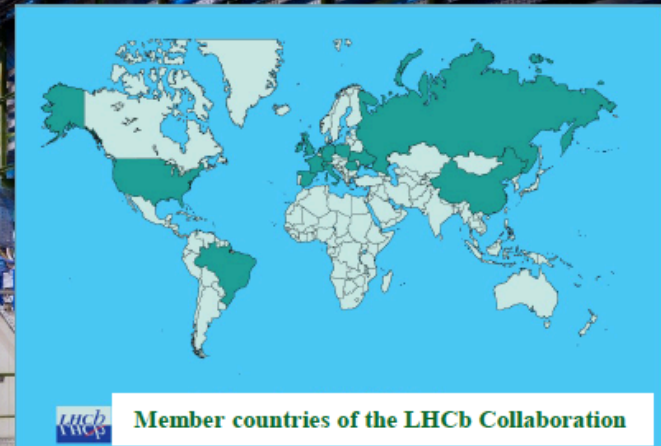




730 members
15 countries
54 institutes



Misure di precisione sul quark b (e c) a LHCb



Stefano Perazzini

LHCb Bologna

4 Luglio 2013

I quark charm (c) e beauty (b)

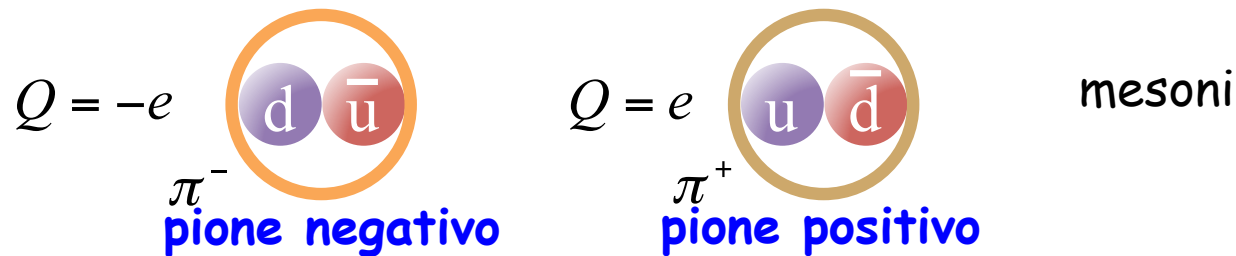
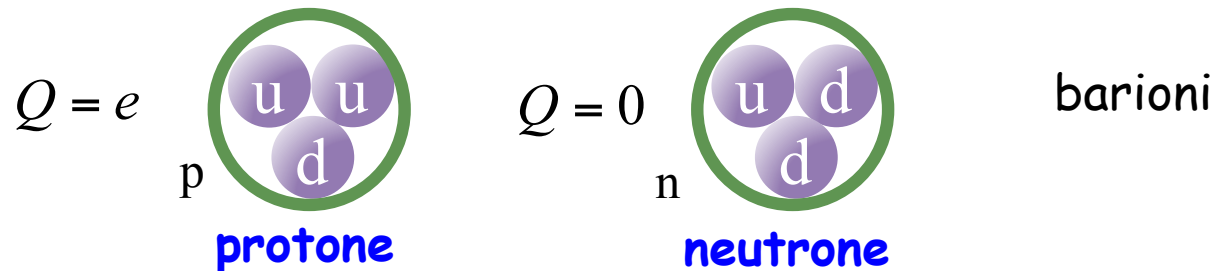
- I quark c e b, insieme al t (top) sono anche detti quark “pesanti”
 - le loro masse sono significativamente più elevate rispetto a quelle degli altri tre quark più leggeri (u, d, s)
- Lo studio degli adroni contenenti i quark c e b permette di controllare con elevata precisione le previsioni del Modello Standard e di indagare l’eventuale esistenza di nuove particelle e nuove interazioni non ancora conosciute

Tre generazioni della materia (fermioni)

	I	II	III
massa→	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV
carica→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
nome→	u up	c charm	t top
Quark	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4,2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom
	<2,2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e neutrino elettronico	<0,17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ neutrino muonico	<15,5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ neutrino tauonico
	0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e elettrone	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ muone	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ tauone
Leptoni			

Adroni: barioni e mesoni

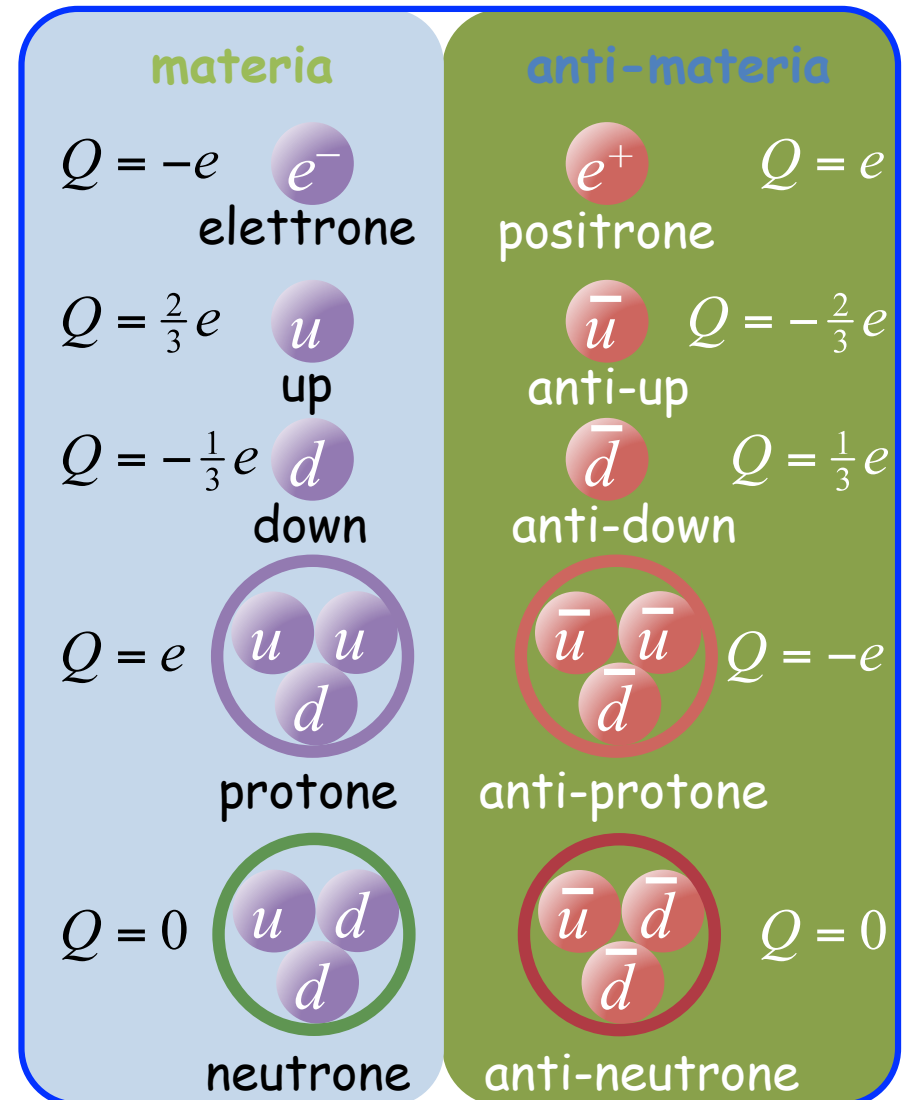
- I quark non si osservano individualmente, ma soltanto in combinazione tra loro.
- Gli **adroni** sono particelle **composite** formate da quark. Si suddividono in:
 - **Barioni**, formati da **3 quark**, e **Mesoni**, formati da una **coppia quark-antiquark**.



- I quark c e b sono i due quark più pesanti in grado di “adronizzare”, cioè di legarsi con altri quark per formare adroni
 - $B^\pm(\bar{b}u)$, $B^0(\bar{b}d)$, $B_s(\bar{b}s)$, $\Lambda_b(bud)$, ...
 - $D^0(c\bar{u})$, $D^\pm(c\bar{d})$, $D_s^\pm(c\bar{s})$, $\Lambda_c(cud)$, ...

Le antiparticelle

- Per ogni **particella** costituente della materia esiste un'**antiparticella** costituente dell'antimateria.
- Le antiparticelle sono **identiche** alle corrispettive particelle in tutto **eccetto** che nella **carica elettrica** e nel **momento magnetico**, che sono **opposti**
 - ad esempio, la carica del protone è positiva e quella dell'antiprotone è negativa
- Particelle e antiparticelle hanno la **stessa massa**.



Perché i fisici si Interessano delle (a)simmetrie?

- Esiste un legame tra **l'invarianza delle leggi fisiche per trasformazioni di simmetria** e **principi di conservazione**.

Trasformazione di simmetria	Grandezza conservata
Traslazioni nello spazio	Quantità di moto
Traslazioni nel tempo	Energia
Rotazioni nello spazio	Momento angolare
Inversione spaziale	Parità spaziale (P)
Coniugazione di carica	Parità per coniugazione di carica (C)
Inversione temporale	Parità per inversione temporale (T)

Emmy Amalie Nöther,
1882-1935



Alcune di queste trasformazioni sono **“continue”** mentre altre sono **“discrete”**

Troppa simmetria è innaturale

volto naturale



volto "simmetrizzato"



Troppa simmetria è innaturale

volto naturale



volto "simmetrizzato"



**Una certa asimmetria rende
le figure più dinamiche...**



Troppa simmetria è innaturale

volto naturale



volto "simmetrizzato"



**Una certa asimmetria rende
le figure più dinamiche...**



...e anche più belle!



Simmetria P (Parità)

- **Simmetria:**
 - Il mondo visto allo specchio è **uguale** al mondo reale.
- **Violazione della simmetria** (asimmetria):
 - Il mondo visto allo specchio è **diverso** dal mondo



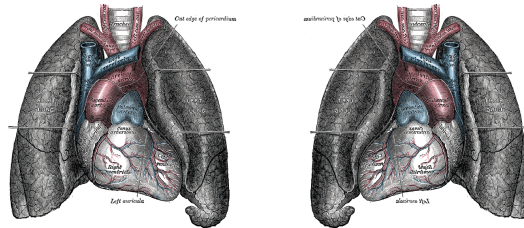
Violazione della simmetria P nel mondo macroscopico

Mondo reale



90%

10%



99.999%
cuore a sx

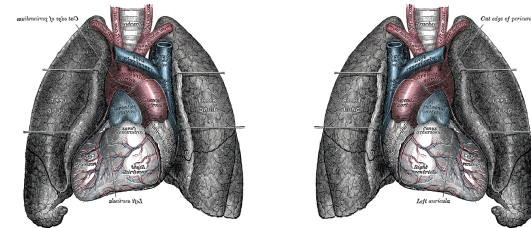
0.001%
cuore a dx

Mondo allo specchio



10%

90%



99.999%
cuore a dx

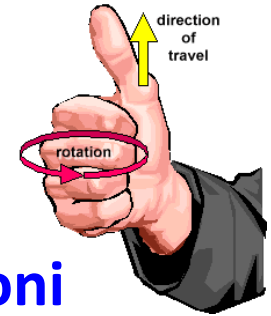
0.001%
cuore a sx

Mondo reale \neq mondo allo specchio
(violazione della parità)

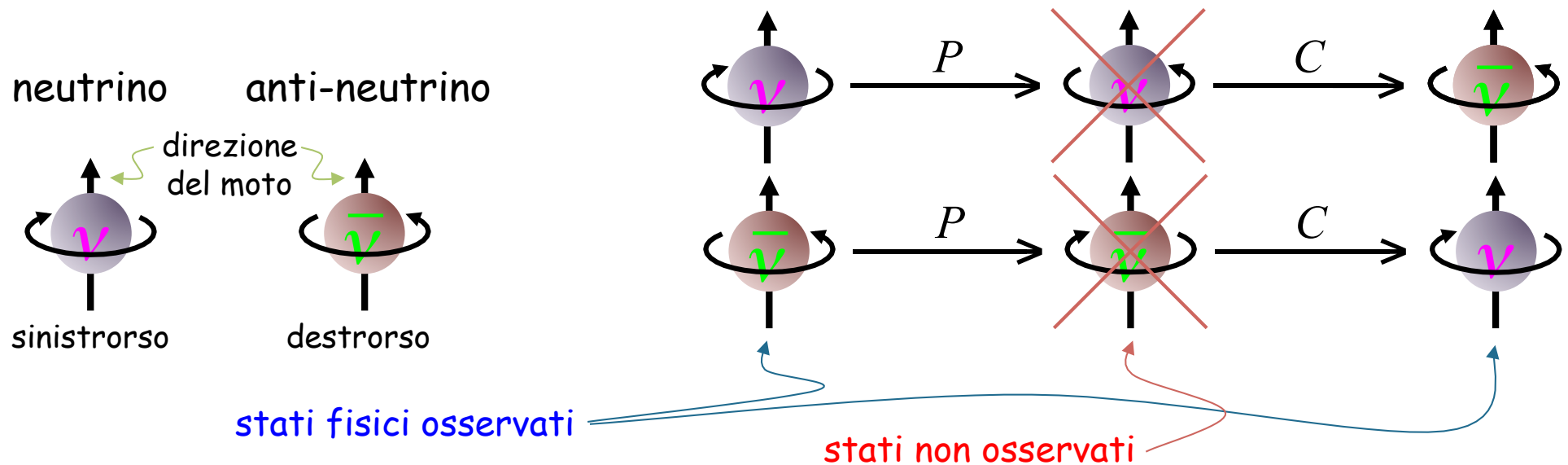
La Parità nella fisica microscopica

- **Interazioni elettromagnetiche**, e **interazioni nucleari forti** sono **invarianti** per inversione spaziale.
 - Diciamo che la parità P si conserva.
 - Le interazioni elettromagnetiche e le interazioni nucleari forti **viste allo specchio** sono assolutamente **verosimili**.
 - **Non è possibile** distinguere la **destra dalla sinistra** sulla base delle interazioni elettromagnetiche o delle interazioni nucleari forti.
- Le **interazioni nucleari deboli** invece **non** sono **invarianti** per inversione spaziale.
 - La parità P non si conserva.
 - Le interazioni nucleari deboli **viste allo specchio** possono essere **inverosimili**.
 - **Si può** distinguere la **destra dalla sinistra** sulla base delle interazioni nucleari deboli.

