Incontri di Fisica delle Alte Energie
Genova, 31 Marzo 2016

Vista di Genova, Ambroise Louis Garneray (ca. 1810)

Violazione di CP nei decadimenti del charm a LHCb

Pietro Marino per la collaborazione LHCb
SNS & INFN-Pisa

INFN Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

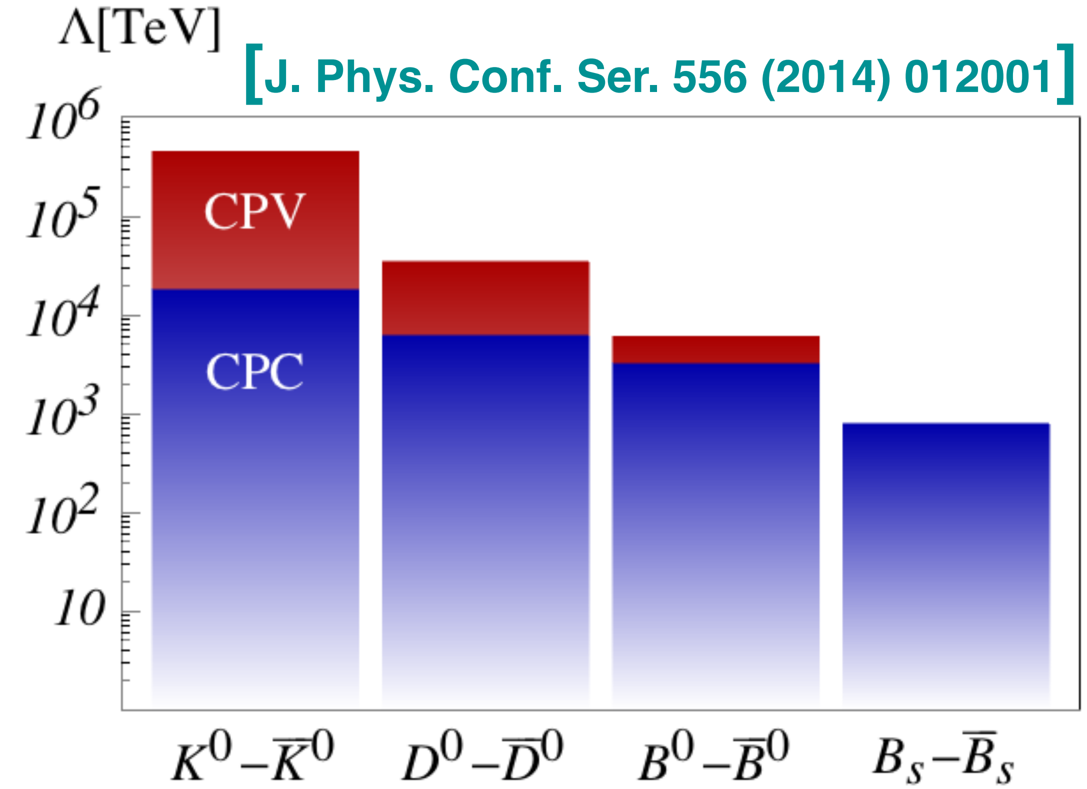
SCUOLA NORMALE SUPERIORE

LHCb

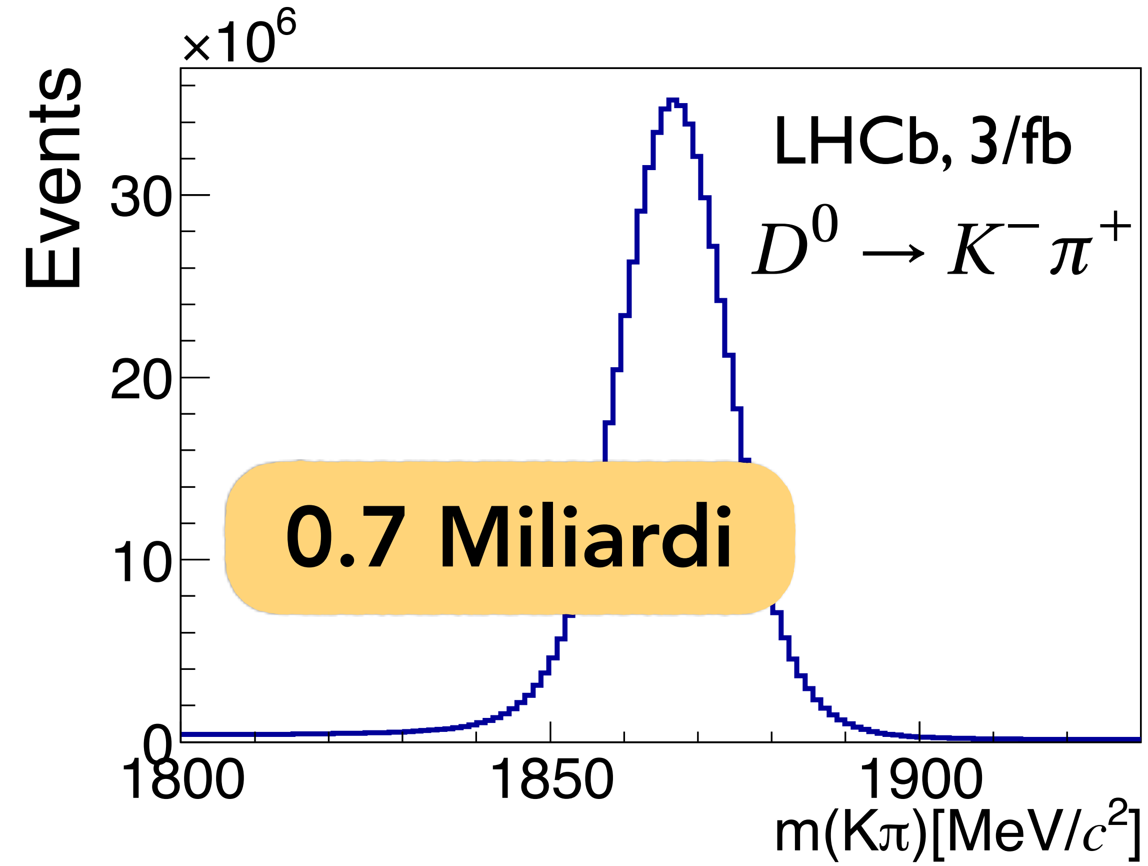
Perché il CHARM?

- Una sonda unica per la Fisica del sapore BSM.
- Unico quark di tipo up che oscilla:
  - complementare a sistemi *B* e *K*
  - i più stringenti limiti per un generico modello di NP dopo il mixing del sistema *K*

[J. Phys. Conf. Ser. 556 (2014) 012001]



- **Enormi campioni di dati** (l'era del Gev),
  - LHCb ha i campioni i più grandi campioni di charm al mondo.
- Predizioni nel charm sono **complicate**:
  - sprona e aiuta la comprensione della QCD non pertubativa.



Sistema dei mesoni D^0

- Sistema mesoni D^0:

$$i\frac{\delta}{\delta t}\begin{pmatrix} |D^0(t)\rangle \\ |\overline{D}^0(t)\rangle \end{pmatrix} = \left[\begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{12}^* & M_{22} \end{pmatrix} - \frac{i}{2}\begin{pmatrix} \Gamma_{11} & \Gamma_{12} \\ \Gamma_{12}^* & \Gamma_{22} \end{pmatrix}\right]\begin{pmatrix} |D^0(t)\rangle \\ |\overline{D}^0(t)\rangle \end{pmatrix}$$

- Soluzione: due autostati di massa, combinazioni lineari degli autostati dell'interazione forte:

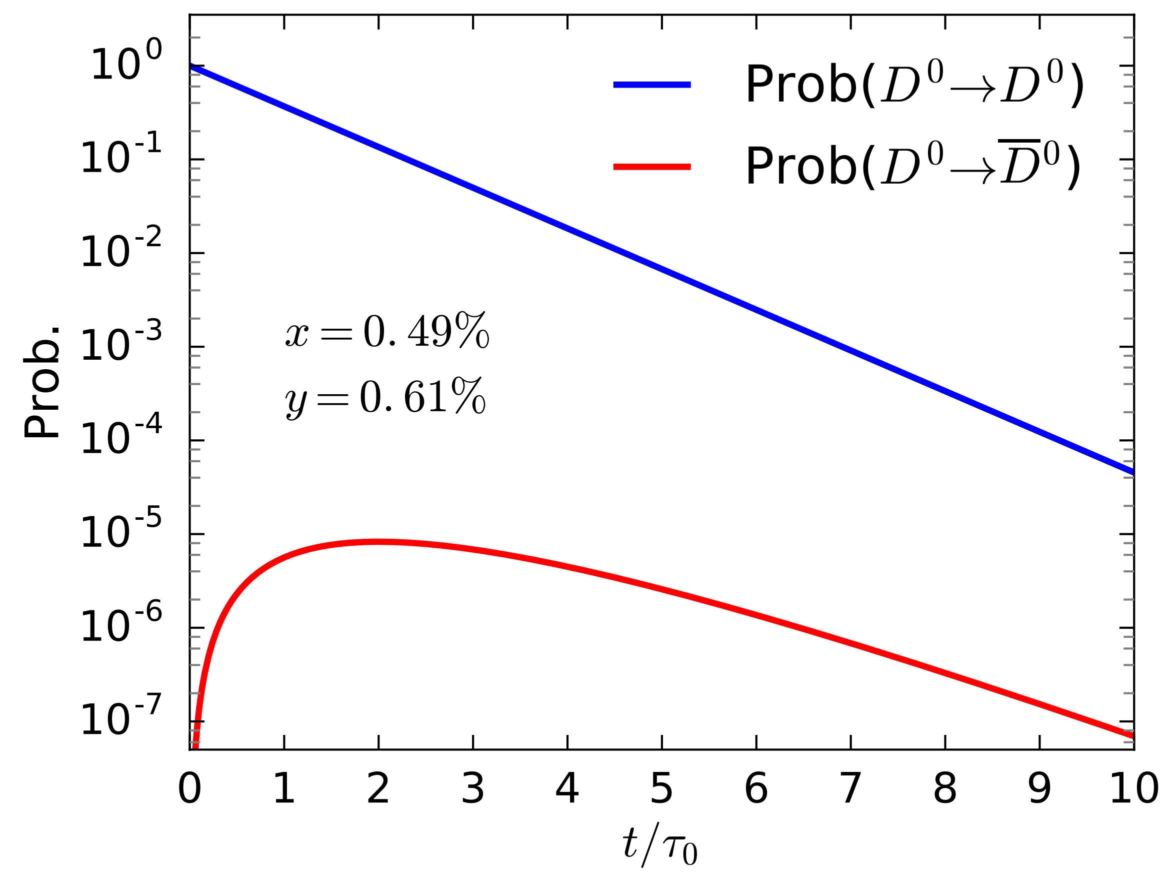
$$|D_{L,H}\rangle = p\,|D^0\rangle \pm q\,|\overline{D}^0\rangle$$

