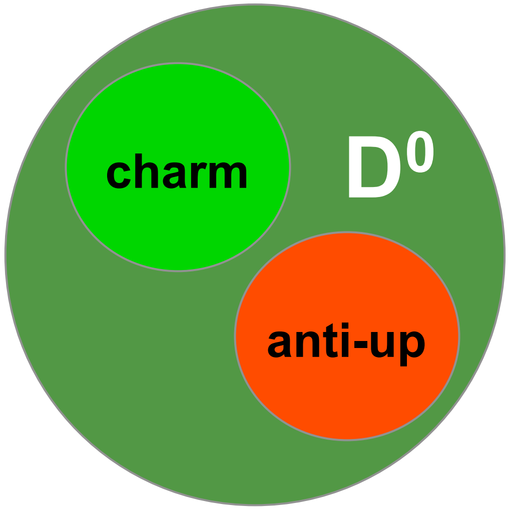
$$N = N_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \Rightarrow \quad \tau = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} = \frac{T_{1/2}}{0.693}$$

τ è la vita media

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

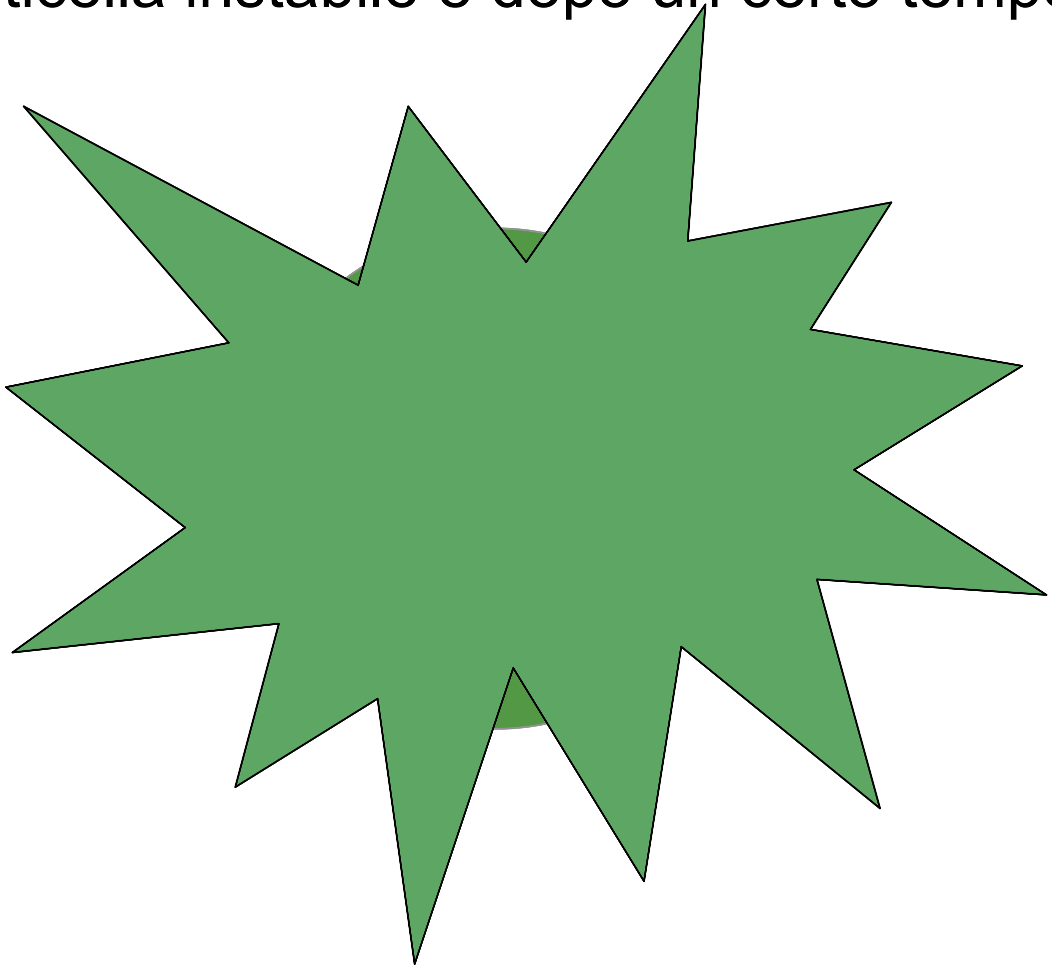
La particella (il mesone) D^0

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



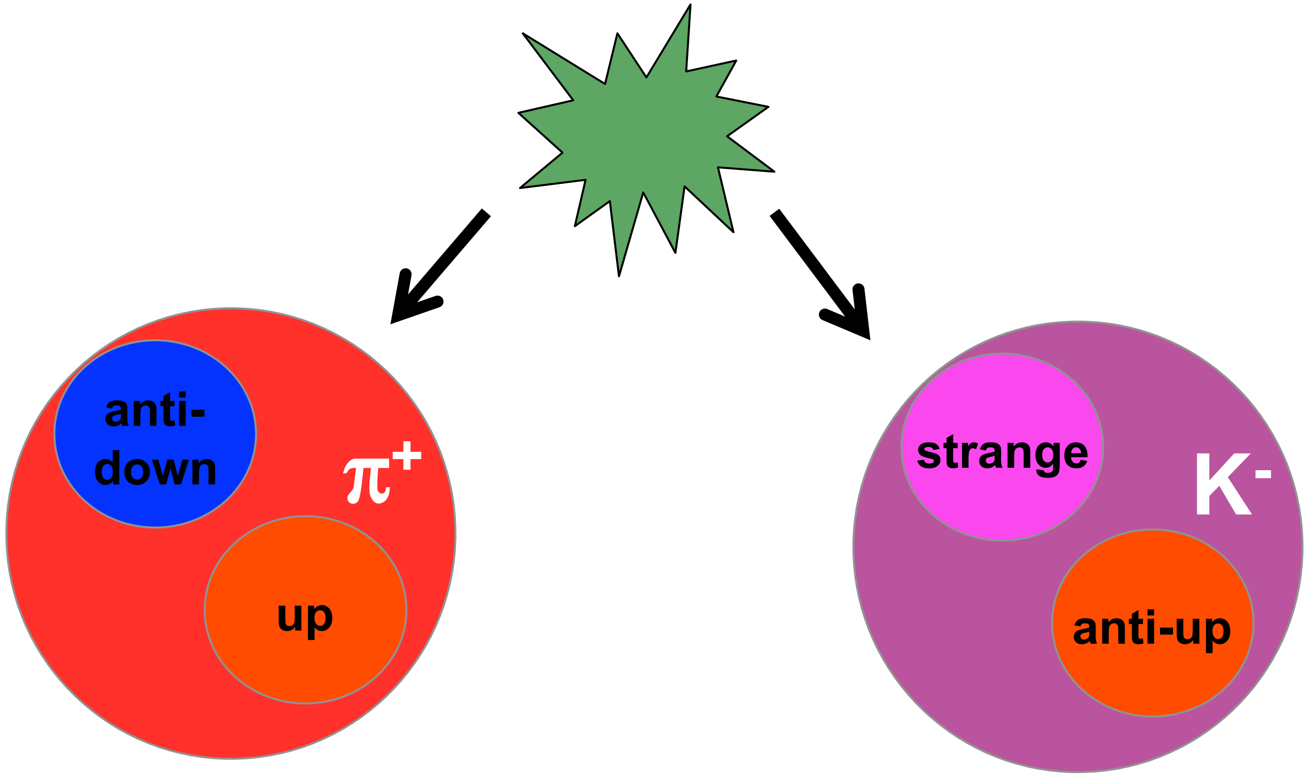
La particella (il mesone) D^0

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



La particella (il mesone) D^0

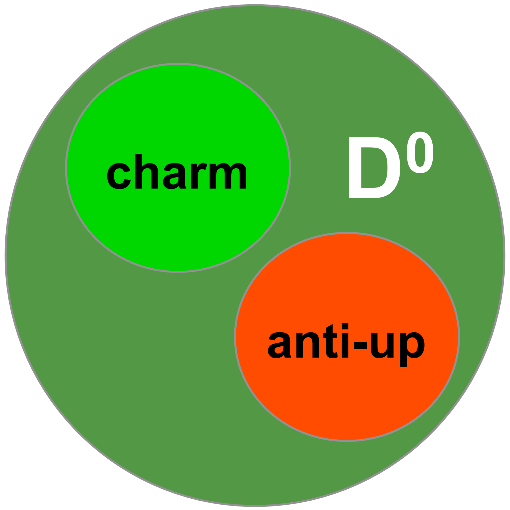
... in un kaone negativo e un pione positivo



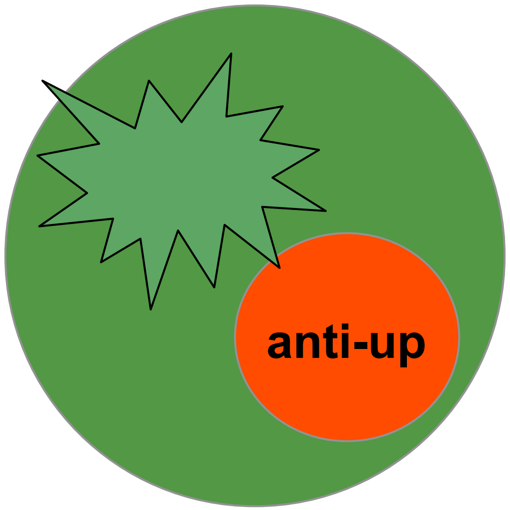
pione positivo

kaone negativo

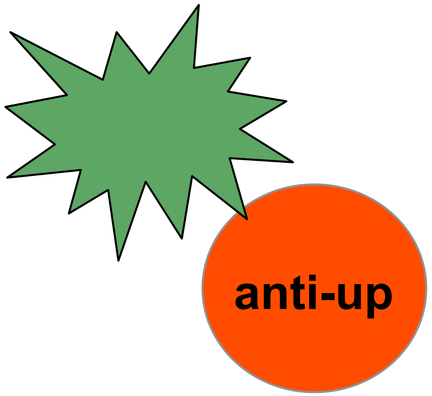
Perché decade?



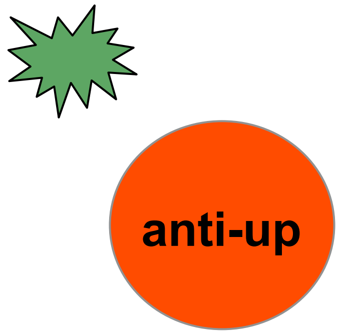
Perché decade?



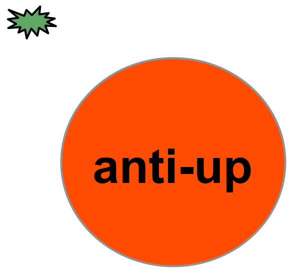
Perché decade?



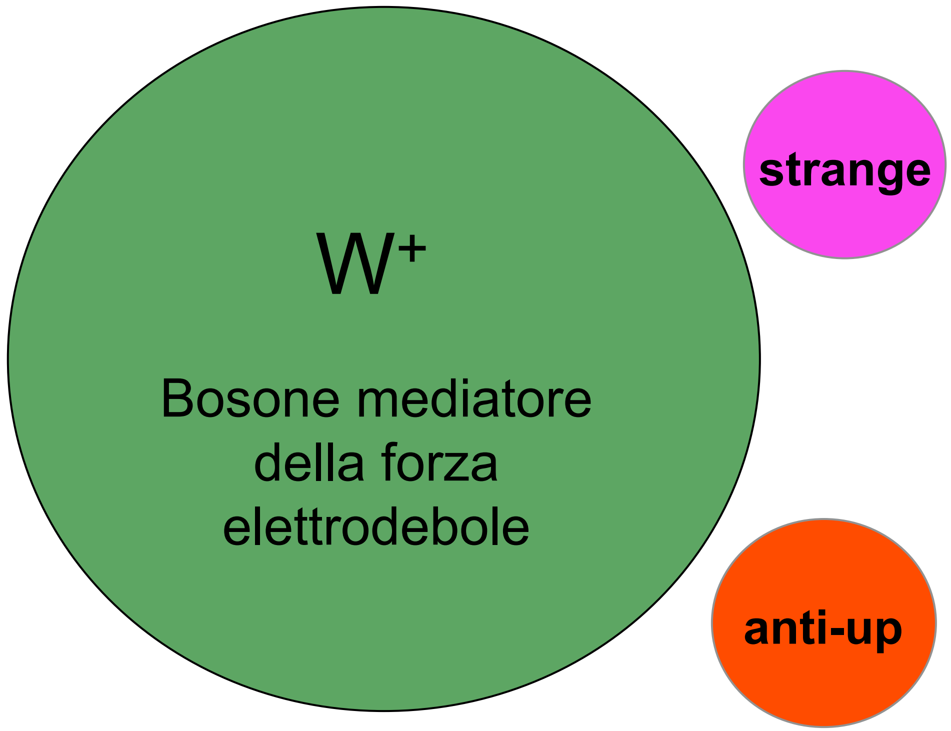
Perché decade?



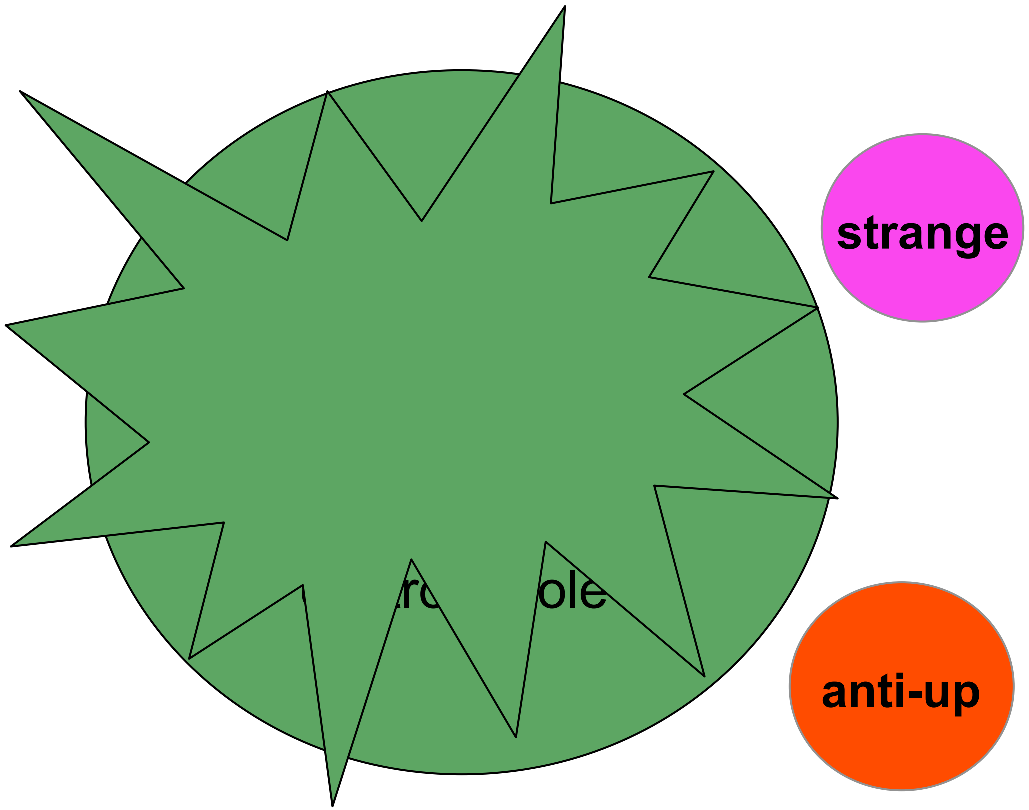
Perché decade?



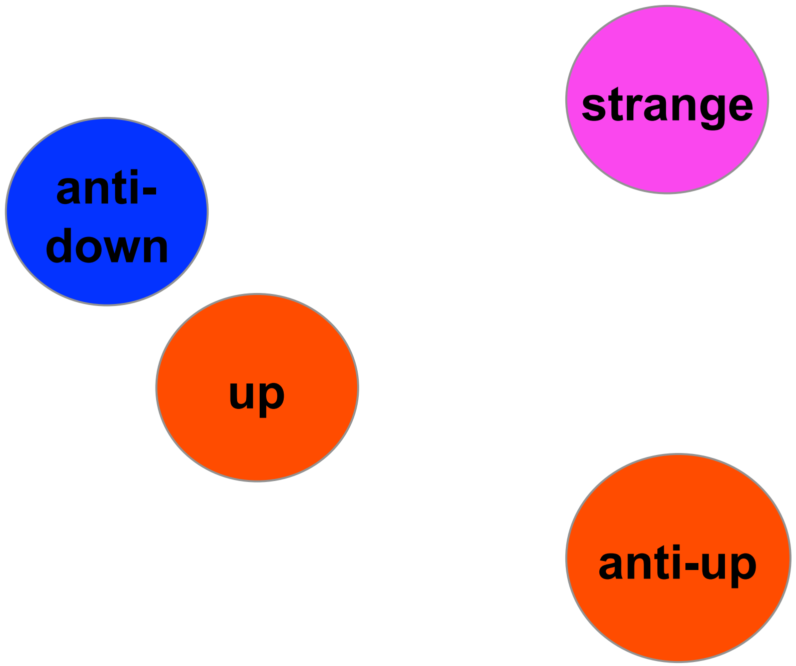
Perché decade?



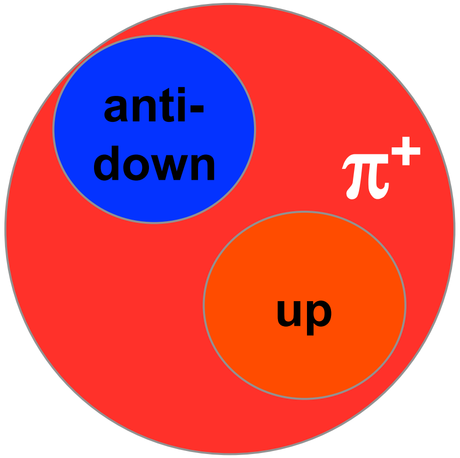
Perché decade?



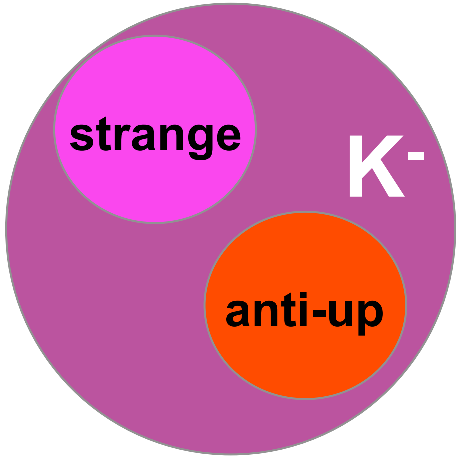
Perché decade?



Perché decade?