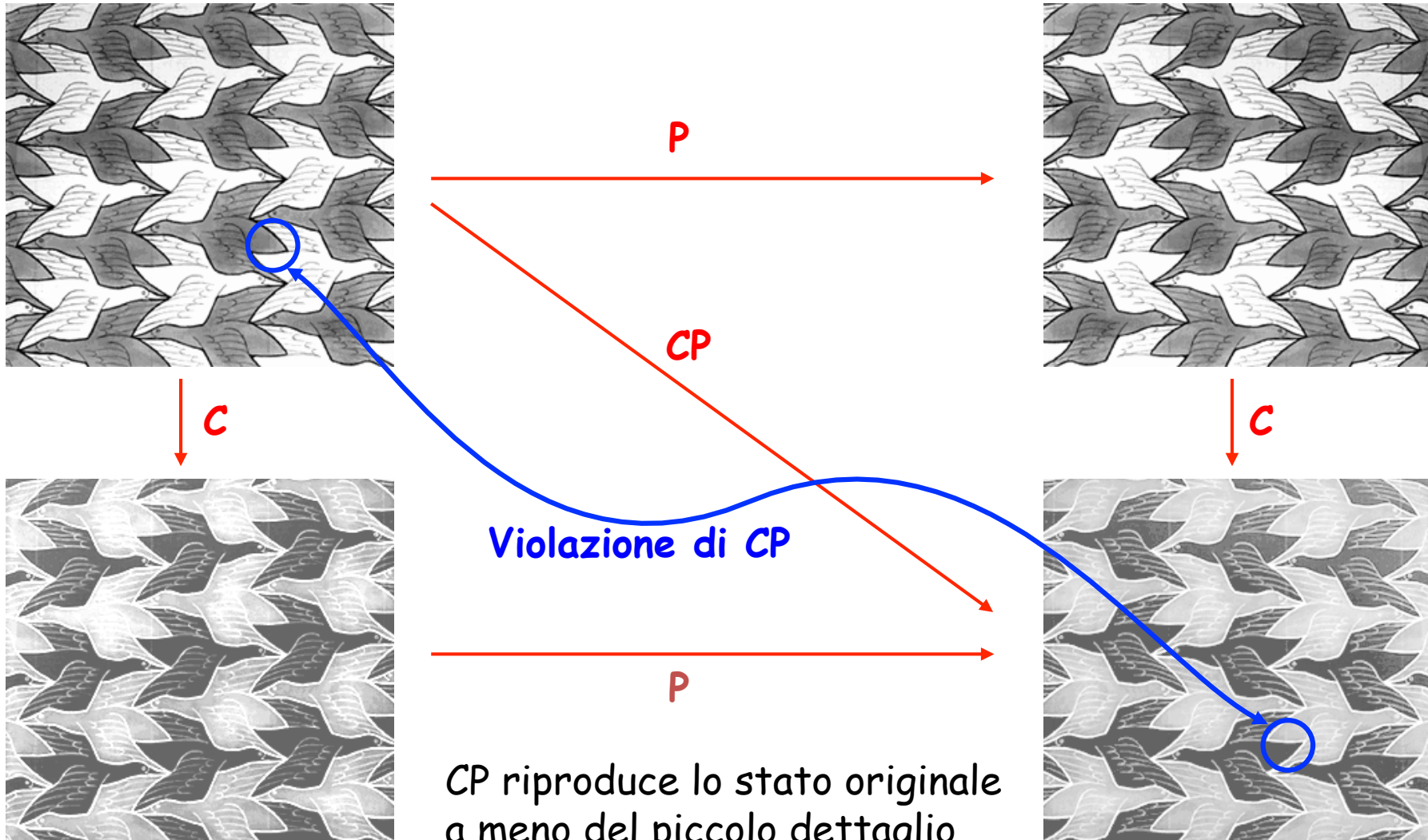
La simmetria CP



- In alcuni decadimenti di particelle mediati dalle **interazioni nucleari deboli** si osserva **violazione di P** .
- Tuttavia, se, oltre a guardare tali processi allo **specchio**, si **scambiano** anche le **cariche positive con quelle negative** (simmetria **C** , o **coniugazione di carica**), tali processi appaiono **di nuovo verosimili**. O per essere più precisi, **quasi verosimili...**



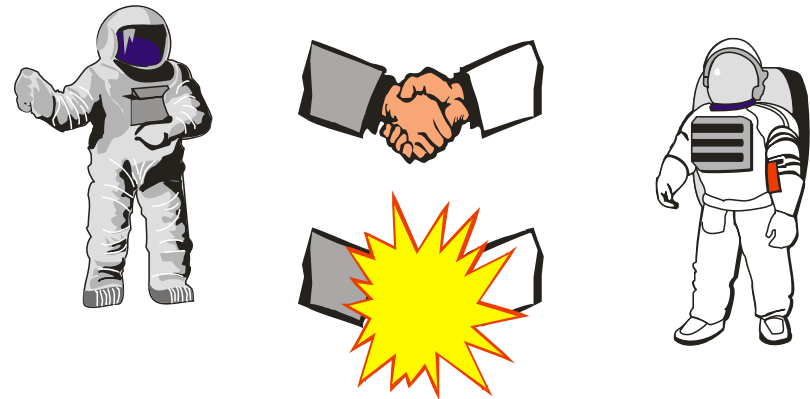
Una metafora



CP riproduce lo stato originale a meno del piccolo dettaglio della coda.

La stretta di mano a un extraterrestre

- Se non ci si vuole annichilare, prima di **stringere la mano** a un extraterrestre occorre accertarsi che esso sia composto di materia: come fare prima di toccarlo?



- Per fortuna **materia e antimateria non sono esattamente l'una l'opposto dell'altra a causa della violazione di CP.**
- Ad esempio alcune particelle, i **kaoni neutri a vita lunga** K_L , possono avere, tra gli altri, 2 decadimenti semileptonico, tra loro CP-coniugati, ma le probabilità che questi decadimenti si verifichino non sono esattamente le stesse.

$$\frac{\text{rateo}\left(K_L \rightarrow e^+ + \pi^- + \nu_e\right)}{\text{rateo}\left(K_L \rightarrow e^- + \pi^+ + \bar{\nu}_e\right)} = 1.00648 \pm 0.00035$$

Regola: mai stringere la mano a extraterrestri i cui nuclei atomici hanno carica elettrica dello stesso segno della carica degli elettroni emessi con maggiore frequenza nel decadimento semileptonico dei kaoni neutri a vita lunga.

Una lunga ricerca

- **La violazione di CP impegna la fisica fondamentale da più di 40 anni.**
 - La scoperta è stata **precoce**, favorita dalla piccola massa del kaone neutro K^0 (circa metà della massa di un protone).
 - Tuttavia la comprensione più profonda ha richiesto lo studio della violazione di CP nei decadimenti di altri **mesoni neutri di massa più grande** (D^0 , B^0 , B_s^0)
- La produzione abbondante di queste particelle (il B^0 ha massa pari a circa 5 volte la massa del protone) ha richiesto un notevole **avanzamento tecnologico**.
- Il meccanismo di violazione di CP oggi conosciuto, basato sul **Modello Standard**, prevede una violazione di entità **troppo piccola per spiegare l'asimmetria cosmica**.
 - La **cosmologia** suggerisce che, oltre al Modello Standard, esista un'**altra sorgente ancora sconosciuta di violazione di CP**.

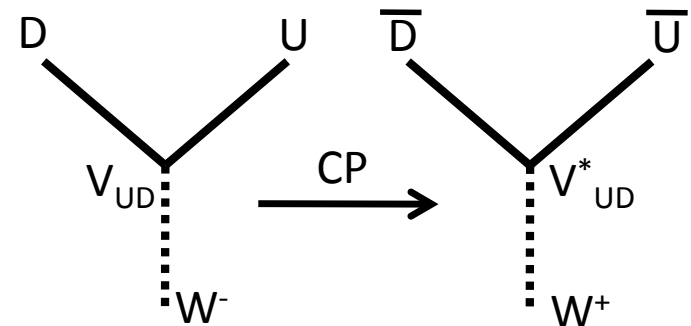
L'antimateria in natura

- **Non** c'è evidenza di **antimateria primaria** nell'Universo.
 - La **distanza minima** dalla Terra di un **eventuale dominio di antimateria** è comparabile con la **scala dell'orizzonte visibile ~1 Gpc** (1 pc = 3.08×10^{16} m = 3.26 a.l.).
- Deve esistere un **meccanismo asimmetrico** che **“preferisce”** la **materia** all'antimateria.
- Quanto deve essere stata **intensa** inizialmente questa asimmetria? **Quale eccesso di materia** rispetto all'antimateria deve esserci stato **inizialmente**?
 - In realtà **meno di quanto si possa pensare**.
 - È sufficiente **una parte per 10 miliardi**.

Matrice CKM

- Tutta la violazione di CP prevista nel Modello Standard è spiegata dalla matrice CKM
- La matrice CKM descrive il miscelamento tra gli autostati di massa e gli autostati di sapore dei quark
- Nelle ampiezze dei processi d'interazione debole compaiono delle fasi complesse che cambiano segno per trasformazioni di CP

$$\begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}}_{V_{\text{CKM}} \text{ matrice complessa unitaria } 3 \times 3} \cdot \begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix}$$



La presenza di una fase complessa nelle ampiezze dei processi è responsabile della violazione di CP

Come si manifesta la violazione di CP

- Per poter osservare violazione di CP è necessario che la stessa transizione avvenga tramite due processi distinti
 - Interferenza tra almeno due ampiezze con differenza di fase non nulla
- Violazione di CP “**diretta**”
 - Si manifesta come una probabilità diversa per i due processi di decadimento $B \rightarrow f$ e $\bar{B} \rightarrow \bar{f}$
- Violazione di CP nel “**miscelamento**”
 - Si manifesta come una diversa probabilità tra i due processi $B \rightarrow \bar{B}$ e $\bar{B} \rightarrow B$
- Interferenza tra **decadimento** e **miscelamento**
 - È dovuta all’interferenza tra i due processi di cui sopra, e può esistere anche in assenza dei due precedenti tipi di violazione di CP

Perché la violazione di CP è importante

Diagramma di decadimento

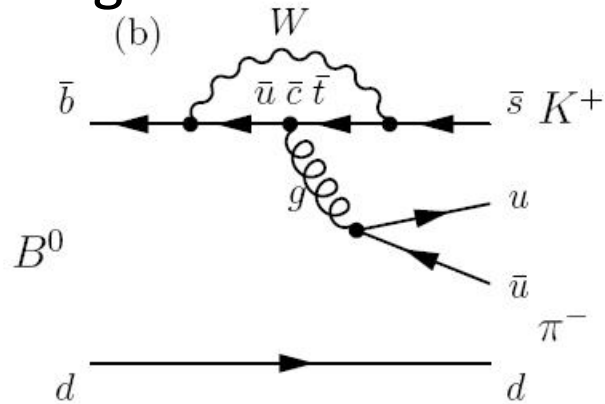
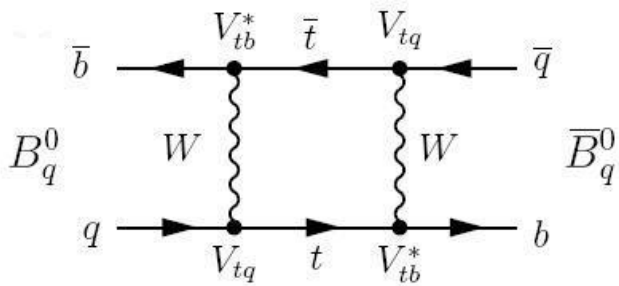


Diagramma di miscelamento



Perché la violazione di CP è importante

Diagramma di decadimento

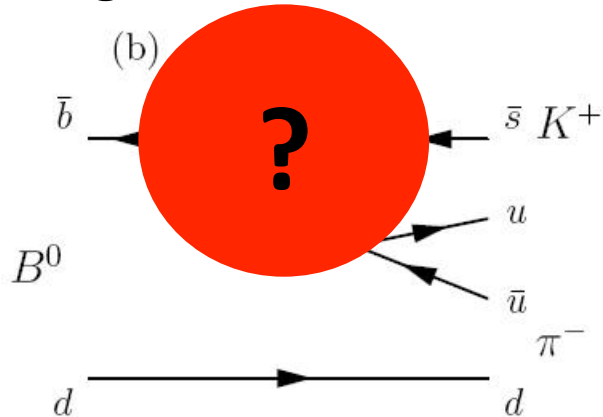
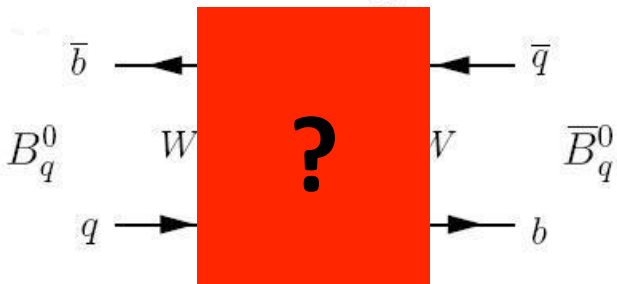


Diagramma di miscelamento



- Le particelle che compaiono all'interno dei diagrammi sono particelle virtuali
- Particelle virtuali molto massive e non ancora osservate possono comparire all'interno dei diagrammi modificando i valori delle osservabili di violazione di CP

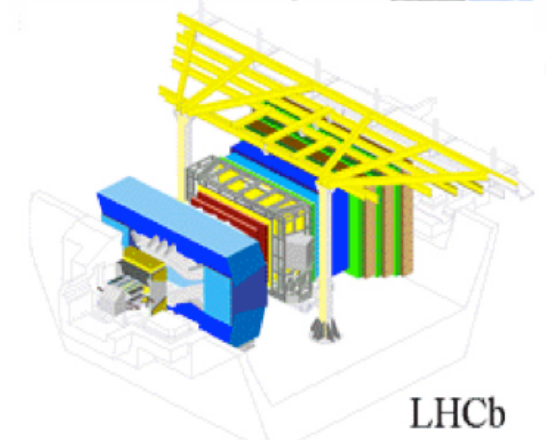
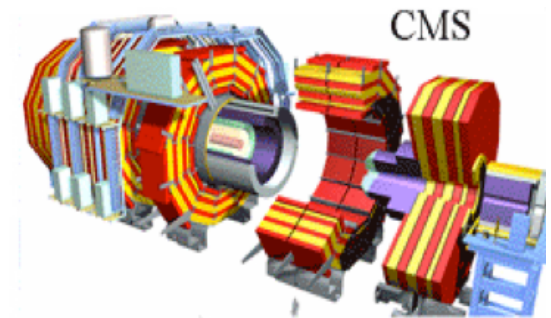
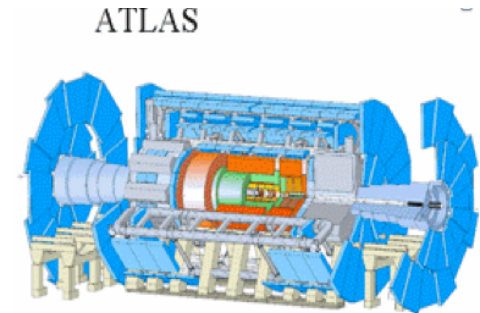
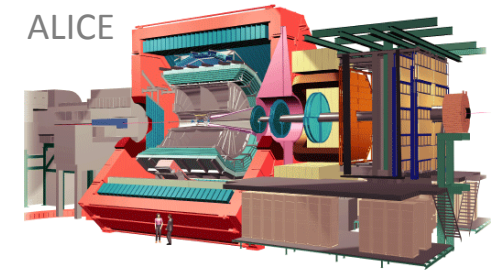
- Oscillazione dei kaoni neutri e meccanismo GIM → **predizione del quark charm**
- Oscillazione dei mesoni B neutri → stima della **massa del quark top**

La missione di LHCb

- Gli esperimenti LHC ambiscono alla scoperta di effetti di Nuova Fisica non previsti dal Modello Standard
- **Ricerche dirette** di nuove particelle prodotte dagli urti ultraenergetici di LHC sono realizzate dai cosiddetti *general purpose detectors*: **ATLAS e CMS**
- **LHCb** è specializzato per la **ricerca indiretta** di effetti di Nuova Fisica
 - Cercando discrepanze delle previsioni del Modello Standard causate dalla possibile presenza di nuove particelle pesanti che **alterano il comportamento** delle particelle note



- Effettuando misure di precisione di violazione di CP e ricerca di decadimenti rari di adroni pesanti, con quark **beauty e charm**)



Qualche volta le ricerche indirette pagano bene...

