

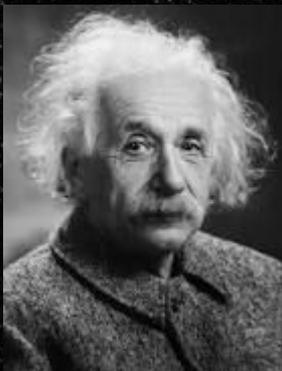
Introduzione all'esperimento LHCb e all'analisi dei dati.

Lucio Anderlini

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare - Firenze



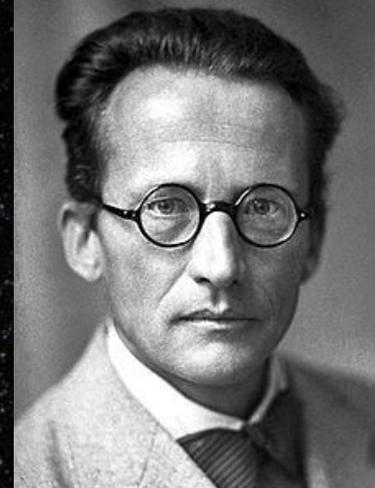
Predizione dell'antimateria



Albert Einstein, 1905

Meccanica **Relativistica**

$$E = \gamma mc^2$$



Erwin Schrodinger, 1926

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{r}, t) = \hat{H} \Psi(\mathbf{r}, t)$$

Meccanica **Quantistica**



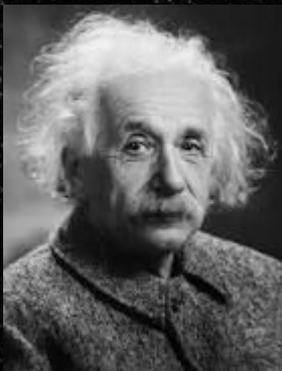
Paul A. M. Dirac, 1929

Meccanica **Quantistica Relativistica**

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m) \psi = 0$$

Apparente difetto: presenta soluzioni ad energia negativa...

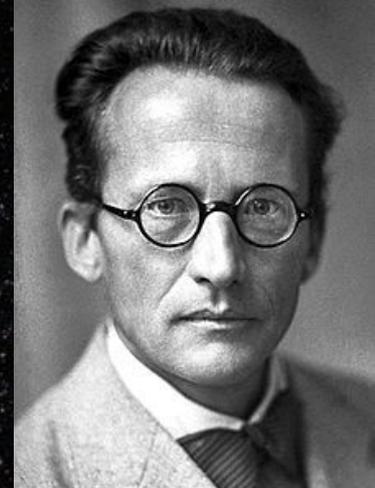
Predizione dell'antimateria



Albert Einstein, 1905

Meccanica **Relativistica**

$$E = \gamma mc^2$$



Erwin Schrodinger, 1926

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{r}, t) = \hat{H} \Psi(\mathbf{r}, t)$$

Meccanica **Quantistica**



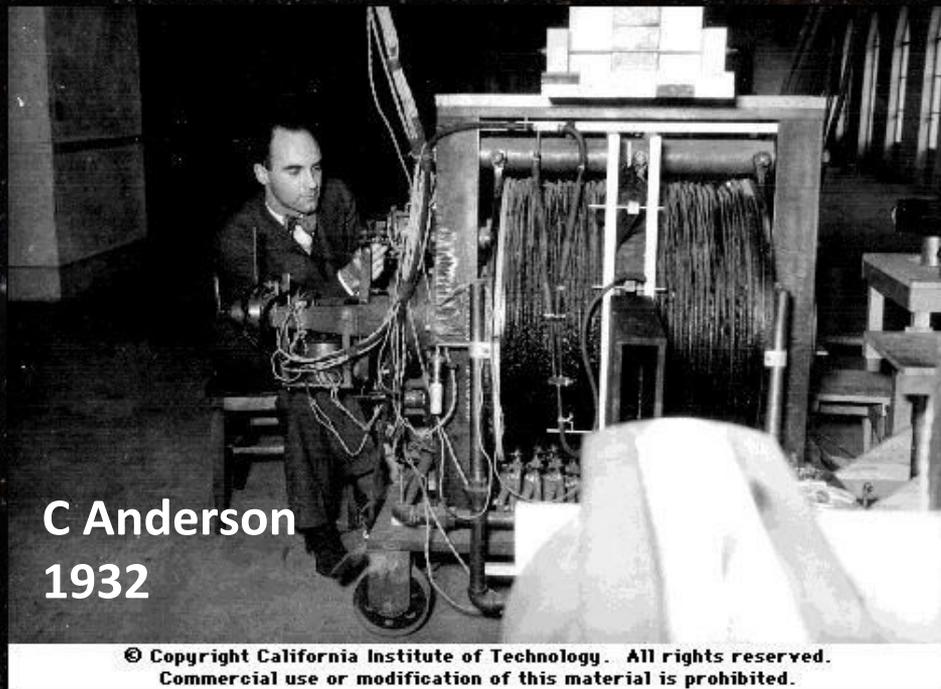
Meccanica **Quantistica Relativistica**

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m) \psi = 0$$

*Soluzioni a energia negativa descriverebbero bene "elettroni di carica positiva"...
che però non conosciamo...*

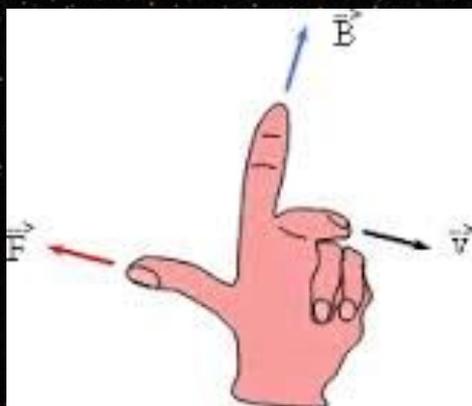
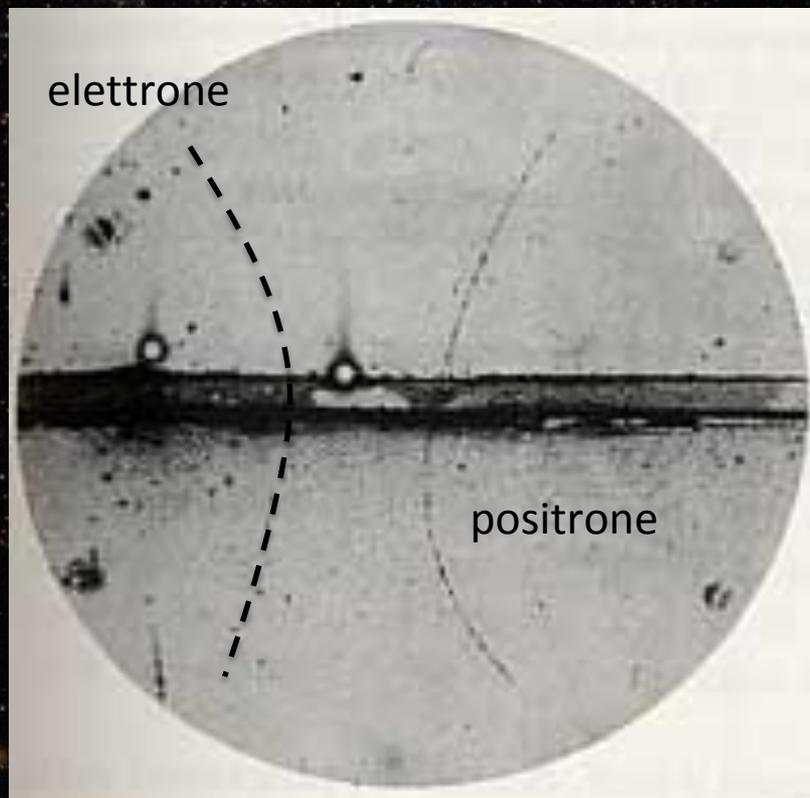
Paul A. M. Dirac, 1929

Osservazione dell'antimateria



Studio dei raggi cosmici con un campo magnetico.

La traccia “curva” dalla parte sbagliata!

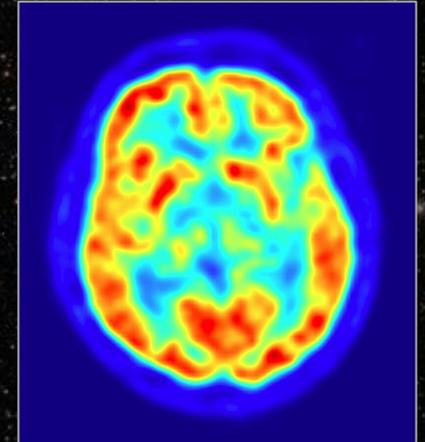
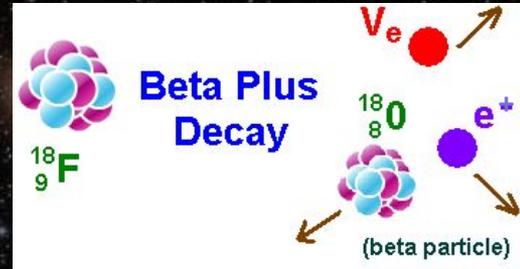
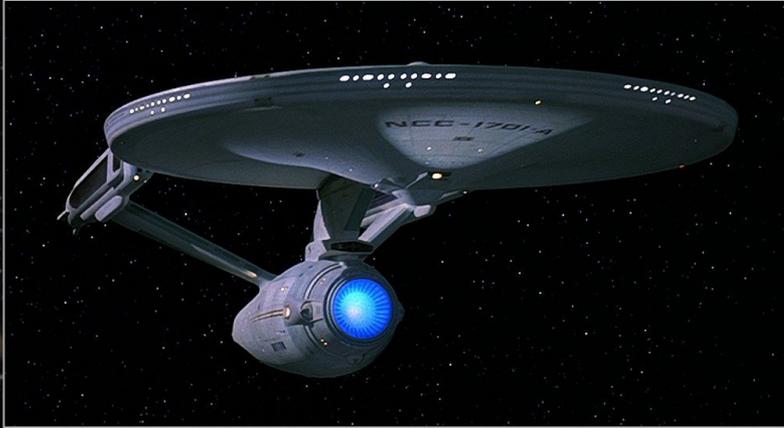


La Forza di Lorentz

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

è opposta per cariche opposte

Applicazioni tecnologiche dell'antimateria, oggi.