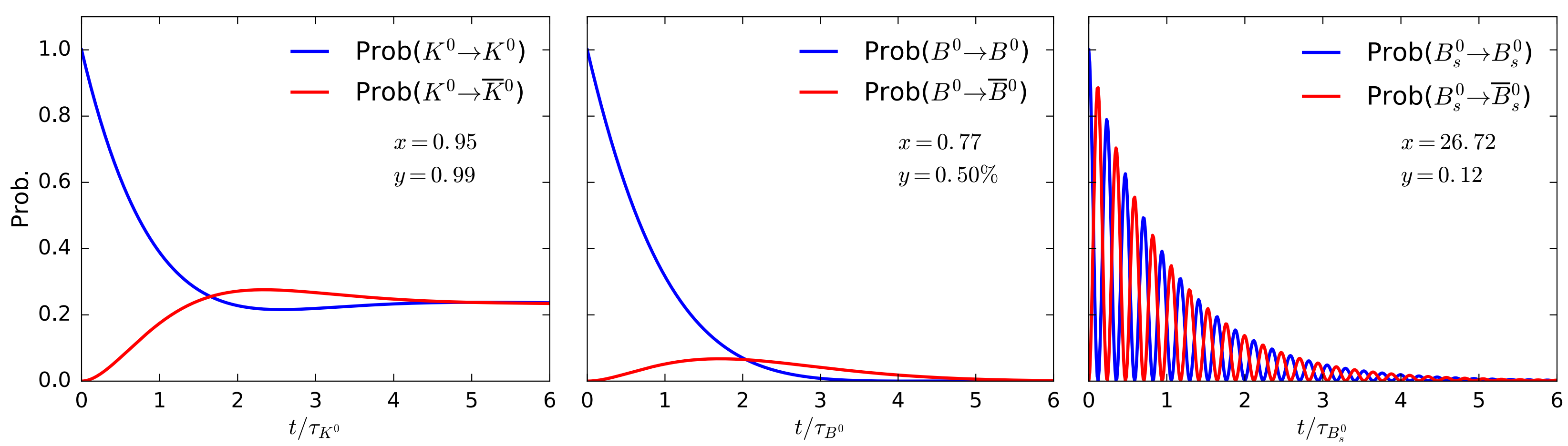
- Il sapore del mesone *oscilla* tra D^0 e $\overline{D}^0$

$$x \equiv \frac{m_H - m_L}{\Gamma}, \qquad y \equiv \frac{\Gamma_H - \Gamma_L}{2\Gamma}$$

$$|\langle D^0(0)|D^0(t)\rangle|^2 \propto e^{-\Gamma t}[\cosh(y\Gamma t) + \cos(x\Gamma t)]$$

$$|\langle D^0(0)|\overline{D}^0(t)\rangle|^2 \propto e^{-\Gamma t}[\cosh(y\Gamma t) - \cos(x\Gamma t)]$$



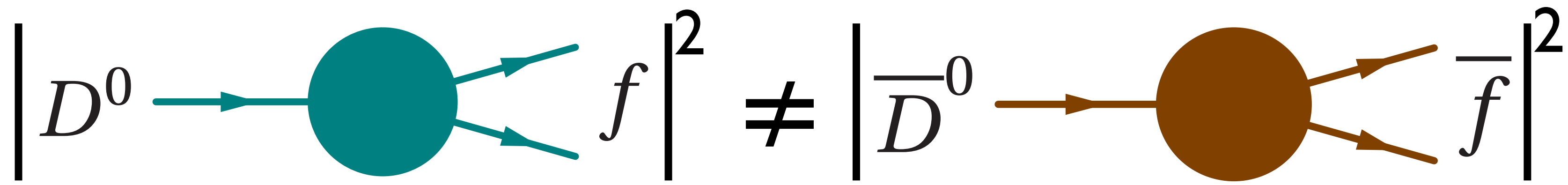


P. Marino (SNS & INFN-Pi)

Violazione di CP nel Charm

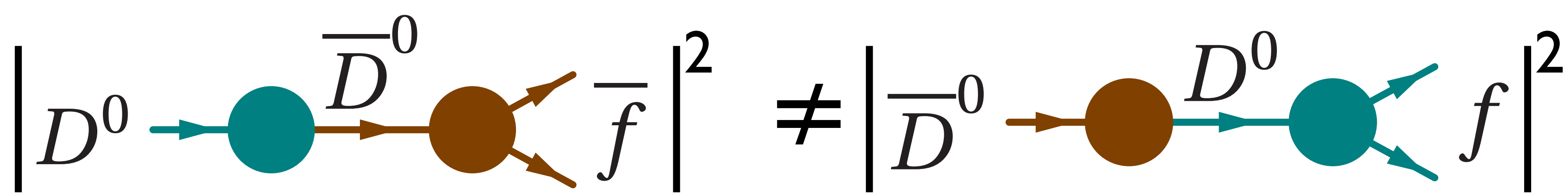
- Non ancora osservata sperimentalmente!
- Valore aspettato dal SM $\mathcal{O}(V_{ub}V_{cb}^{*}/V_{us}V_{cs}^{*}) \sim \mathcal{O}(10^{-3})$
  - ✦ ottimo luogo dove cercare NP (buon rapporto segnale(NP)/fondo(SM))