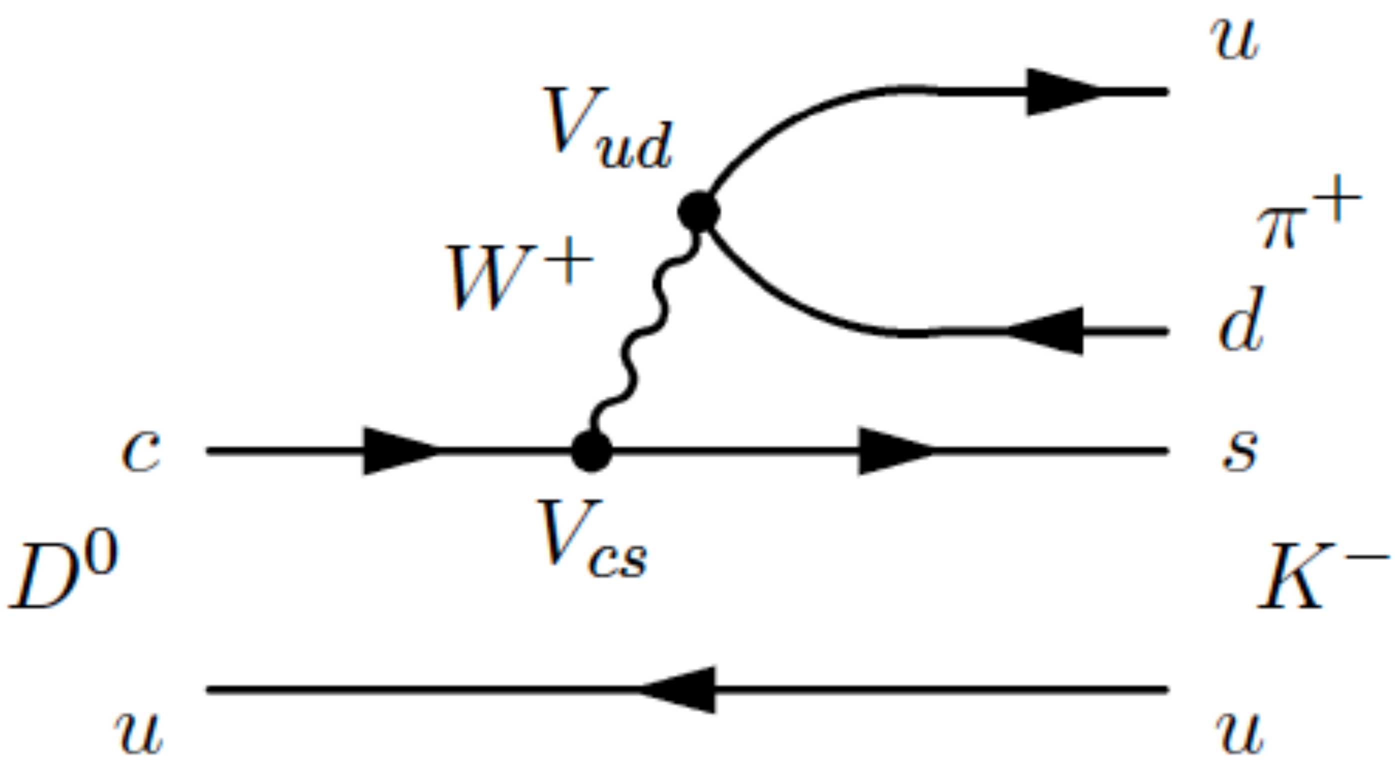


pione positivo



kaone negativo

Come descriviamo questo processo noi fisici?



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? micro-secondi? nano-secondi? pico-secondi?

Dove facciamo la misura?

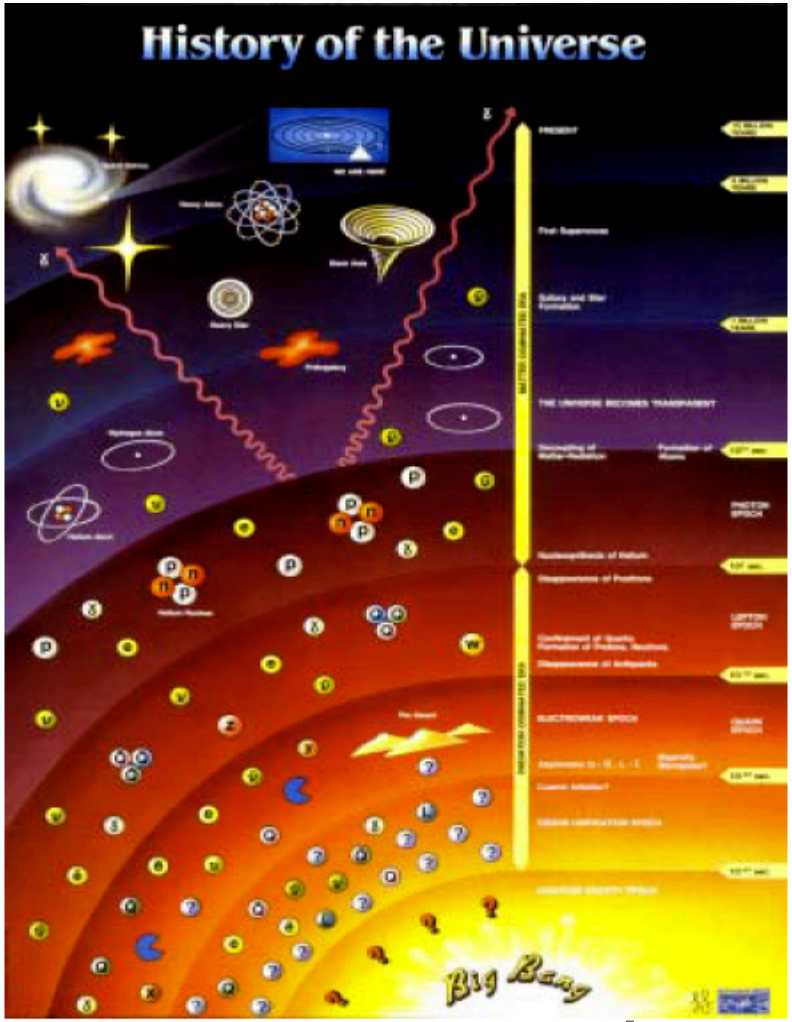
presso l’esperimento LHCb al CERN di Ginevra

Il mistero della scomparsa dell’anti-materia

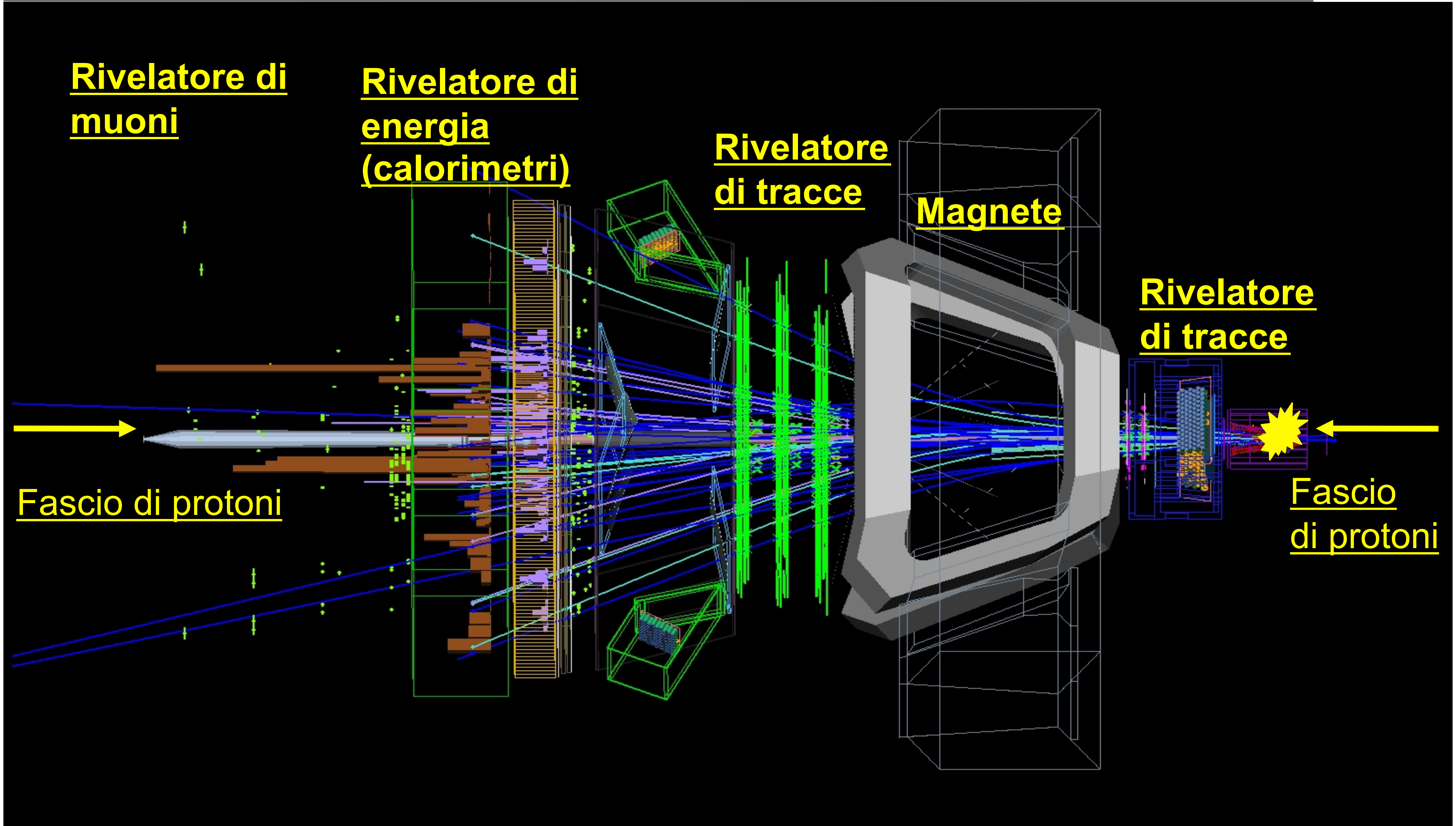
All’esperimento LHCb cerchiamo di capire perché l’Universo che osserviamo oggi è costituito di materia e non da anti-materia

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

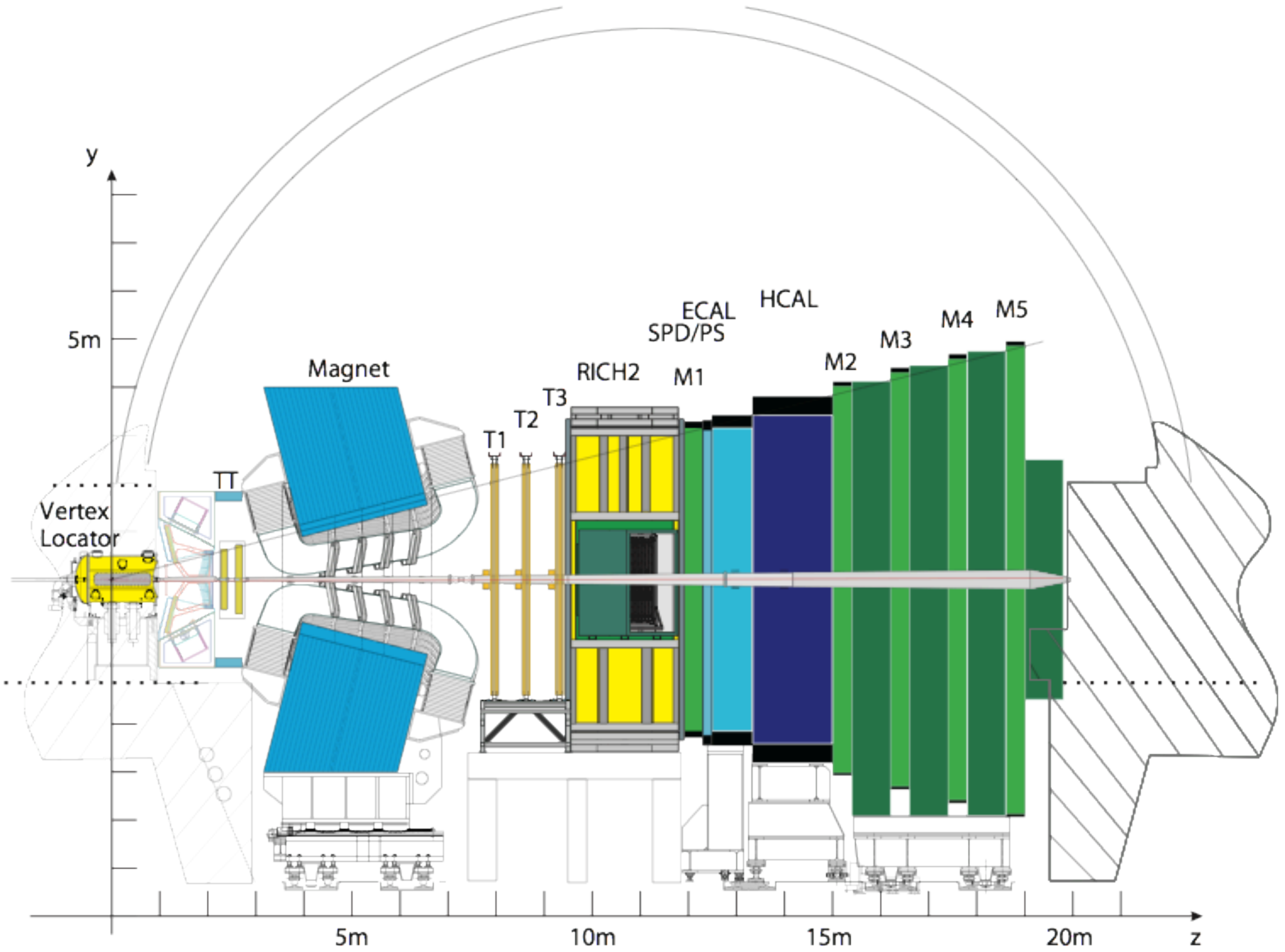
Oggi sappiamo che la materia e l’anti-materia non si comportano esattamente allo stesso modo, ma non siamo ancora in grado di spiegare il mistero della scomparsa dell’anti-materia