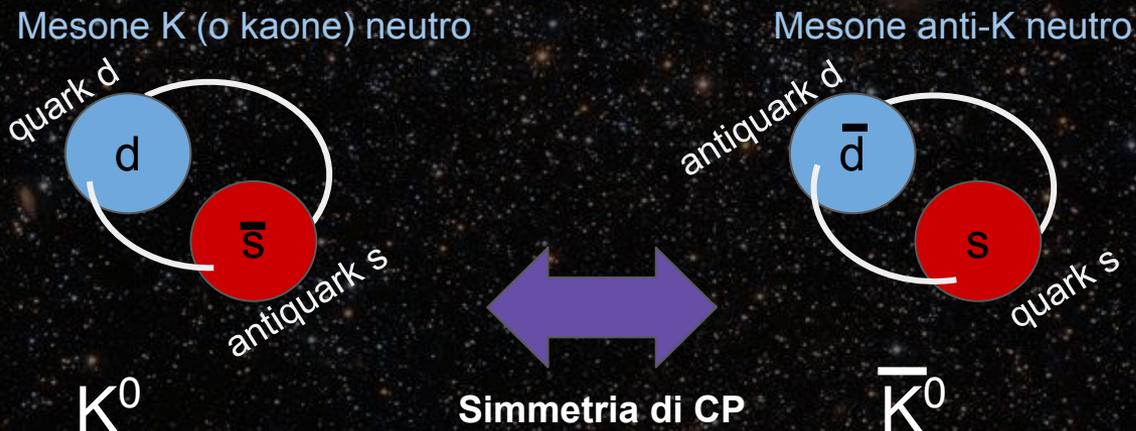


PET scanner

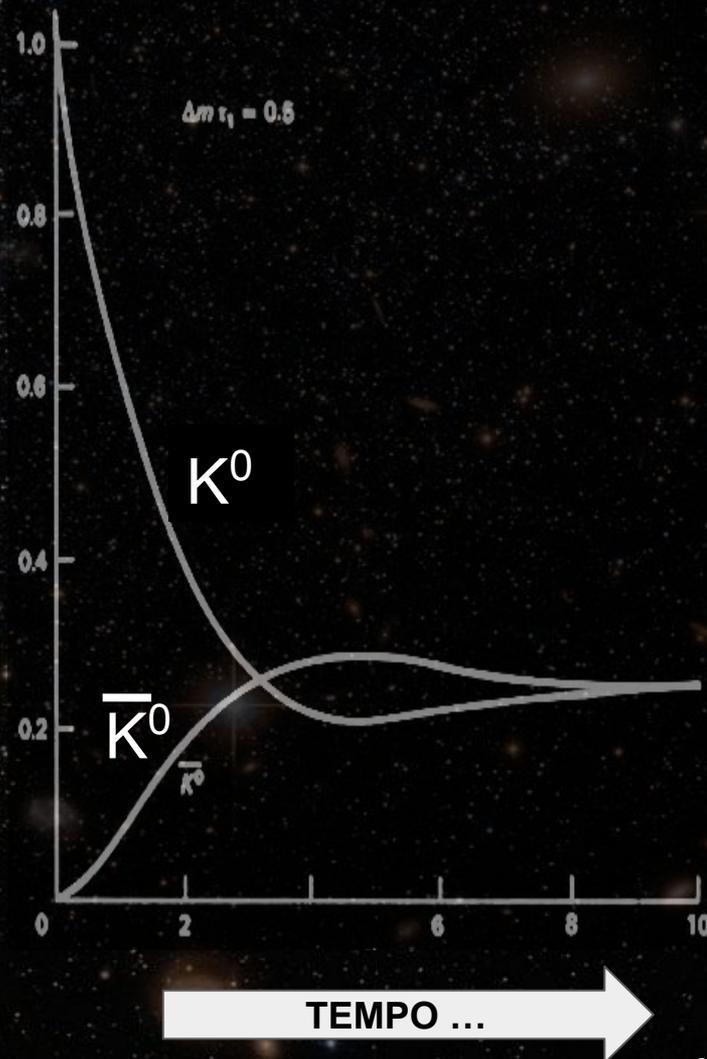
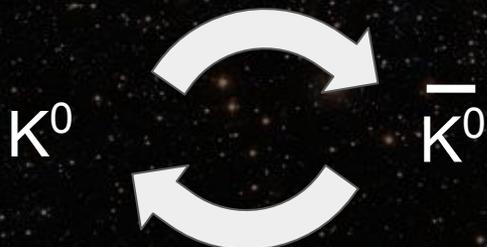
PET = **Positron** Emission Tomography



Mesoni K neutri: oscillazioni

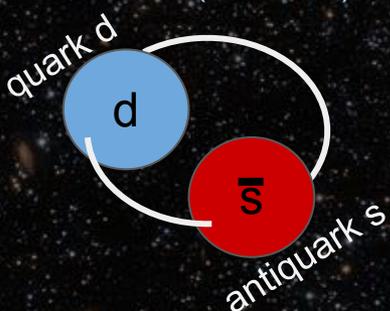


I mesoni K possono trasformarsi in mesoni anti-K:

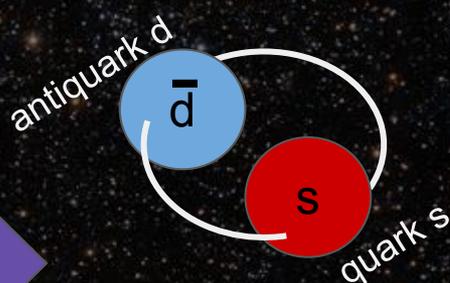


Piccolissime differenze tra materia e antimateria (asimmetrie)

Mesone K (o kaone) neutro



Mesone anti-K neutro



Violazione della Simmetria di CP

Fascio puro di mesoni K^0

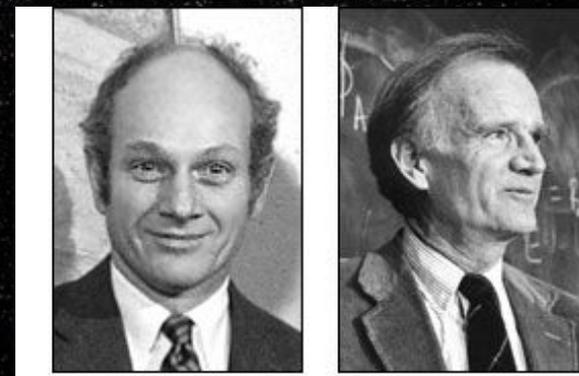
tempo

Stato quantistico a prevalenza di K^0

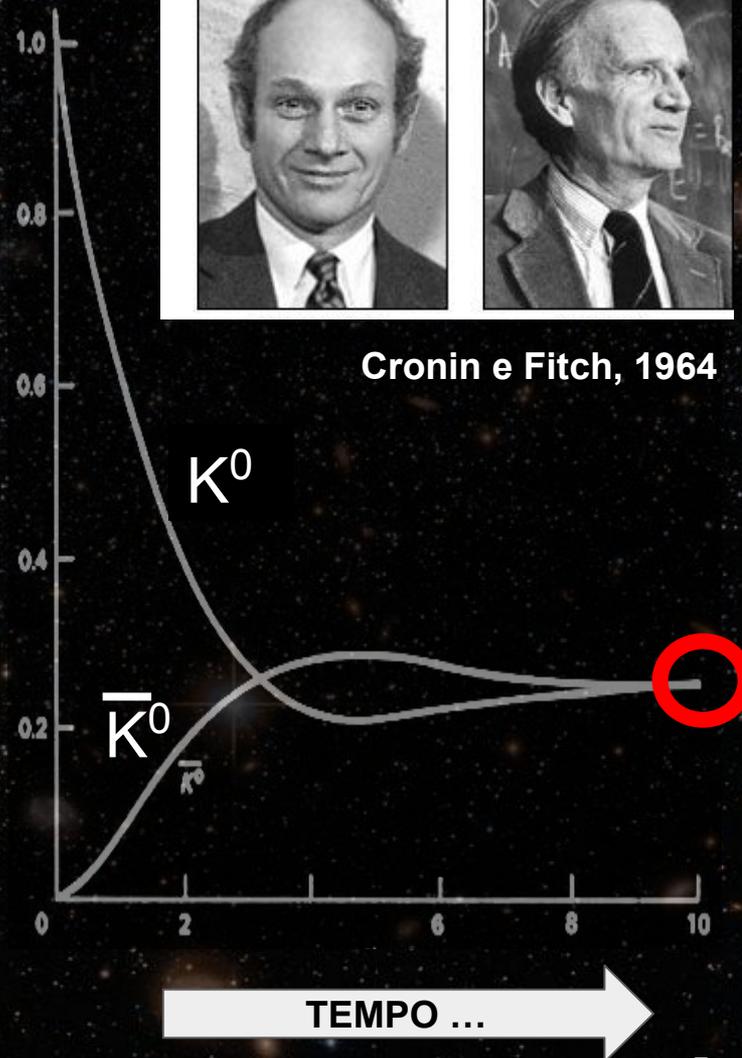
Fascio puro di mesoni \bar{K}^0

tempo

Stato quantistico a prevalenza di K^0



Cronin e Fitch, 1964



Come è possibile?

*Con i soli quark up, down, strange e charm
(i soli noti al tempo) NON è possibile!*

... funzionerebbe con due quark in più...