Una terza famiglia di quark è necessaria per spiegare la violazione di CP nelle interazioni deboli



M. Kobayashi and T. Maskawa

CP Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction

Prog. Theor. Phys. **49** (1973) 652

CP violation nei decadimenti dei mesoni B a BaBar e Belle

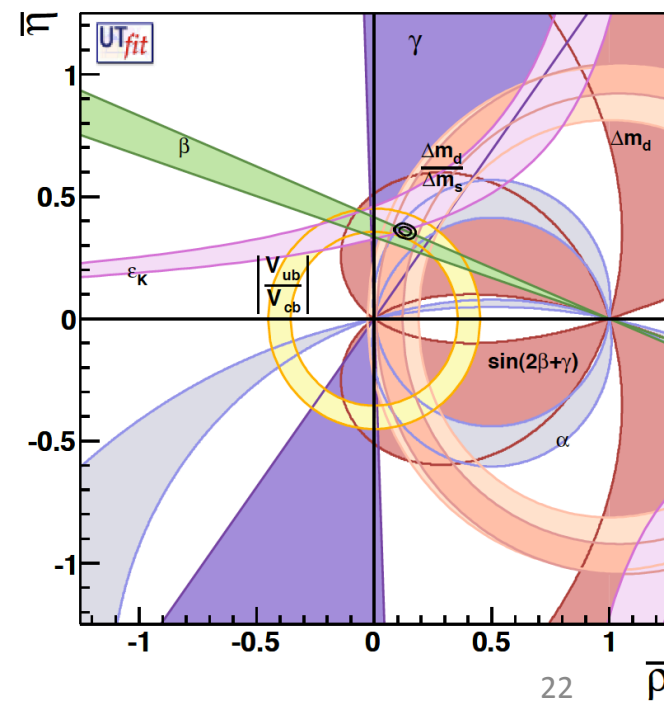
B. Aubert *et al.*, Phys. Rev. Lett. **87** (2001) 091801

K. Abe *et al.*, Phys. Rev. Lett. **87** (2001) 091802



2008: Premio nobel in fisica

“per la scoperta dell’origine della rottura della simmetria che prevede l’esistenza di almeno tre famiglie di quark in natura”



...ma non dimentichiamo il Prof. Cabibbo

Ho alcuni
decadimenti
preferiti...

N. Cabibbo

Unitary Symmetry and Leptonic Decays

Phys. Rev. Lett. **10** (1963) 531

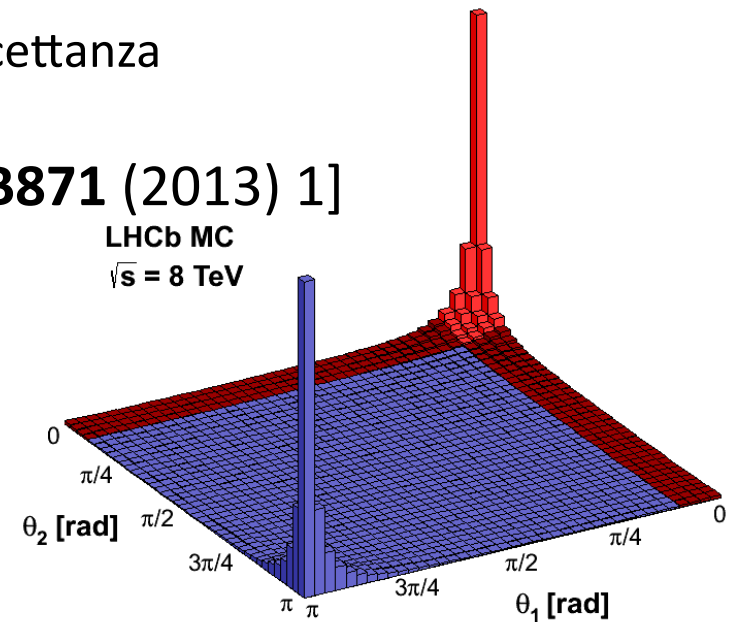
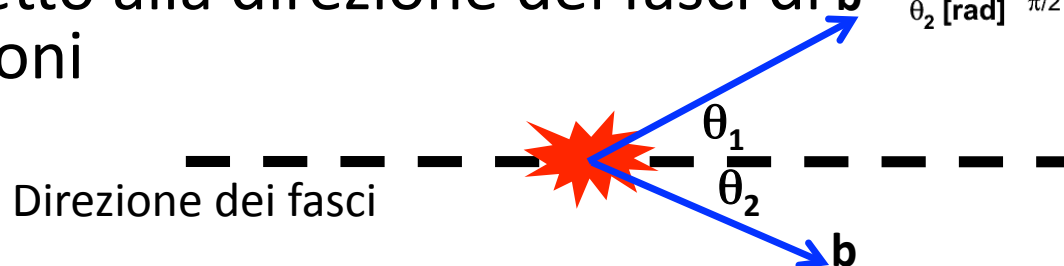


2010: Medaglia Dirac

per i suoi “fondamentali contributi alla comprensione delle interazioni deboli e di altri aspetti della fisica teorica”

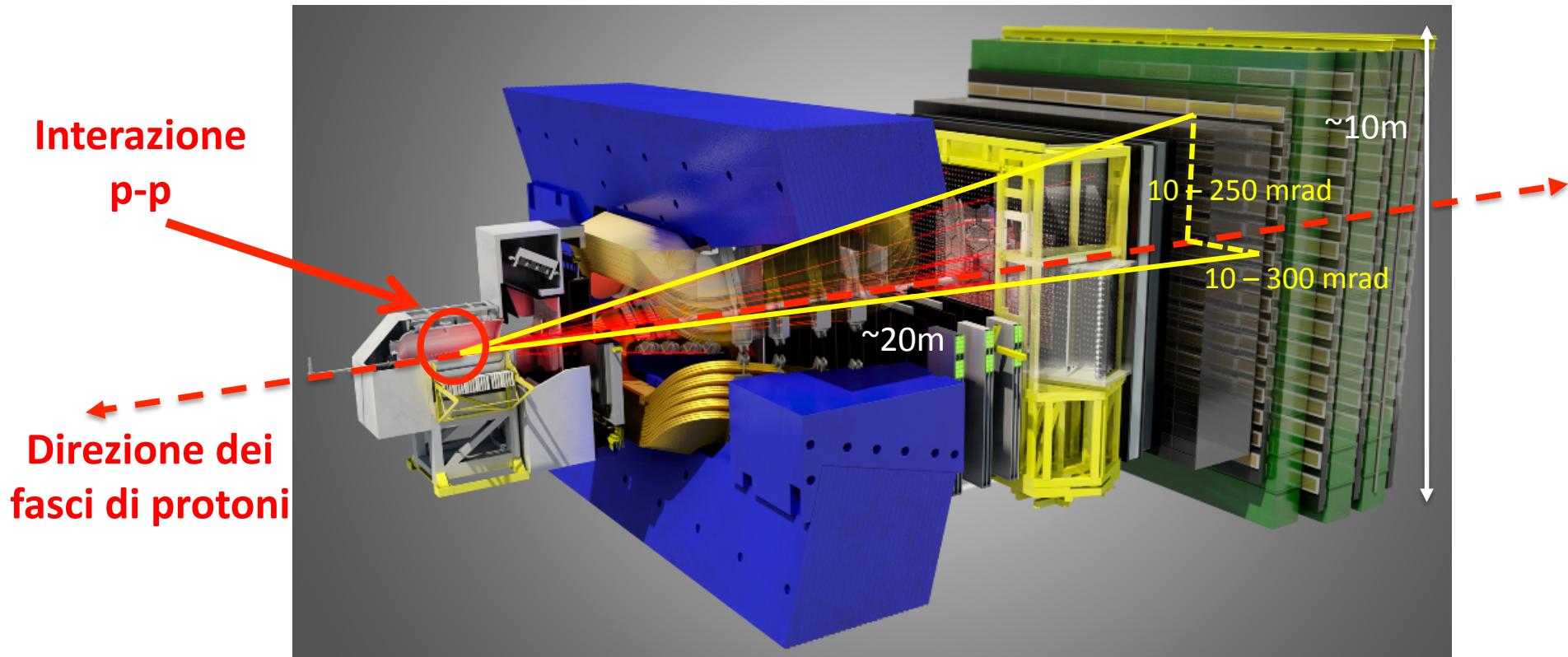
Produzione di quark c e b a LHCb

- Nelle collisioni p-p a LHC vengono prodotti tantissimi adroni contenenti quark c e b:
 - Elevata sezione d'urto di produzione di coppie di quarks $b\bar{b}$ e $c\bar{c}$:
 - $\sigma_{b\bar{b}} \sim 75 \mu\text{b}$ [Phys. Lett. **B694** (2010) 209]
 - Circa 10^{11} adroni B prodotti dentro l'accettanza del rivelatore ogni anno
 - $\sigma_{c\bar{c}}$ è 20 volte più grande [Nucl. Phys. **B871** (2013) 1]
 - $\sigma(pp \rightarrow c\bar{c}X) = \sim 1.4 \text{ mb}$
 - I quark c e b sono prodotti in avanti con un piccolo angolo rispetto alla direzione dei fasci di b protoni



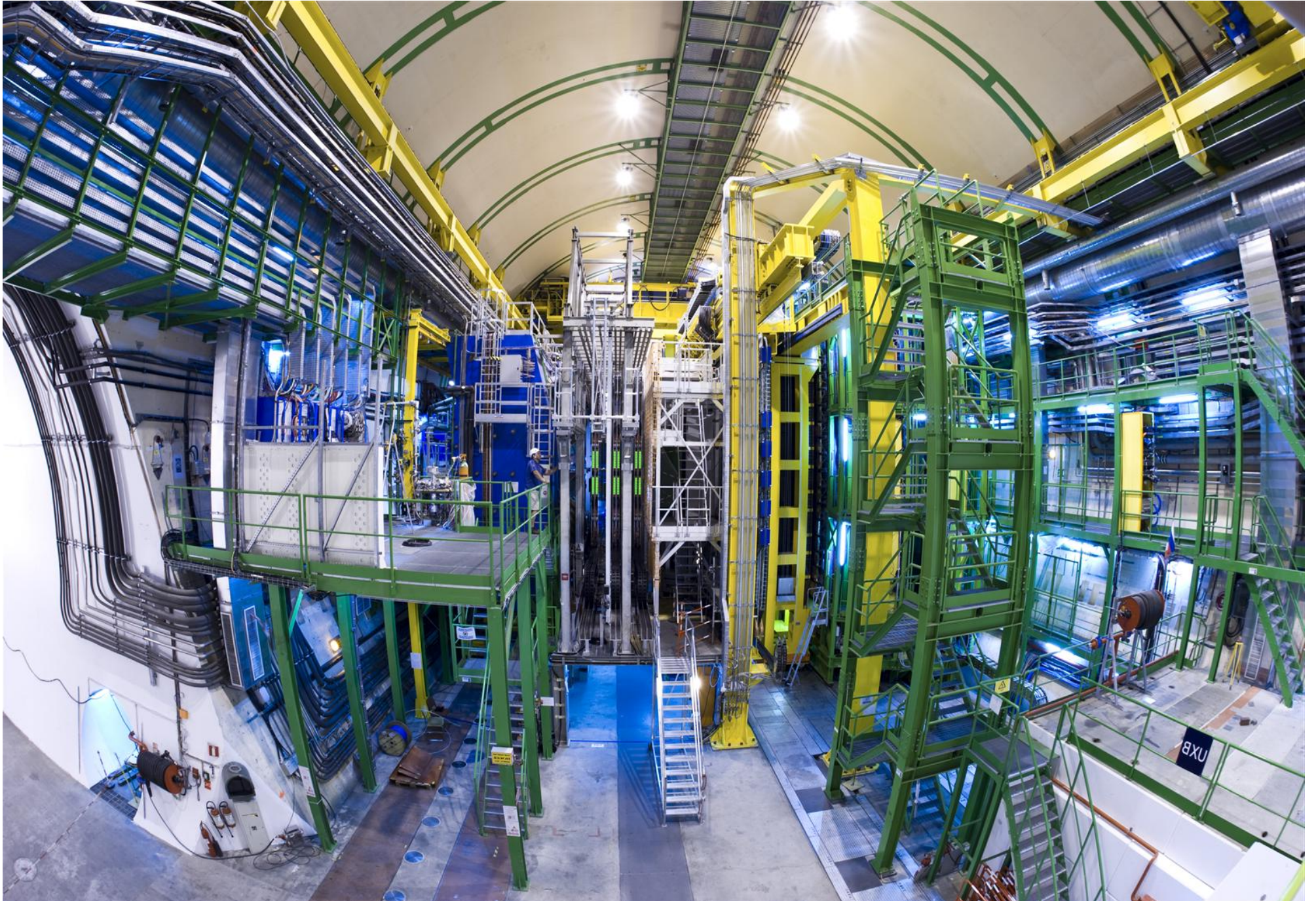
Il rivelatore LHCb

- Il rivelatore LHCb è uno spettrometro a braccio singolo in avanti
 - Al fine di coprire la zona in cui viene prodotta la maggior parte di quark c e b ($\sim 30\%$)