CPV nel decadimento



$$\left|\frac{A_f}{\overline{A}_{\overline{f}}}\right| \neq 1$$

CPV nel mixing

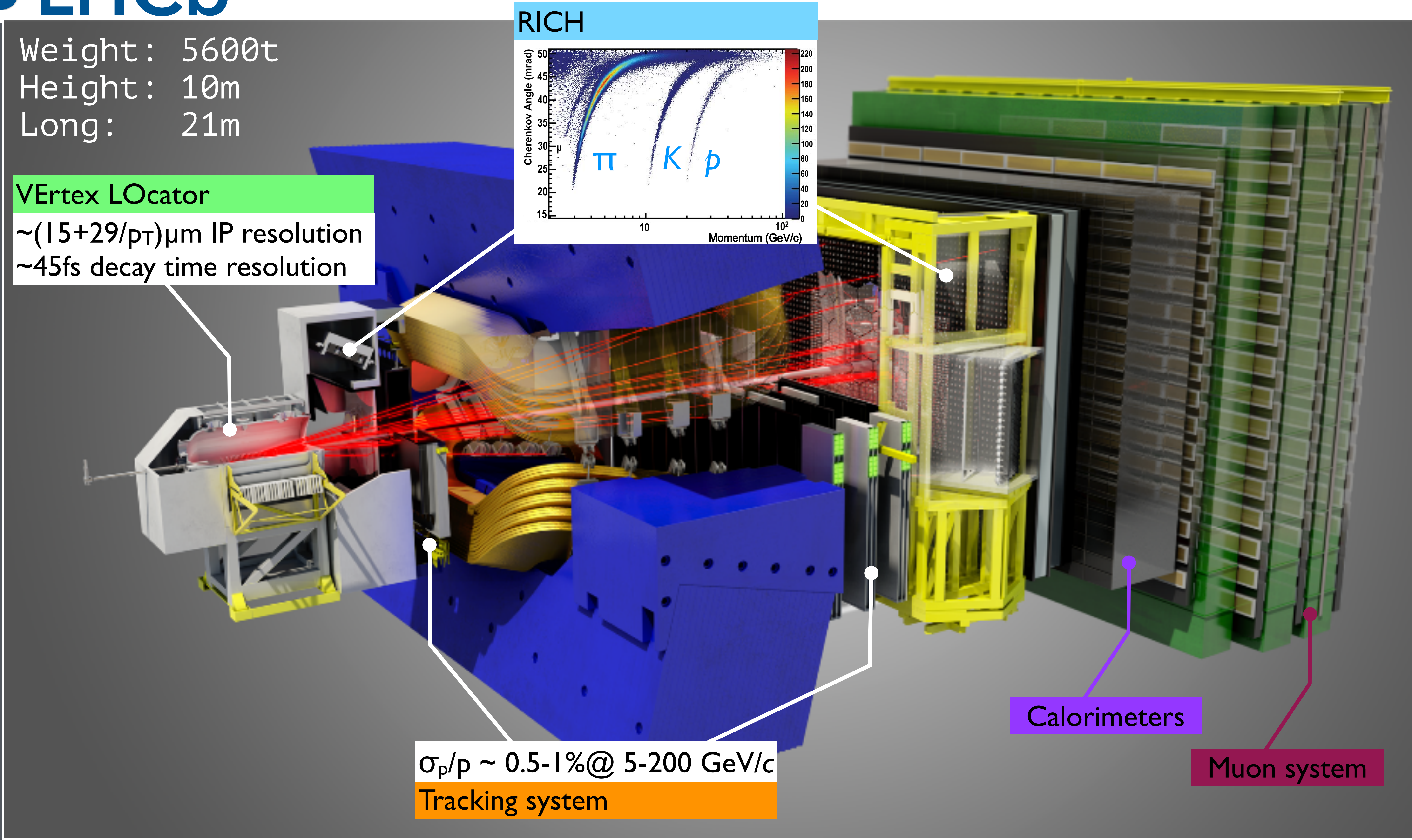


$$\left|\frac{q}{p}\right| \neq 1$$

CPV nel interferenza

$$\arg\left(\frac{q A_f}{p \overline{A}_{\overline{f}}}\right) \neq 0$$

LHCb

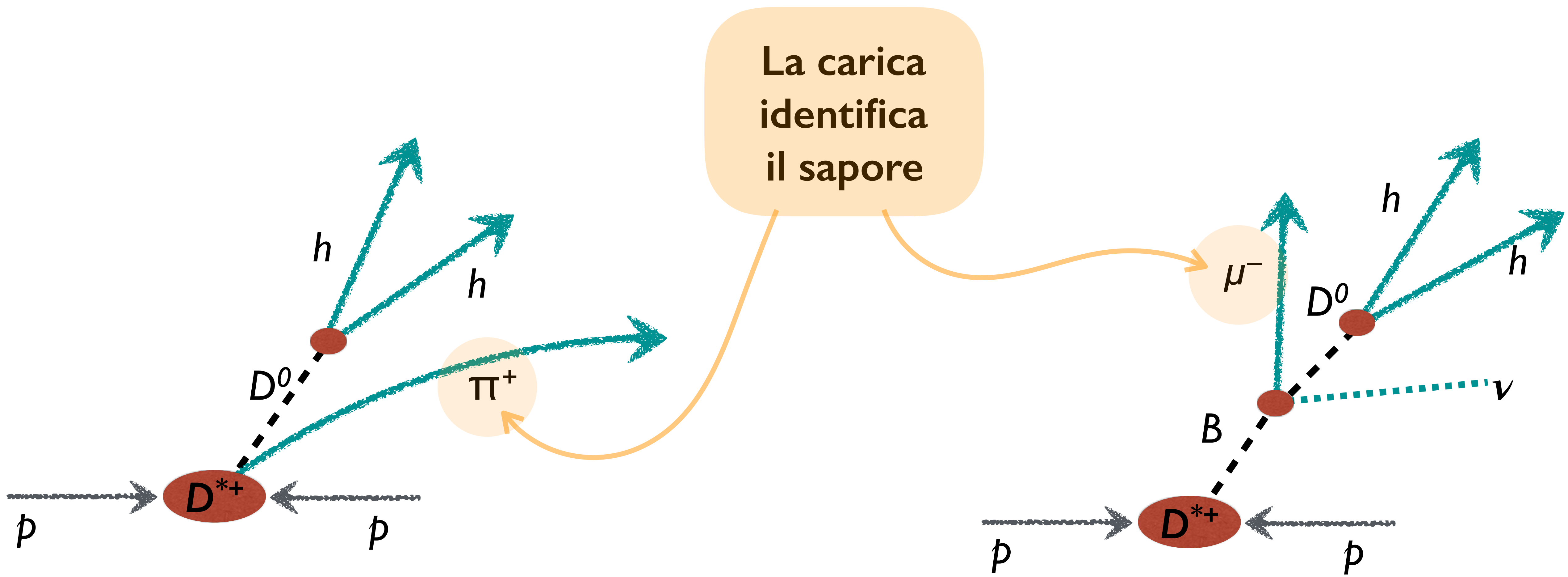

Weight: 5600t
Height: 10m
Long: 21m
RICH
Cherenkov Angle (mrad)
Momentum (GeV/c)
μ
π
K
p
VErtex LOcator
~(15+29/pT)μm IP resolution
~45fs decay time resolution
σp/p ~ 0.5-1%@ 5-200 GeV/c
Tracking system
Calorimeters
Muon system

Fisica del Charm a LHCb

Tanta fisica del Charm a LHCb, qui solo i “golden modes” ($D^0 \to hh$).

Identificazione del sapore

- Nelle misure del mixing e della violazione di CP è necessario determinare il sapore del D^0.
- Due metodi vengono sfruttati a LHCb:
  - $D^{*+} \rightarrow D^0 \pi^+$ (decadimento forte: la carica del pione identifica il sapore del D^0)
  - decadimenti semi-leptonici del B



CPV diretta in $D^0 \to h^+h^-$

- Asimmetria di CP integrata nel tempo:

$$A_{CP}(f) = \frac{\Gamma(D^0 \to f) - \Gamma(\overline{D}^0 \to f)}{\Gamma(D^0 \to f) + \Gamma(\overline{D}^0 \to f)}$$

- Sperimentalmente misuriamo gli yields:

$$A_{\rm raw}(f) = \frac{N(D^{*+} \to D^0(\to f)\pi^+) - N(D^{*-} \to \overline{D}^0(\to f)\pi^-)}{N(D^{*+} \to D^0(\to f)\pi^+) + N(D^{*-} \to \overline{D}^0(\to f)\pi^-)}$$

$$\approx A_{CP}(f) + A_D(f) + A_D(\pi) + A_P(D^*)$$

dove
- $A_D(f)$ asimmetria di detector dello stato finale $f = K^+K^-, \pi^+\pi^-$
- $A_D(\pi)$ asimmetria di detector del pione soffice (tag)
- $A_P(D^*)$ asimmetria di produzione del D^*

CPV diretta in $D^0 \to h^+h^-$

- Asimmetria di CP integrata nel tempo:

$$A_{CP}(f) = \frac{\Gamma(D^0 \to f) - \Gamma(\overline{D}^0 \to f)}{\Gamma(D^0 \to f) + \Gamma(\overline{D}^0 \to f)}$$

$$\Delta A_{CP} = \Delta a_{CP}^{\text{dir}}\left(1 + \frac{\overline{\langle t \rangle}}{\tau(D^0)}\right) y_{CP} + \frac{\Delta\langle t \rangle}{\tau(D^0)} a_{CP}^{\text{ind}}$$

- Sperimentalmente misuriamo gli yields:

$$A_{\text{raw}}(f) = \frac{N(D^{*+} \to D^0(\to f)\pi^+) - N(D^{*-} \to \overline{D}^0(\to f)\pi^-)}{N(D^{*+} \to D^0(\to f)\pi^+) + N(D^{*-} \to \overline{D}^0(\to f)\pi^-)}$$

$$\approx A_{CP}(f) + A_D(f) + A_D(\pi) + A_P(D^*)$$

- Parametri, difficilmente misurabili (a queste precisioni), che non ci interessano per la CPV, si sfrutta la differenza $A_{CP}(KK)$ e $A_{CP}(\pi\pi)$:

$$A_{\text{raw}}(KK) \approx A_{CP}(KK) + A_D(KK) + A_D(\pi) + A_P(D^*)$$

$$A_{\text{raw}}(\pi\pi) \approx A_{CP}(\pi\pi) + A_D(\pi\pi) + A_D(\pi) + A_P(D^*)$$