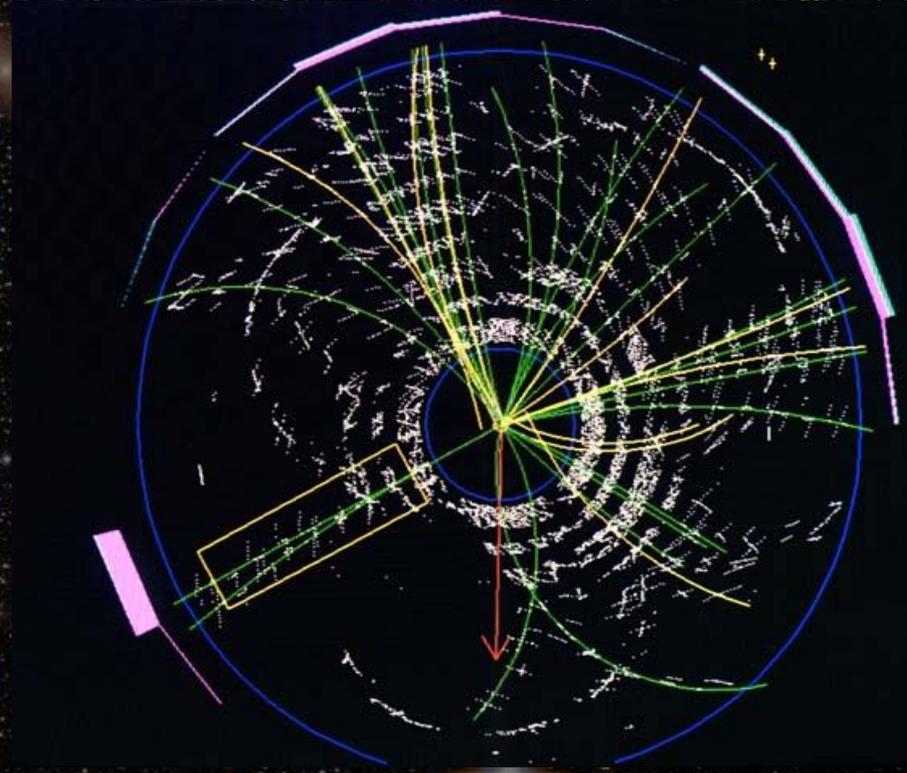
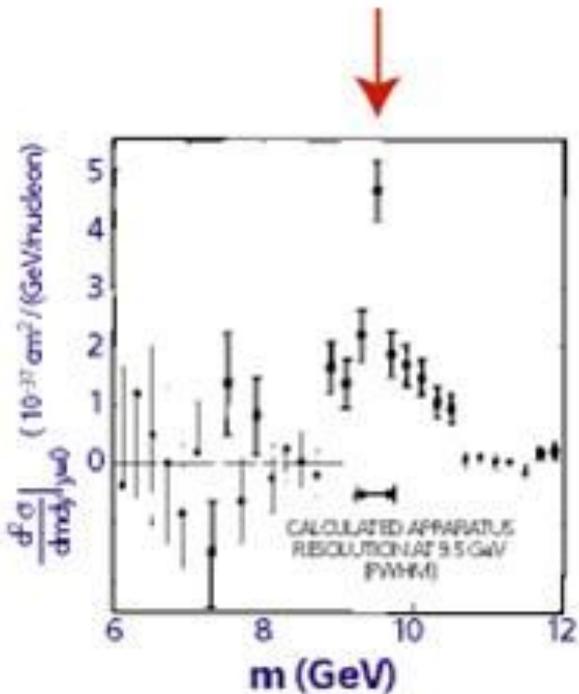


Kobayashi e Maskawa, 1968

...
chiamiamoli
top & bottom

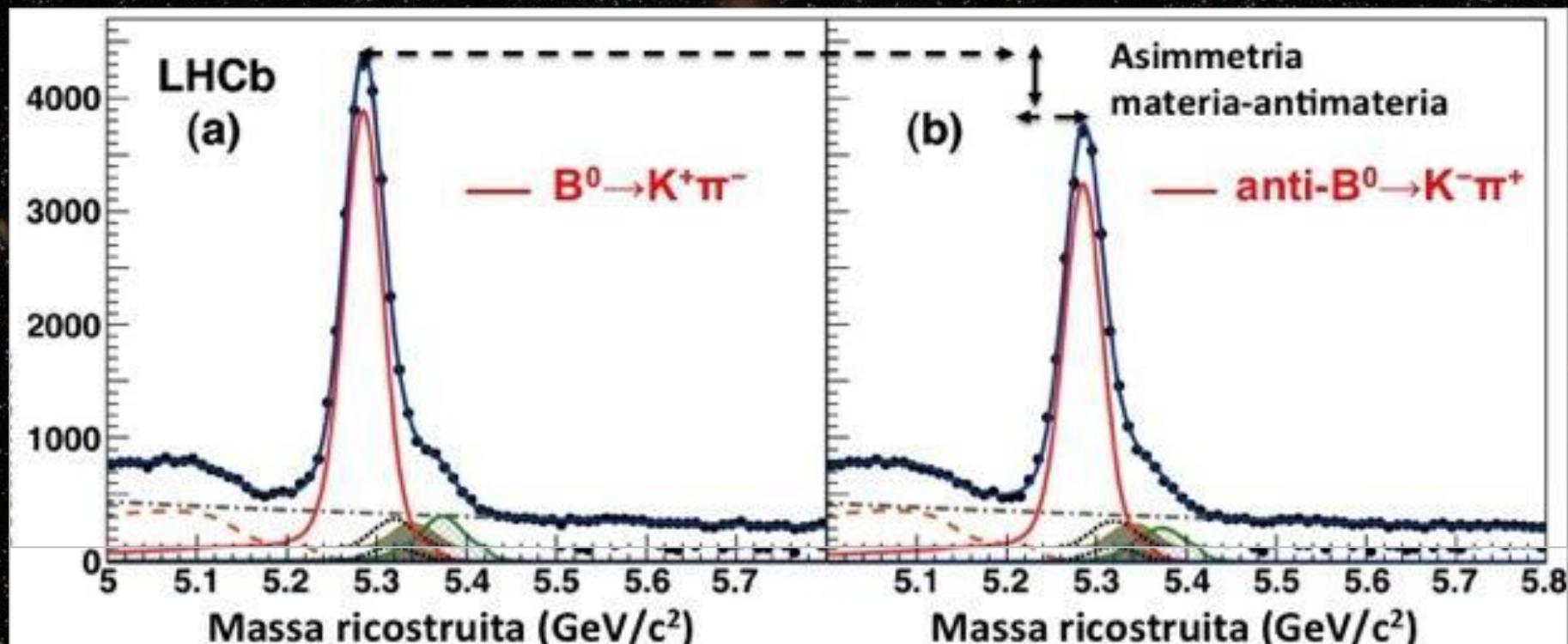
... e infatti...

Osservato il primo adrone
con un quark b , agosto
1977



Osservato il quark top
marzo 1995
(esperimento CDF)

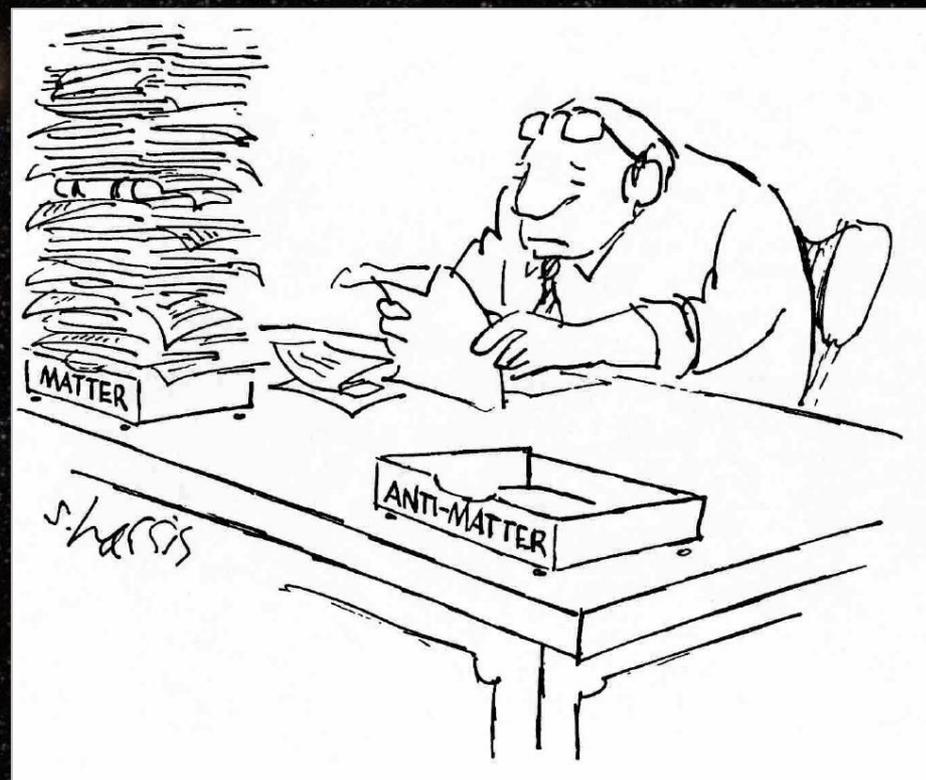
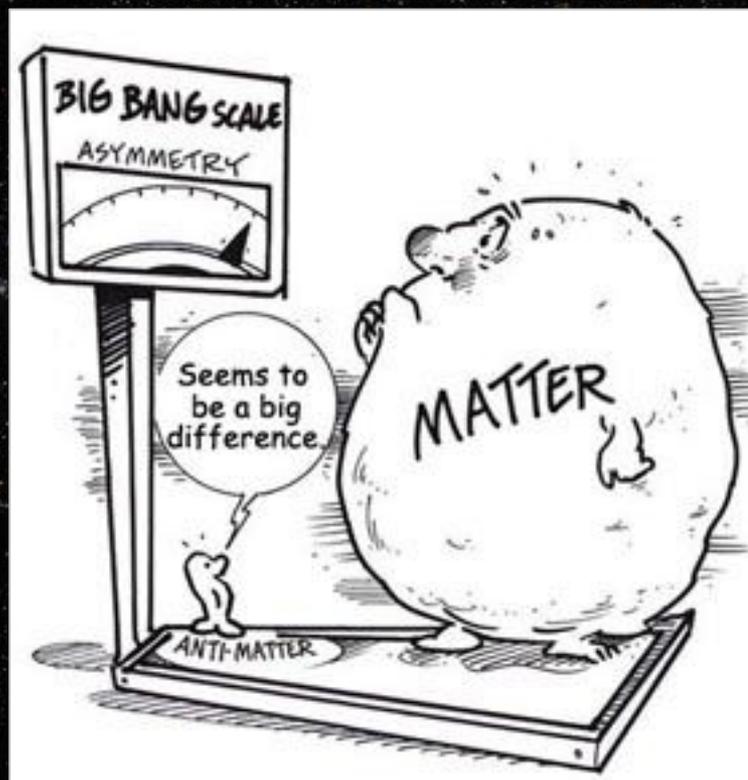
Gli effetti di violazione di CP nei mesoni B



Per la prima volta gli effetti della violazione CP sono così evidenti da poter essere apprezzati ad “occhio nudo”.

Esperimento LHCb, 2013

Perché è ancora interessante?



*Le stesse quantità di materia e anti-materia sono state prodotte nel big-bang...
... eppure oggi c'è solo materia...*

Che fine ha fatto l'antimateria ?

Ricapitolando...

Negli ultimi 100 anni è stata:

- ✓ predetta l'antimateria
- ✓ scoperta l'antimateria
- ✓ osservata asimmetria tra materia e antimateria
- ✓ predette nuove particelle in virtù di quelle asimmetrie
- ✓ trovate quelle particelle
- ✓ osservate asimmetrie ancora maggiori in quelle particelle



... ma non basta a spiegare la prevalenza di materia nell'Universo, se immaginiamo un Big-Bang equilibrato...

La violazione di CP nei mesoni charm

è molto piccola e non è ancora stata osservata.