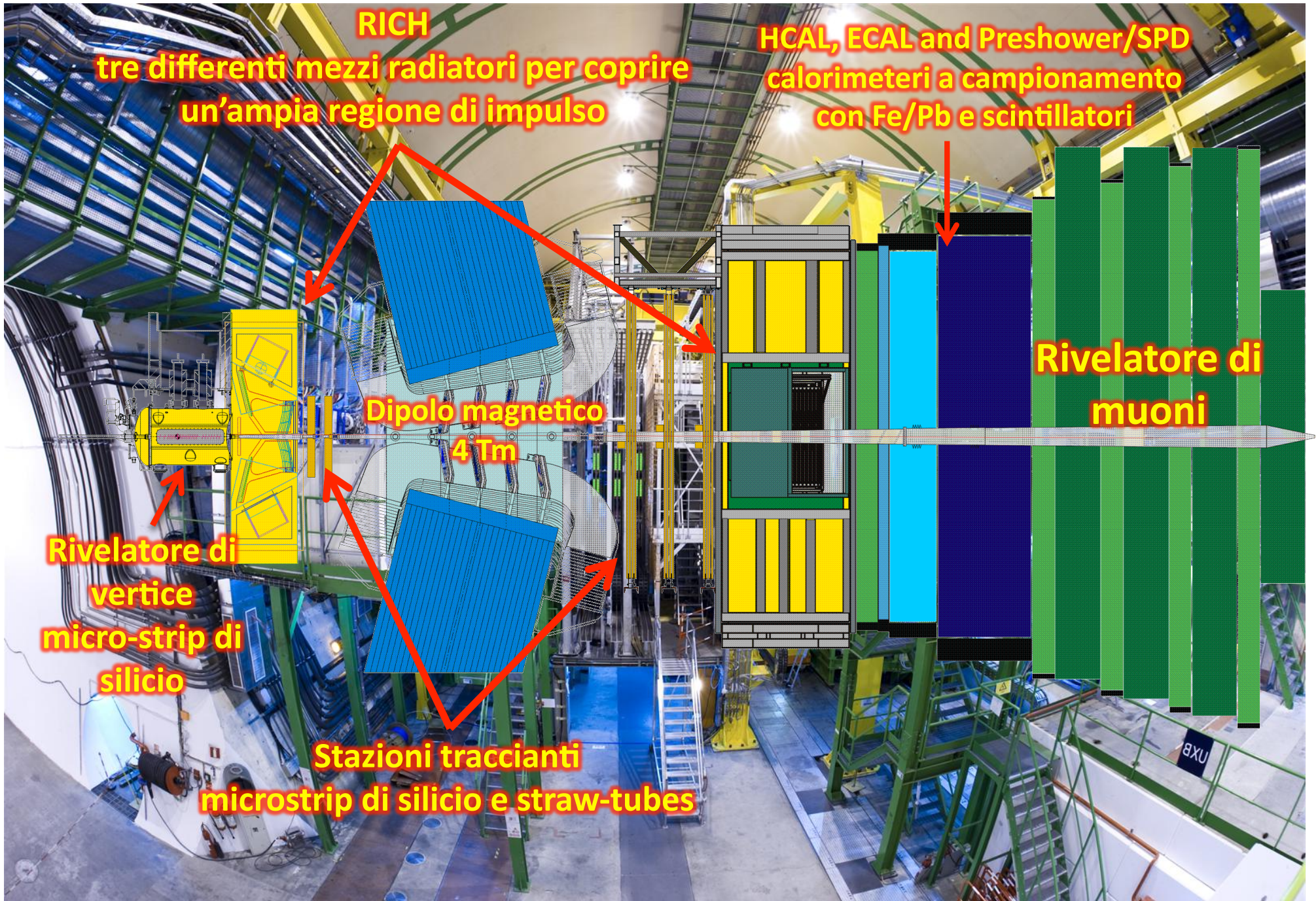


Pseudorapidità $2 < \eta < 5$

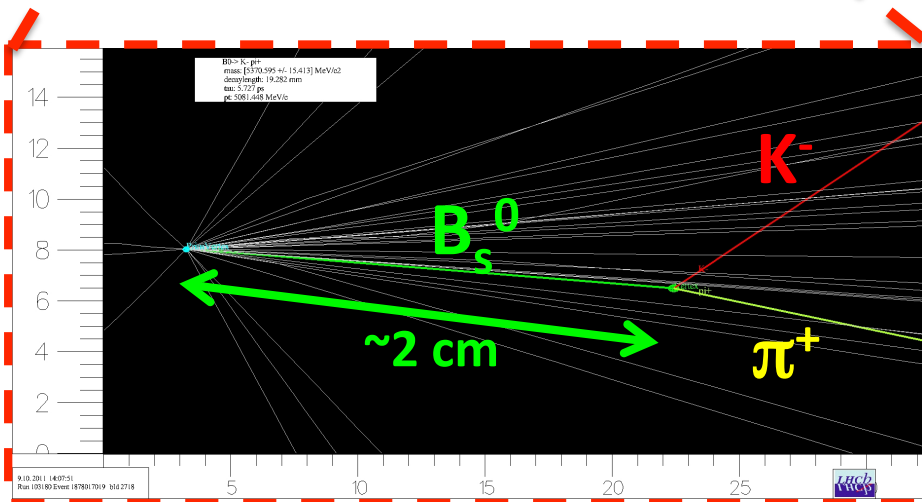
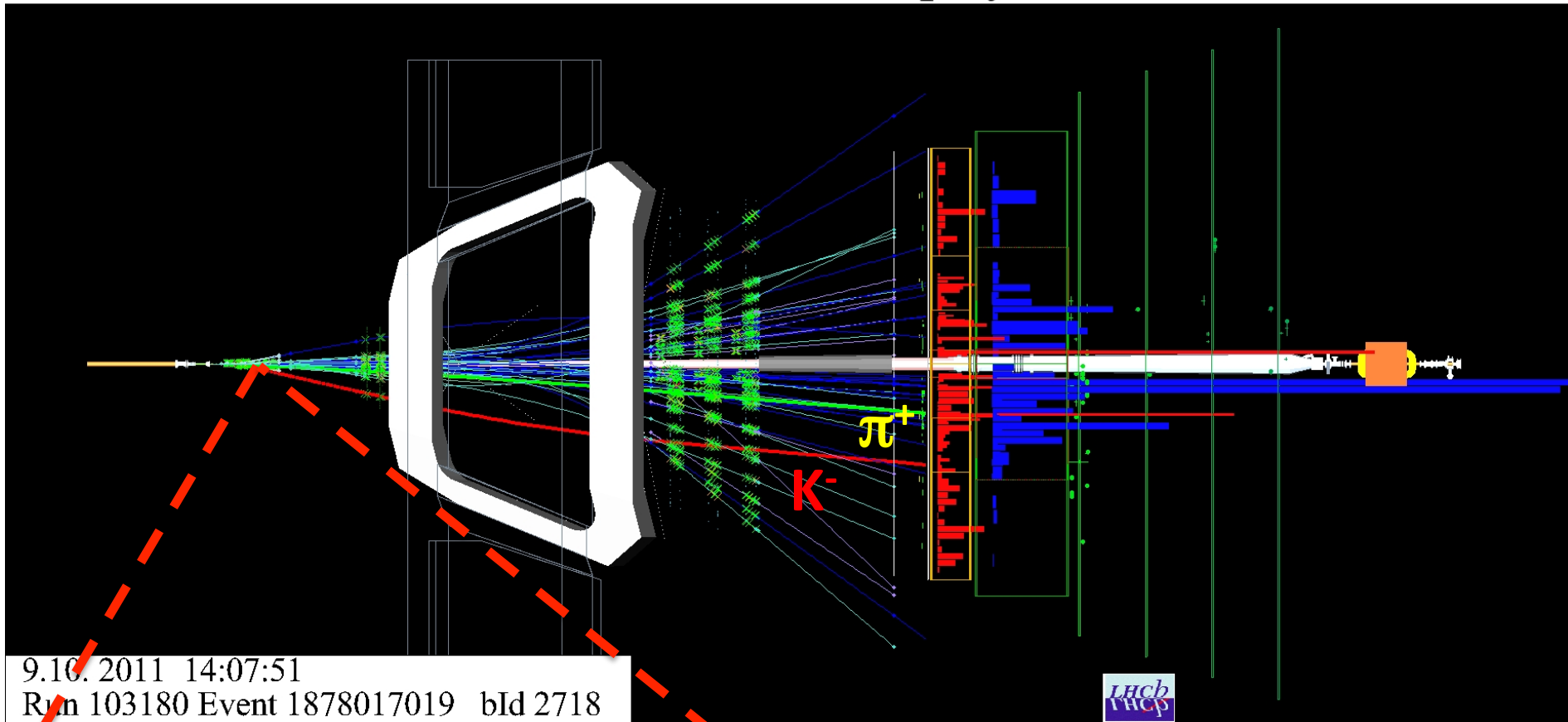
Il rivelatore LHCb



Il rivelatore LHCb



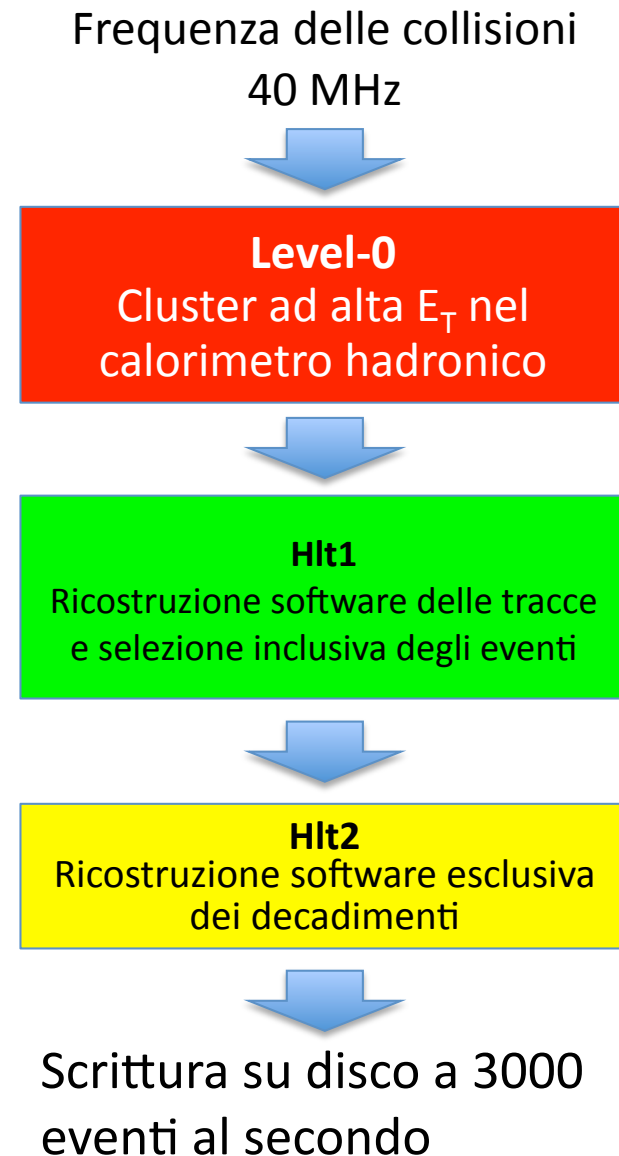
LHCb Event Display



- Eccellente capacità di distinguere K e π
- Identificazione del vertice di decadimento con una precisione di ~ 0.01 mm
 - Consente di rigettare le tracce inutili che vengono dall'interazione primaria p-p
 - Piccolo errore sulla determinazione del tempo di volo

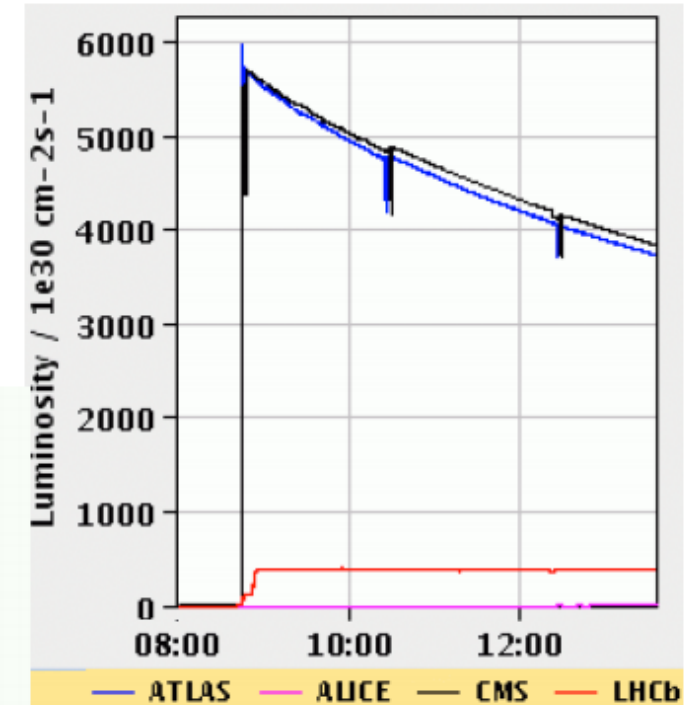
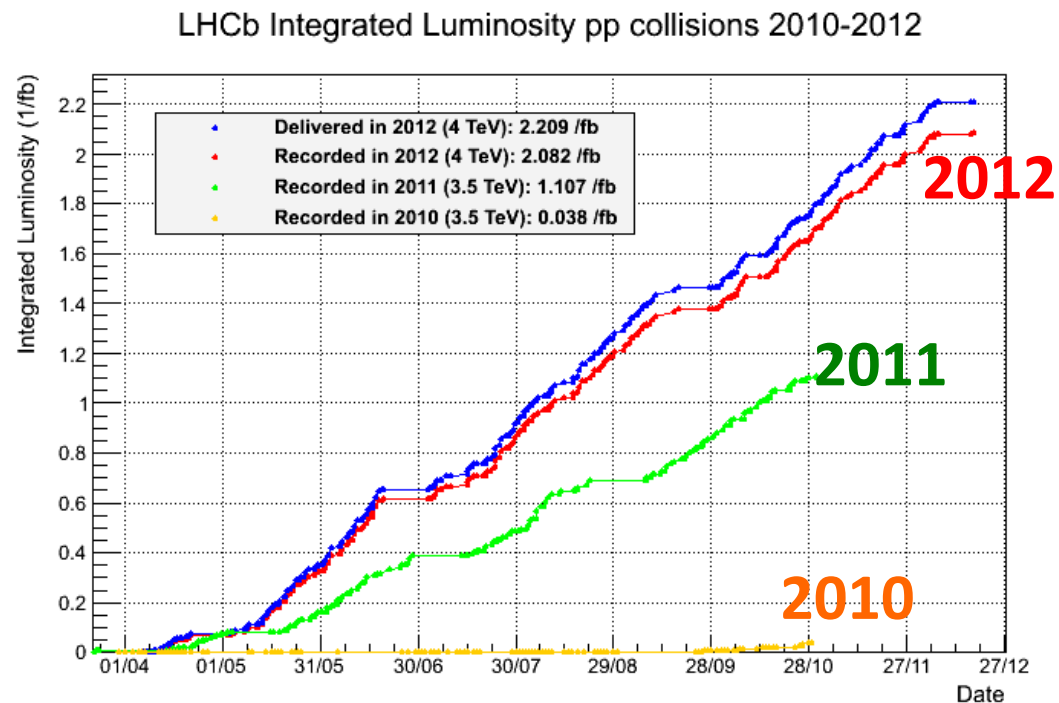
Il trigger di LHCb