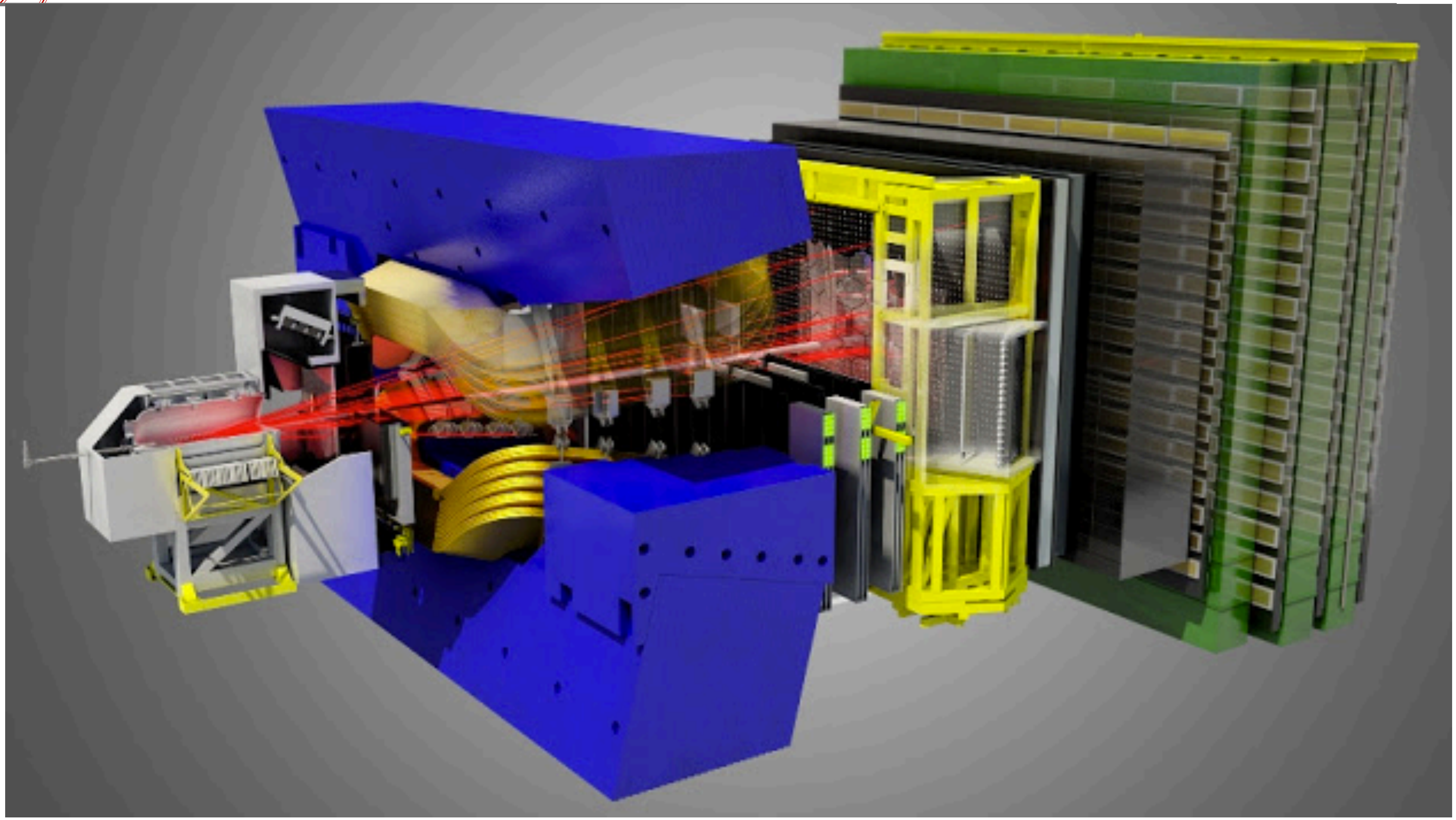
Il rivelatore LHCb



Il rivelatore LHCb

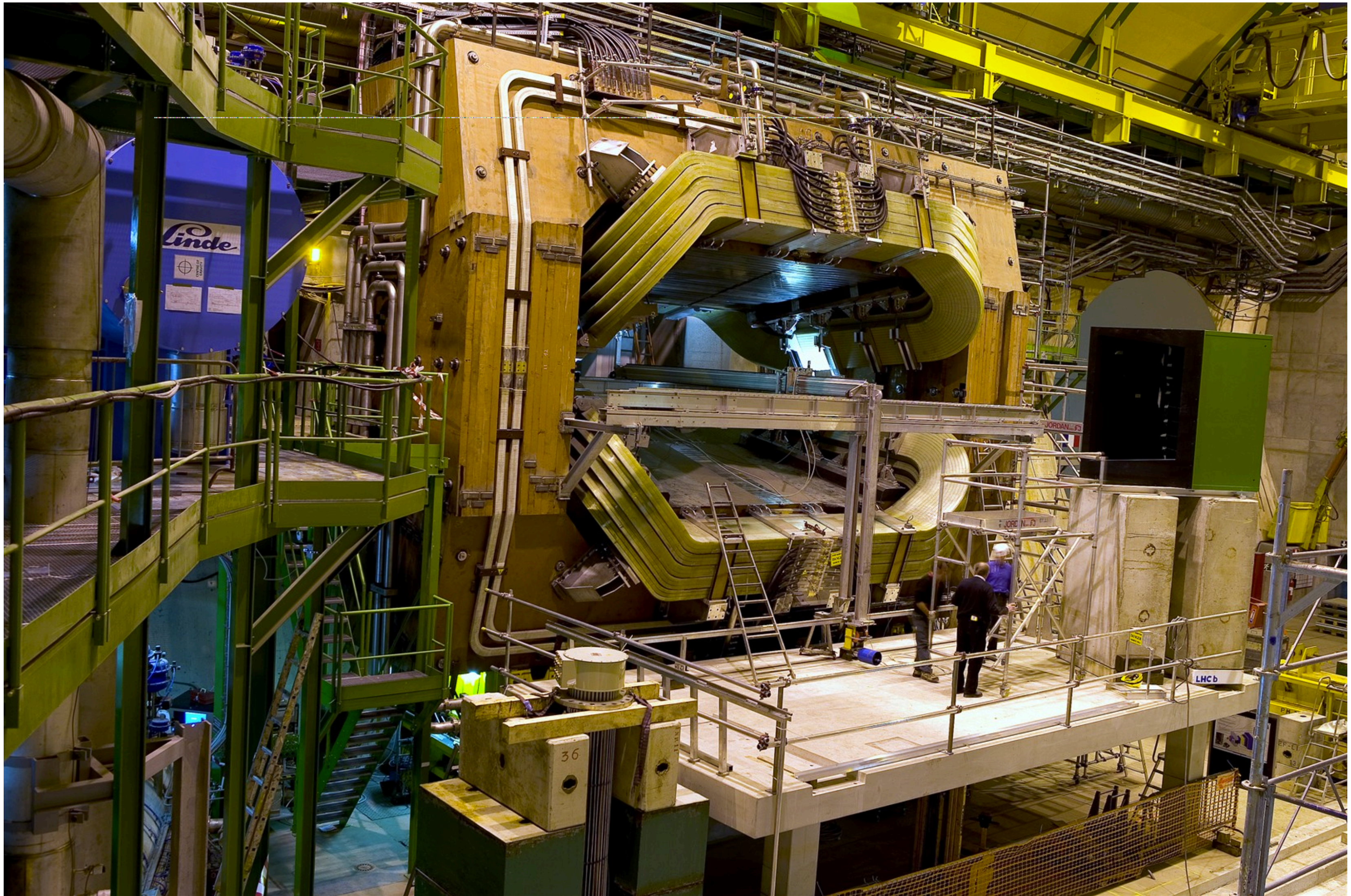


Il rivelatore LHCb

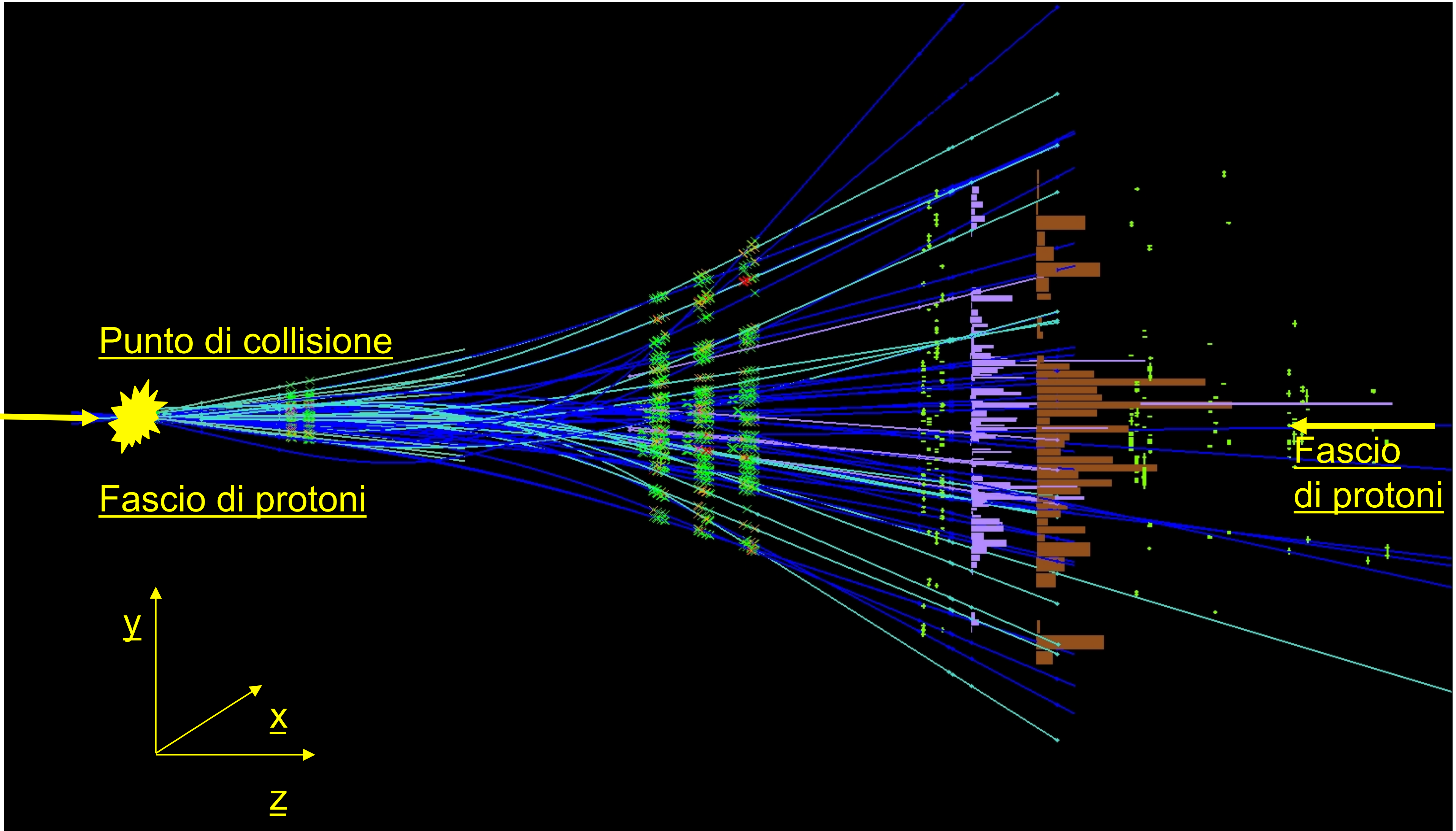


Il rivelatore LHCb e i fisici

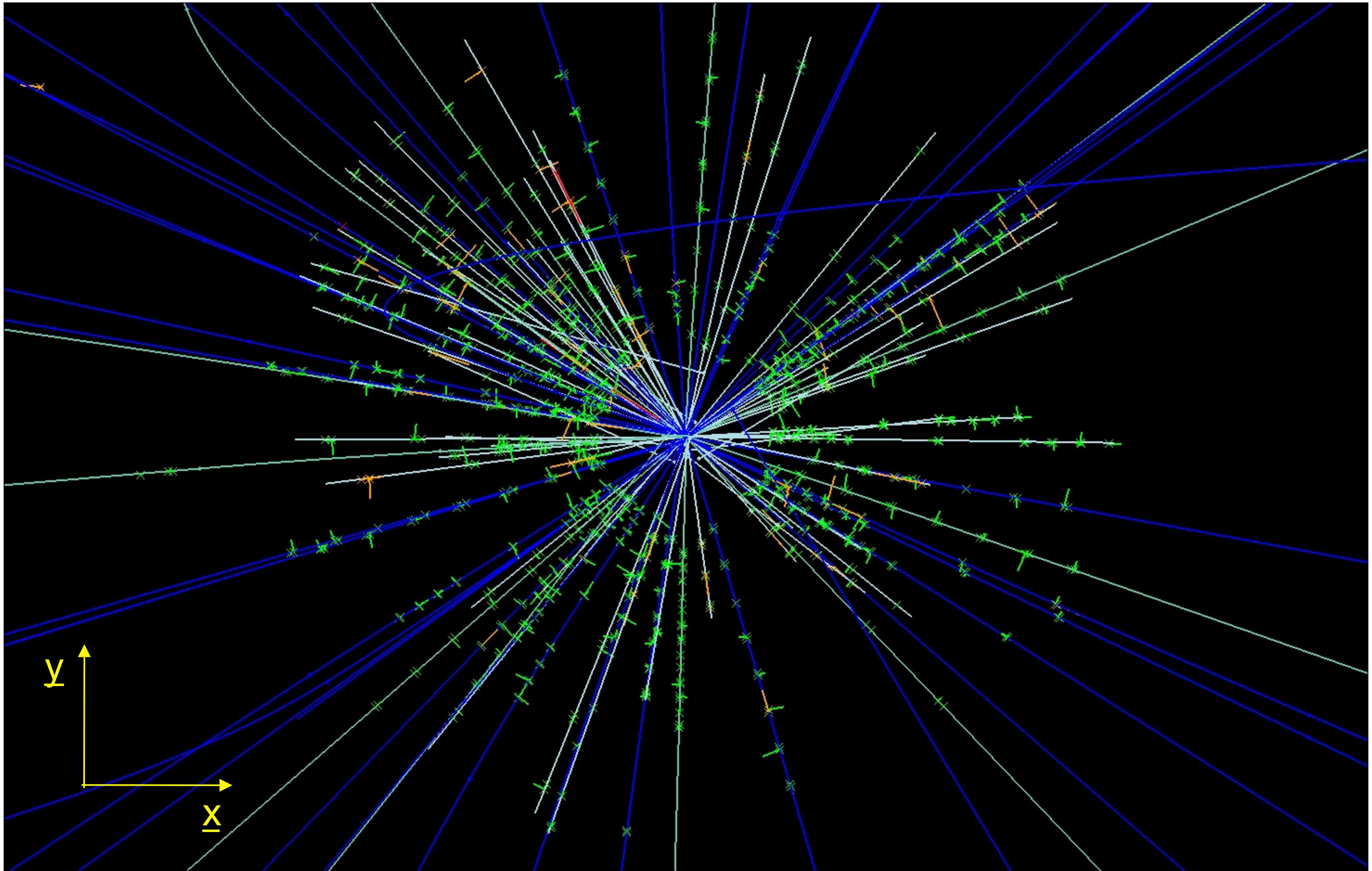
Il rivelatore LHCb e i fisici



Una collisione a LHCb



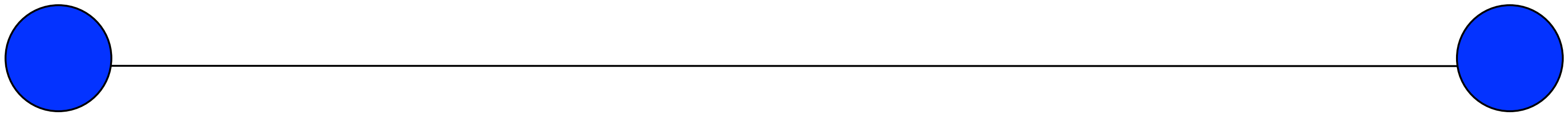
Una collisione a LHCb



Alla ricerca di D^0

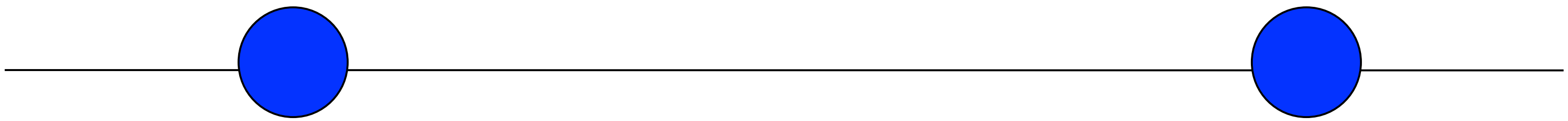
Per misurare la vita media del D^0 dobbiamo rivelare i D^0, ma prima di cercarli devono essere prodotti

Come vengono prodotti?

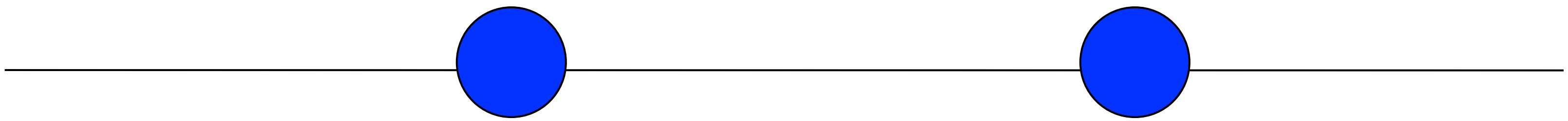


protone protone

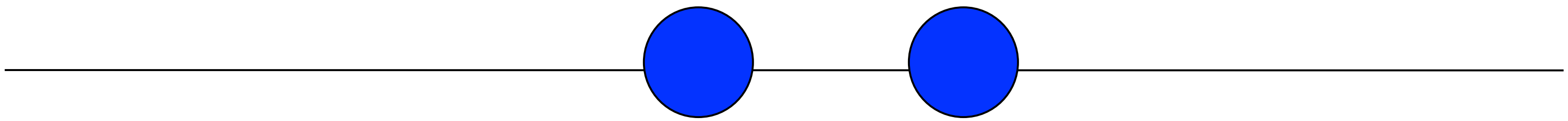
Alla ricerca di D^0



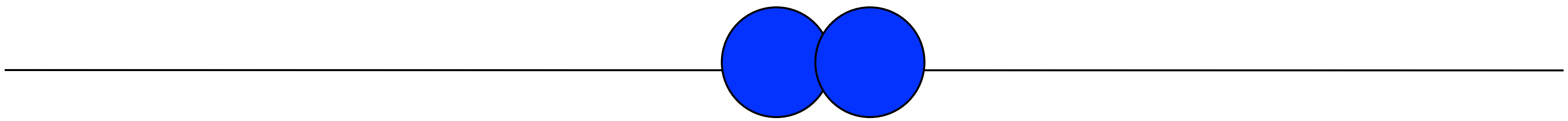
Alla ricerca di D^0



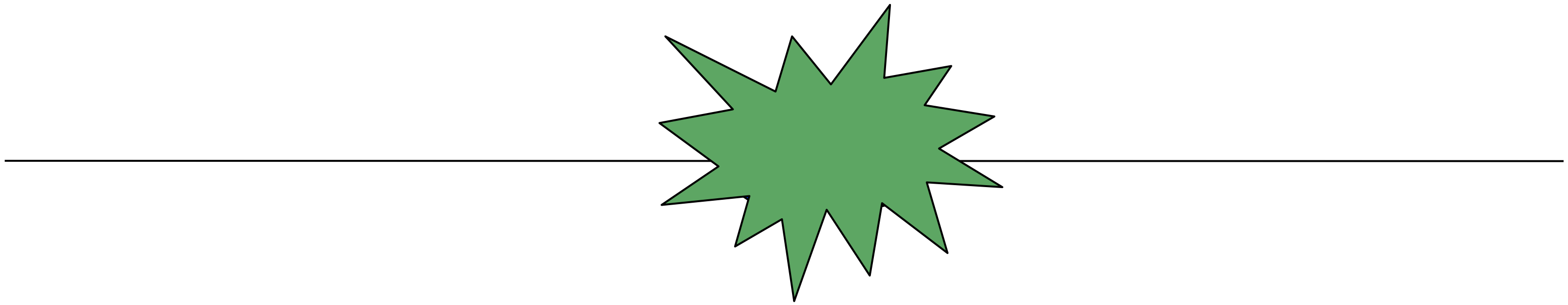
Alla ricerca di D^0



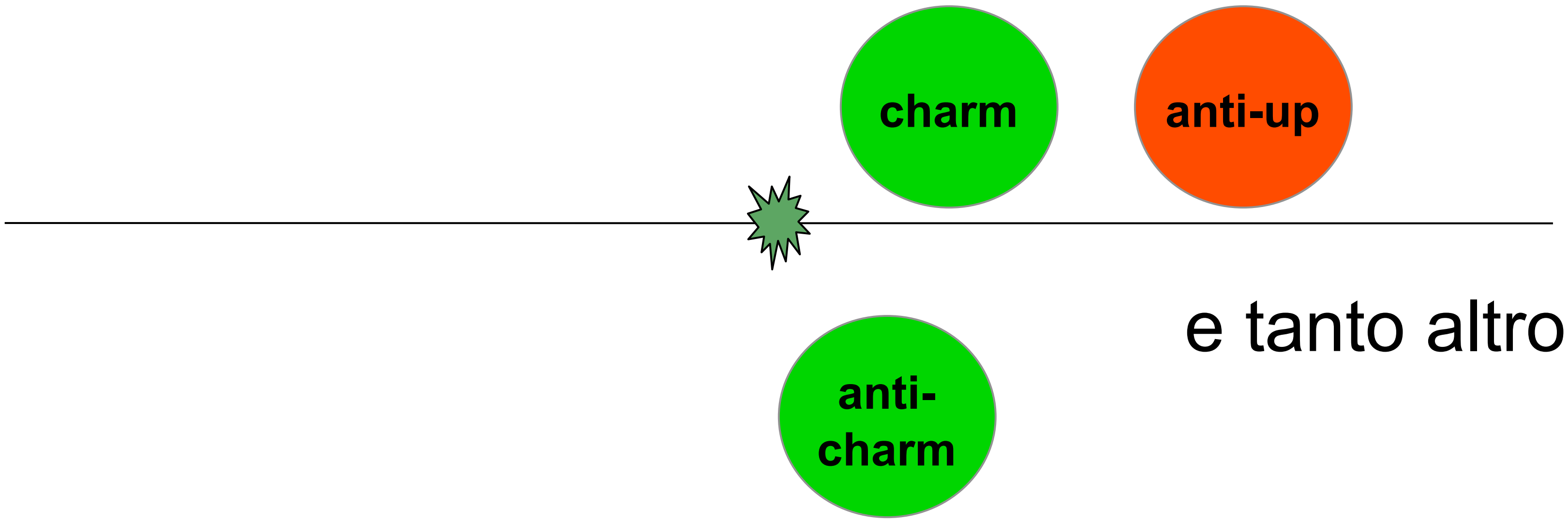
Alla ricerca di D^0



Alla ricerca di D^0

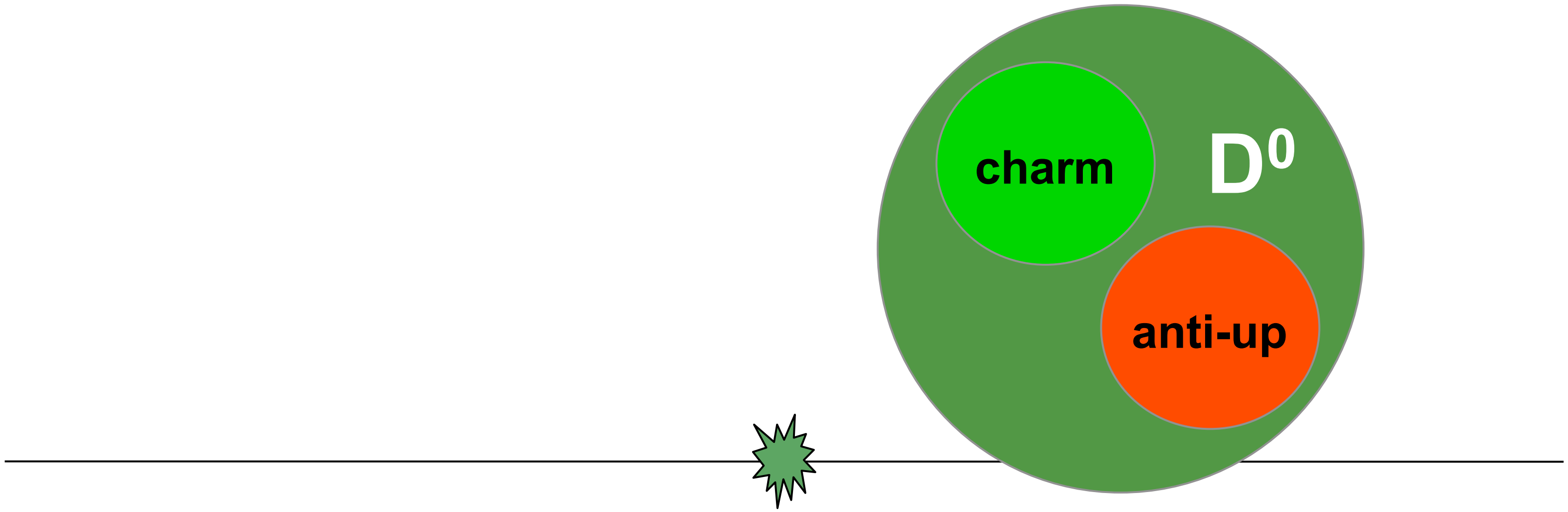


Alla ricerca di D^0



e tanto altro!!