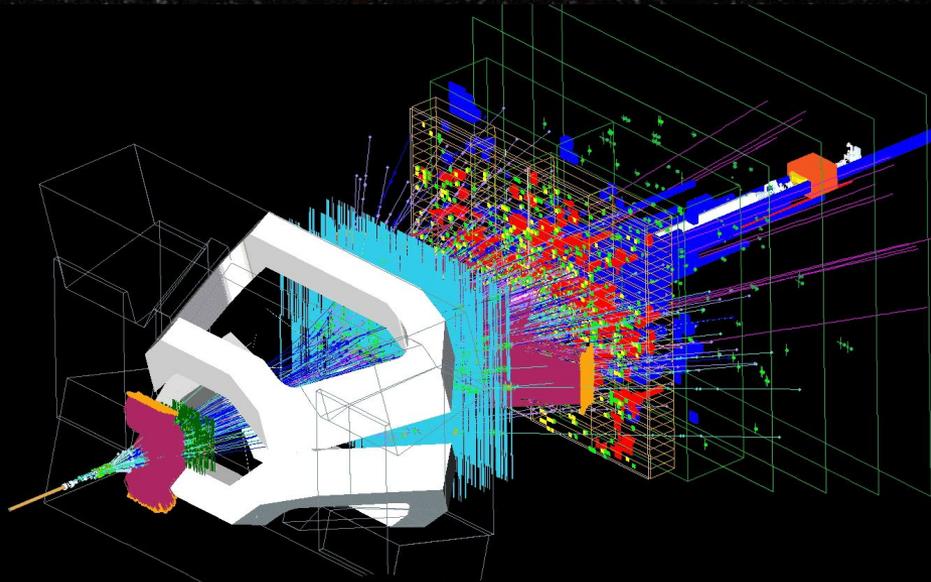
Tra le ragioni, c'è la vita media troppo breve dei mesoni charm.

Nell'esercizio di oggi pomeriggio misureremo la vita media di un particolare mesone charm: il mesone D^0 e il suo mesone anti- \bar{D}^0

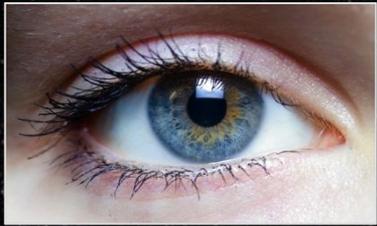


Rivelazione e studio delle particelle con un rivelatore moderno

L'esperimento LHCb al CERN



Rivelatori di particelle



Occhio
Rivelatore di fotoni
Segnale elettrico
sul nervo ottico

Tutti I rivelatori di particelle funzionano con lo stesso principio: le particelle rilasciano la loro energia nel rivelatore dove viene trasformata in un segnale elettrico



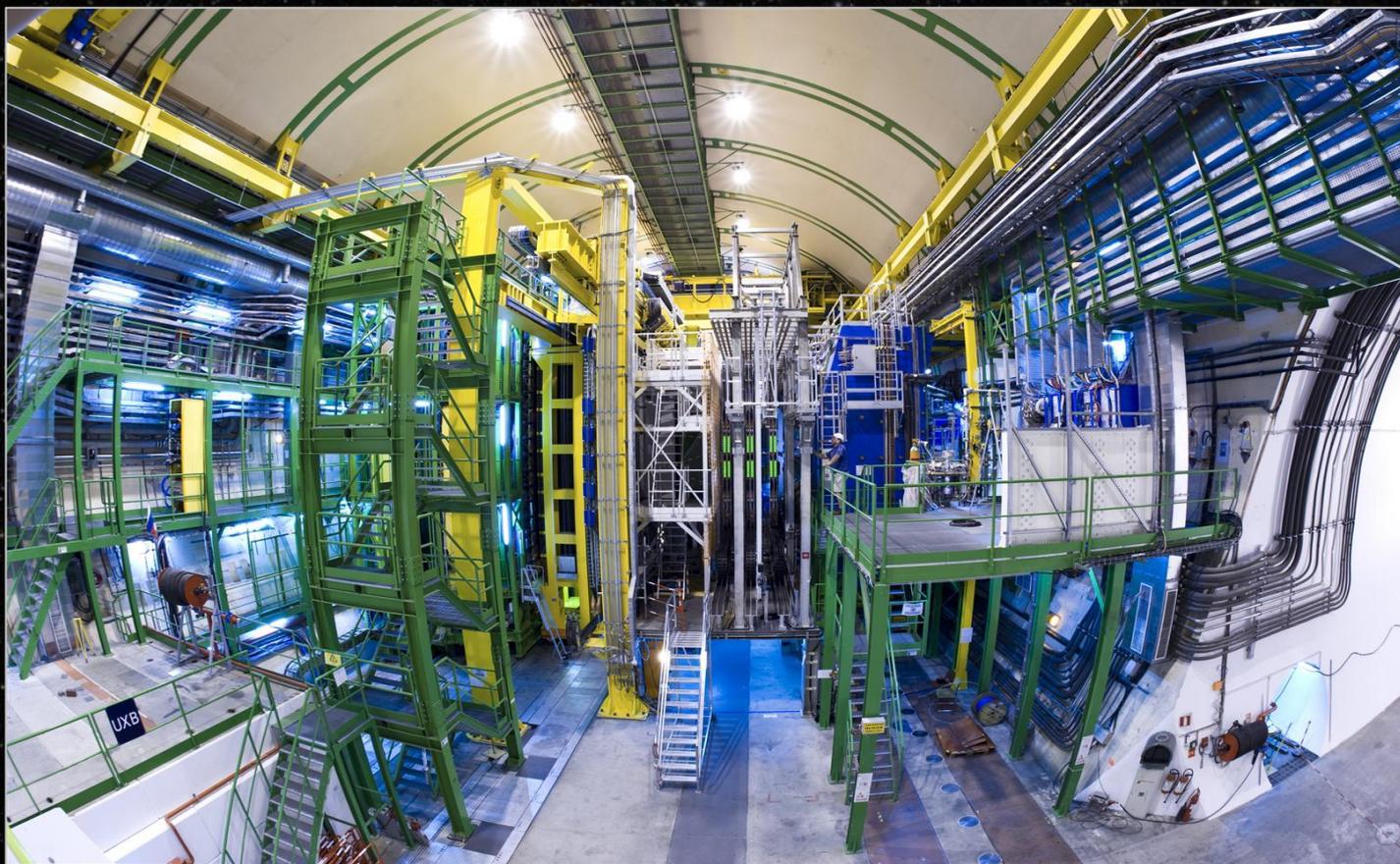
Fotocamera digitale
Rivelatore di fotoni
Segnale elettrico sul
CCD



TAC
Rivelatore di fotoni
Segnale elettrico da
rivelatori a cristalli

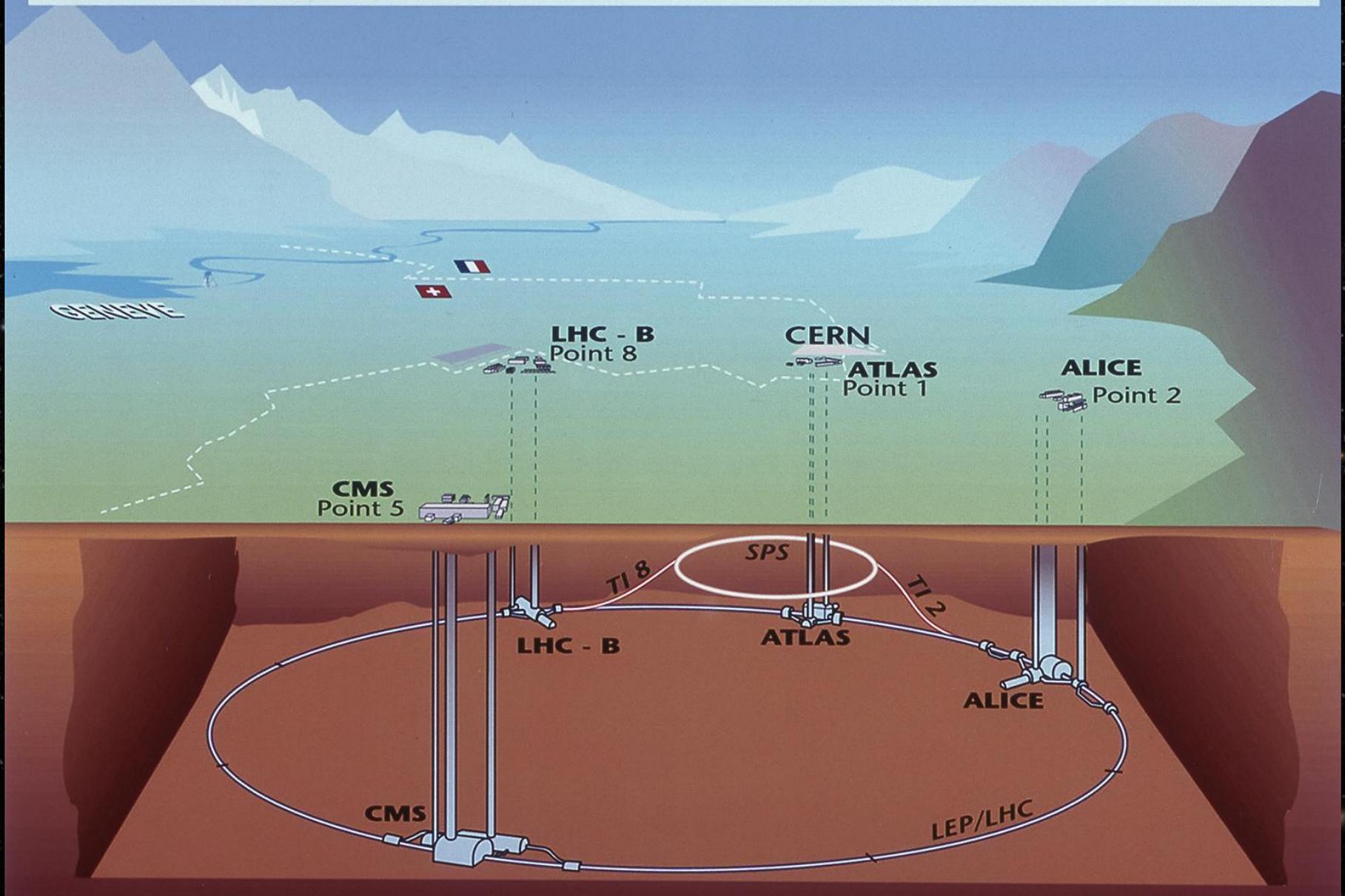


Contatore Geiger
Rivelatore di elettroni,
particelle alfa, etc.
Segnale elettrico
ionizzando un gas



L'esperimento LHCb

Overall view of the LHC experiments.