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

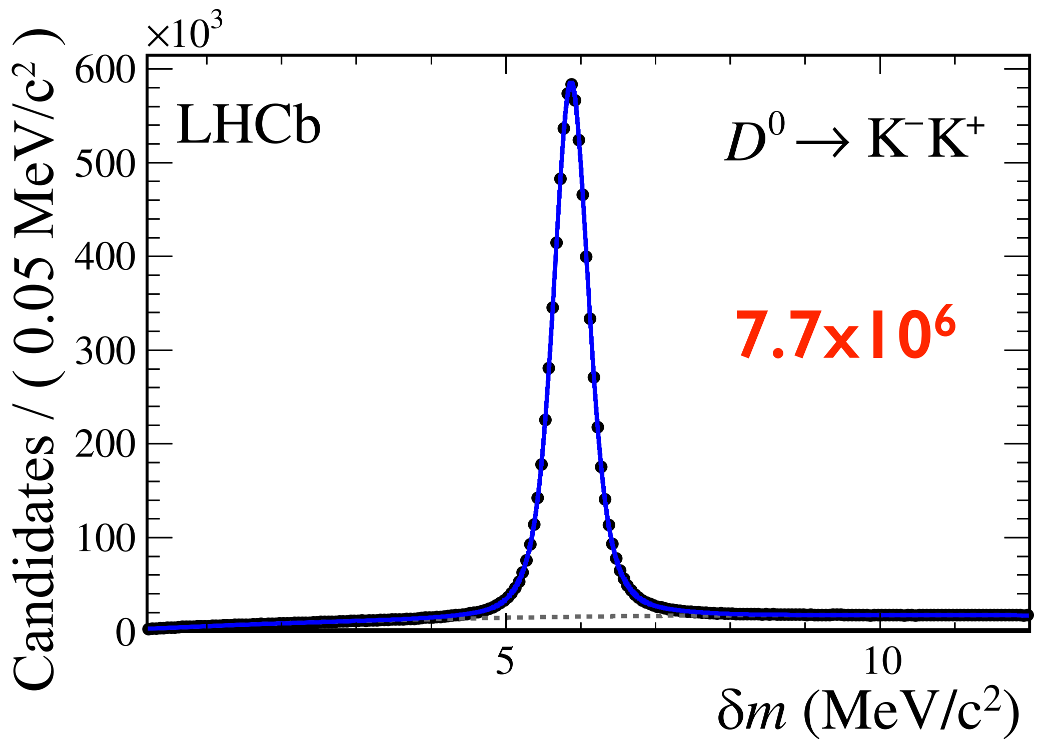
ΔA_{CP} in $D^0 \to h^+h^-$

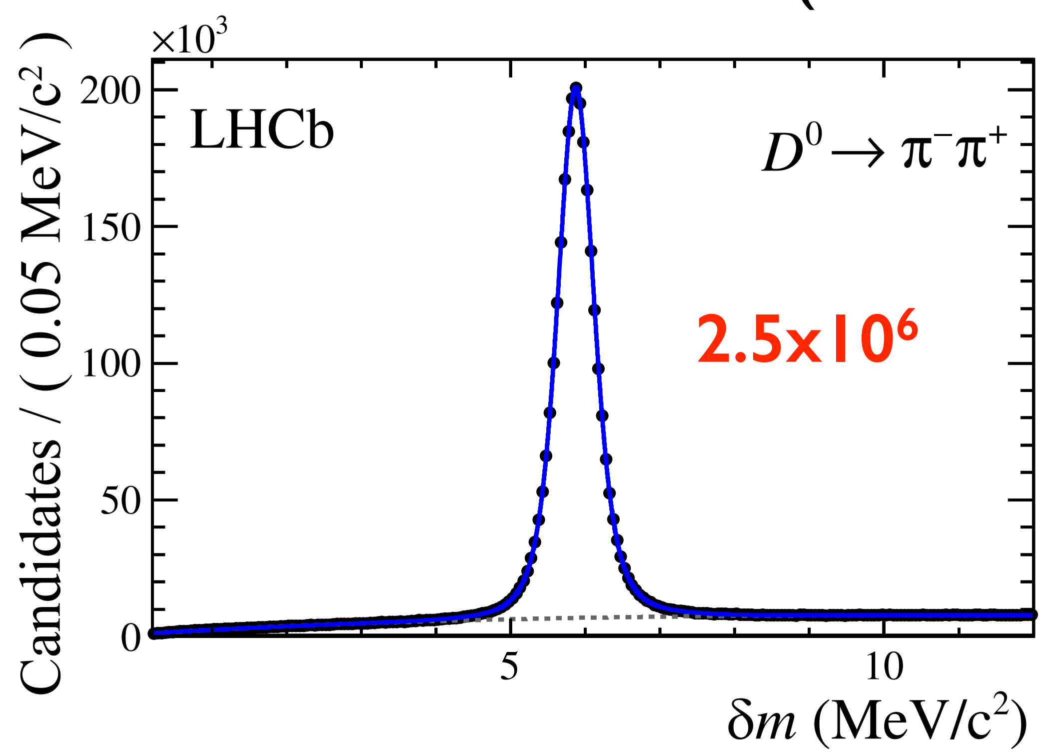
Poster Federico Betti

- Misure precedenti:
  - usando 0.6/fb (D^*-tag): $\Delta A_{CP} = (-0.82 \pm 0.21(\text{stat.}) \pm 0.11(\text{syst.}))\%$ [PRL 108 (2012) 111602]
  - 3/fb (tag semi-leptonico): $\Delta A_{CP} = (+0.14 \pm 0.16(\text{stat.}) \pm 0.08(\text{syst.}))\%$ [JHEP 07 (2014) 041]
- Nuova misura con tutto il campione del RunI di LHCb 3/fb:
  - decadimenti del D^0 identificando il sapore dal D^{*+}.

$$\Delta A_{CP} = (-0.10 \pm 0.08(\text{stat.}) \pm 0.03(\text{syst.}))\%$$

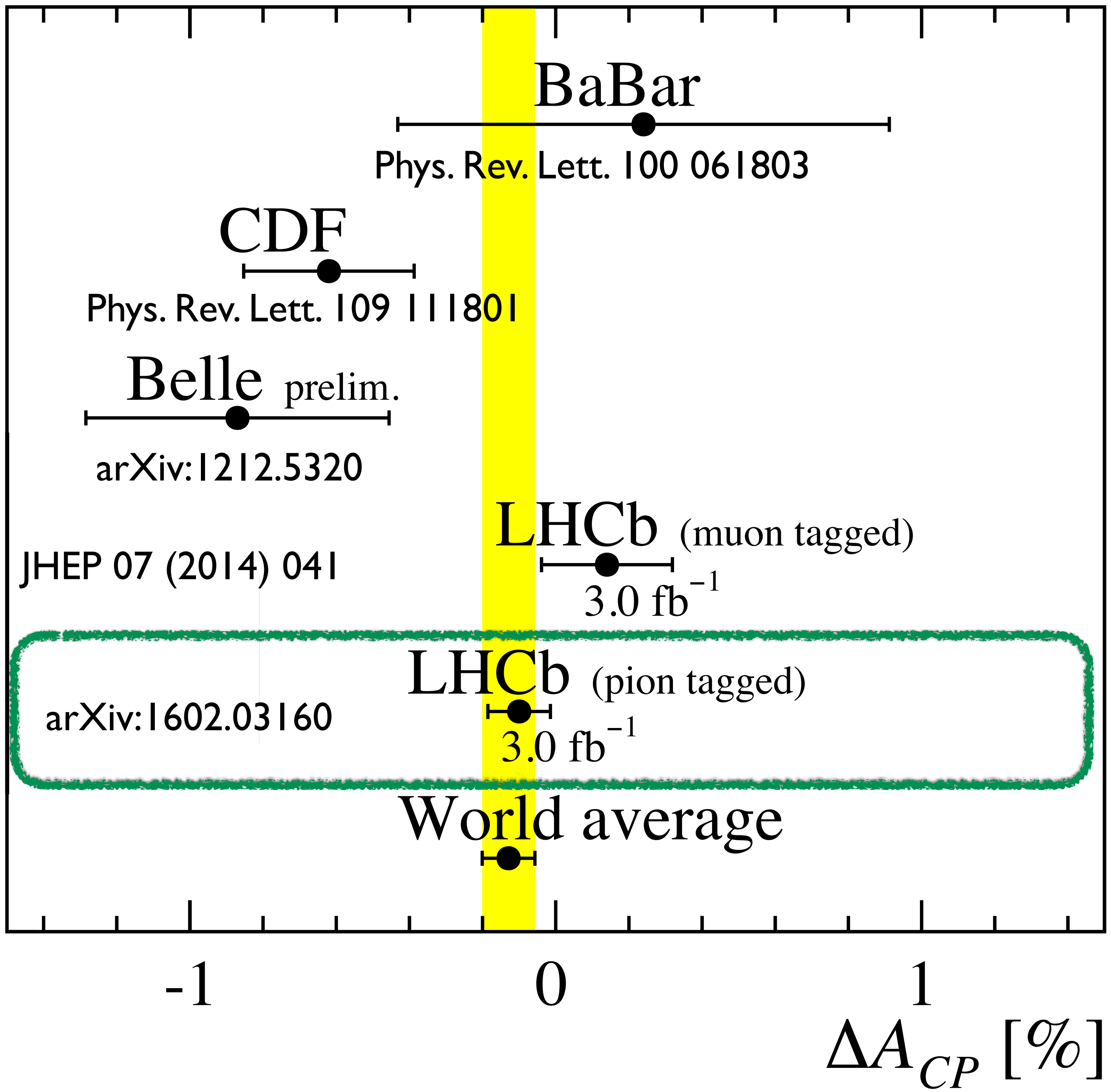
[arXiv:1602.03160]
(submitted to PRL)





$$\delta m = m(h^+h^-\pi^+) - m(h^+h^-) - m_\pi$$

Stato dell'arte su ΔA_{CP}



Media (ignorando il contributo della CPV indiretta) = (-0.129 ± 0.072)%

A_Γ: violazione indiretta di CP $D^0 \to h^+h^-$

- Asimmetria di CP dipendente dal tempo:

$$A_{CP}(t) = \frac{\Gamma(D^0(t)\to f) - \Gamma(\overline{D}^0(t)\to f)}{\Gamma(D^0(t)\to f) + \Gamma(\overline{D}^0(t)\to f)} \simeq a_{CP}^{dir} - \frac{t}{\tau_{D^0}} A_\Gamma$$