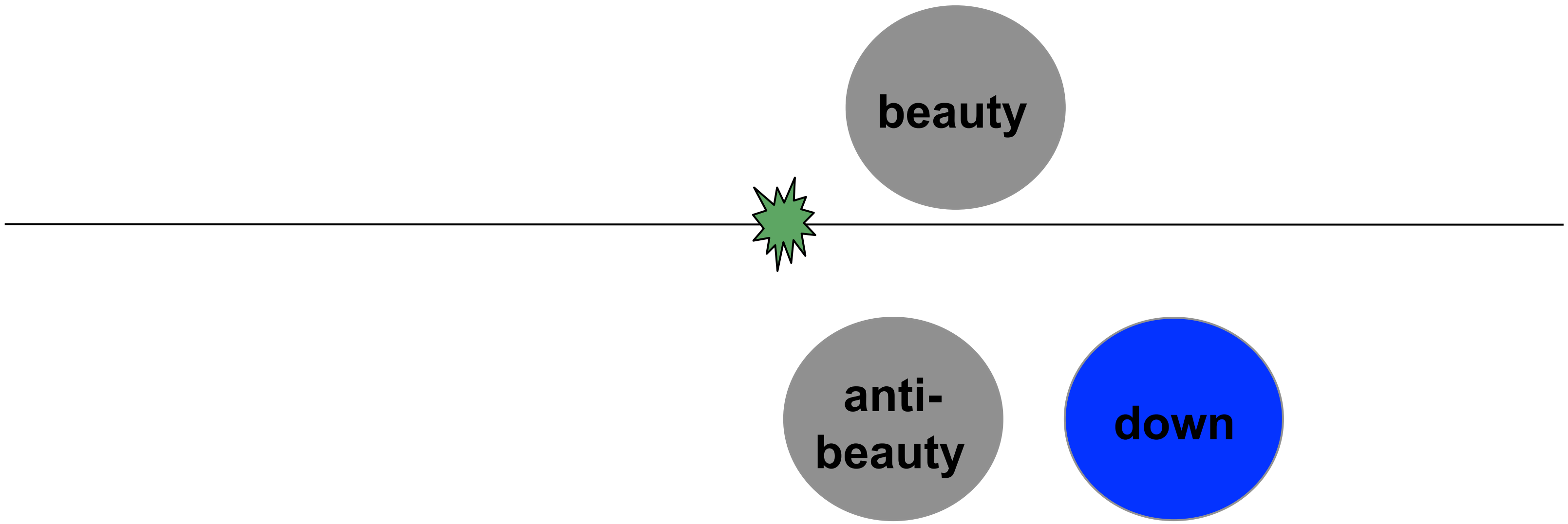
Alla ricerca di D^0



e tanto altro!!

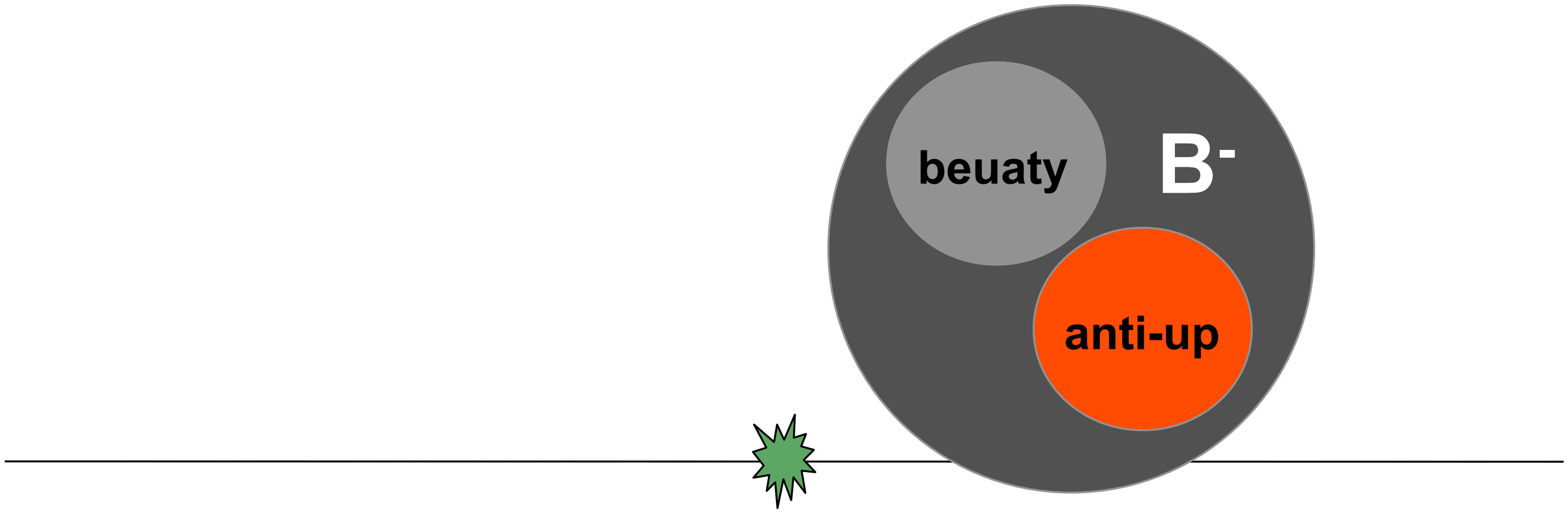
... è il resto della storia lo conosciamo!

Alla ricerca di D^0



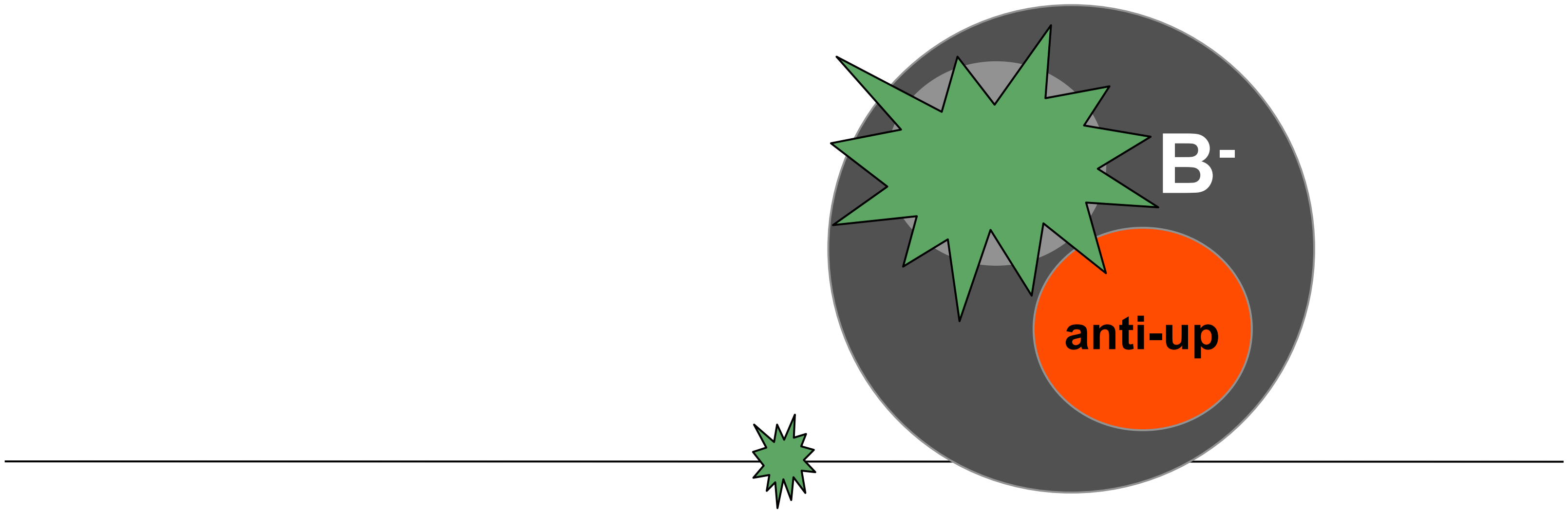
può anche accadere questo!

Alla ricerca di D^0



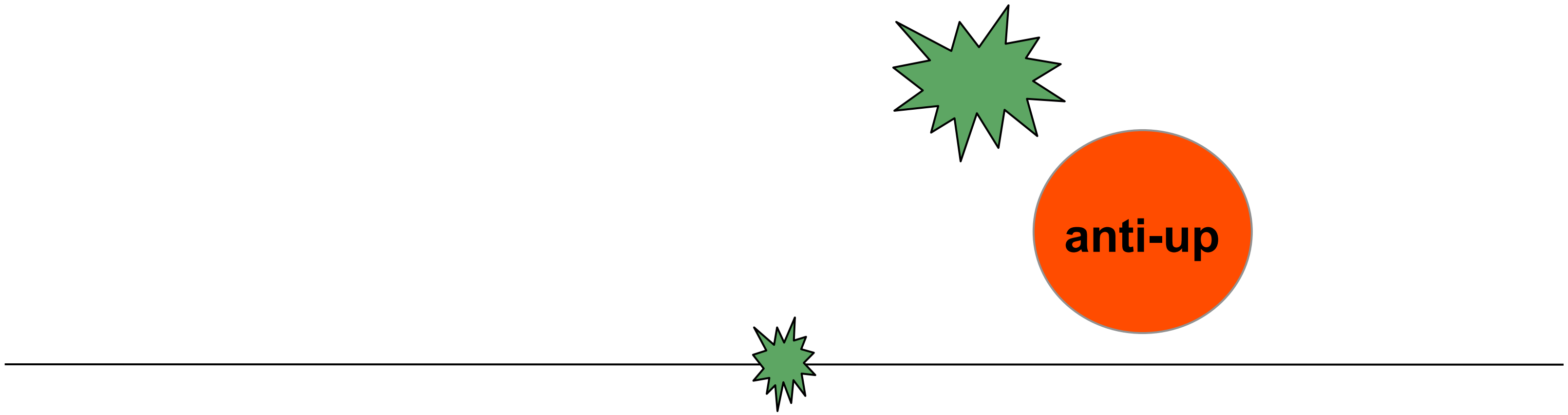
dalla interazione protone-protone si produce una particella chiamata B^-...

Alla ricerca di D^0



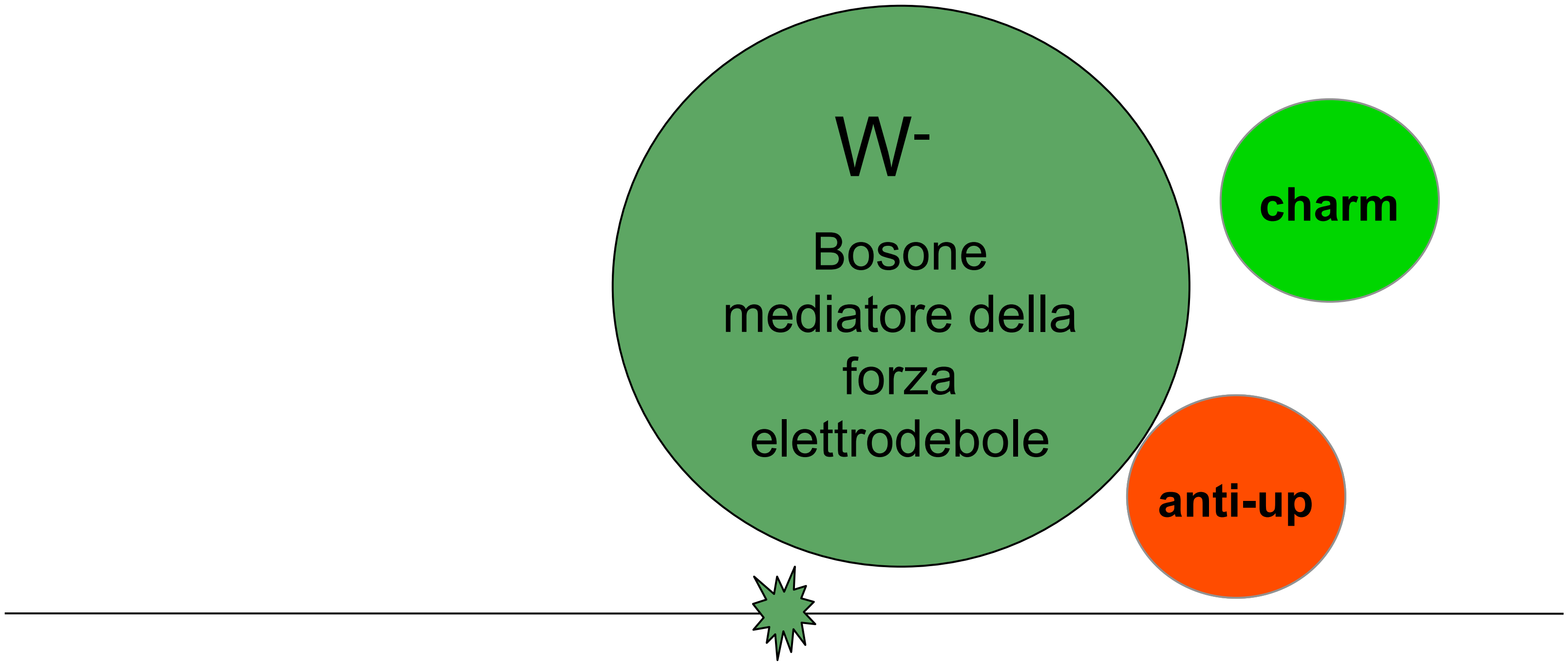
... che dopo un po' decade...

Alla ricerca di D^0



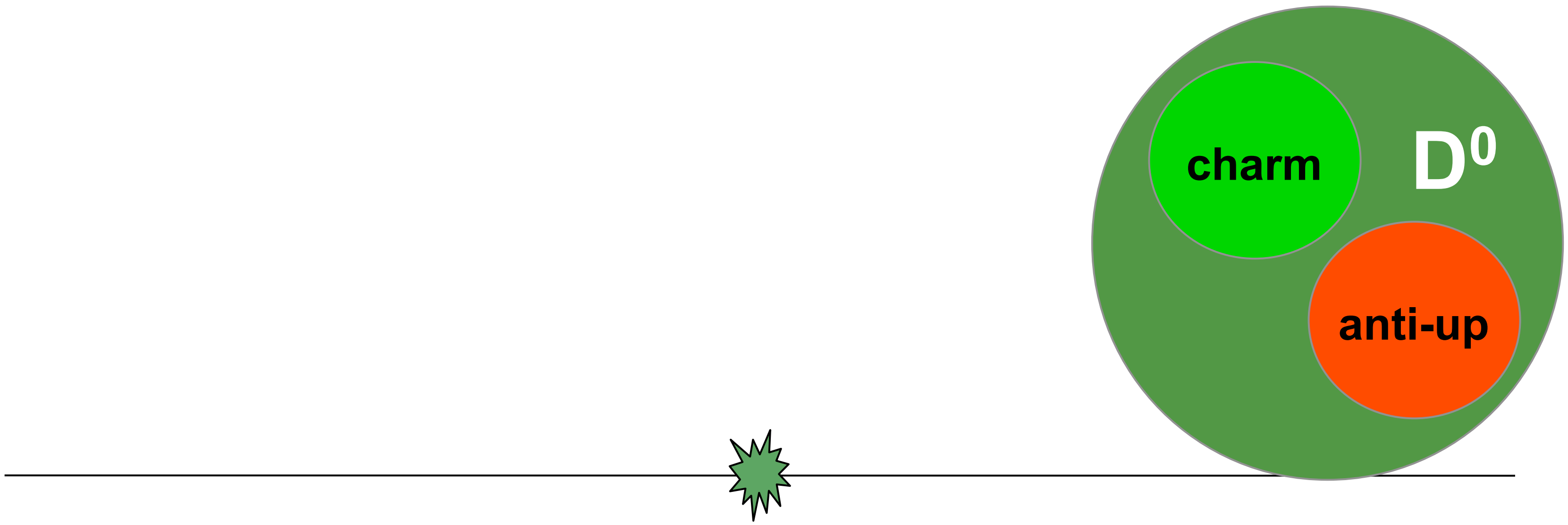
... che dopo un po' decade...

Alla ricerca di D^0



... nel bosone W^-....