Il “rivelatore” come insieme di rivelatori

Magnete per curvare le particelle e misurarne l'impulso

Rivelatore di tracce: ricostruisce le traiettorie delle particelle

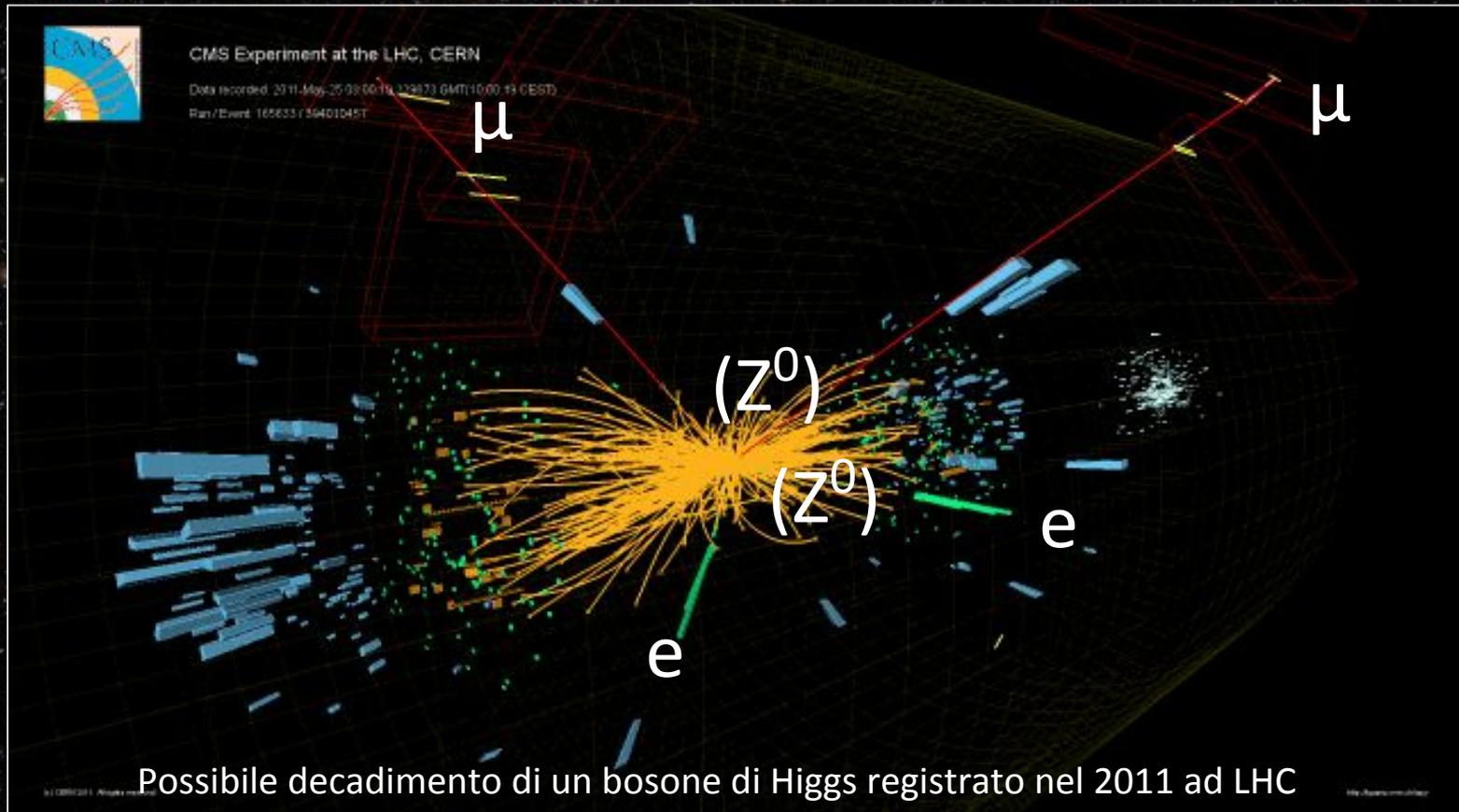
Rivelatore di muoni

Rivelatore di vertice
Per individuare i decadimenti di particelle instabili

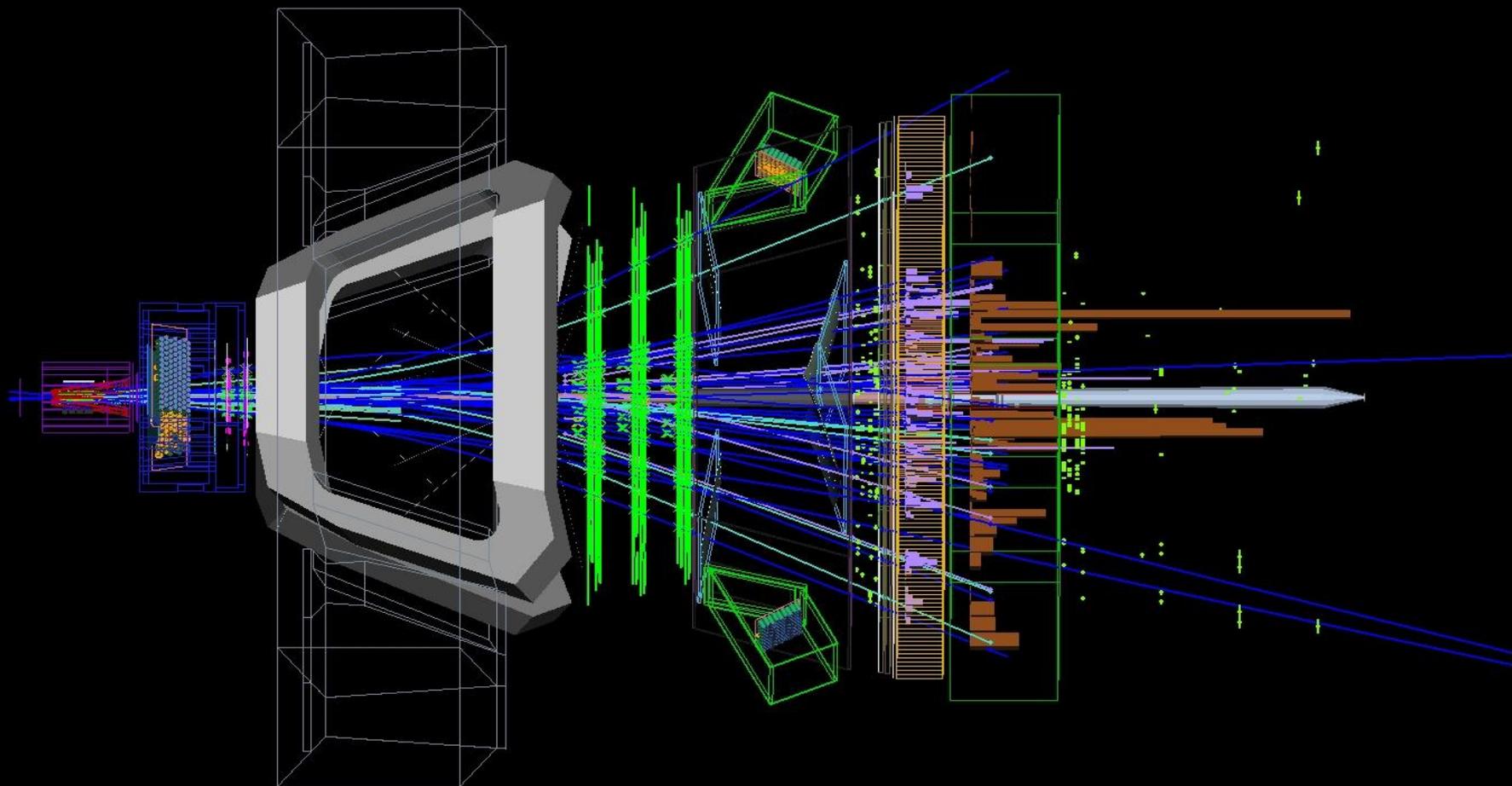
Rivelatore Cherenkov: permette di riconoscere il tipo di particella

Calorimetri: misurano l'energia delle particelle

Come si riconoscono le particelle ?



Le “impronte digitali” delle particelle sono: la massa; i prodotti di decadimento. In questo esempio: 2 particelle Z^0 : una decade in 2 muoni e una in 2 elettroni. (potrebbero provenire da un bosone di Higgs !)

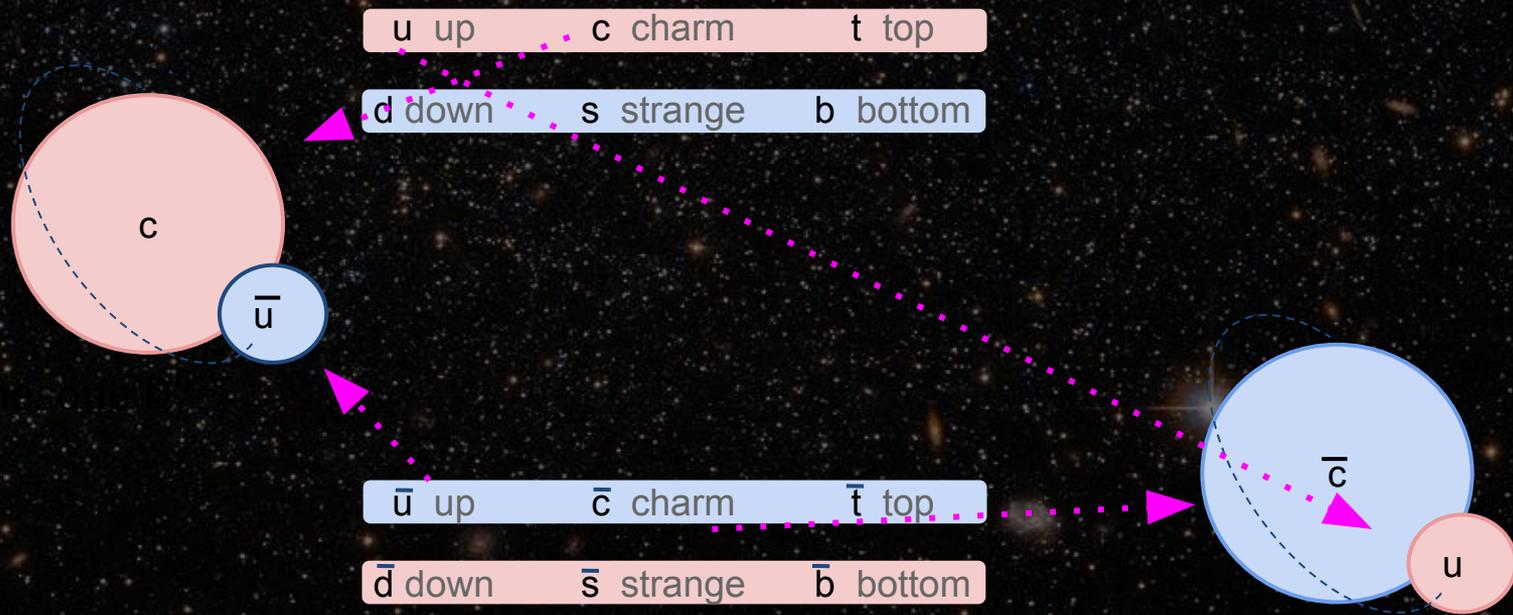


Questo evento contiene un decadimento come quello ricordato prima dove si sono formate due particelle (K , π) che lasciano due tracce nell'esperimento: sapreste trovarle ?
Oggi imparerete come fare !