- Elevato numero di eventi “inutili”
 - $\sigma_{\text{visibile}} \sim 60 \text{ mb}$ at $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$, 200 volte maggiore della sezione d’urto di produzione di beauty
 - Per ogni B prodotto, i decadimenti d’interesse hanno branching ratio (probabilità di verificarsi) da 10^{-4} a 10^{-9}
- Elevata frequenza di collisioni p-p
 - 40 milioni al secondo
- Limiti di budget sulla quantità di dati immagazzinabili
 - $\sim 2.5 \text{ PB}$ di dati RAW raccolti nel 2011 e nel 2012



LHCb e la luminosità

- Durante il 2011 e 2012 LHCb ha lavorato con buona continuità ad una luminosità istantanea di $4 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 - 2 volte la luminosità di progetto



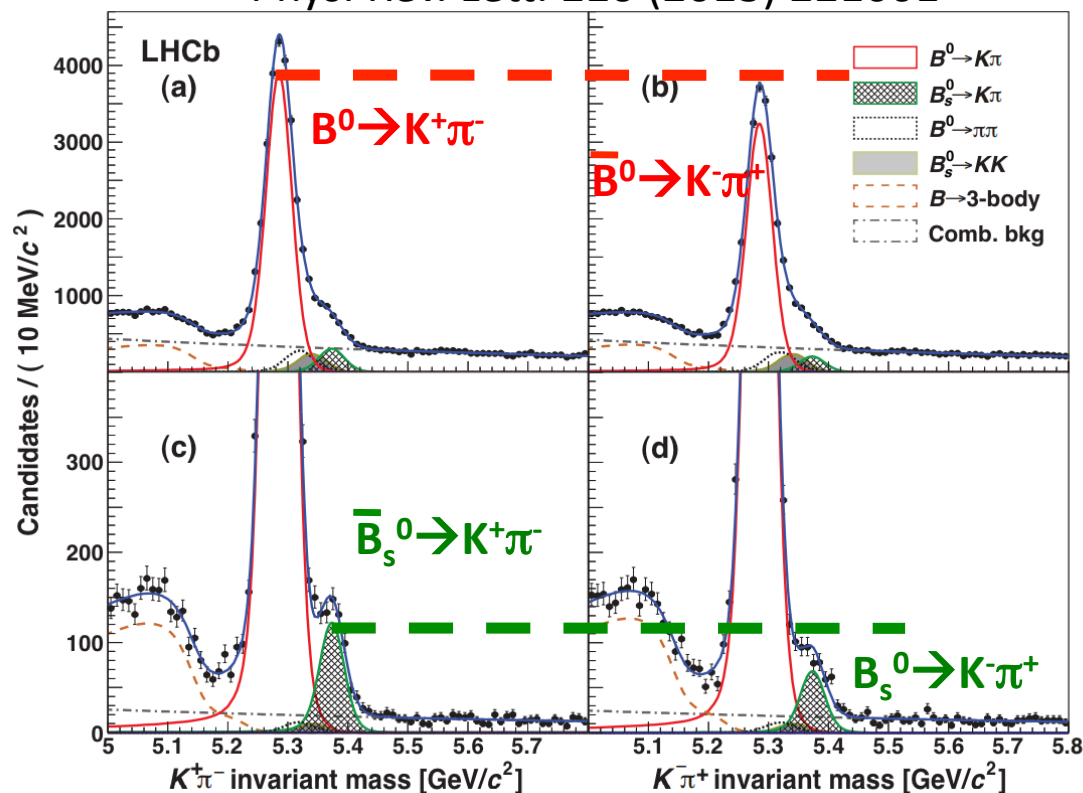
Luminosità
mantenuta costante
durante il fill

Selezione di risultati di rilievo

- Violazione di CP
 - Prima osservazione di violazione di CP nei decadimenti del mesone B_s
 - Misura della fase di miscelamento del mesone B_s
 - Misure di violazione di CP nei decadimenti in due corpi carichi dei mesoni D^0
- Oscillazione dei mesoni D^0
- Decadimenti rari
 - $B_{(s)} \rightarrow \mu^+ \mu^-$

Violazione di CP nei decadimenti $B \rightarrow K\pi$

Phys. Rev. Lett. **110** (2013) 221601



- Tipico esempio di violazione di CP diretta
- Risultati ottenuti utilizzando solamente i dati 2011 (1/fb)
- Necessario determinare le differenti efficienze di ricostruzione per i due stati finali coniugati di CP $K^+\pi^-/K^-\pi^+$
- Necessario stimare possibili differenze nei ratei di produzione dei mesoni B^0 e \bar{B}^0

$$A_{CP}(B^0 \rightarrow K\pi) = -0.080 \pm 0.007(\text{stat}) \pm 0.003(\text{syst}),$$

Misura più precisa mai eseguita di questa quantità (10.7σ)

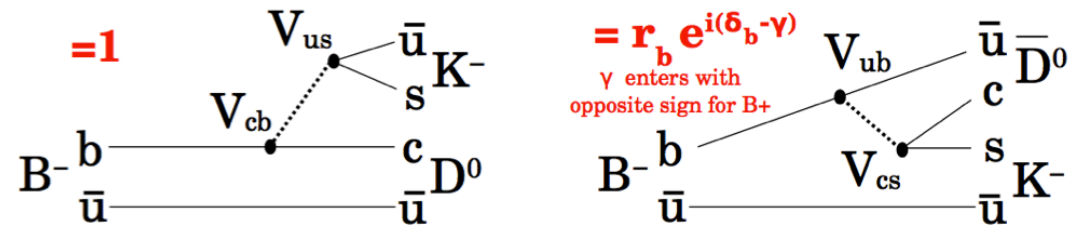
$$A_{CP}(B_s^0 \rightarrow K\pi) = 0.27 \pm 0.04(\text{stat}) \pm 0.01(\text{syst}).$$

Prima osservazione di violazione di CP nei decadimenti del B_s (6.5σ)

Violazione di CP nei decadimenti $B^\pm \rightarrow D^0 h^\pm$

- Altro esempio di violazione di CP diretta

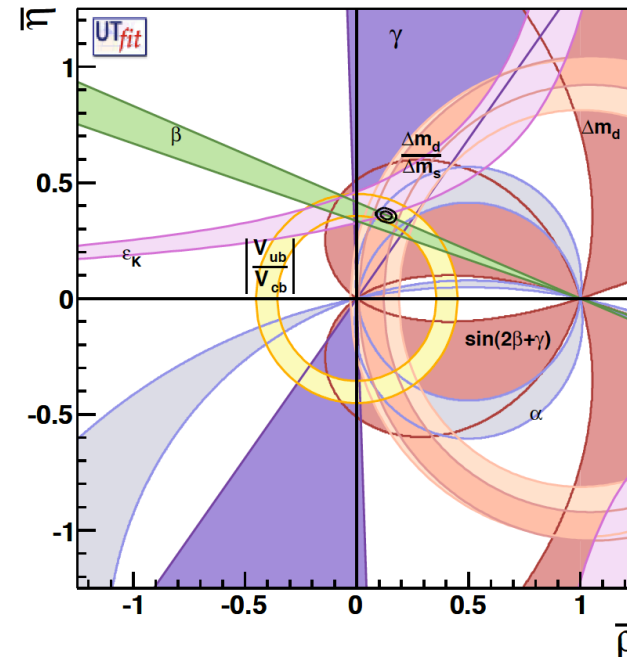
- Sfrutta l'interferenza tra le ampiezze delle transizioni $b \rightarrow u$ e $b \rightarrow c$



- Estrazione dell'angolo γ del **Triangolo Unitario**
- Le osservabili sensibili sono le asimmetrie dirette di CP e i rapporti tra i ratei di decadimento

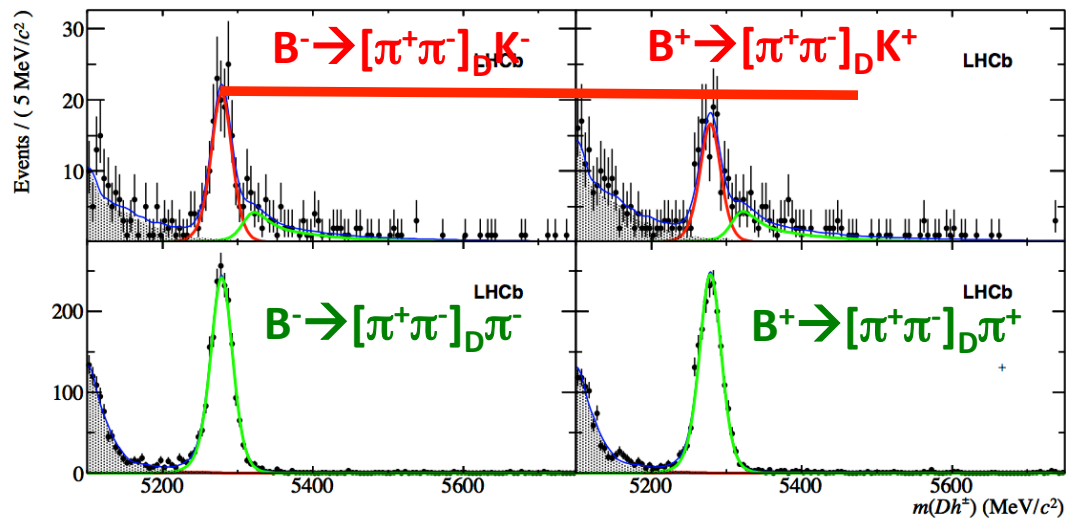
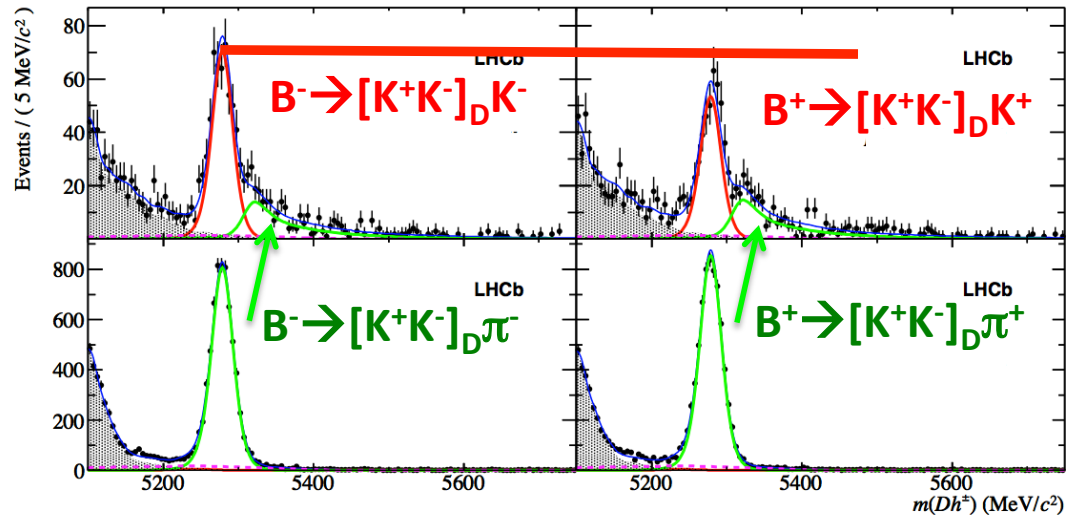
- Possibilità di utilizzare diversi decadimenti dei mesoni D^0

- **Metodo GLW**: decadimenti dei mesoni D^0 in autostati di CP (K^+K^- , $\pi^+\pi^-$, ...)
- **Metodo ADS**: decadimenti dei mesoni D^0 negli stati finali $K^+\pi^-$ e $K^-\pi^+$
- **Metodo GGSZ**: analisi di Dalitz dei decadimenti $D^0 \rightarrow K_S \pi^+ \pi^-$ e $D^0 \rightarrow K_S K^+ K^-$



Metodo GLW

Phys. Lett. **B712** (2012) 203 $\int Ldt = 1 fb^{-1}$



- GLW: Gronau-London-Wyler

- Phys. Lett. **B253** (1991) 483

- Phys. Lett. **B265** (1991) 172

- Aspetti sperimentali

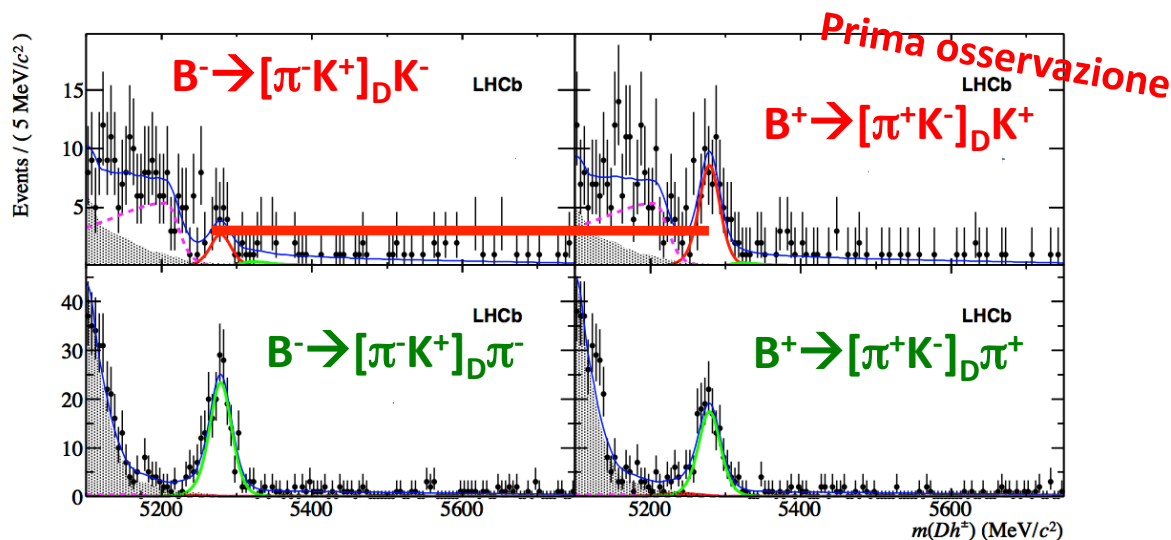
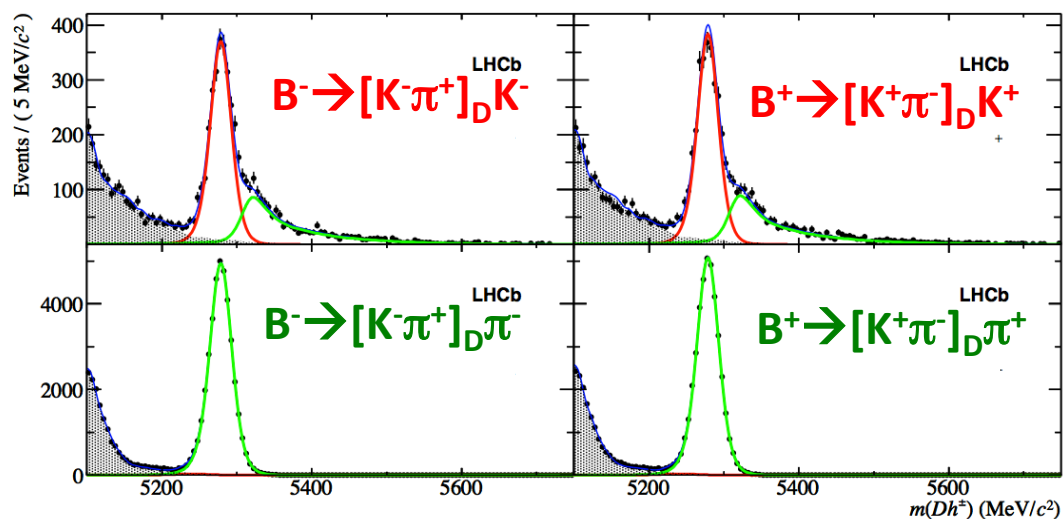
- Controllo delle efficienze di identificazione di K e π