Alla ricerca di D^0



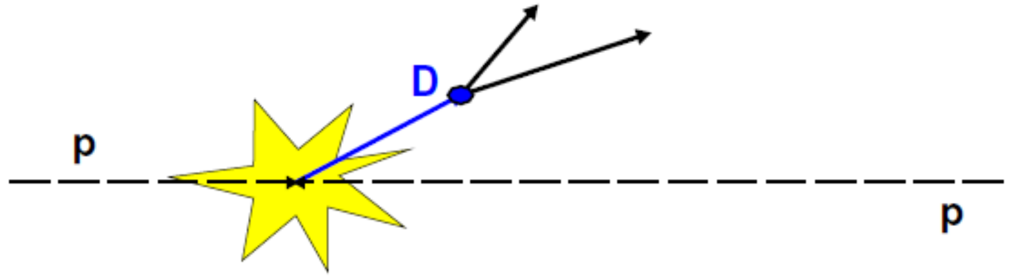
+ altro

si forma così il D^0

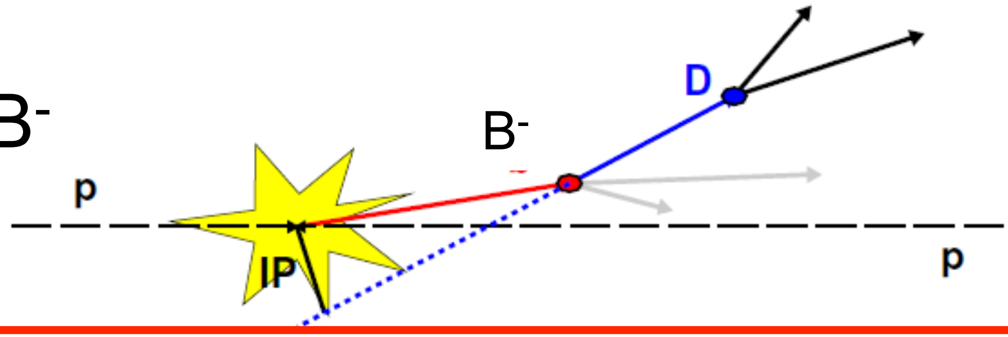
Produzione del D^0

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

Produzione diretta

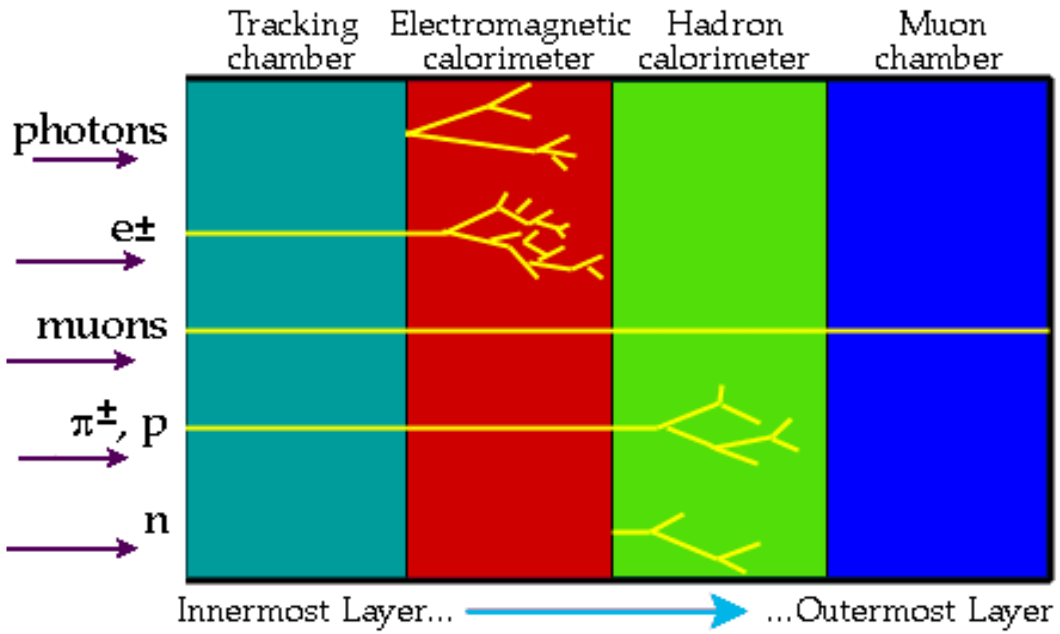


Produzione dal decadimento di una particella (mesone) B^-



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

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

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

Carta d'identità del D^0

D^0

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

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 $\tau =$ [redacted]

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

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

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

$A_\Gamma = (0.26 \pm 2.31) \times 10^{-3}$

$K^+\pi^-$ relative strong phase: $\cos\delta = 1.03^{+0.32}_{-0.18}$

$K^-\pi^+\pi^0$ coherence factor $R_{K\pi\pi^0} = 0.78^{+0.11}_{-0.25}$

$K^-\pi^+\pi^0$ average relative strong phase $\delta^{K\pi\pi^0} = (239^{+32}_{-28})°$

$K^-\pi^-2\pi^+$ coherence factor $R_{K3\pi} = 0.36^{+0.24}_{-0.30}$

$K^-\pi^-2\pi^+$ average relative strong phase $\delta^{K3\pi} = (118^{+60}_{-50})°$

Dal PDG
Il libro sacro
dei fisici delle
particelle
elementari

Carta d'identità del D^0

$\boxed{D^0}$

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

Mass $m = 1864.86 \pm 0.13$ MeV

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

Mean life $\tau =$

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

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

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

Quanto pesa un D^0 ?

3.1×10^{-27} Kg

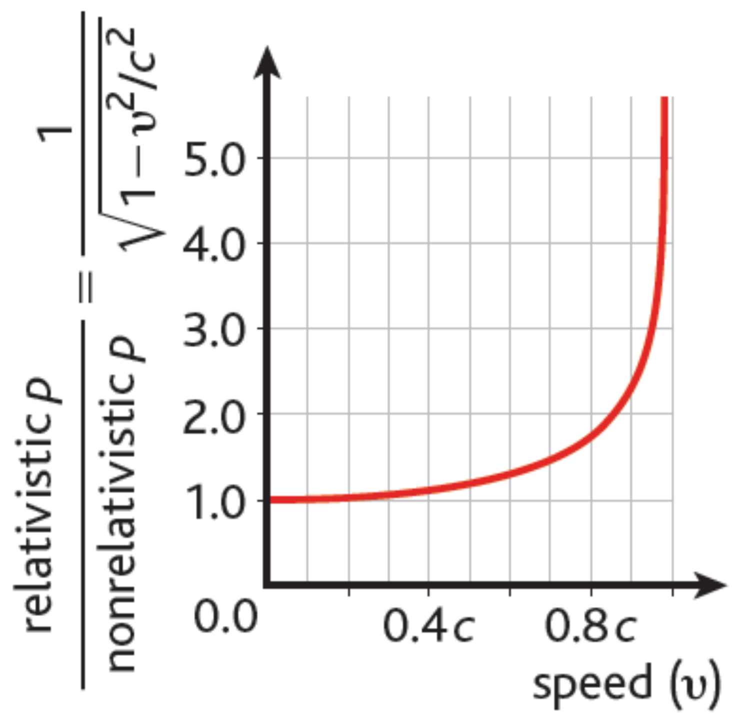
$K^-\pi^-2\pi^+$ average relative strong phase $\delta^{K3\pi} = (118^{+60}_{-50})°$

Dal PDG
Il libro sacro
dei fisici delle
particelle
elementari

L'impulso (quantità di moto) di una particella

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 $v \ll c$ si ha

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

La massa del D^0

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

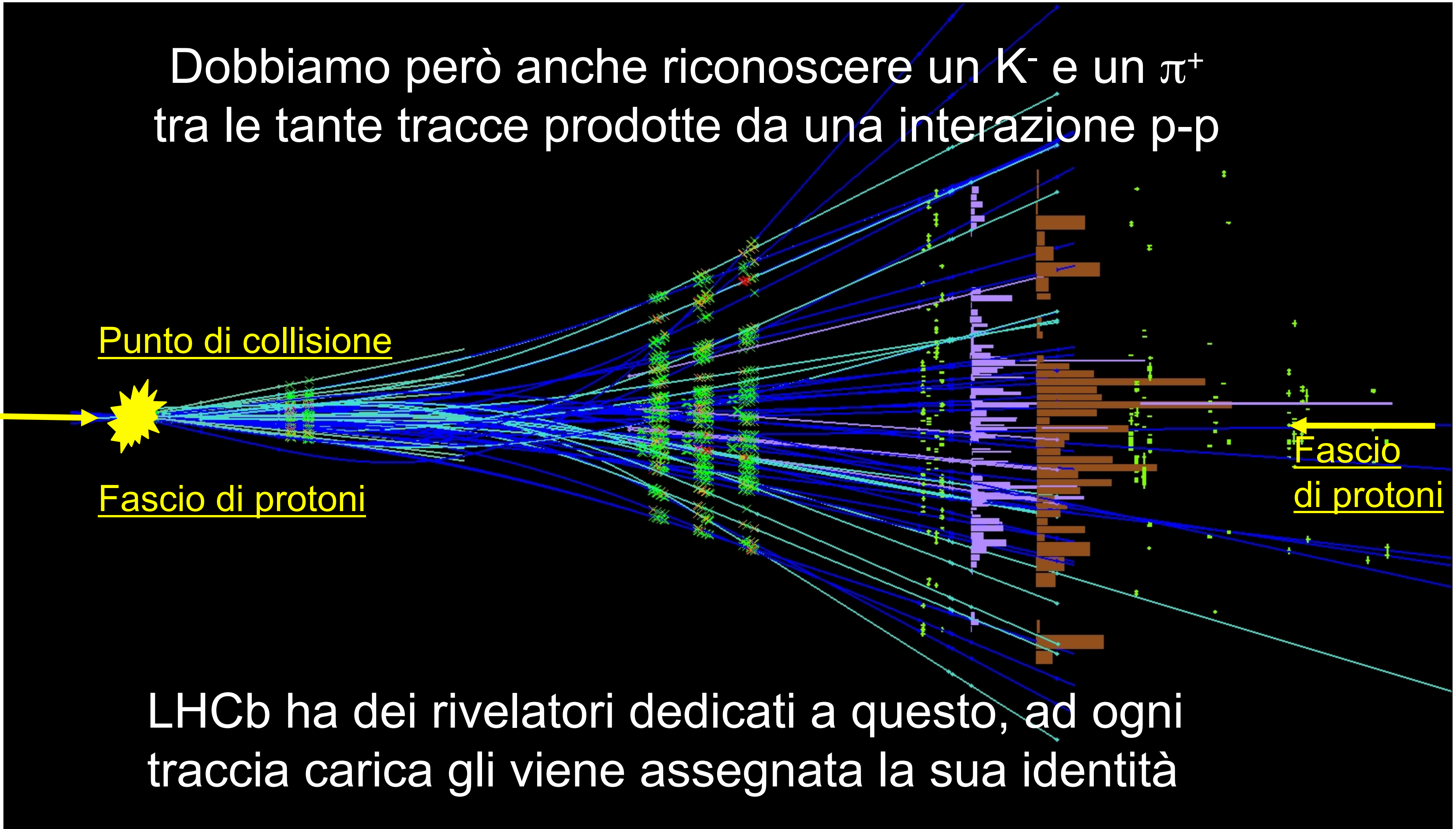
La massa del K^- e la massa del π^+ le conosciamo con ottima precisione, basta guardare la nostra bibbia, il PDG!

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

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

Una collisione a LHCb

Dobbiamo però anche riconoscere un K^- e un π^+ tra le tante tracce prodotte da una interazione p-p



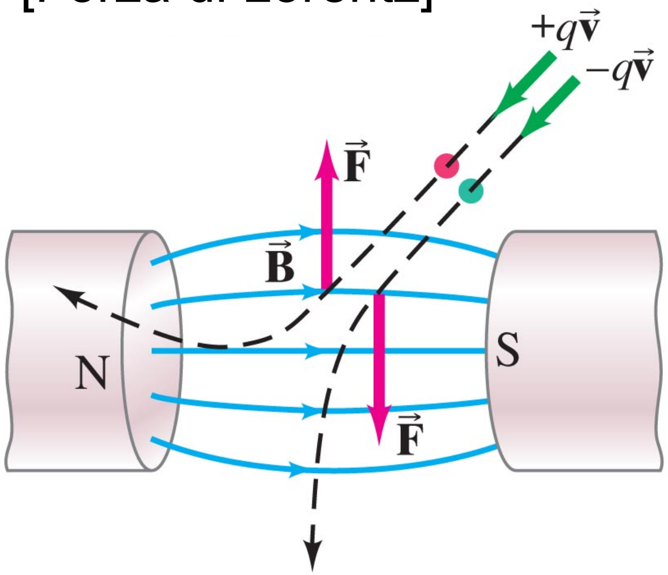
LHCb ha dei rivelatori dedicati a questo, ad ogni traccia carica gli viene assegnata la sua identità

Come si misura l'impulso di una particella carica?

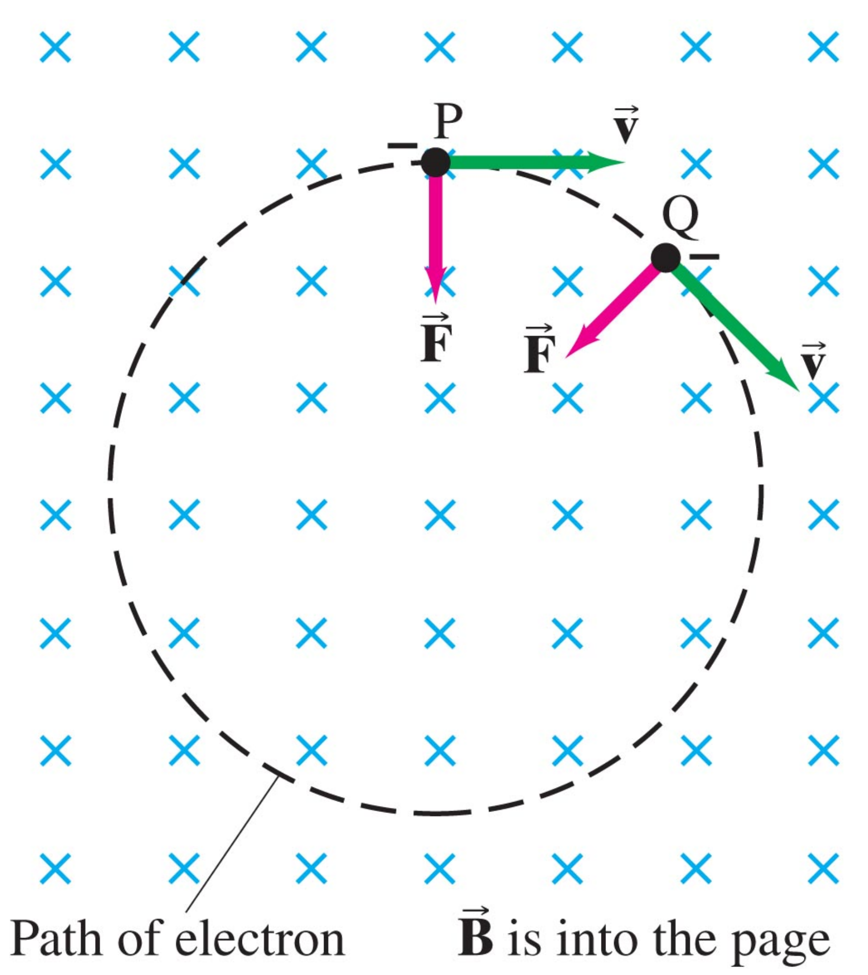
Una particella carica che attraversa un campo magnetico è soggetta ad una forza perpendicolare alla direzione della sua velocità e del campo magnetico. La direzione della forza dipende dal segno della carica

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

[Forza di Lorentz]



Come si misura l'impulso di una particella carica?



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

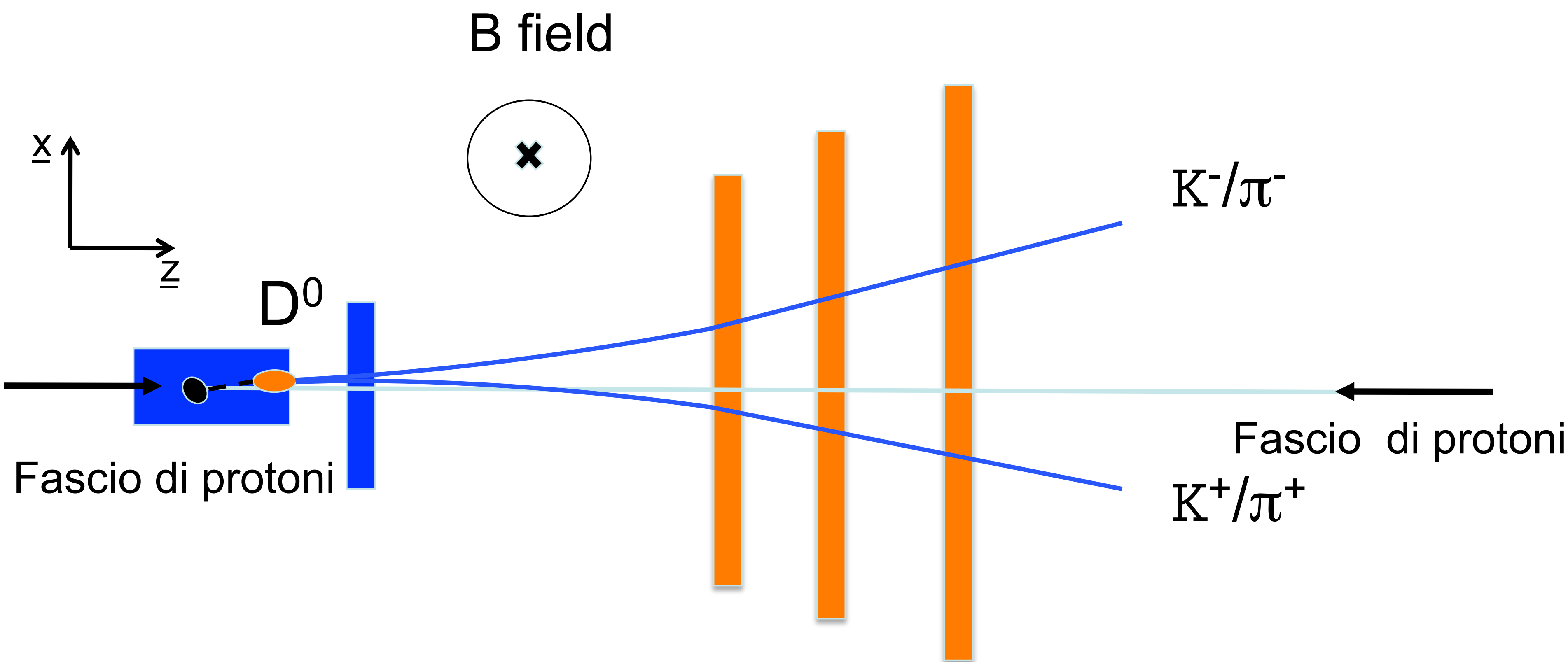
Se $\vec{v}$ e $\vec{B}$ sono perpendicolari il prodotto vettoriale diventa

$$F = qvB$$

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

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

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 misurato l'impulso delle tracce