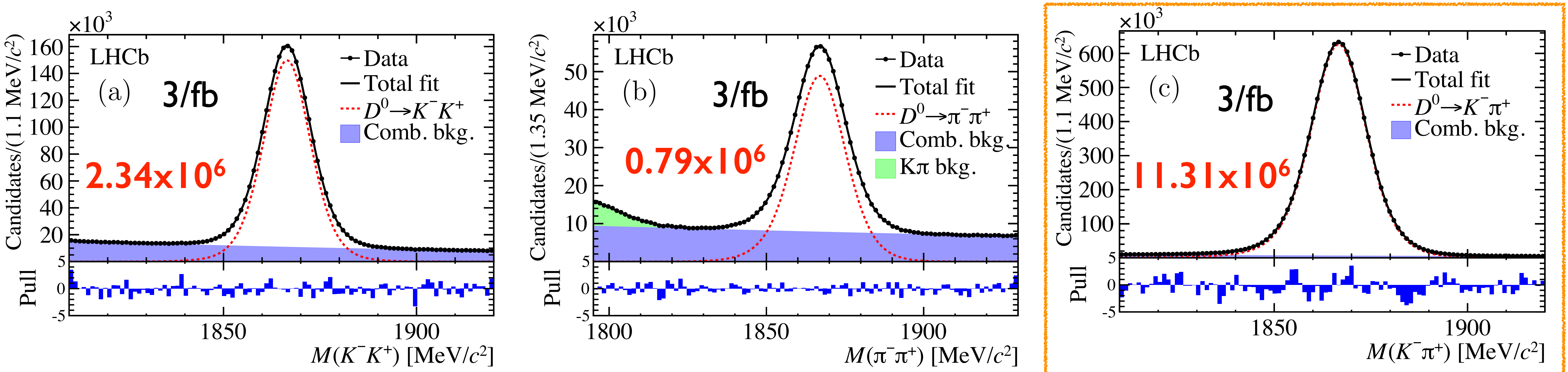
A_Γ è collegata alla violazione di CP nel mixing (A_m) e nel decadimento (A_d):

$$A_\Gamma \simeq \left[\frac{1}{2}(A_m + A_d)\, y\cos\phi - x\sin\phi\right]$$

- Misura dell'asimmetria in m bin del tempo di decadimento del D^0:

$$A^i_{\rm raw} = \frac{n_i(D^0\to f) - n_i(\overline{D}^0\to f)}{n_i(D^0\to f) + n_i(\overline{D}^0\to f)}; \qquad i = 1,\ldots,m$$

campione di controllo $D^0 \to K\pi$
pseudo-$A_\Gamma(D^0 \to K\pi) = 0$



[JHEP 1504 (2015) 043]

A_Γ: violazione indiretta di CP $D^0 \to h^+h^-$

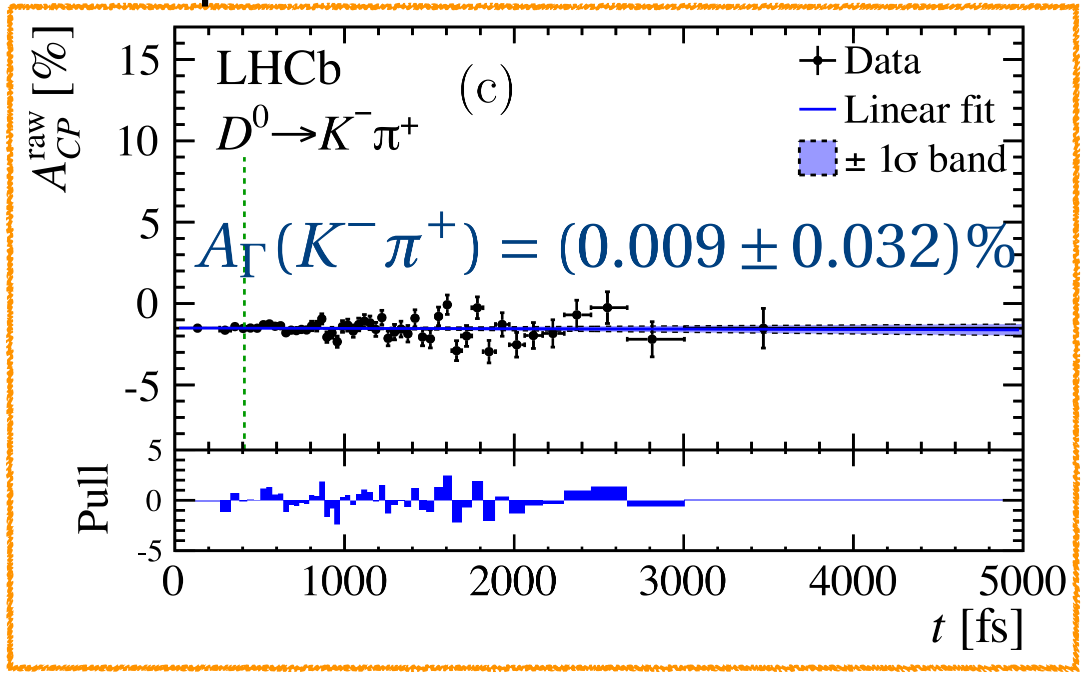
- Fit dell'asimmetria in funzione di

$$A_{\text{raw}}(t) = A_0 - \frac{t}{\tau_{D^0}} A_\Gamma;$$

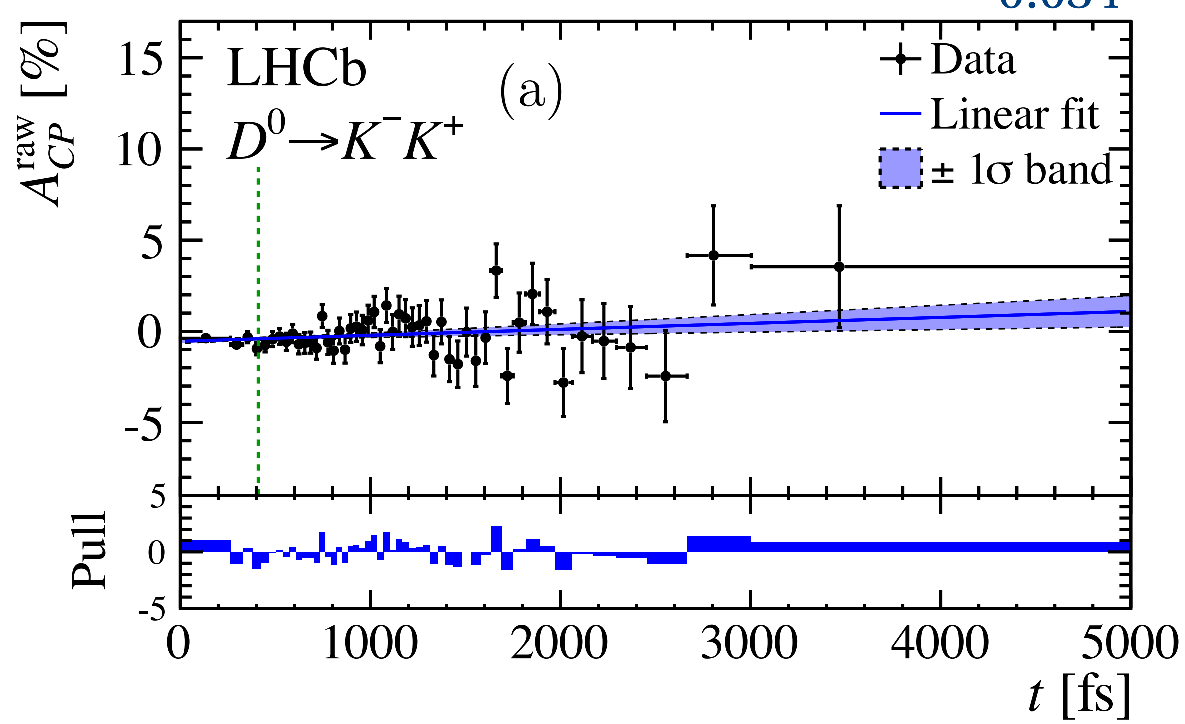
termine noto:
asimmetria globale (indipendente dal tempo di decadimento)