- Controllo delle asimmetrie di rivelazione K^+/K^- e π^+/π^-

- Controllo della possibile asimmetria di produzione B^+/B^-

Metodo ADS

Phys. Lett. B712 (2012) 203 $\int Ldt = 1 fb^{-1}$



- ADS: Atwood-Dunietz-Soni

- Phys. Rev. Lett. **78** (1997)

- Aspetti sperimentali

- Controllo delle efficienze di identificazione di K e π

- Controllo delle asimmetrie di rivelazione K^+/K^- , π^+/π^- e $K^+\pi^-/K^-\pi^+$

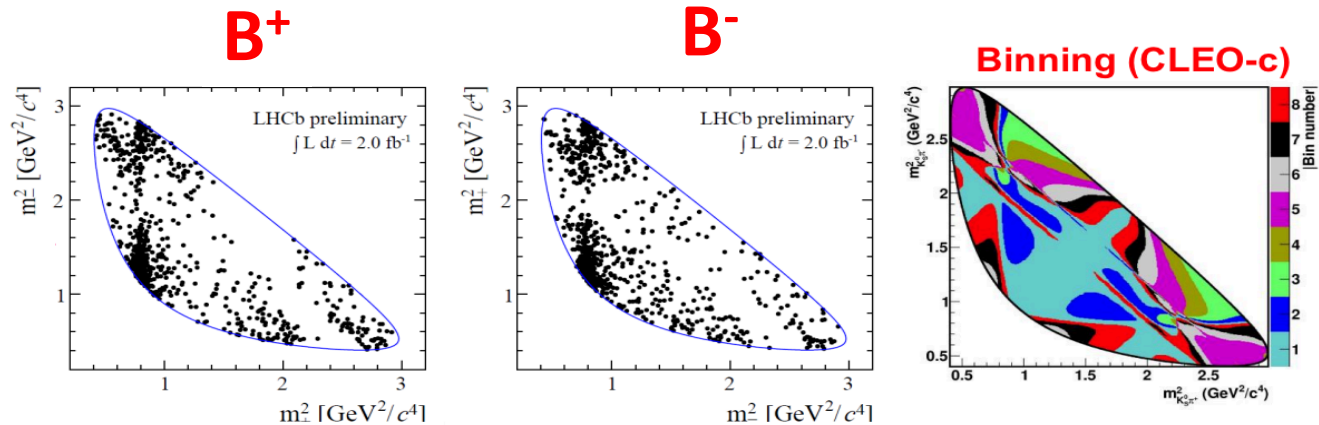
- Controllo della possibile asimmetria di produzione B^+/B^-

Metodo GGSZ

- GGSZ: Giri-Grossman-Soffer-Zupan
 - Phys. Rev. D68 (2003) 054018
- Per ogni bin nel piano di Dalitz vengono misurate le variabili sensibili a γ come nei metodi precedenti
- Ad ogni bin corrisponde una diversa sensibilità su γ
 - I risultati vengono mediati bin per bin in funzione della sensibilità

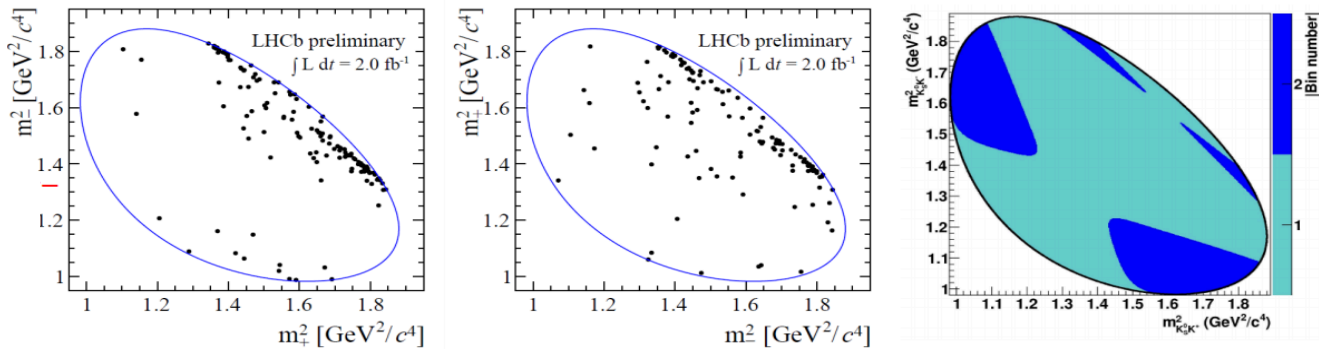
~1390

$B^\pm \rightarrow D^0(K_S \pi^+ \pi^-) K^\pm$

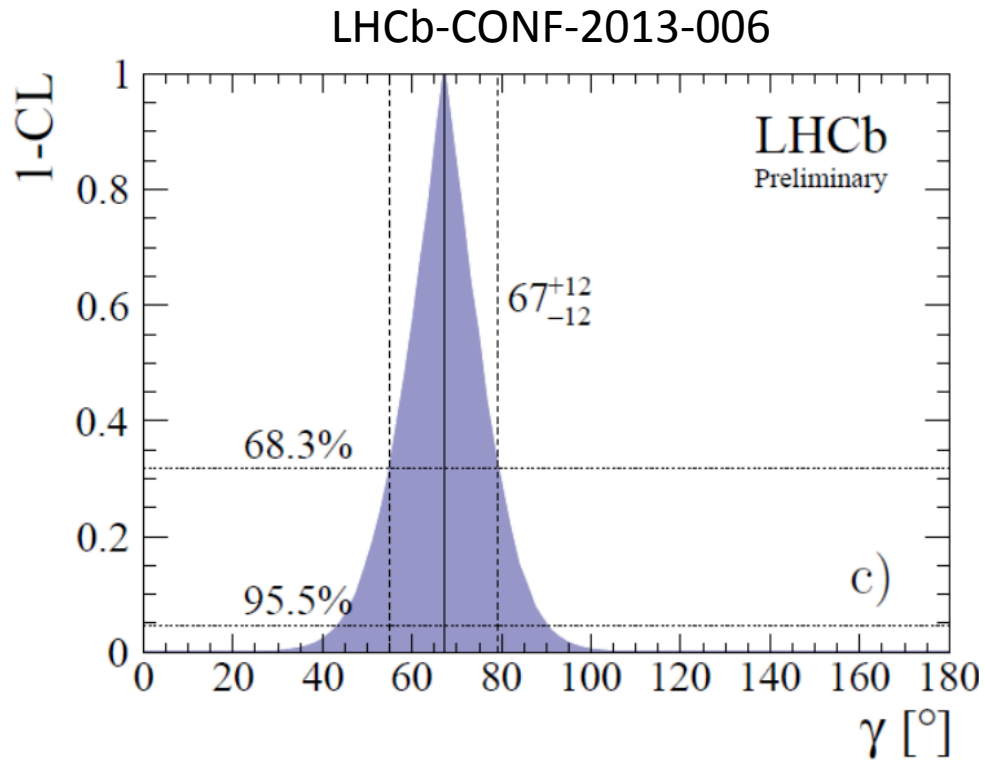


~200

$B^\pm \rightarrow D^0(K_S K^+ K^-) K^\pm$



Combinazione



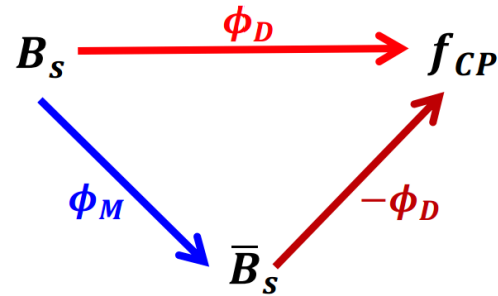
$$\gamma = (67 \pm 12)^\circ @ 68\% \text{ CL}$$

- Metodi GLW e ADS con 1/fb (2011)
- Metodo GGSZ con 3/fb (2011+2012)
- Risultato migliore rispetto alle B-Factories
 - $\gamma_{\text{BaBar}} = (69^{+17}_{-16})^\circ$
 - $\gamma_{\text{Belle}} = (68^{+15}_{-14})^\circ$

**In ottimo accordo con il
Modello Standard**

Misura della fase di mixing del mesone B_s

- Tipico caso di violazione di CP dovuta all'interferenza tra oscillazione e decadimento



Fase di

$$\phi_s = \phi_m - 2\phi_D$$

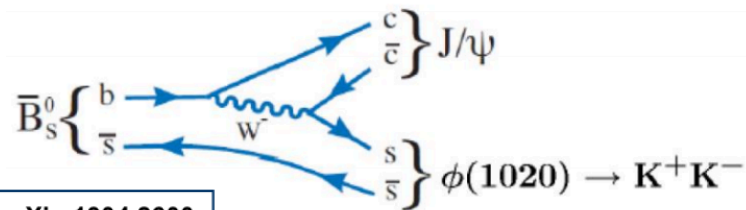
- Assumendo la validità del modello standard:
 - Nelle transizioni $b \rightarrow ccs$ si ha che $\phi_D \sim 0 \rightarrow \phi_s$ coincide con la fase di mixing ϕ_m
 - $\phi_m = -0.036 \pm 0.002$ è predetto con un'ottima precisione



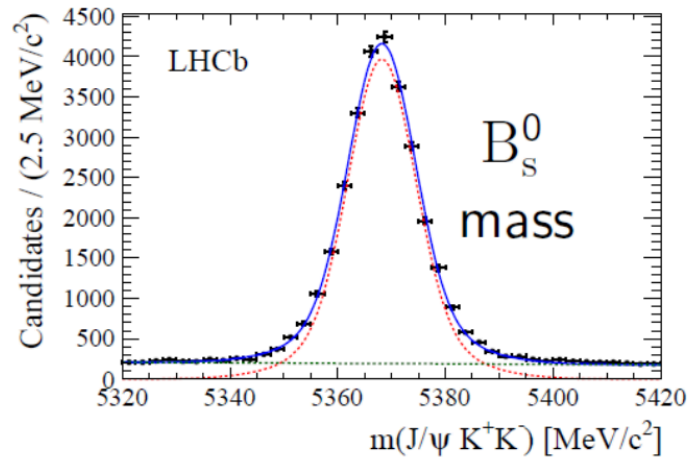
Una misura di ϕ_s diversa da 0 sarebbe un chiaro segnale di presenza di Nuova Fisica

Misura della fase di mixing del mesone B_s

- Misura effettuata utilizzando due decadimenti

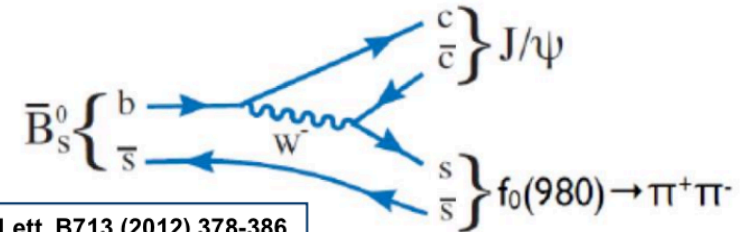


arXiv:1304.2600

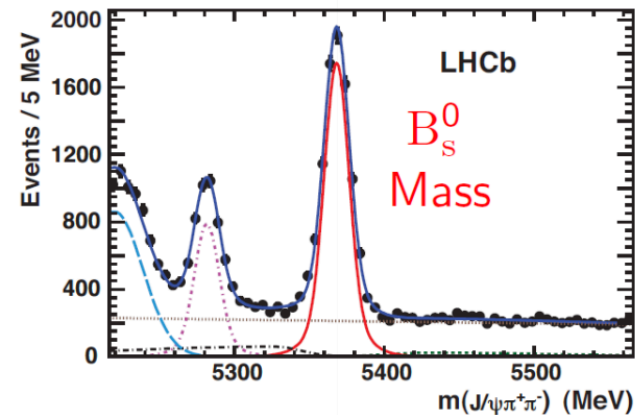


$N \approx 27,600$ Signal events

- Lo stato finale $J/\psi\phi$ è una miscela di autostati CP-pari e CP-dispari



Phys. Lett. B713 (2012) 378-386

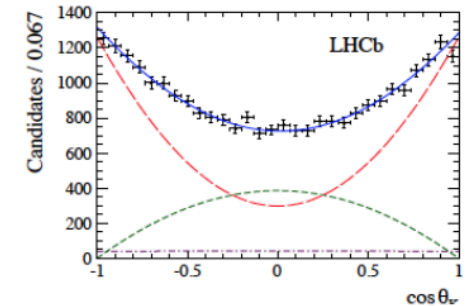
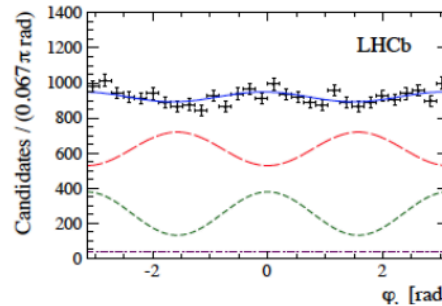
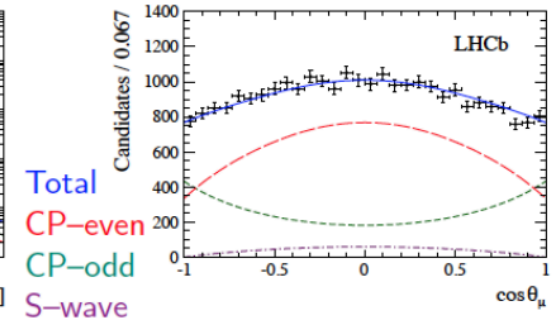
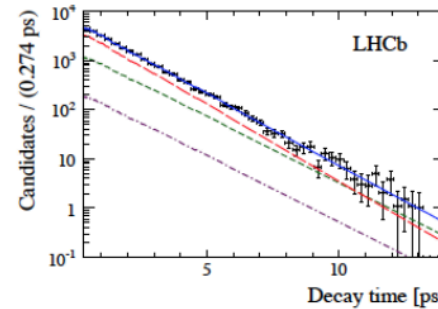
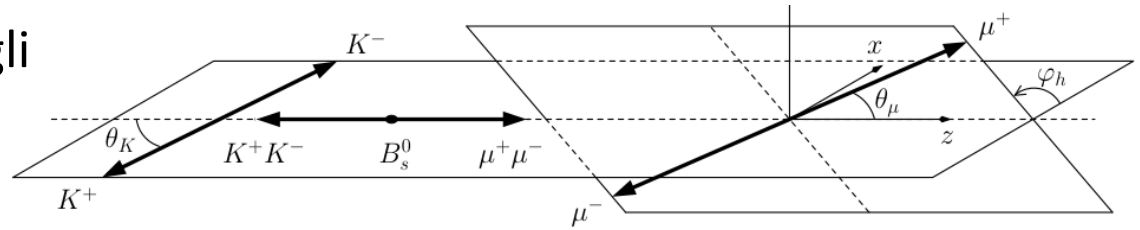