Il mesone D^0

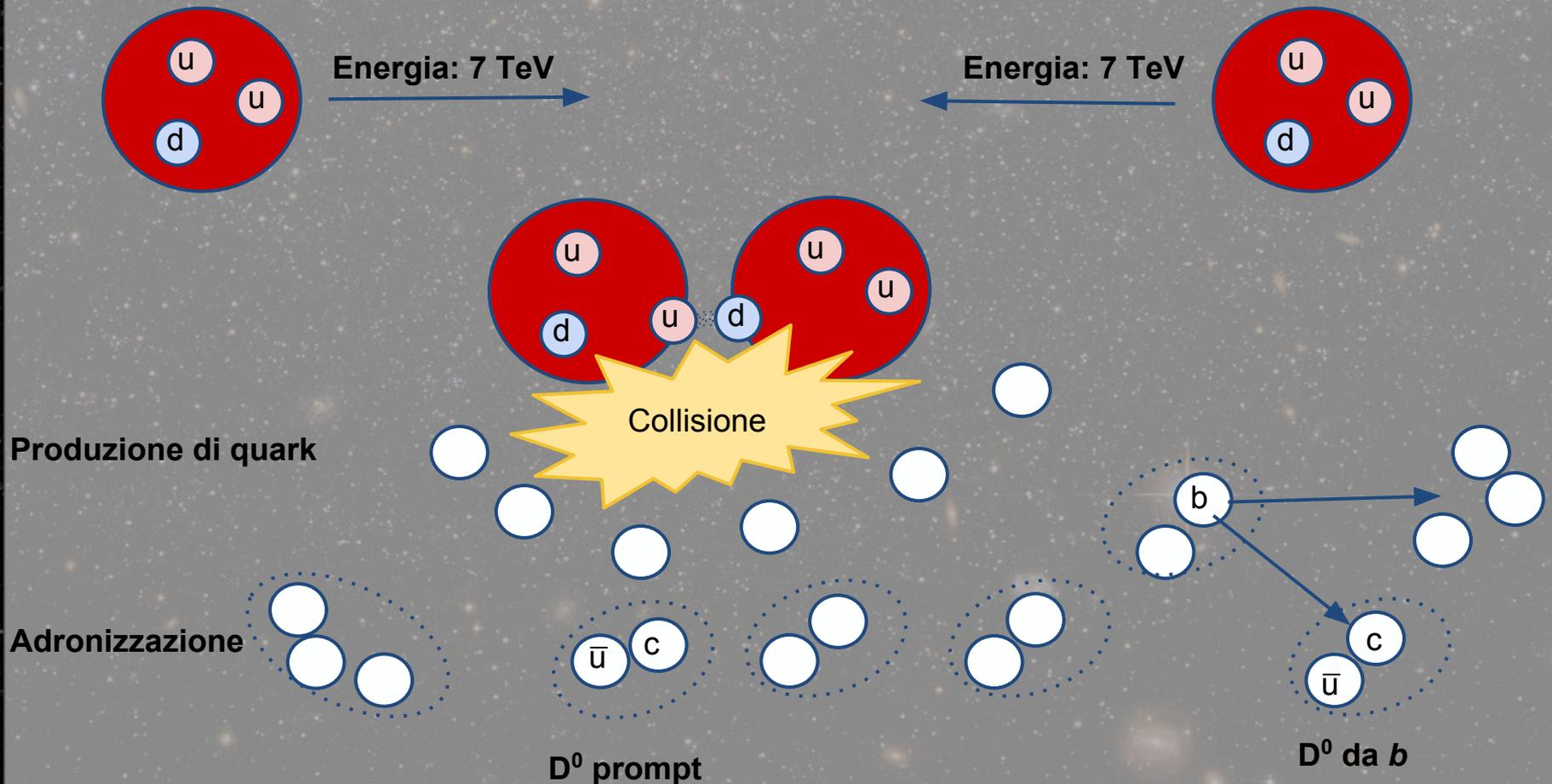
Il mesone D^0 è uno **stato legato** di un quark *charm* e un anti-quark *up*.

D^0 e \bar{D}^0 sono l'una l'anti-particella dell'altra.

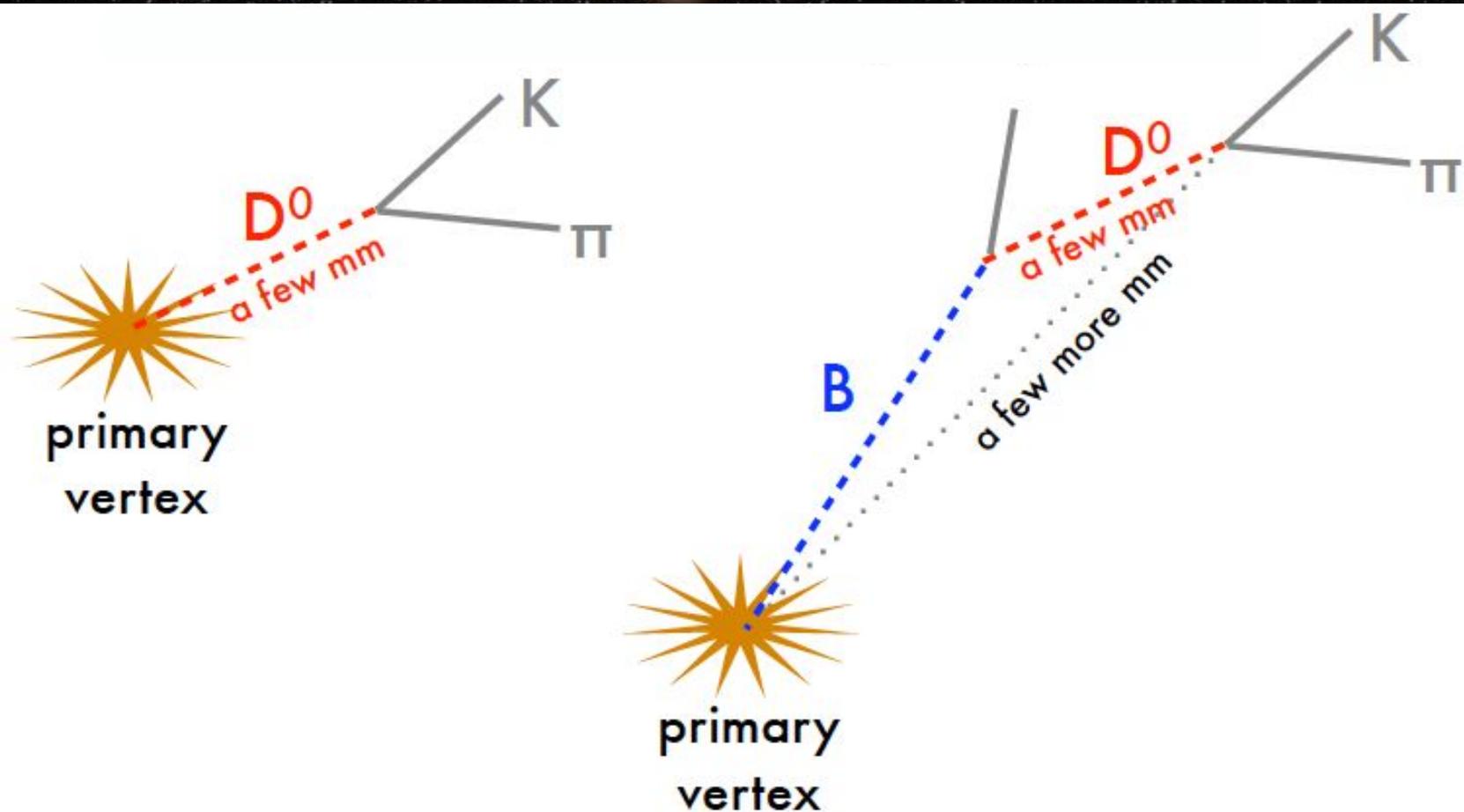


Produzione dei mesoni D^0

Collisioni protone - protone



Modi di produzione



Modi di decadimento

Decay Modes show all decays
 Most decay modes (other than the semileptonic modes) that involve a neutral K meson are now given as K_S^0 modes, not as K^0 modes. Nearly always K_S^0 is measured, and interference between Cabibbo-allowed and doubly Cabibbo-suppressed modes can invalidate the assumption that $\mathcal{B}(K_S^0) = \Gamma(K^0)$.