pendenza della retta:
asimmetria dipendente dal tempo di decadimento

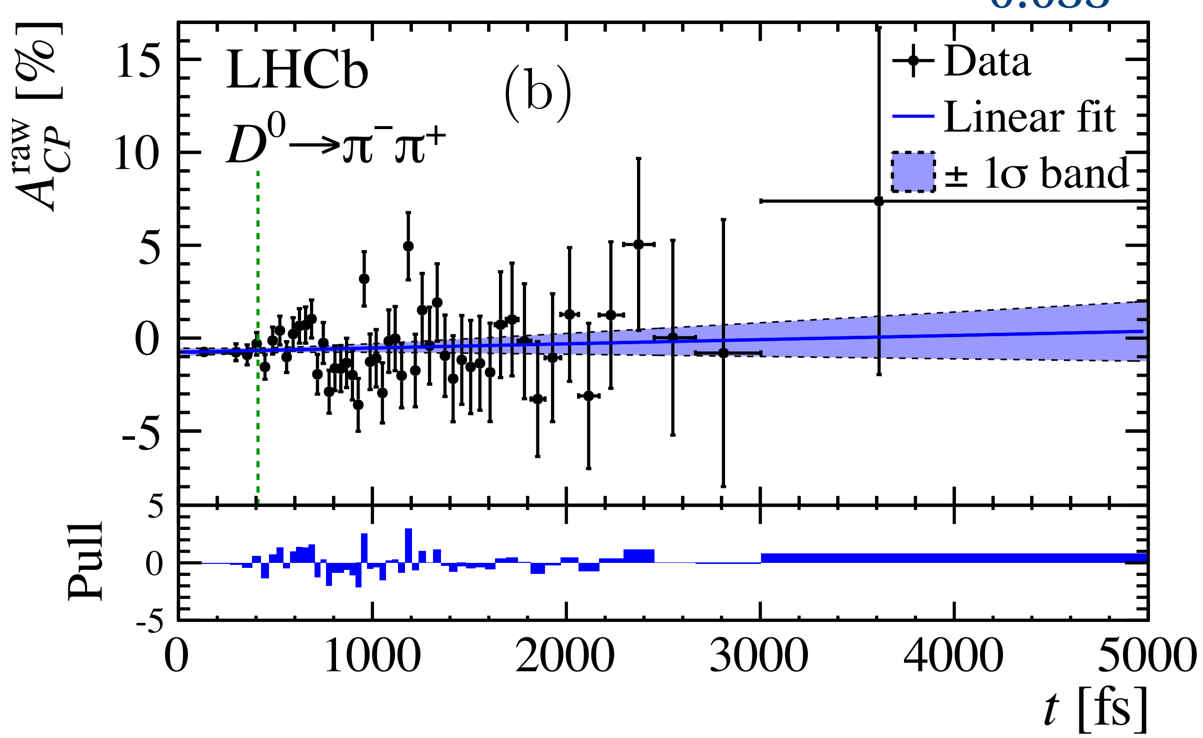
campione di controllo $D^0 \to K\pi$



$A_\Gamma(K^-K^+) = (-0.134 \pm 0.077^{+0.026}_{-0.034})\%$

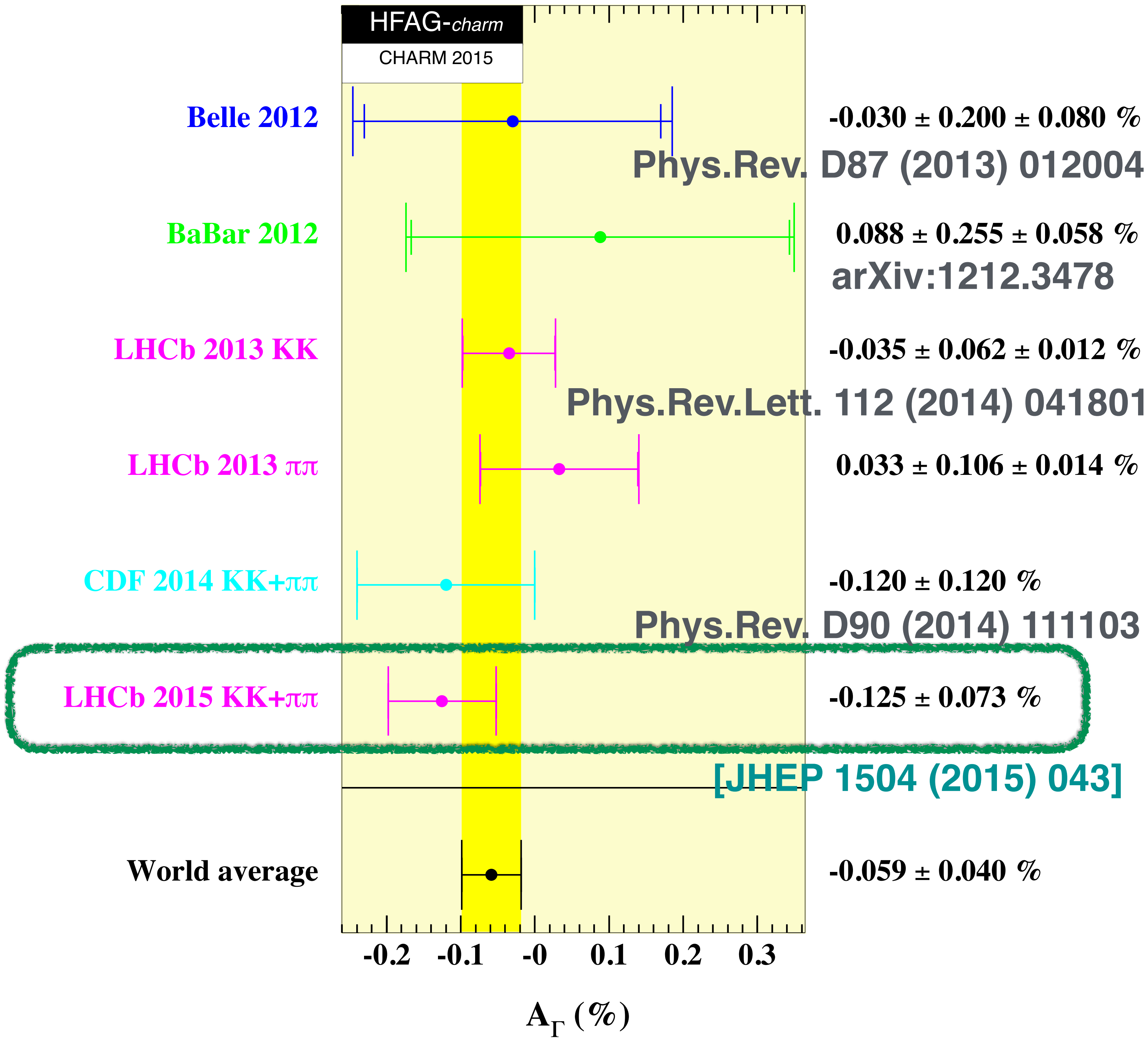


$A_\Gamma(\pi^-\pi^+) = (-0.092 \pm 0.145^{+0.025}_{-0.033})\%$



[JHEP 1504 (2015) 043]

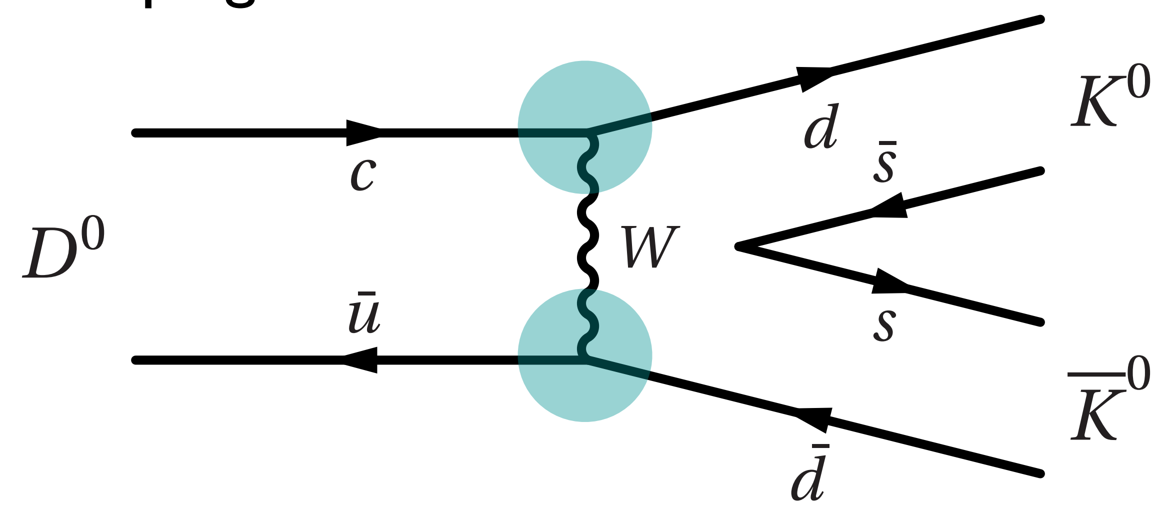
Stato dell'arte su A_Γ



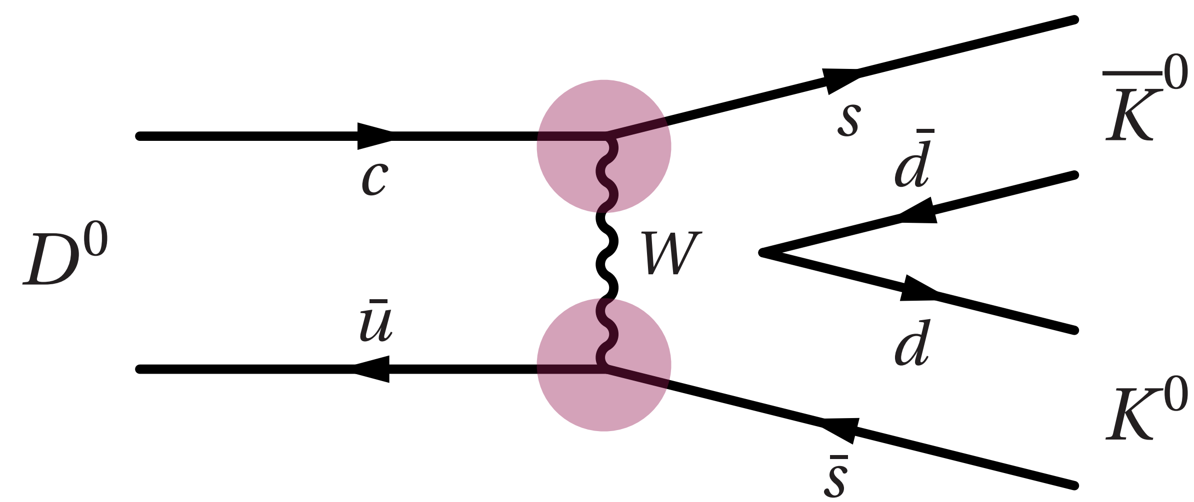
- La misura migliore è di LHCb D^*-tag su 1/fb.