$\approx 7,400$ signal events

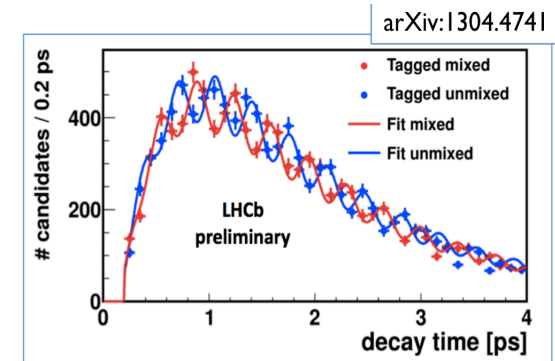
- Lo stato finale $J/\psi f_0$ è composto per più del 97.7 % dall'autostato CP-dispari

Decadimenti $B_s \rightarrow J/\psi(\mu^+\mu^-)\phi(K^+K^-)$

- Lo studio delle distribuzioni negli **angoli di elicità** permette di separare i due autostati di CP
- Necessario determinare lo stato di sapore del mesone B_s al momento della produzione \rightarrow **Flavour tagging**
 - Potere effettivo di tagging $\epsilon D^2 = (3.13 \pm 0.23) \%$
- Necessaria un'ottima risoluzione in tempo proprio di decadimento per seguire l'oscillazione veloce del mesone $B_s \rightarrow \sigma_t \sim 44 \text{ fs}$



Misura della frequenza di oscillazione del B_s con decadimenti $B_s \rightarrow D_s \pi$



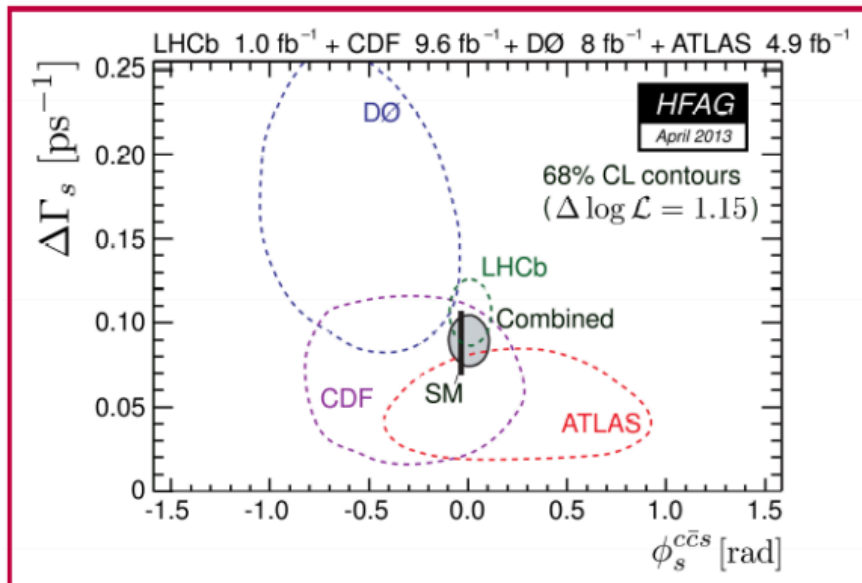
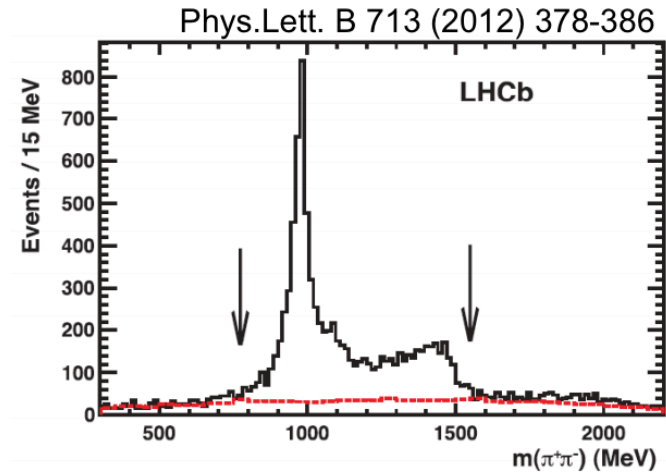
Decadimenti $B_s \rightarrow J/\psi(\mu^+\mu^-) f_0(980)(\pi^+\pi^-)$

- Lo stato $J/\psi f_0(980)$ è quasi puramente CP dispari
 - Non è necessaria un'analisi angolare

Risultato ottenuto analizzando
simultaneamente i due decadimenti

$B_s \rightarrow J/\psi\phi$ e $B_s \rightarrow J/\psi f_0$

ϕ_s	$= 0.01 \pm 0.07$ (stat) ± 0.01 (syst) rad,
Γ_s	$= 0.661 \pm 0.004$ (stat) ± 0.006 (syst) ps^{-1} ,
$\Delta\Gamma_s$	$= 0.106 \pm 0.011$ (stat) ± 0.007 (syst) ps^{-1} .



Nessuna evidenza di scostamento dal Modello Standard ma l'errore sperimentale è ancora grande comparato con le capacità predittive del Modello Standard

Violazione di CP nei decadimenti $D^0 \rightarrow h^+ h^-$

- La violazione di CP è stata osservata nei decadimenti dei mesoni K, B^\pm , B^0 , B_s ma non ancora nel settore del quark charm
 - Nel Modello Standard è attesa essere molto piccola $\rightarrow O(10^{-4})$
 - Un'osservazione di violazione di CP $O(10^{-3})$ sarebbe un chiaro segnale di Nuova Fisica
- Ricerca della violazione di CP come asimmetria tra le ampiezze di decadimento

$$A_{CP}(f) = \frac{\Gamma(D^0 \rightarrow f) - \Gamma(\bar{D}^0 \rightarrow f)}{\Gamma(D^0 \rightarrow f) + \Gamma(\bar{D}^0 \rightarrow f)} \quad f = K^+ K^-, \pi^+ \pi^-$$

- Necessario determinare lo stato di sapore iniziale del mesone D^0

- Ad esempio utilizzando gli gnocchi decadimenti $D^* \rightarrow D^0(f)$

$$A_{raw}(f) = \frac{N(D^{*+} \rightarrow D^0(f)\pi_s^+) - N(D^{*-} \rightarrow \bar{D}^0(\bar{f})\pi_s^-)}{N(D^{*+} \rightarrow D^0(f)\pi_s^+) + N(D^{*-} \rightarrow \bar{D}^0(\bar{f})\pi_s^-)}$$

$$A_{raw} \approx A_{CP} + A_D + A_P$$



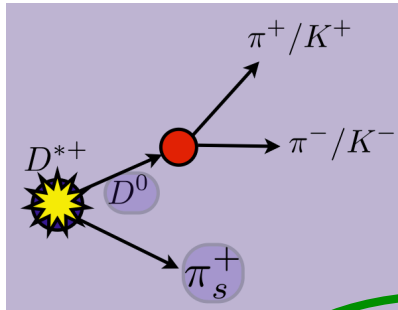
La differenza tra le asimmetrie è una quantità molto robusta da un punto di vista sperimentale in quanto asimmetrie strumentali si cancellano

$$\Delta A_{CP} \equiv A_{raw}(KK) - A_{raw}(\pi\pi) = A_{CP}(KK) - A_{CP}(\pi\pi)$$

Violazione di CP nei decadimenti $D^0 \rightarrow h^+ h^-$

- Due misure indipendenti di ΔA_{CP} :

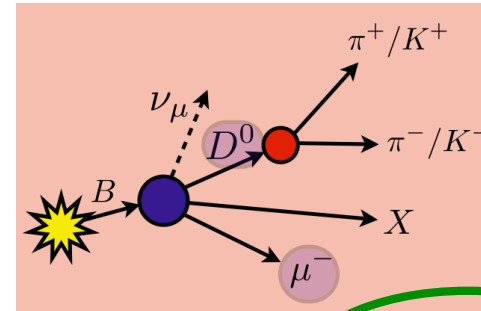
- $D^{*+} \rightarrow D^0(f) \pi_s$
(LHCb-CONF-2013-003):
 - $\mathcal{L} = 1 \text{ fb}^{-1}$ @ $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$



$$A_{raw}(f) = A_{CP}(f) + A_D(\pi_s) + A_P(D^*)$$

- Sapore del D^0 ottenuto dalla carica del π lento da D^*
- Asimmetria di rivelazione del π lento
- Asimmetria di produzione del D^*

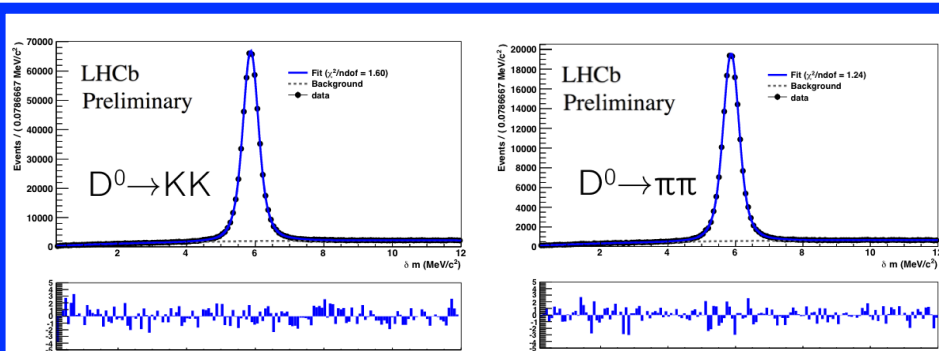
- $B \rightarrow D^0(f) \mu \nu X$
(Phys. Lett. B723 (2013) 33):
 - $\mathcal{L} = 1 \text{ fb}^{-1}$ @ $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$



$$A_{raw}(f) = A_{CP}(f) + A_D(\mu) + A_P(B)$$

- Sapore del D^0 ottenuto dalla carica del μ da B
- B ricostruito parzialmente
- Asimmetria di produzione del B
- Asimmetria di rivelazione del μ

Violazione di CP nei decadimenti $D^0 \rightarrow h^+ h^-$

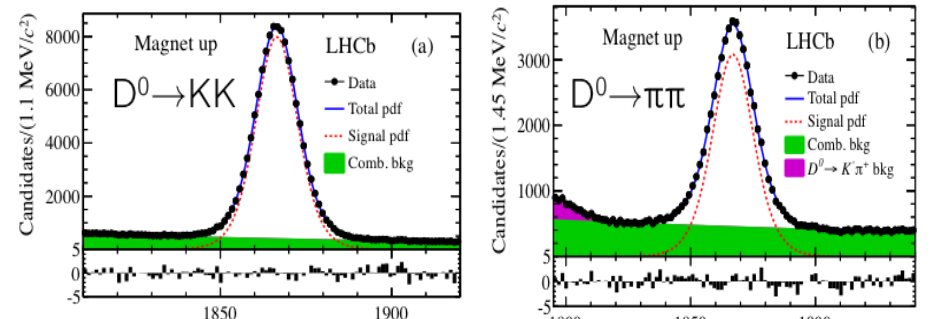
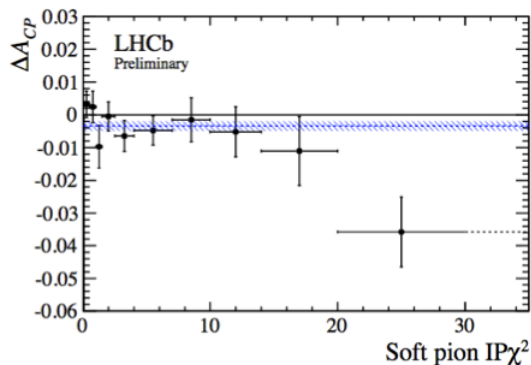


2.2M $D^0 \rightarrow KK$

0.7M $D^0 \rightarrow \pi\pi$

$$\Delta A_{CP} = (-0.34 \pm 0.15 \text{ (stat.)} \pm 0.10 \text{ (syst.)})\%$$

- Sistemático dominante 0.08%:
 - Dipendenza di ΔA_{CP} da $IP\chi^2$ del pione lento

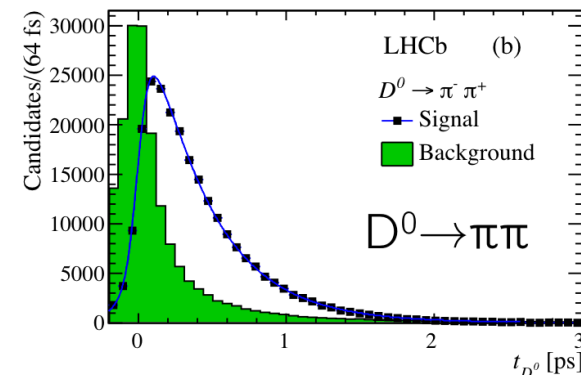


559K $D^0 \rightarrow KK$

222K $D^0 \rightarrow \pi\pi$

$$\Delta A_{CP} = (0.49 \pm 0.30 \text{ (stat)} \pm 0.14 \text{ (syst)})\%$$

- Sistemático dominante 0.11%:
 - Fondo nel $D^0 \rightarrow \pi\pi$ a brevi tempi di decadimento del D^0