#	Mode	Fraction (%)	Scale Factor/Confidence Level	ρ (MeV/c)
Topological modes				
1	$D^0 \rightarrow 0$ prongs	$(0.15 \pm 0.06) \times 10^4$		
2	$D^0 \rightarrow 2$ prongs	$(0.070 \pm 0.006) \times 10^4$		
3	$D^0 \rightarrow 4$ prongs	1.45 ± 0.05		
4	$D^0 \rightarrow 6$ prongs	$(6.4 \pm 1.3) \times 10^{-4}$		
Inclusive modes				
5	$D^0 \rightarrow e$ anything	$6.49 \pm 0.11 \%$		
6	$D^0 \rightarrow \mu$ anything	$(6.7 \pm 0.6) \times 10^{-2}$	$S=1.0$	
7	$D^0 \rightarrow \tau$ anything	5.47 ± 0.21	$S=1.3$	
8	$D^0 \rightarrow K^+ \text{ anything } K^0$ anything	$(0.47 \pm 0.04) \times 10^4$		
9	$D^0 \rightarrow K^+ \text{ anything } K^0$ anything	$3.4 \pm 0.4 \%$		
10	$D^0 \rightarrow K^+ \text{ anything } K^0$ anything	$(0.15 \pm 0.09) \times 10^4$		
11	$D^0 \rightarrow K^+ (D^{*0})^0$ anything	$9 \pm 4 \%$		
12	$D^0 \rightarrow K^+ (D^{*0})^0$ anything	$<1.05 \times 10^{-2}$	$CL=90\%$	
13	$D^0 \rightarrow K^+ (D^{*0})^0$ anything	$2.1 \pm 1.3 \%$		
14	$D^0 \rightarrow \pi^+ \text{ anything}$	$9.5 \pm 0.9 \%$		
15	$D^0 \rightarrow \rho^+ \text{ anything}$	$2.41 \pm 0.27 \%$		
16	$D^0 \rightarrow \phi \text{ anything}$	$1.05 \pm 0.11 \%$		
Semileptonic modes				
17	$D^0 \rightarrow K^+ e^- \nu_e$	$(3.55 \pm 0.15) \times 10^{-2}$	$S=1.2$	887
18	$D^0 \rightarrow K^+ \mu^- \nu_\mu$	$(3.31 \pm 0.13) \times 10^{-2}$	$S=1.0$	854
19	$D^0 \rightarrow K^+ \tau^- \nu_\tau$	$(2.16 \pm 0.16) \times 10^{-2}$	$S=1.0$	719
20	$D^0 \rightarrow K^+ \pi^0 e^- \nu_e$	$1.91 \pm 0.24 \%$		714
21	$D^0 \rightarrow K^+ \pi^0 \mu^- \nu_\mu$	$1.6 \pm 0.5 \%$		661
22	$D^0 \rightarrow K^+ \pi^0 \tau^- \nu_\tau$	$2.7 \pm 0.7 \%$		890
23	$D^0 \rightarrow K^+ \pi^0 e^- \nu_e$	$(2.1 \pm 1.1) \times 10^{-4}$		843
24	$D^0 \rightarrow K^+ \pi^0 \mu^- \nu_\mu$	$(7.6 \pm 3.4) \times 10^{-4}$		468
25	$D^0 \rightarrow K^+ \pi^0 \tau^- \nu_\tau$	$<1.25 \times 10^{-3}$	$CL=90\%$	621
26	$D^0 \rightarrow K^+ \rho^0 e^- \nu_e$	$<1.45 \times 10^{-3}$	$CL=90\%$	652
27	$D^0 \rightarrow K^+ \rho^0 \mu^- \nu_\mu$	$(2.49 \pm 0.18) \times 10^{-2}$	$S=1.1$	927
28	$D^0 \rightarrow K^+ \rho^0 \tau^- \nu_\tau$	$(2.37 \pm 0.24) \times 10^{-2}$	$S=1.0$	924
29	$D^0 \rightarrow K^+ \rho^0 e^- \nu_e$	$(1.77 \pm 0.16) \times 10^{-2}$		771
Hadronic modes with one K^0				
30	$D^0 \rightarrow K^+ \pi^0$	$(3.11 \pm 0.05) \times 10^{-2}$	$S=1.1$	861
31	$D^0 \rightarrow K^+ \pi^0$	$(1.310 \pm 0.021) \times 10^{-4}$		861
32	$D^0 \rightarrow K^+ \pi^0$	$(1.19 \pm 0.04) \times 10^{-2}$	$S=1.0$	860
33	$D^0 \rightarrow K^+ \pi^0$	$(1.00 \pm 0.07) \times 10^{-4}$		860
34	$D^0 \rightarrow K^+ \pi^0$	$(2.13 \pm 0.20) \times 10^{-2}$	$S=1.1$	842
35	$D^0 \rightarrow K^+ \pi^0$	$(6.3 \pm 0.9) \times 10^{-3}$		674
36	$D^0 \rightarrow K^+ \pi^0$	$(2.1 \pm 0.6) \times 10^{-4}$		670
37	$D^0 \rightarrow K^+ \pi^0$	$(5.4 \pm 0.1) \times 10^{-2}$		842
38	$D^0 \rightarrow K^+ \pi^0$	$(1.22 \pm 0.24) \times 10^{-3}$		549
39	$D^0 \rightarrow K^+ \pi^0$	$(2.1 \pm 1.3) \times 10^{-3}$		-1

D⁰
K⁺
π⁰

Ricostruzione....



**2 bicchieri
100 g l'uno**



**Bicchiere
100 g**



**Bicchiere
100 g**

Ma che succede se rimettete insieme i pezzi a caso ?

Ricostruzione

In questa collisione e' stato prodotto un D^0 che poi e' decaduto in due particelle piu' leggere.

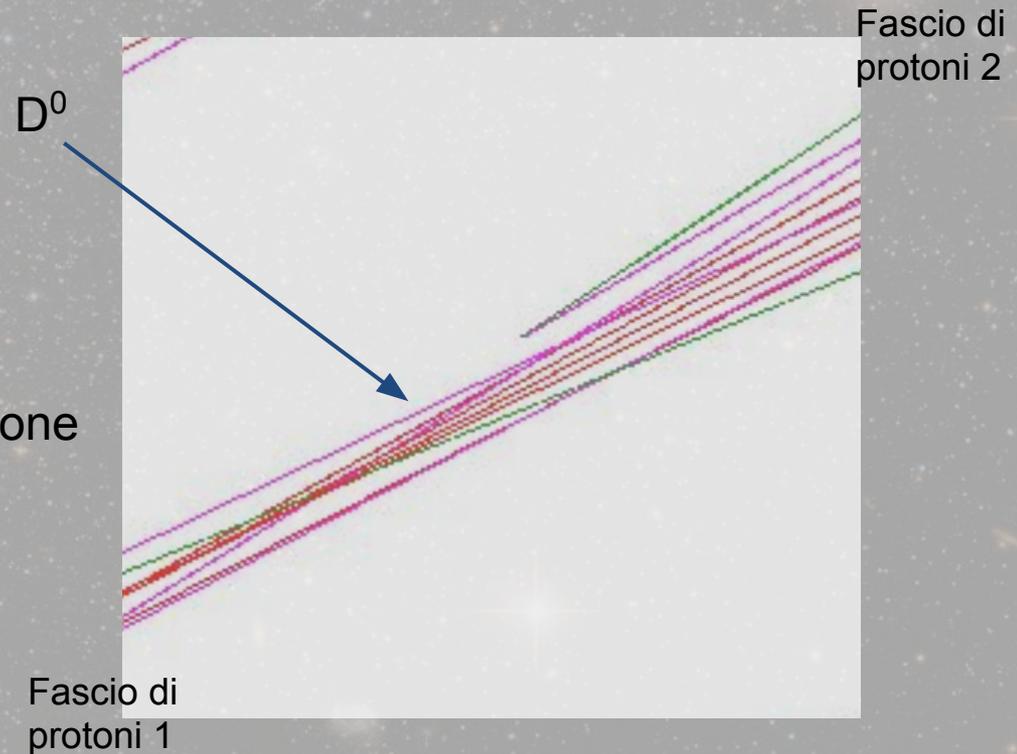
Per "ricostruirlo" dobbiamo individuare le tracce delle due particelle e "riassemblarle"

Vertice di interazione
protone-protone

E se scelgo male?

Succede...

Chiamiamo **segnale** i candidati selezionati realmente prodotti nel decadimento di un D^0 , **fondo** gli altri: combinazioni casuali di particelle.



SELEZIONE

Selezione

Per separare il segnale dal fondo dobbiamo utilizzare proprietà delle particelle che ci permettano di distinguere quelle “giuste” da quelle “sbagliate”

Ad esempio, se volete studiare le proprietà delle mele e avete a disposizione un **cesto di frutta assortita**, sceglierete le mele in base alla *forma*, al *colore*, al *peso*, al *diametro* etc.

Per le particelle si utilizzano grandezze come:

- Massa
- Quantita' di moto
- Parametro d'impatto
- Tempo di decadimento



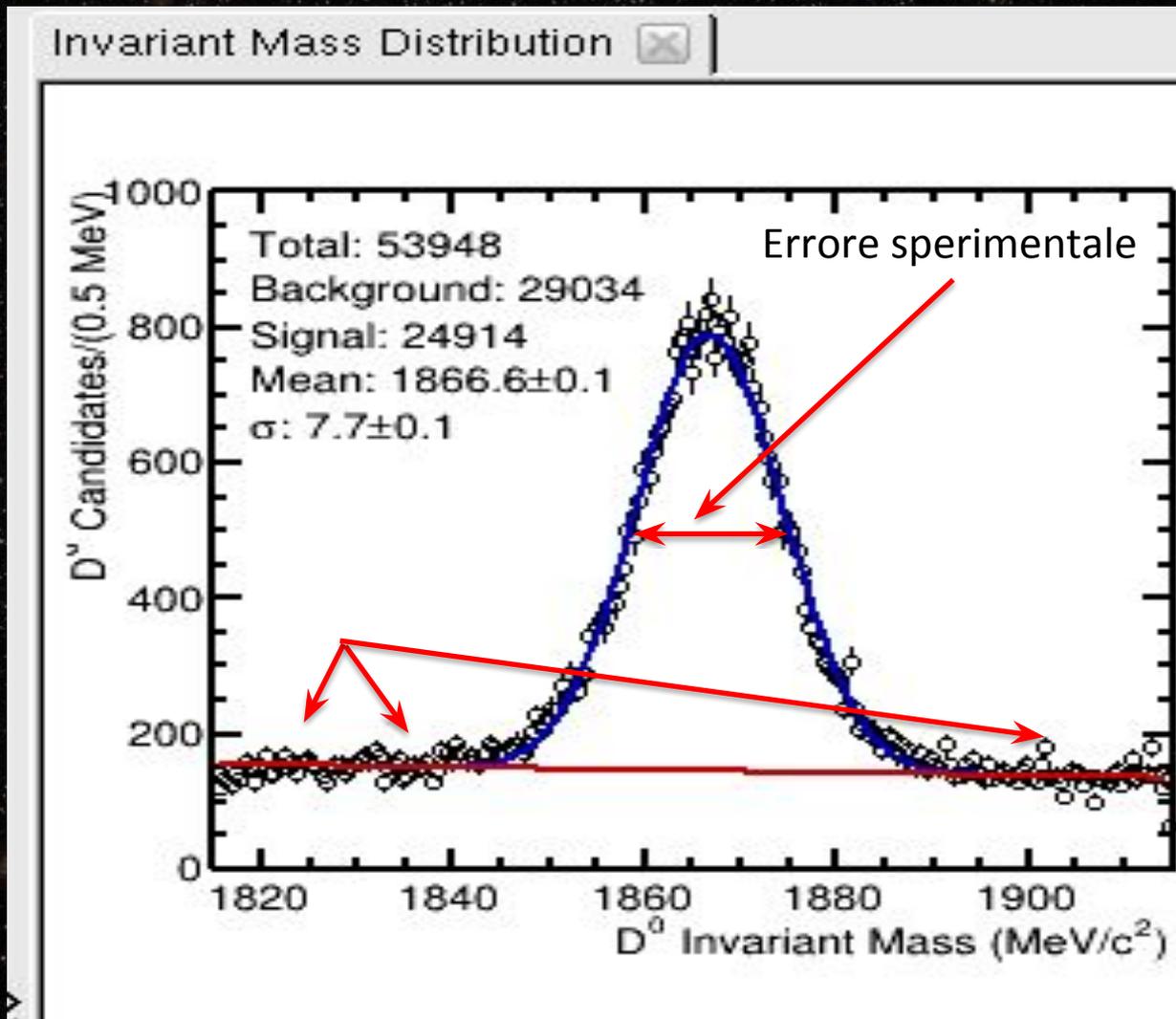
Massa

Sfruttando le leggi di conservazione dell'energia e della quantità di moto, la massa del mesone D^0 può essere misurata a partire dalle particelle in cui esso decade