✓Abbiamo identificato le tracce negative e le tracce positive grazie alla curvatura delle tracce indotta dal campo magnetico

✓Abbiamo identificato i K e i π

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

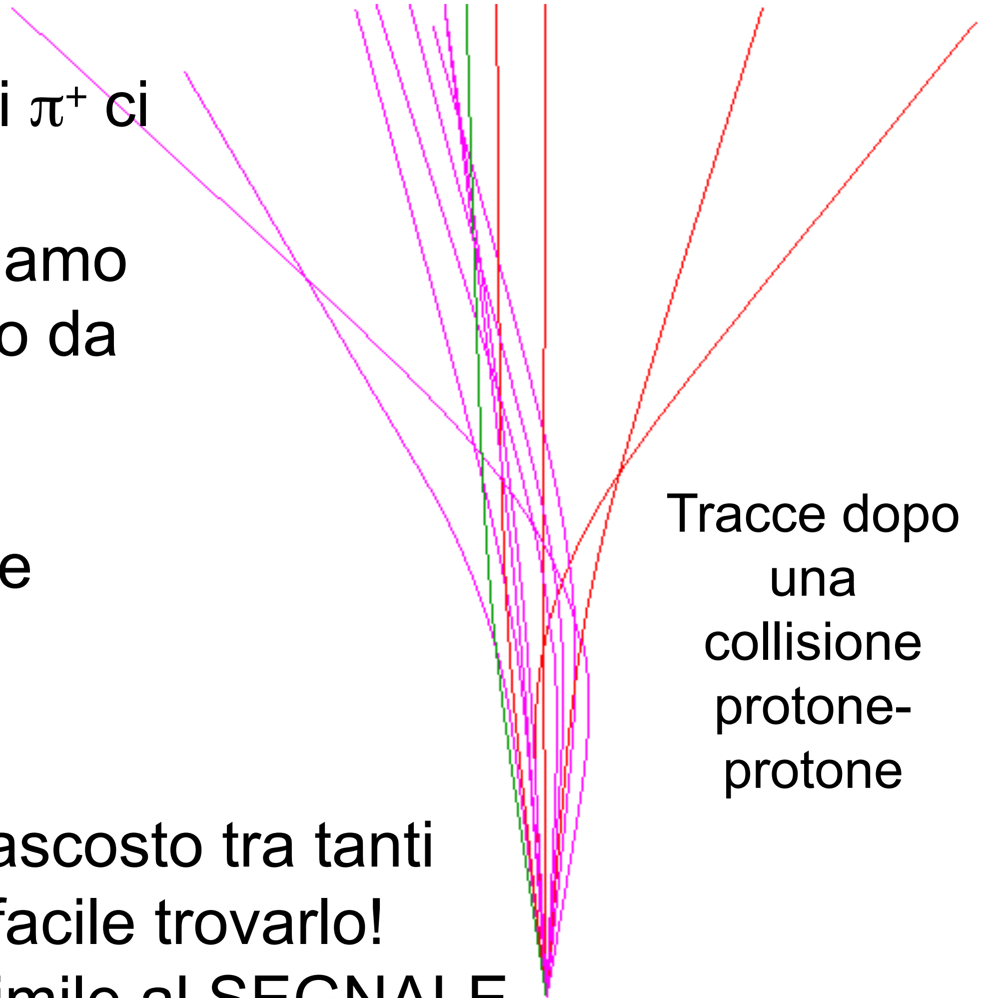
Tracce dopo una collisione protone-protone

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 informazioni in più per distinguere il SEGNALE dal FONDO ?

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

Quanto spazio percorre ?

$$x = \mathrm{v} \cdot \mathrm{t}$$

Per quanto tempo vola mediamente il D^0 ?

Andiamo a vedere nel nostro PDG

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 $\quad (S = 1.1)$
Mean life $\tau = (410.1 \pm 1.5) \times 10^{-15}$ s

Sappiamo che le particelle viaggiano molto prossime alla velocità della luce

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

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 paiaio

Come si rivela un D^0 ?

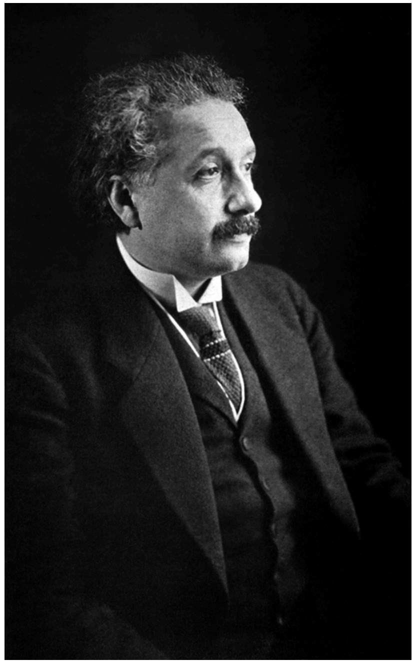
Siamo sicuri che questa formula è corretta per il nostro caso?

$$x = \mathrm{v} \cdot \mathrm{t}$$

Come si rivela un D^0 ?

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

$$x = \mathrm{v} \cdot \mathrm{t}$$

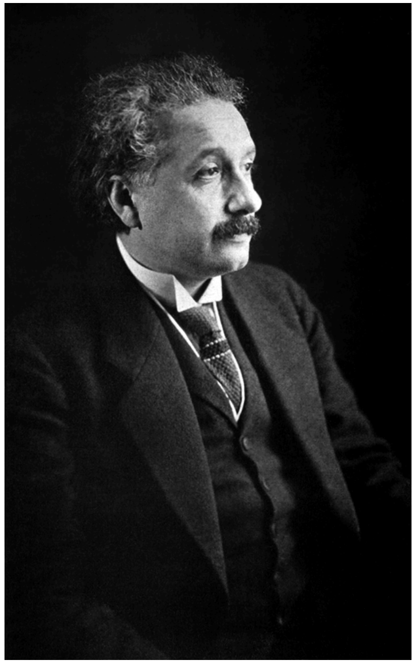


Chiediamolo ad Albert!

Come si rivela un D^0 ?

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

$$x = \mathrm{v} \cdot \mathrm{t}$$



“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”

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

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

Come si rivela un D^0 ?

Quindi

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

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

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

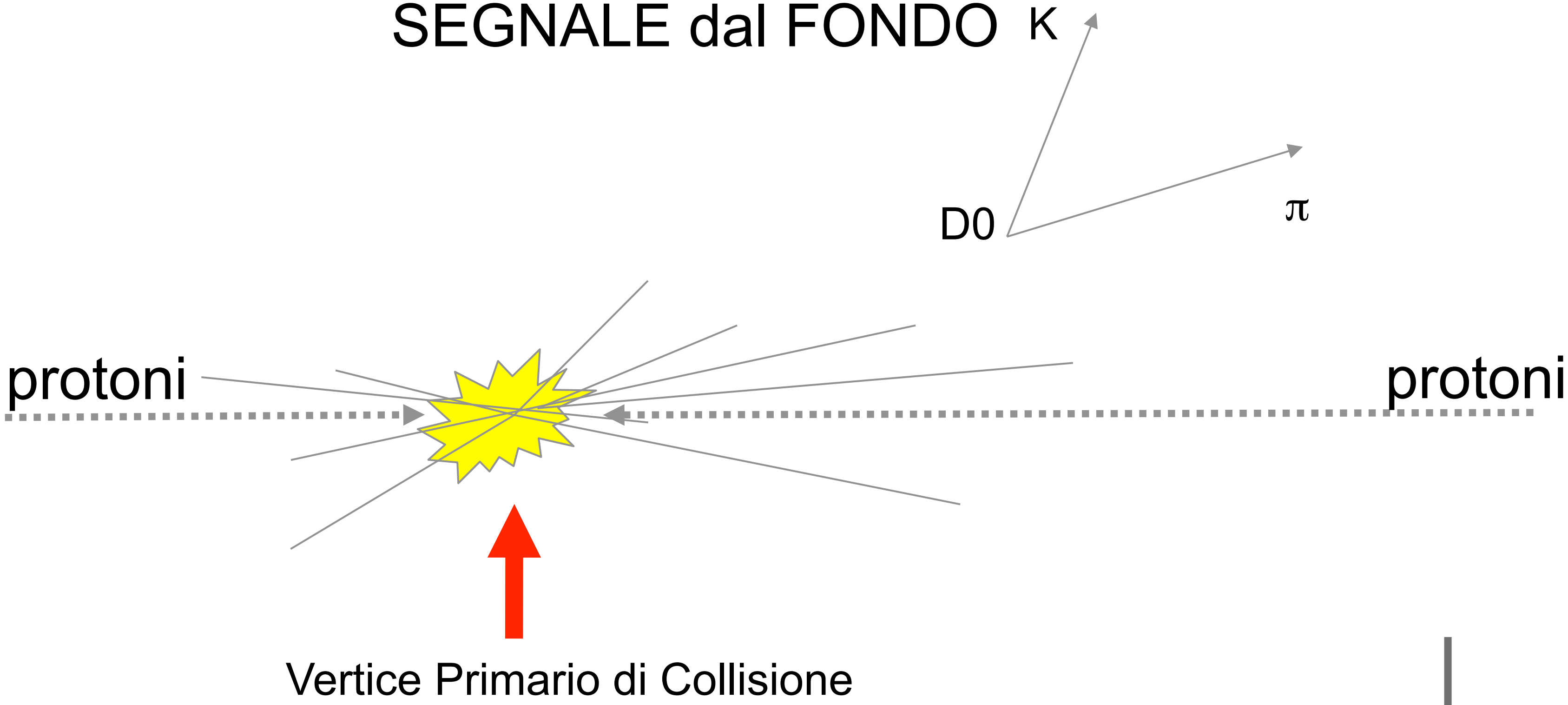
$$x = 40 \cdot 3.0 \times 10^{8}\ \text{m/s}\ \cdot 410 \times 10^{-15}\ \text{s} = 0.6\ \text{cm}$$

Come si rivela un D^0 ?

$$x = 40 \cdot 3.0\times10^{8}\ \text{m/s}\ \cdot 410\times10^{-15}\ \text{s} = 0.6\ \text{cm}$$

Il D^0 in media vola 0.6 cm!

Allora abbiamo qualche speranza per distinguere il SEGNALE dal FONDO



L'ESERCIZIO DI OGGI

Obiettivi dell'esercizio

I 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?)

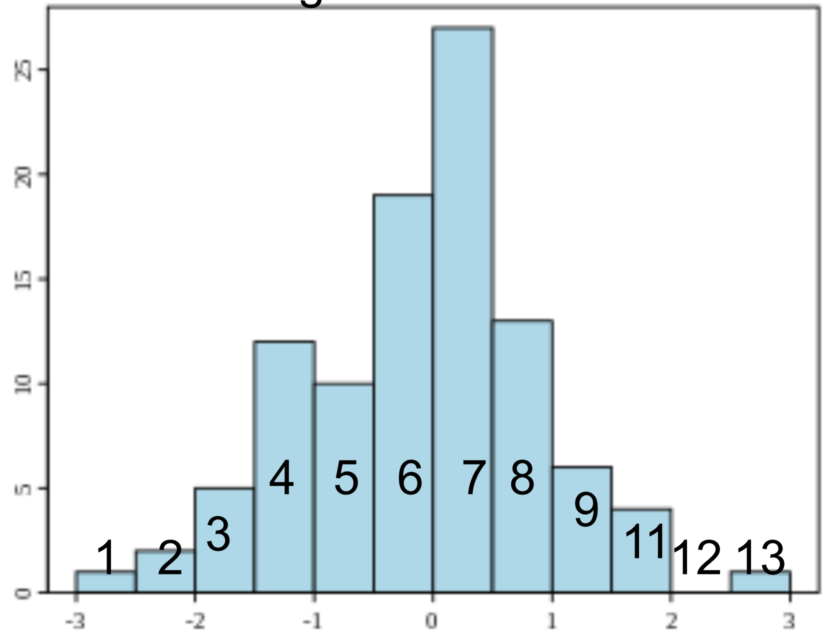
Se facciamo n misure di una stessa grandezza, possiamo classificarla in “bin”.

Un bin è un rettangolo del grafico

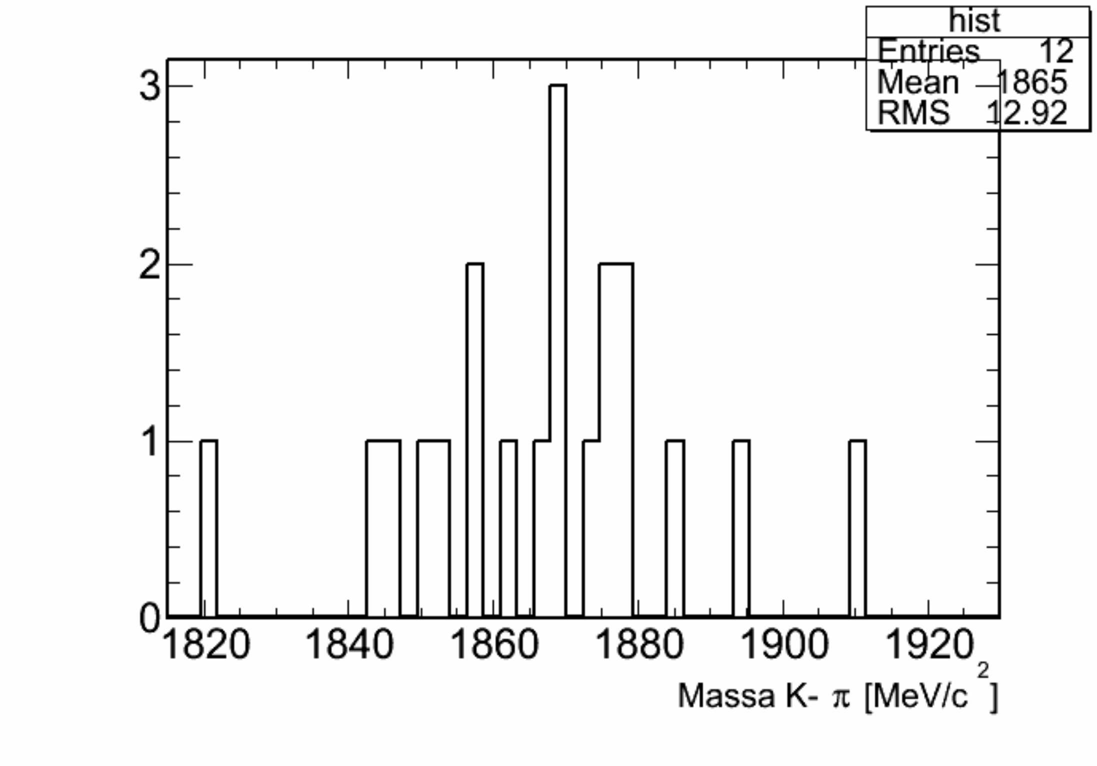
Se misuro x = -0.2 aumento di una unità il bin “6” all’interno dell’intervallo di

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

Istogramma a 13 bin



I OBIETTIVO


hist
Entries 12
Mean 1865
RMS 12.92
3
2
1
0
1820 1840 1860 1880 1900 1920
Massa K- π [MeV/c^2]

Obiettivi dell'esercizio

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

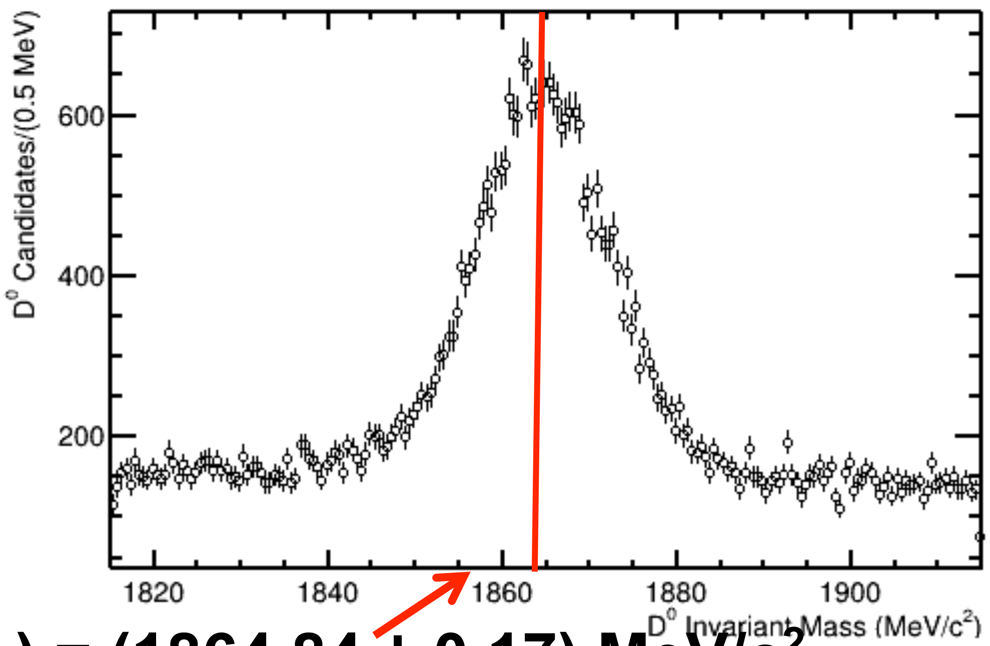
II obiettivo: misurare il valore della massa del D^0