Violazione di CP in $D^0 \to K_s^0 K_s^0$

- L'ampiezza di decadimento è dominata da "long-distance contribution":
  - i termini "short-distance" si cancellano visto $V_{cd}V_{ud}^* \simeq -V_{cs}V_{us}^*$,
  - i termini di interferenza possono dare un grosso contributo $\mathcal{O}(1\%)$ [Phys. Rev. D87 (2013) 014024] [Phys. Rev. D92 (2015) 054036]
  - aiuta la comprensione del contributo dei diagrammi a pinguino



- Sperimentalmente complicata: ricostruzione di vertici di particelle a **lunga** vita media ($K_s^0 \to \pi^+\pi^-$), anche fuori la regione del VELO.
  - Difficile da "triggerare"

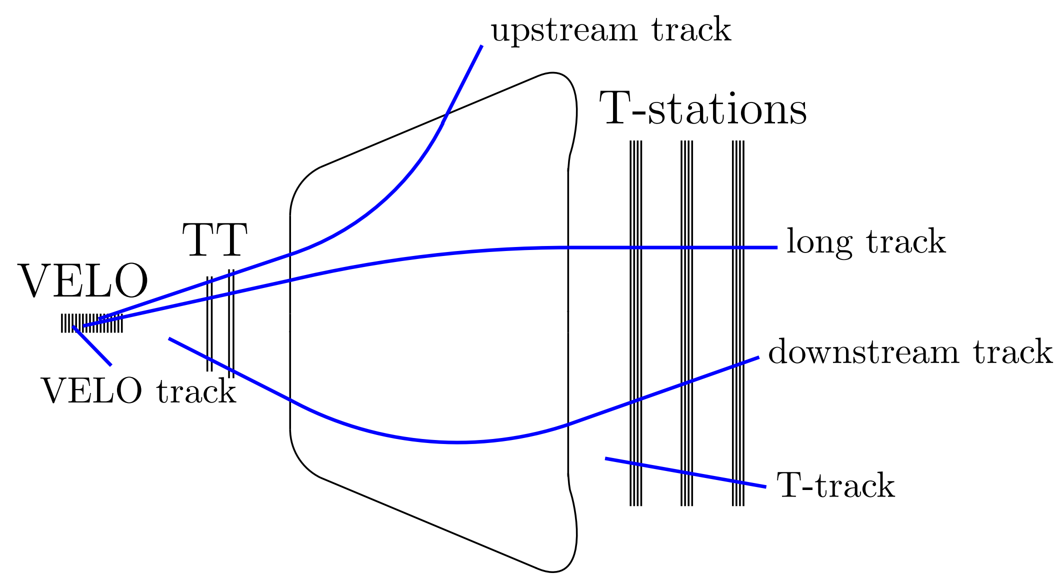


- Solo una misura precedente da CLEO:

$$A_{CP} = (23 \pm 19)\%$$

[PRD 63 (2011) 071101]

A_{CP} in $D^0 \to K_s^0 K_s^0$



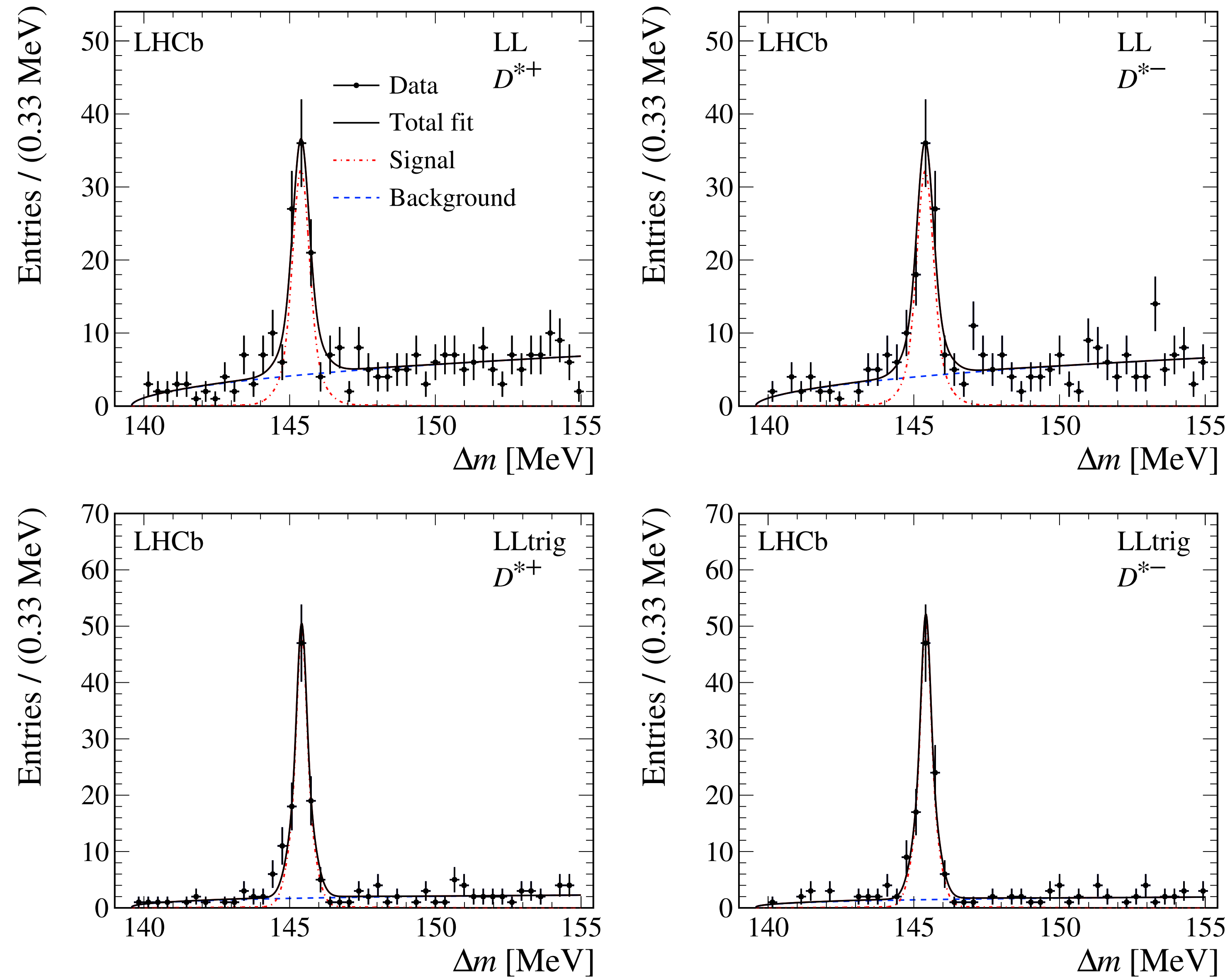
- Misura dell'asimmetria di *CP*

$$A_{\mathrm{raw}}(K_s^0 K_s^0) \approx A_{CP}(K_s^0 K_s^0) + A_D(\pi) + A_P(D^*)$$

- Tag dal decadimento del D^*.
- Asimmetrie di detector, $A_D(\pi)$, e produzione $A_P(D^*)$, determinate da campioni di controllo ($D^0 \to K\pi$), entrambi dell'$\mathcal{O}$(1%).
- Circa **600 eventi** nell'intero campione del RunI:

$$A_{CP} = -0.029 \pm 0.052(\mathrm{stat.}) \pm 0.022(\mathrm{syst.})$$

- Significativo miglioramento rispetto alla misura precedente (circa un fattore 4).
- Run2 trigger dedicato.



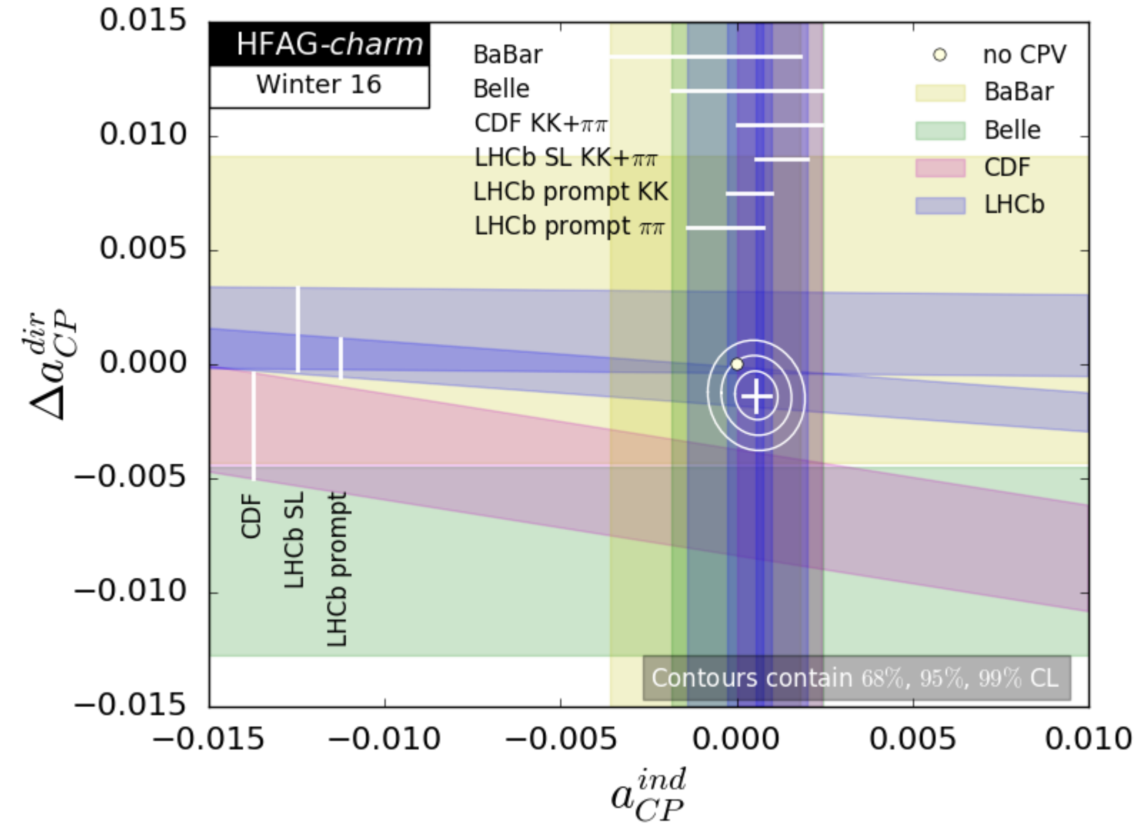
[JHEP 10 (2015) 055]

Sommario e prospettive per il futuro

- Misure di precisione sul charm con gli enormi campioni di LHCb del RunI
  - La violazione di *CP* nel charm ancora non osservata;
  - vicini ai valori aspettati dalla teoria.
- Alcune analisi di punta in fase di preparazione sul RunI.
  - Presto A_Γ (D^*-tag) su 3/fb: precisione $A_\Gamma(D^0 \to KK) \sim 4 \times 10^{-4}$
- Ancora più charm nel RunII e nell'upgrade di LHCb.