Misurando la massa di molti D^0 si ottiene la distribuzione a destra

Il valore più preciso misurato è:

$$m(D^0) = 1864.847 \pm 0.178 \text{ MeV}/c^2$$

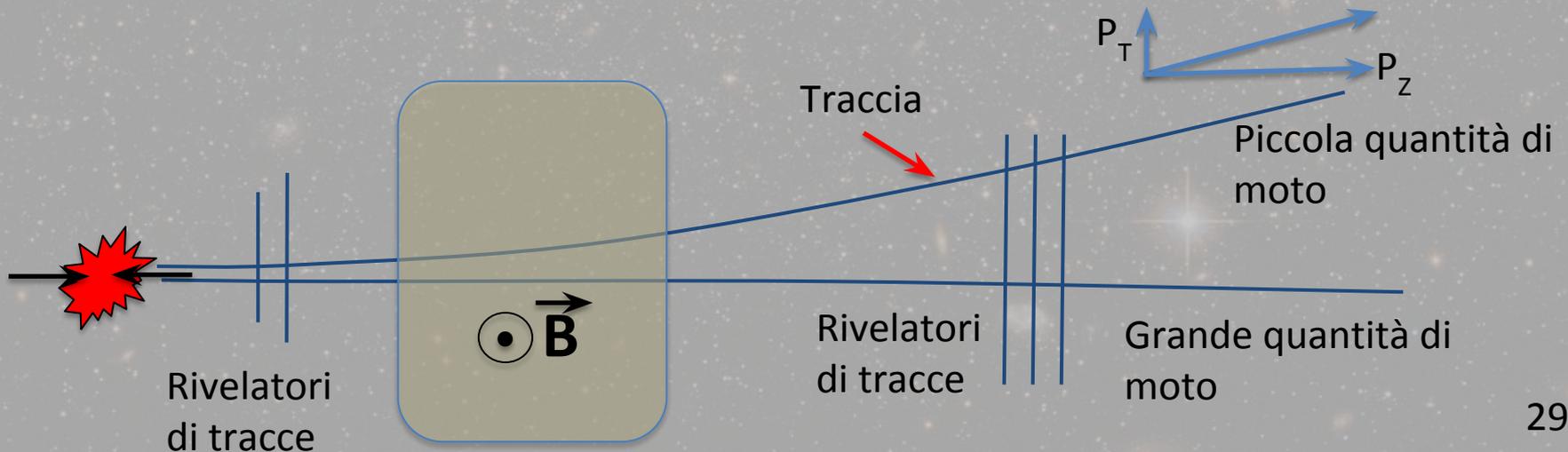


Quantità di moto

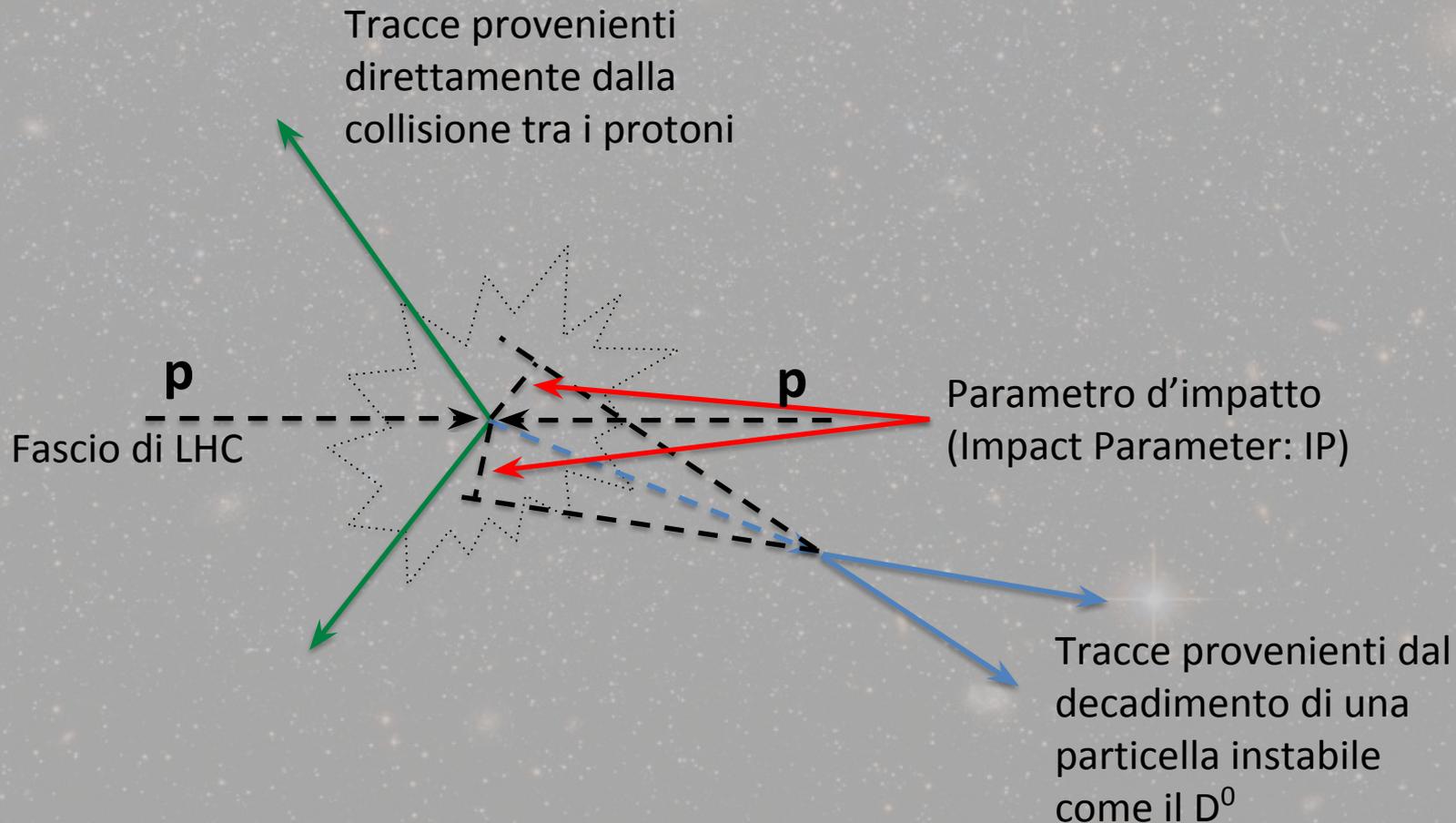
Le particelle cariche che si muovono in campo magnetico sono sottoposte alla **forza di Lorentz**, che le devia in modo dipendente dalla loro quantità di moto.

Studiando la deviazione in campo magnetico si determina la **quantità di moto** delle particelle. Particelle più lente sono deviate di un angolo maggiore.

Disponiamo quindi di **rivelatori di posizione** delle particelle cariche immediatamente prima ed immediatamente dopo il **magnete**.



Parametro d'impatto



Vita media

Se ho un numero N_0 particelle instabili (ad es.: nuclei radioattivi, mesone D^0) ad un tempo iniziale t_0 , dopo un tempo t , a causa delle disintegrazioni, me ne sono rimaste

$$N = N_0 e^{-(t-t_0)/\tau}$$

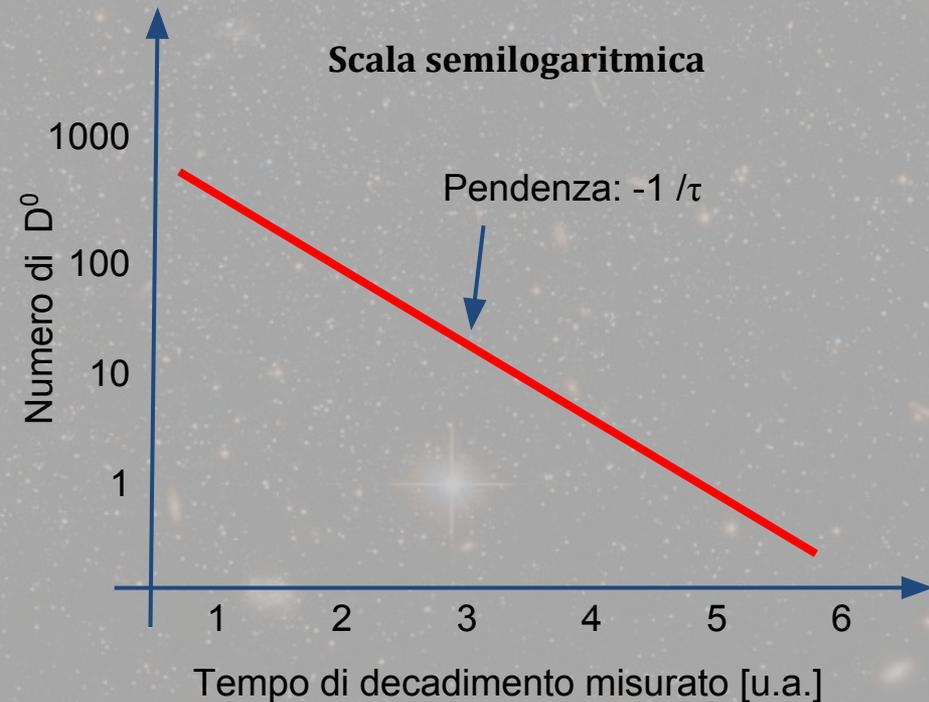
τ è il valore medio di questa distribuzione e prende il nome di **vita media** o **tempo di vita media**.

Da esperimenti precedenti sappiamo che la vita media del D^0 è di circa **mezzo picosecondo**.

Tempi in scala semi-log

Percio' la probabilita' che una particella "muoia", in funzione del tempo e' *esponenziale*

Tempo di "decadimento"
degli umani



- Dopo pranzo imparerete a utilizzare i dati raccolti da LHCb e effettuerete una misura di una importante grandezza fisica proprio come veri fisici delle particelle !