Il OBIETTIVO

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

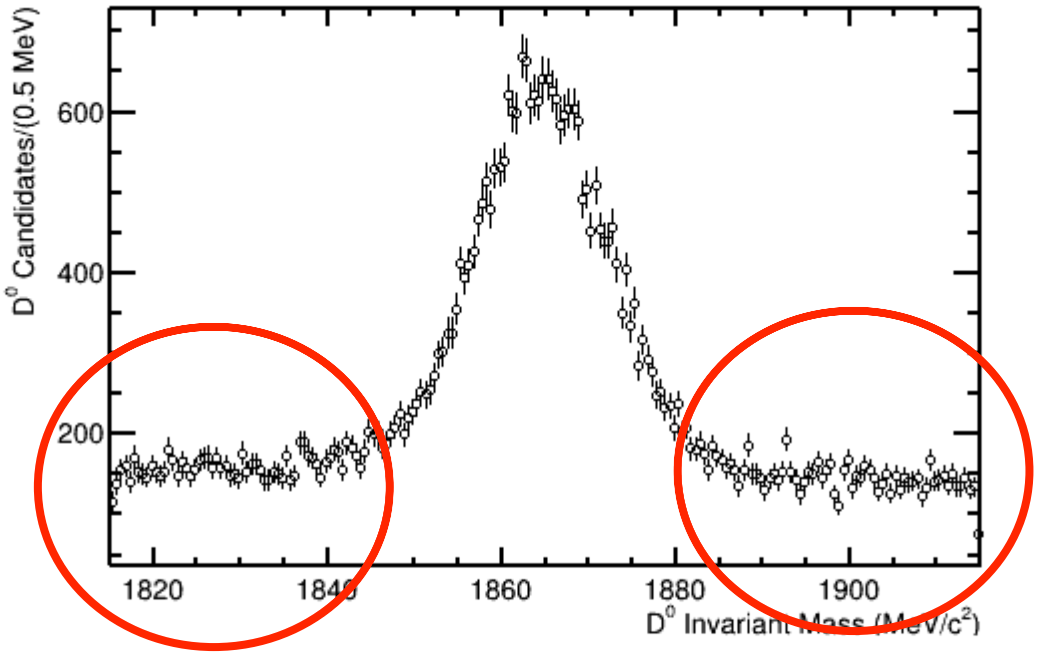


$m(D_0) = (1864.84 \pm 0.17)\ \text{MeV}/c^2$

L'esercizio

La distribuzione mostra due andamenti

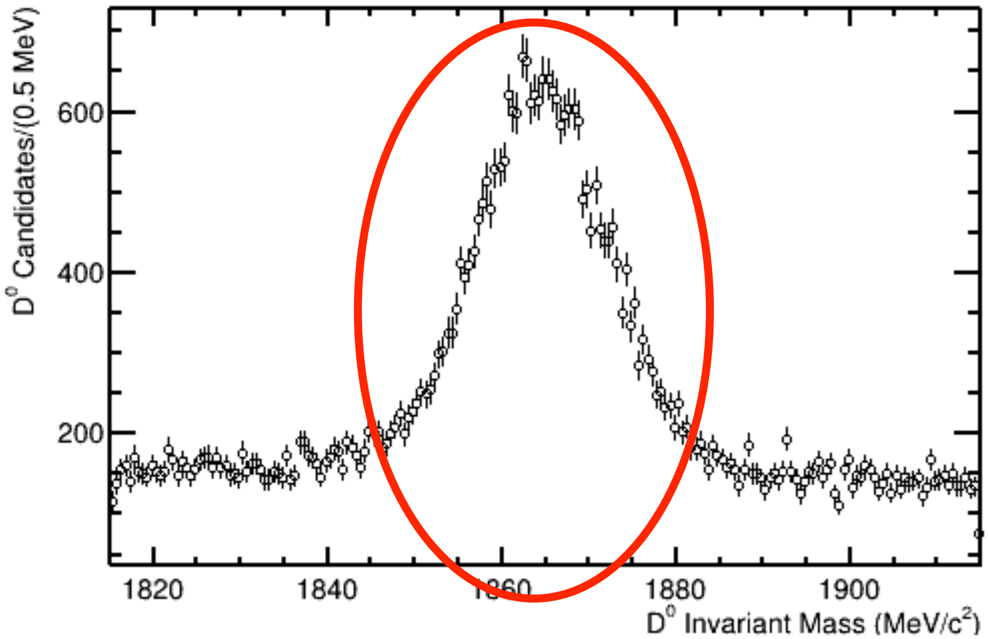
FONDO



Come si rivela un D^0 ?

La distribuzione mostra due andamenti

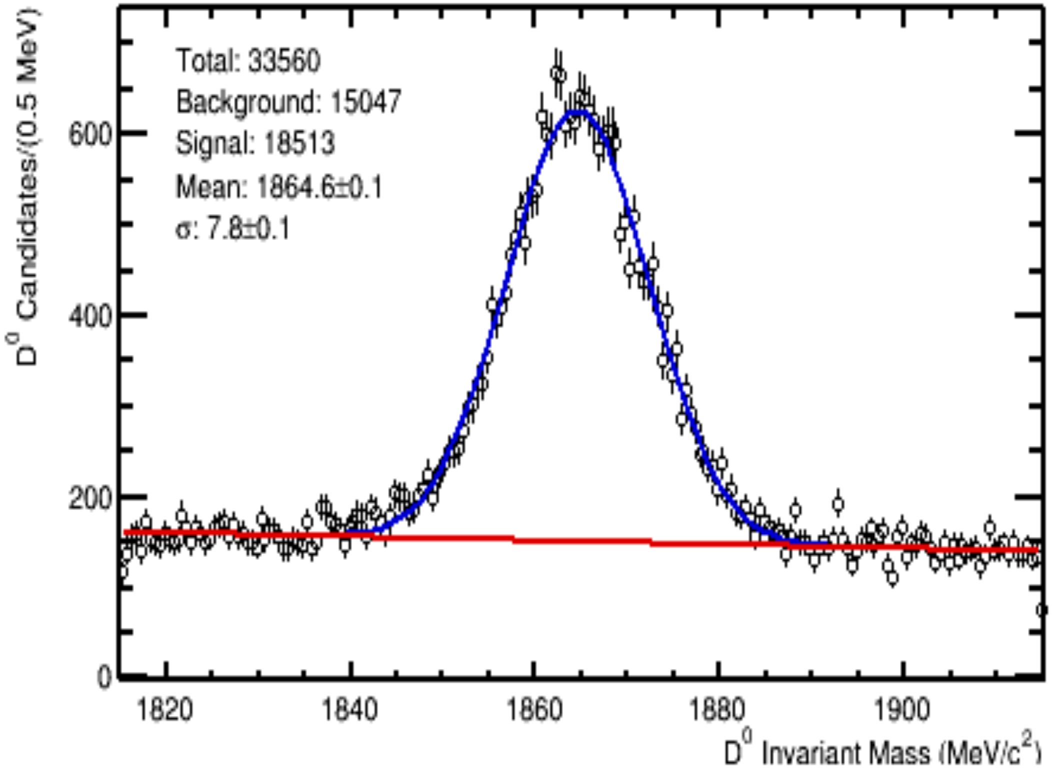
SEGNALE



Il OBIETTIVO

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

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

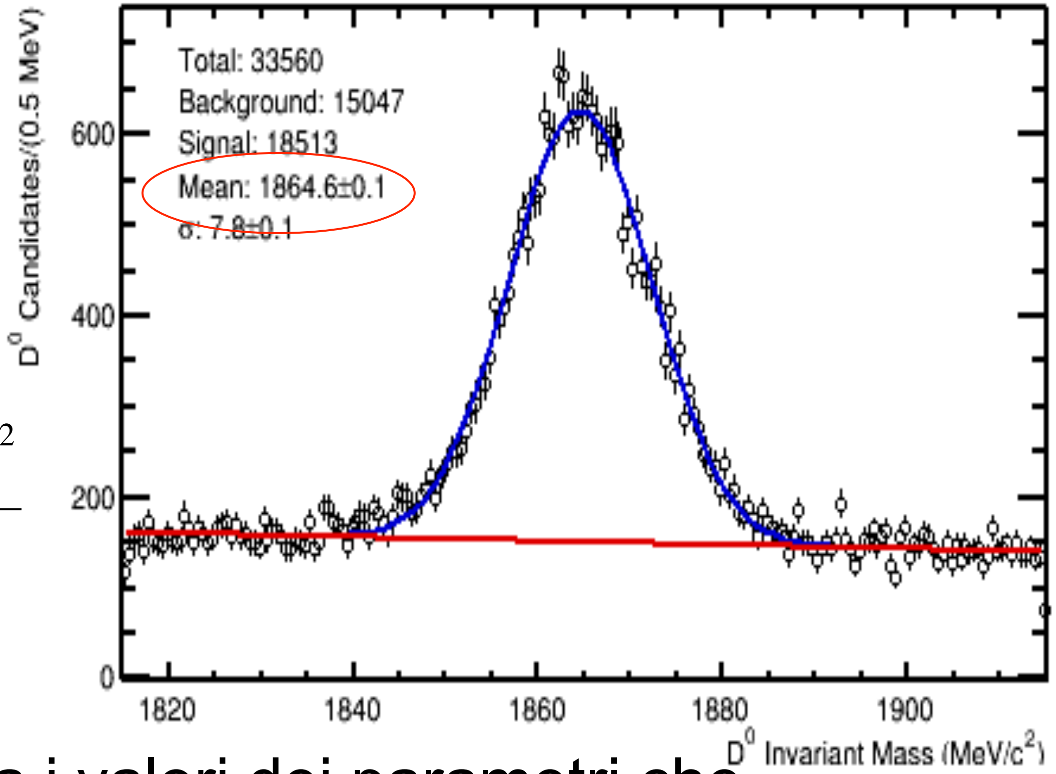


La procedura di "fit" cerca i valori dei parametri che meglio si adattano ai dati
Il valore del parametro μ è la misura di massa del D^0

Il OBIETTIVO

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

$$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{\left(\mathrm{D}^{0}\ \text{invariant mass}-\text{mean}\right)^{2}}{2\sigma^{2}}}$$



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

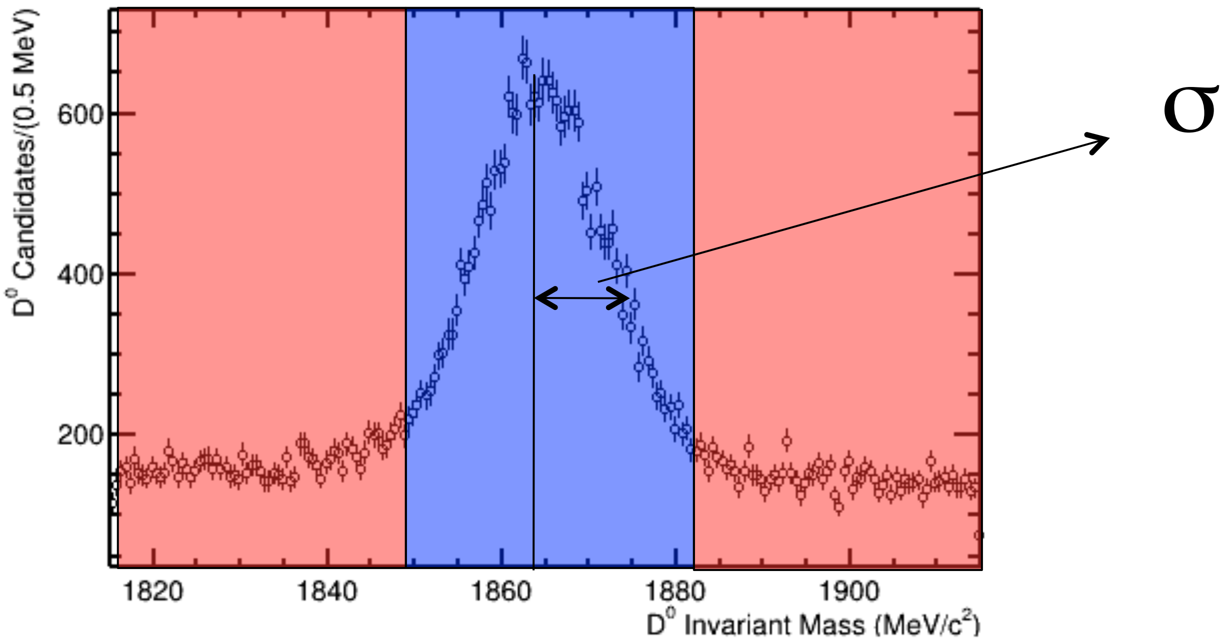
Il valore del parametro μ è la misura di massa del D^0

Confrontiamo il valore con quello del PDG

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

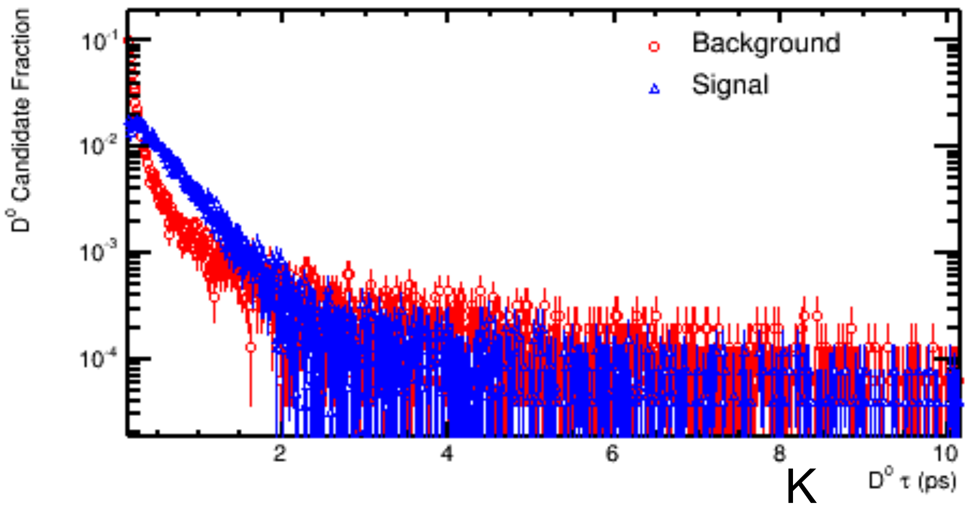
III OBIETTIVO



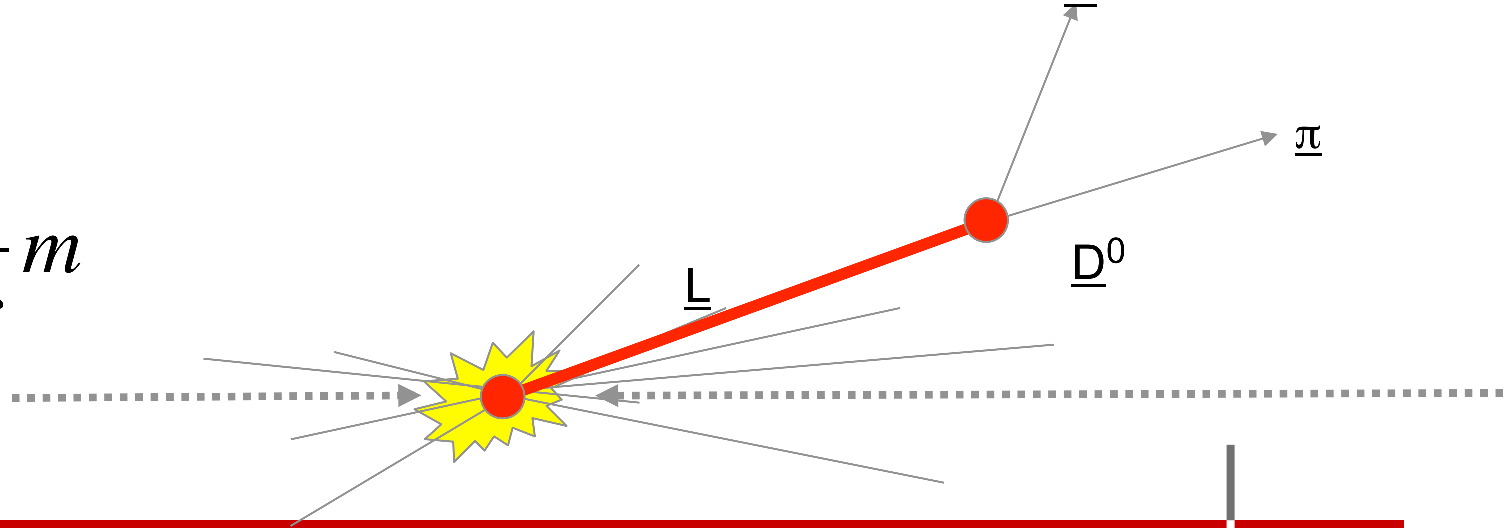
Selezioniamo la regione di FONDO e di SEGNALE
La regione di SEGNALE può essere definita come 3 volte la larghezza della Gaussiana (σ) che abbiamo ottenuto dal fit di prima
In 3 σ è contenuto il 99.% del SEGNALE

III OBIETTIVO

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

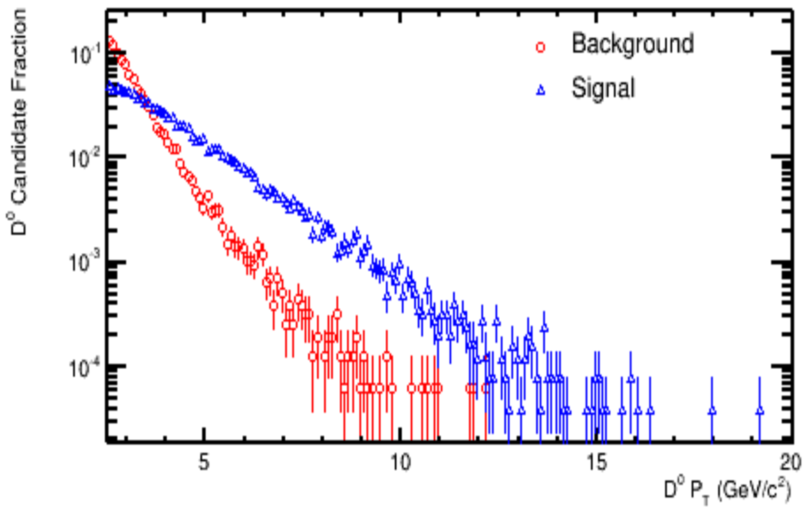


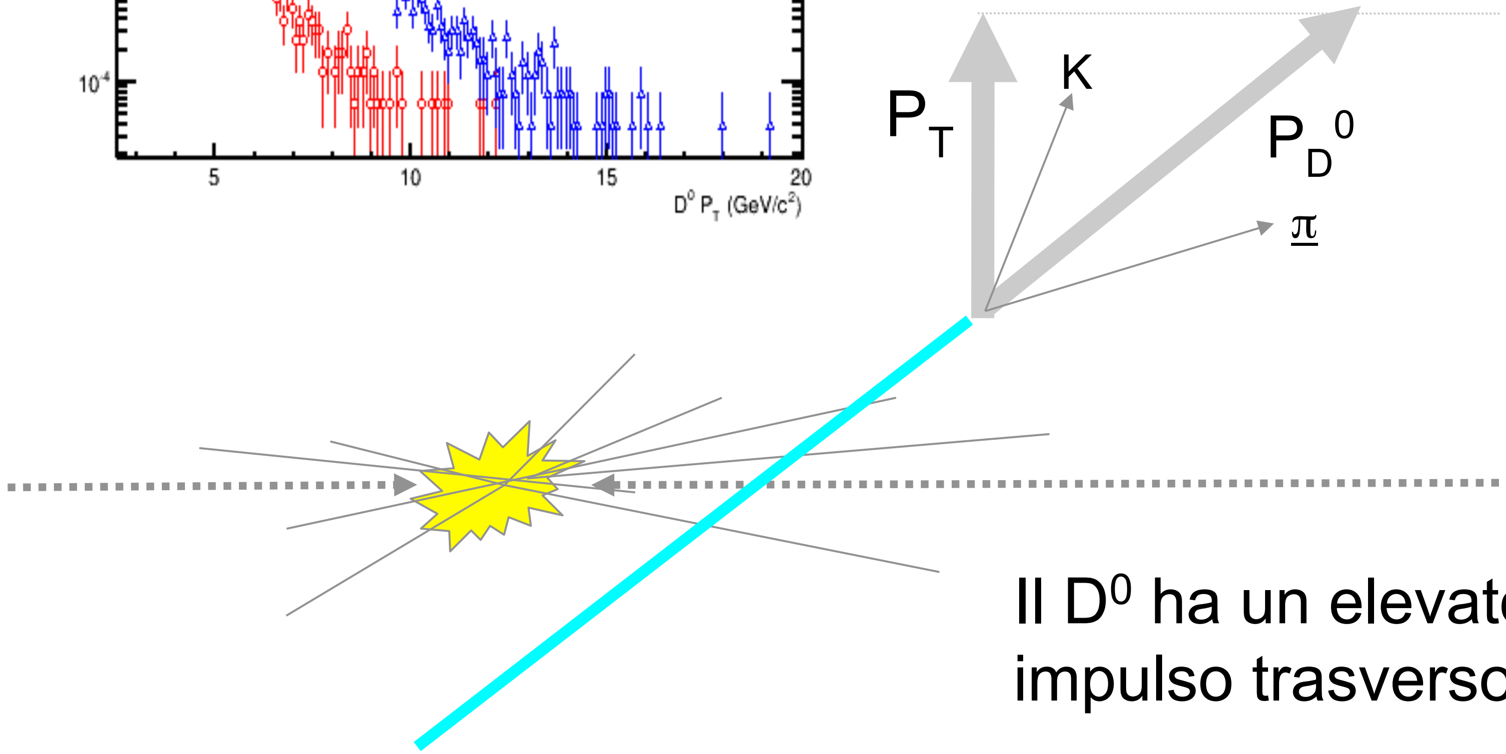
$$t = \frac{x}{\gamma\beta c} = \frac{x}{pc} m$$