Violazione di CP nei decadimenti $D^0 \rightarrow h^+ h^-$

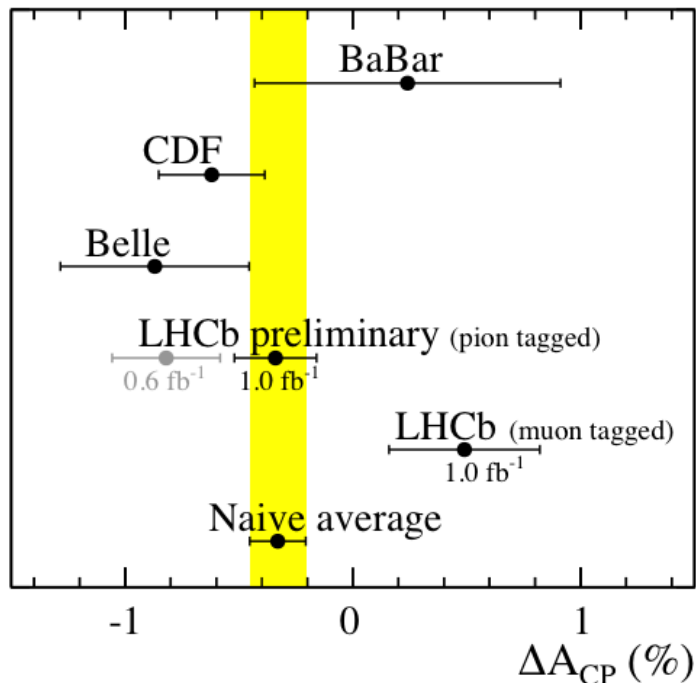
- $D^* \rightarrow D^0(f)\pi_s$ (LHCb-CONF-2013-003):
 - $\mathcal{L} = 1 \text{ fb}^{-1}$ @ $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$

$$\Delta A_{CP} = (-0.34 \pm 0.15 \text{ (stat.)} \pm 0.10 \text{ (syst.)})\%$$

- $B \rightarrow D^0(f)\mu\nu X$ (Phys.Lett.B723(2013)33):
 - $\mathcal{L} = 1 \text{ fb}^{-1}$ @ $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$

$$\Delta A_{CP} = (0.49 \pm 0.30 \text{ (stat)} \pm 0.14 \text{ (syst)})\% .$$

- Le due misure differiscono di 2.2σ :
 - I due campioni sono totalmente indipendenti



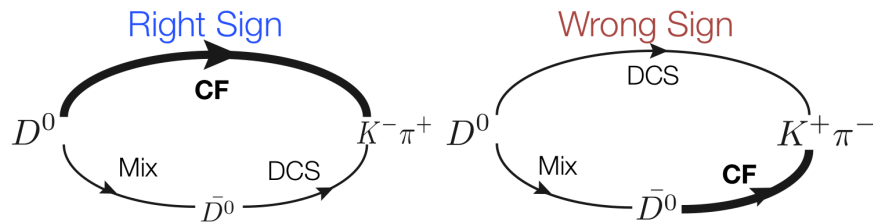
- Nuovo stato sperimentale:

$$\Delta A_{CP} = (-0.33 \pm 0.12)\%$$

È necessaria una maggiore statistica per poter trarre conclusioni definitive

Misura dell'oscillazione dei mesoni D^0

- È possibile misurare l'oscillazione sfruttando l'interferenza tra l'oscillazione e il decadimento doppio Cabibbo soppresso:



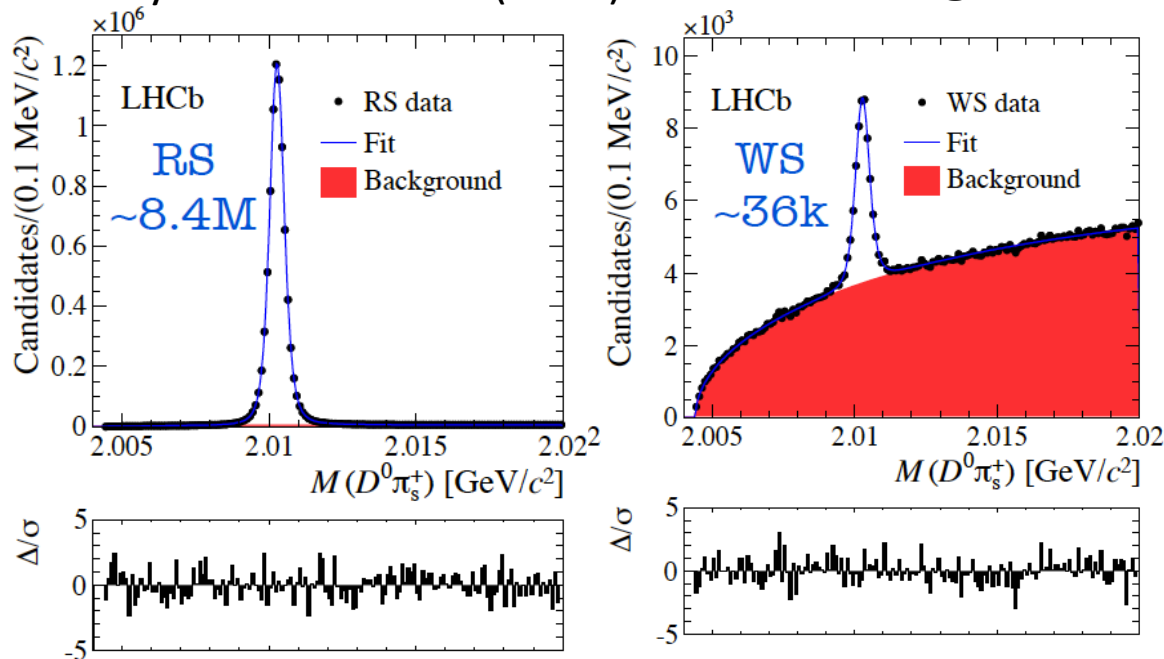
Parametri di oscillazione

$$R(t) = \frac{N_{WS}(t)}{N_{RS}(t)} \simeq R_D + \sqrt{R_D} y' t + \frac{x'^2 + y'^2}{4} t^2$$

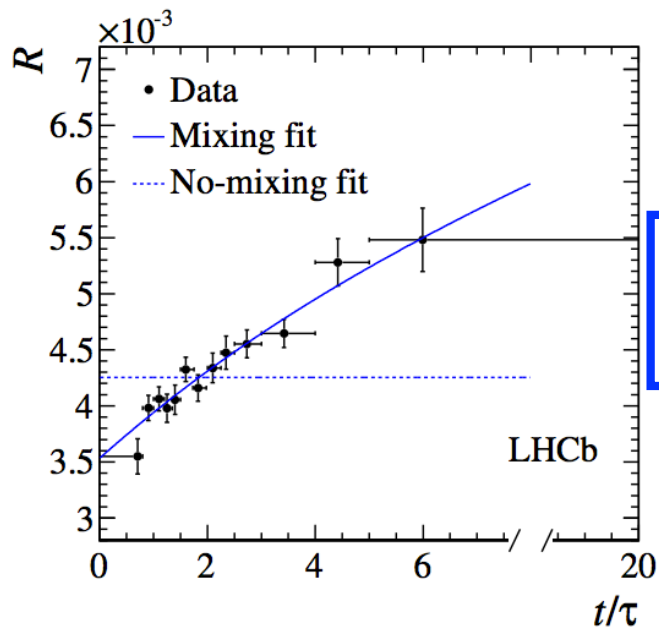
$$x' = x \cos(\delta) + y \sin(\delta)$$

$$y' = y \cos(\delta) - x \sin(\delta)$$

Phys. Rev. Lett. 110 (2013) 101802 1 fb⁻¹ @ $\sqrt{s} = 7$ TeV



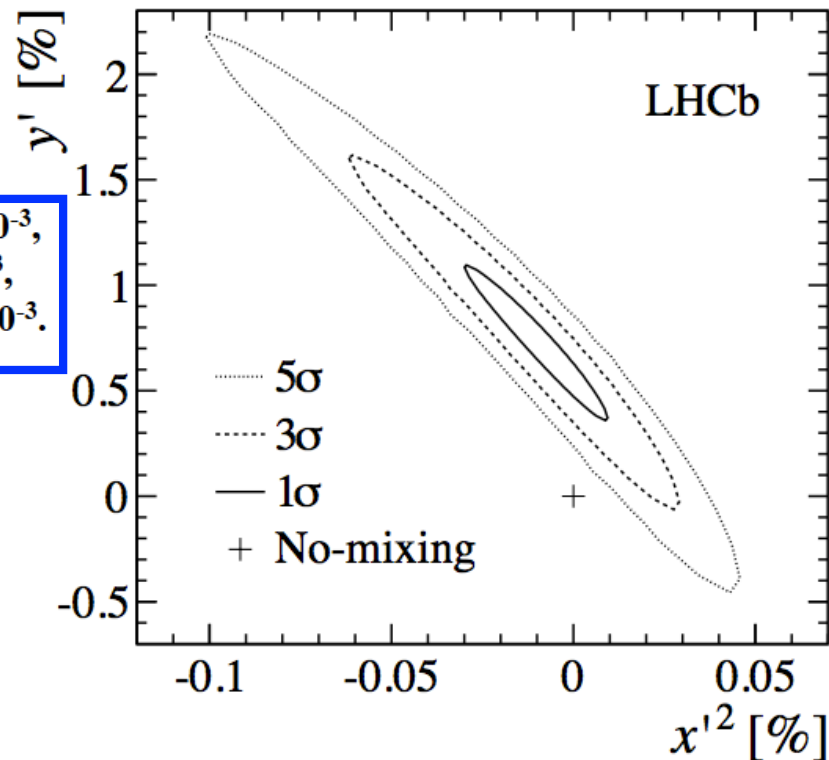
Misura dell'oscillazione dei mesoni D^0



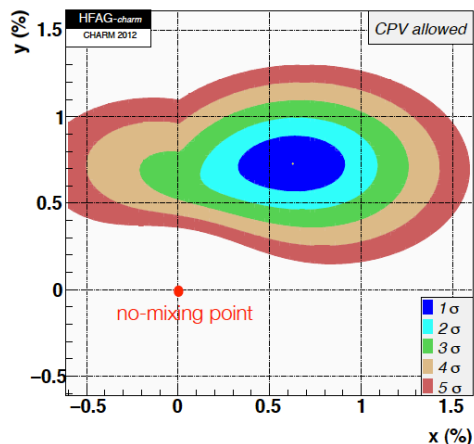
$$R_D = (3.52 \pm 0.15) \times 10^{-3},$$

$$y' = (7.2 \pm 2.4) \times 10^{-3},$$

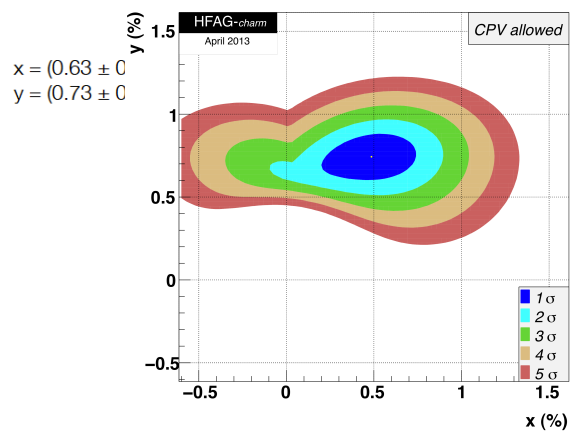
$$x'^2 = (-0.09 \pm 0.13) \times 10^{-3}.$$



Prima di LHCb



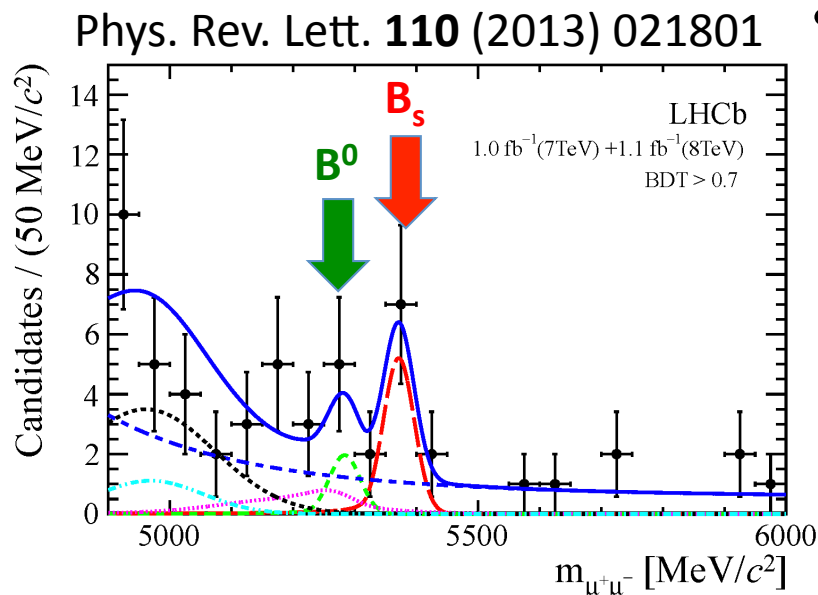
Dopo di LHCb



Prima osservazione da un solo esperimento dell'oscillazione dei mesoni D^0 a più di 5σ

Evidenza di osservazione del decadimento $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$

- Uno dei canali più importanti in assoluto
- Decadimento molto raro nel Modello Standard
- Previsioni teoriche molto precise:
 - $BR(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (3.5 \pm 0.2) \times 10^{-9}$ ← 3 eventi ogni miliardo di B_s prodotti
 - $BR(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (1.1 \pm 0.2) \times 10^{-10}$ ← 1 evento ogni 10 miliardi di B^0 prodotti
- I valori di questi branching ratio sono sensibili a diversi modelli di Nuova Fisica



- Utilizzando 2/3 della statistica totale a disposizione LHCb ha misurato:
 - $BR(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (3.5^{+1.5}_{-1.2}) \times 10^{-9}$
 - Compatibile con le previsioni del Modello Standard
 - Prima evidenza del decadimento con una significanza di 3.5σ
 - $BR(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) < 9.4 \times 10^{-10}$

Prospettive future e conclusioni

- **Il Modello Standard è testardo come un mulo!!!**
- Effetti macroscopici di nuova fisica nel flavour sono in larga parte esclusi
- Dove può emergere nuova fisica?
 - Necessario aumentare la statistica per migliorare la precisione di misura su alcuni canali chiave, cercando effetti più piccoli
 - **Branching ratio $B_s \rightarrow \mu\mu$**
 - **Fase di mixing del mesone B_s**
 - **Misura di precisione dell'angolo γ**
 - **CP violation nel charm**
 - Ma nel settore del charm sono necessari anche passi in avanti della comprensione teorica
- Tante altre misure di rilievo, ma non è stato possibile discuterle oggi
- **Il progetto di upgrade di LHCb sarà presto analizzato dal Comitato Tecnico Scientifico dell'INFN**
- Ad maiora!