III OBIETTIVO

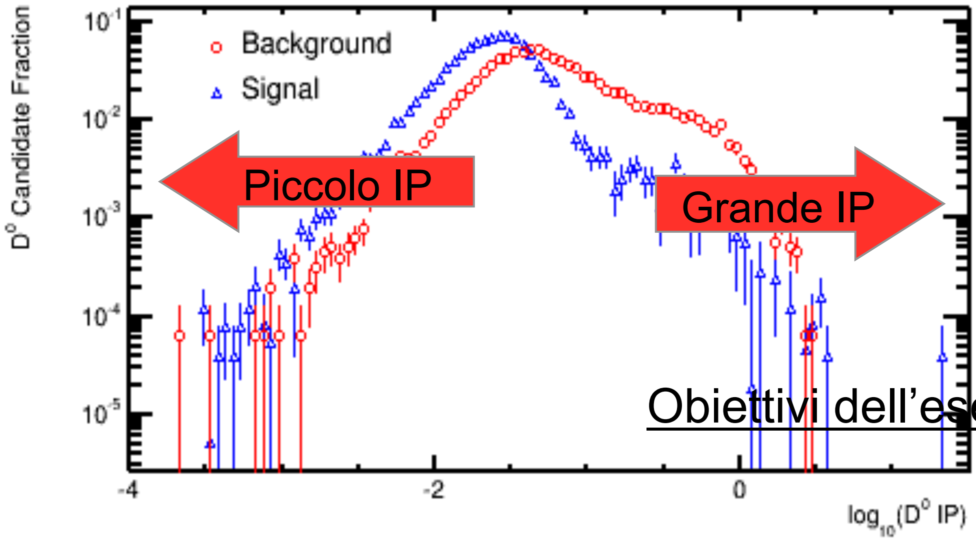
L'impulso trasverso





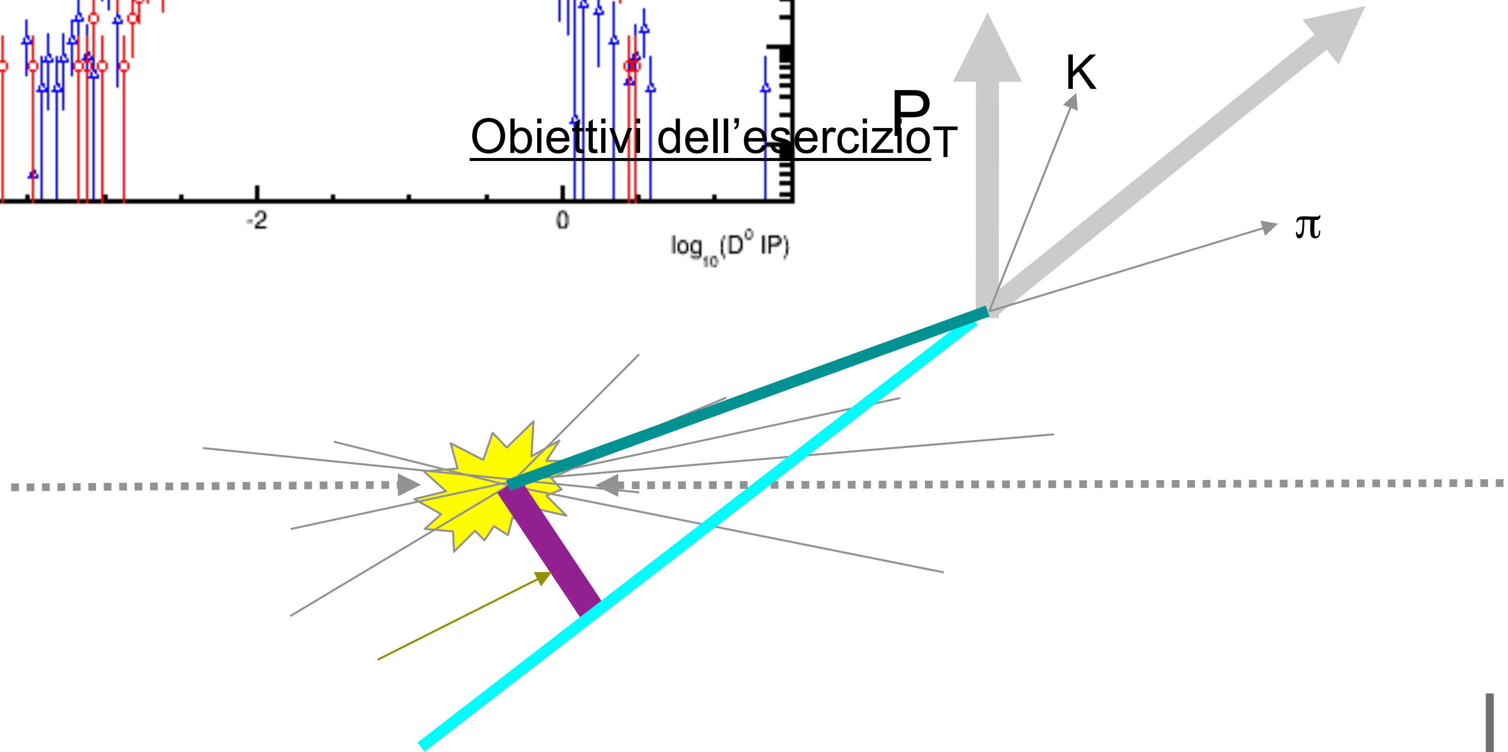
Il D^0 ha un elevato impulso trasverso

III OBIETTIVO



Parametro di Impatto (IP)

Obiettivi dell'esercizio



Obiettivi dell'esercizio

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

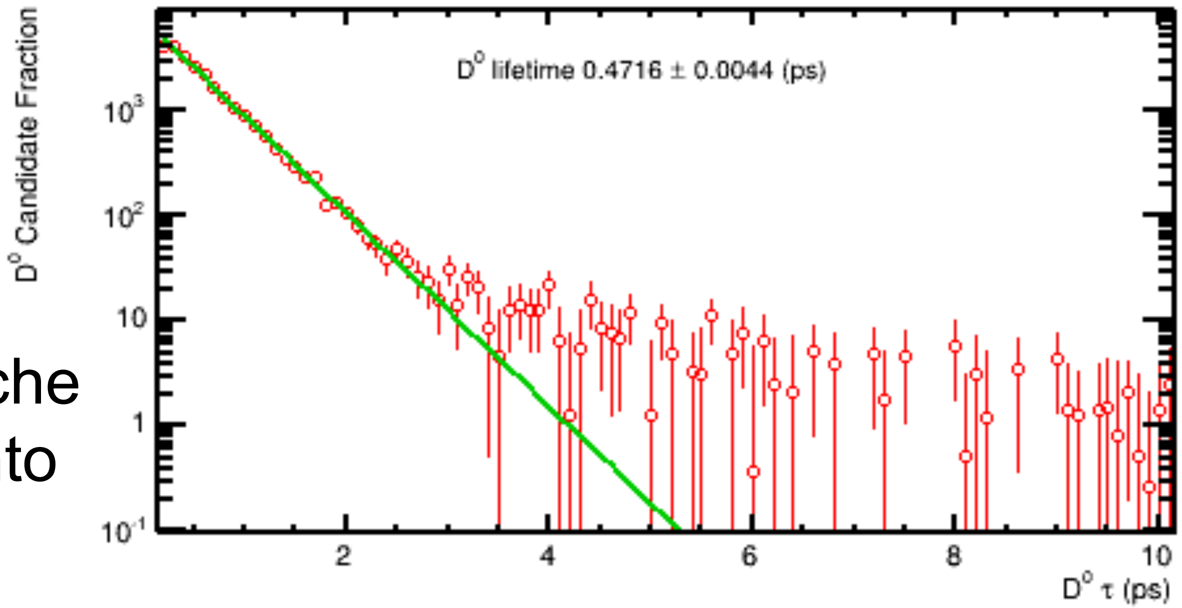
II obiettivo: misurare il valore della massa del D^0

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

IV OBIETTIVO

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



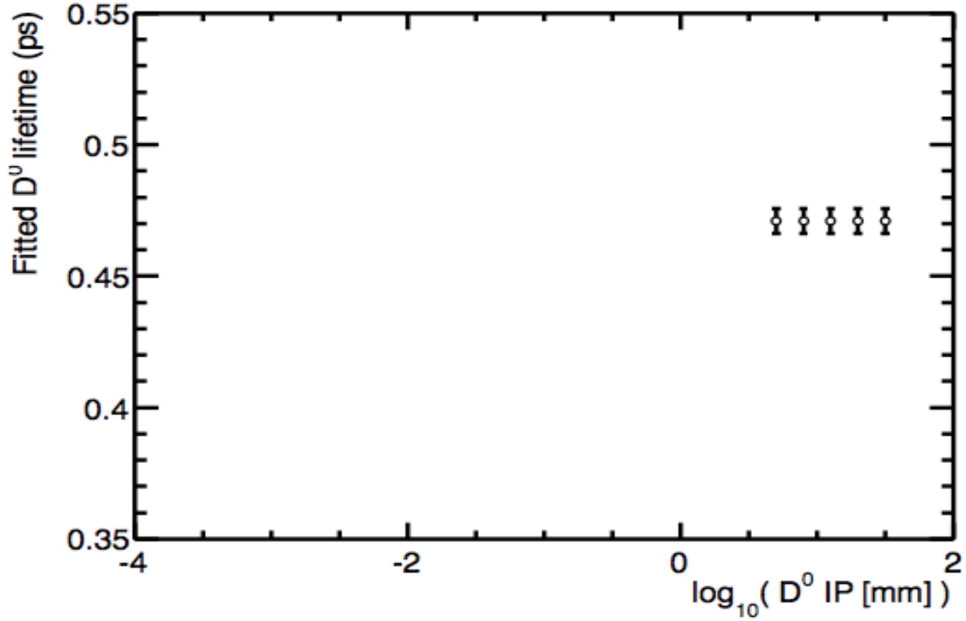
Adattiamo la curva che descrive l'andamento del tempo di decadimento all'istogramma del tempo di decadimento del SEGNALE e ottenendo la misura di τ

Confrontiamo il valore con quello del PDG è corretto?

Obiettivi dell'esercizio

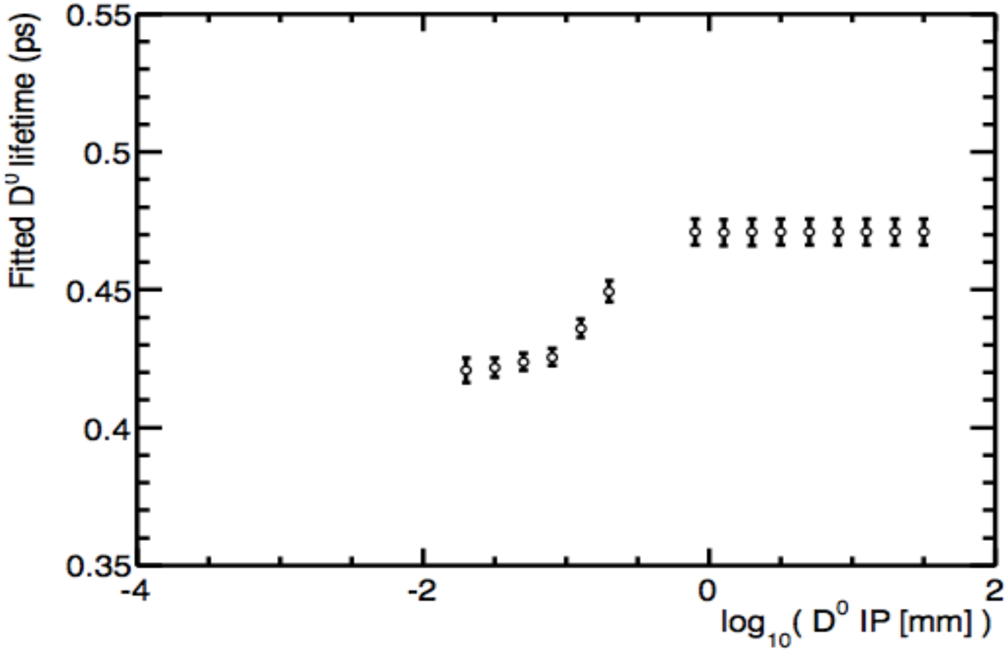
I obiettivo: riempire un istogramma con eventi di massa del D^0, selezionando un K e un π per ogni evento
II obiettivo: misurare il valore della massa del D^0
III obiettivo: fare l'istogramma della tempo di decadimento, dell'impulso trasverso e del parametro d'impatto per il SEGNALE e per il FONDO
IV: 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

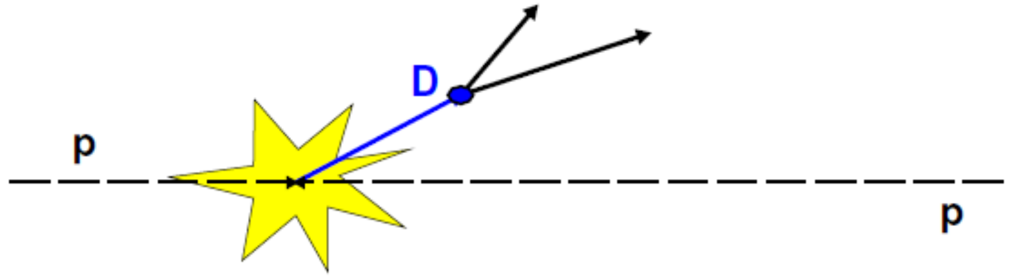


Il valore della vita media diminuisce. Perché?

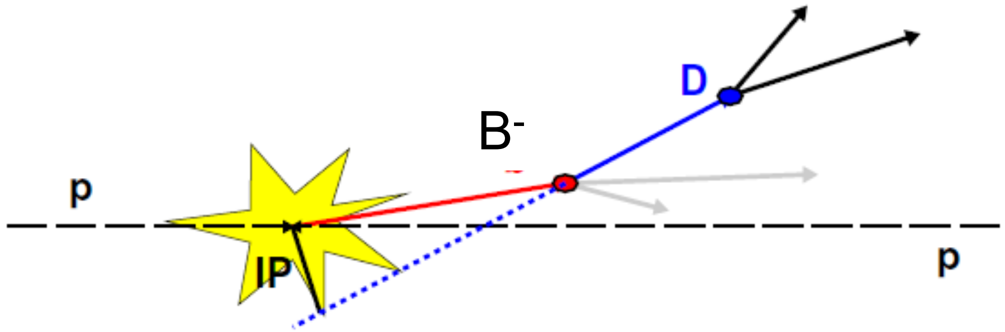
Produzione del D^0

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

Produzione diretta

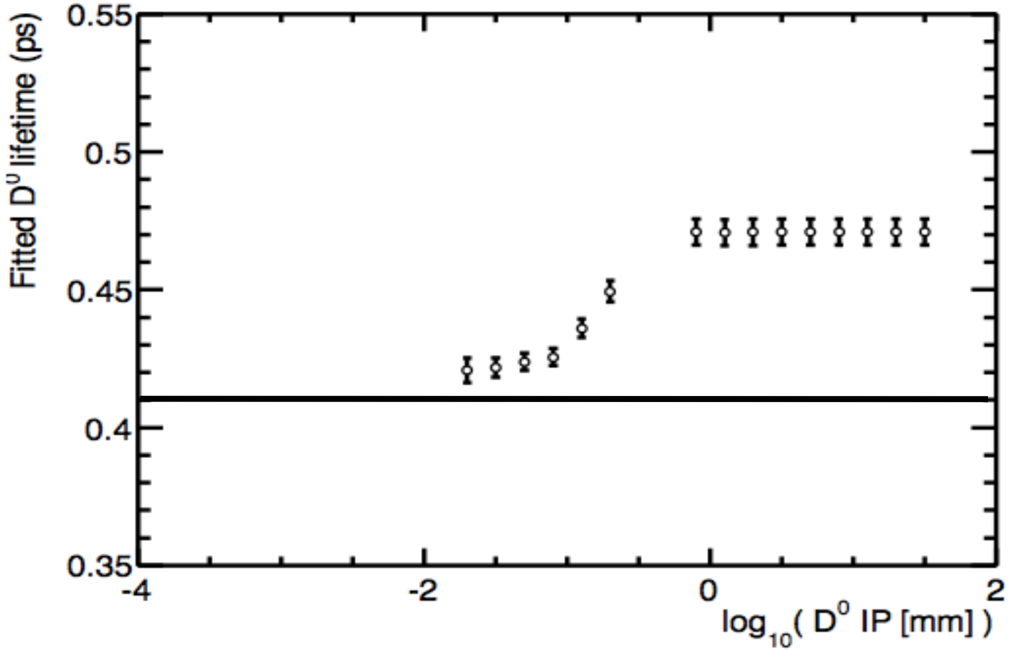


Produzione dal decadimento di una particella (mesone) B^-



V OBIETTIVO

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