[White paper of CSN1]

Analysis	Obs.	LHCb (3 fb^{-1})	LHCb (50 fb^{-1})
$K^0_S\pi^+\pi^-$	x	2×10^{-3}	4×10^{-4}
	y	2×10^{-3}	4×10^{-4}
	$\|q/p\|$	0.2	0.04
	φ	15°	3°
K^+K^-, $\pi^+\pi^-$	y_{CP}	3×10^{-4}	2×10^{-5}
	A_Γ	3×10^{-4}	2×10^{-5}
$K^+\pi^-$	x'^2	5×10^{-5}	1×10^{-5}
	y'	1×10^{-3}	2×10^{-4}
	$\|q/p\|$	0.25	0.05
	A_D	0.02	4×10^{-3}
	φ	-	-



$$a_{CP}^{\text{ind}} = (+0.56 \pm 0.40) \times 10^{-3}$$

$$\Delta a_{CP}^{\text{dir}} = (-1.37 \pm 0.70) \times 10^{-3}$$

HFAG

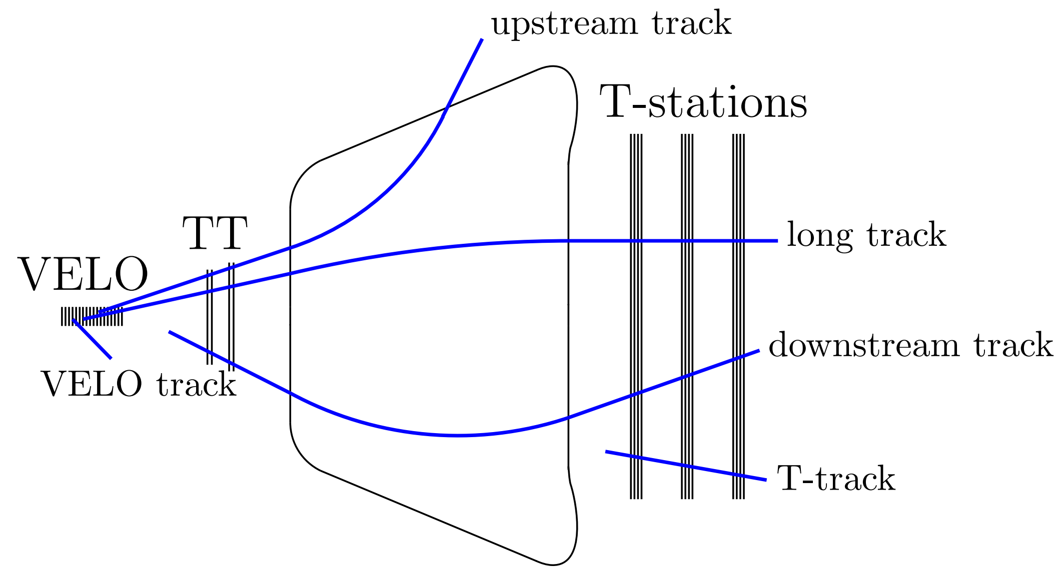
Backup

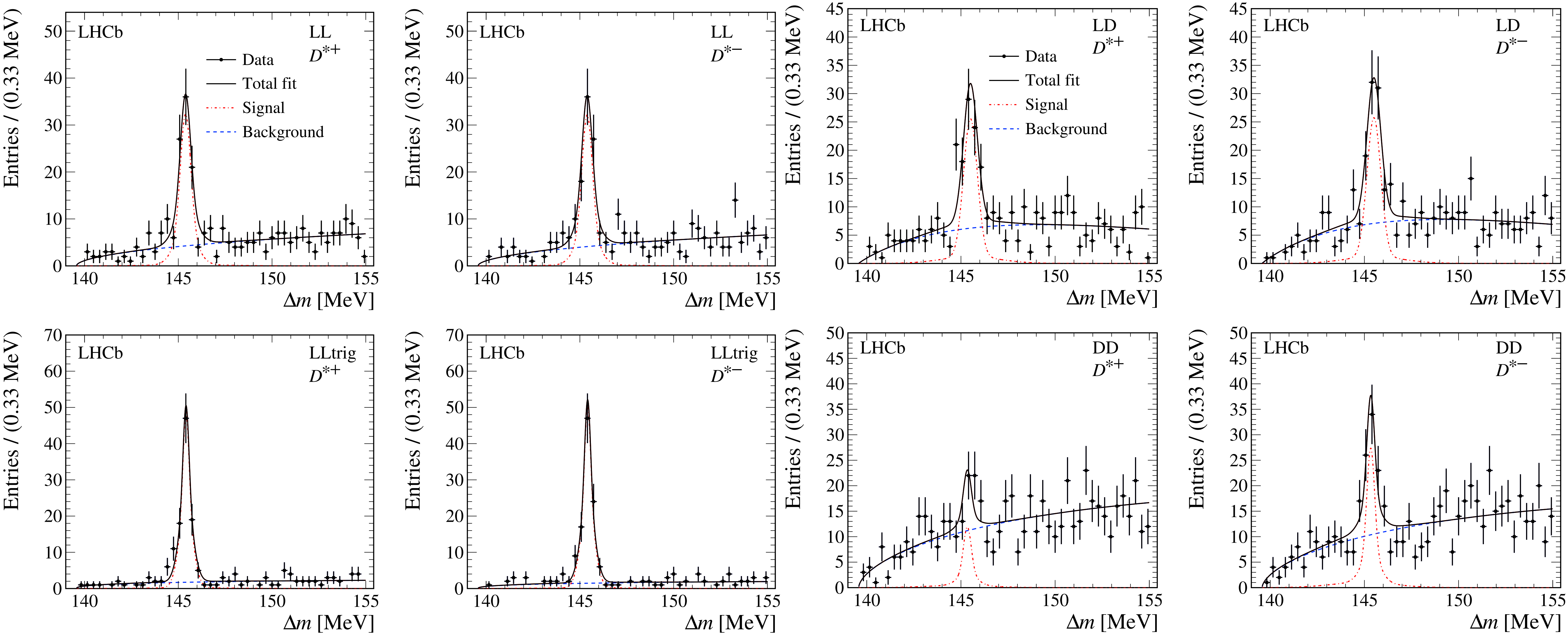
Prospettive per il futuro

Type	Observable	Current precision	LHCb 2018	**Upgrade** (50 fb^{-1})	Theory uncertainty
B_s^0 mixing	$2\beta_s$ ($B_s^0 \to J/\psi\ \phi$)	0.10 [138]	0.025	0.008	~ 0.003
	$2\beta_s$ ($B_s^0 \to J/\psi\ f_0(980)$)	0.17 [214]	0.045	0.014	~ 0.01
	$a_{\rm sl}^s$	6.4×10^{-3} [43]	0.6×10^{-3}	0.2×10^{-3}	0.03×10^{-3}
Gluonic penguins	$2\beta_s^{\rm eff}(B_s^0 \to \phi\phi)$	–	0.17	0.03	0.02
	$2\beta_s^{\rm eff}(B_s^0 \to K^{*0}\bar{K}^{*0})$	–	0.13	0.02	< 0.02
	$2\beta^{\rm eff}(B^0 \to \phi K_S^0)$	0.17 [43]	0.30	0.05	0.02
Right-handed currents	$2\beta_s^{\rm eff}(B_s^0 \to \phi\gamma)$	–	0.09	0.02	< 0.01
	$\tau^{\rm eff}(B_s^0 \to \phi\gamma)/\tau_{B_s^0}$	–	5 %	1 %	0.2 %
Electroweak penguins	$S_3(B^0 \to K^{*0}\mu^+\mu^-; 1 < q^2 < 6\,{\rm GeV}^2/c^4)$	0.08 [67]	0.025	0.008	0.02
	$s_0\,A_{\rm FB}(B^0 \to K^{*0}\mu^+\mu^-)$	25 % [67]	6 %	2 %	7 %
	$A_{\rm I}(K\mu^+\mu^-; 1 < q^2 < 6\,{\rm GeV}^2/c^4)$	0.25 [76]	0.08	0.025	~ 0.02
	$\mathcal{B}(B^+ \to \pi^+\mu^+\mu^-)/\mathcal{B}(B^+ \to K^+\mu^+\mu^-)$	25 % [85]	8 %	2.5 %	~ 10 %
Higgs penguins	$\mathcal{B}(B_s^0 \to \mu^+\mu^-)$	1.5×10^{-9} [13]	0.5×10^{-9}	0.15×10^{-9}	0.3×10^{-9}
	$\mathcal{B}(B^0 \to \mu^+\mu^-)/\mathcal{B}(B_s^0 \to \mu^+\mu^-)$	–	~ 100 %	~ 35 %	~ 5 %
Unitarity triangle angles	γ ($B \to D^{(*)}K^{(*)}$)	~ 10–$12°$ [244, 258]	4°	0.9°	negligible
	γ ($B_s^0 \to D_s K$)	–	11°	2.0°	negligible
	β ($B^0 \to J/\psi\ K_{\rm S}^0$)	0.8° [43]	0.6°	0.2°	negligible
Charm *CP* violation	A_Γ	2.3×10^{-3} [43]	0.40×10^{-3}	0.07×10^{-3}	–
	$\Delta\mathcal{A}_{CP}$	2.1×10^{-3} [18]	0.65×10^{-3}	0.12×10^{-3}	–

$D^0 \rightarrow K_s^0 K_s^0$

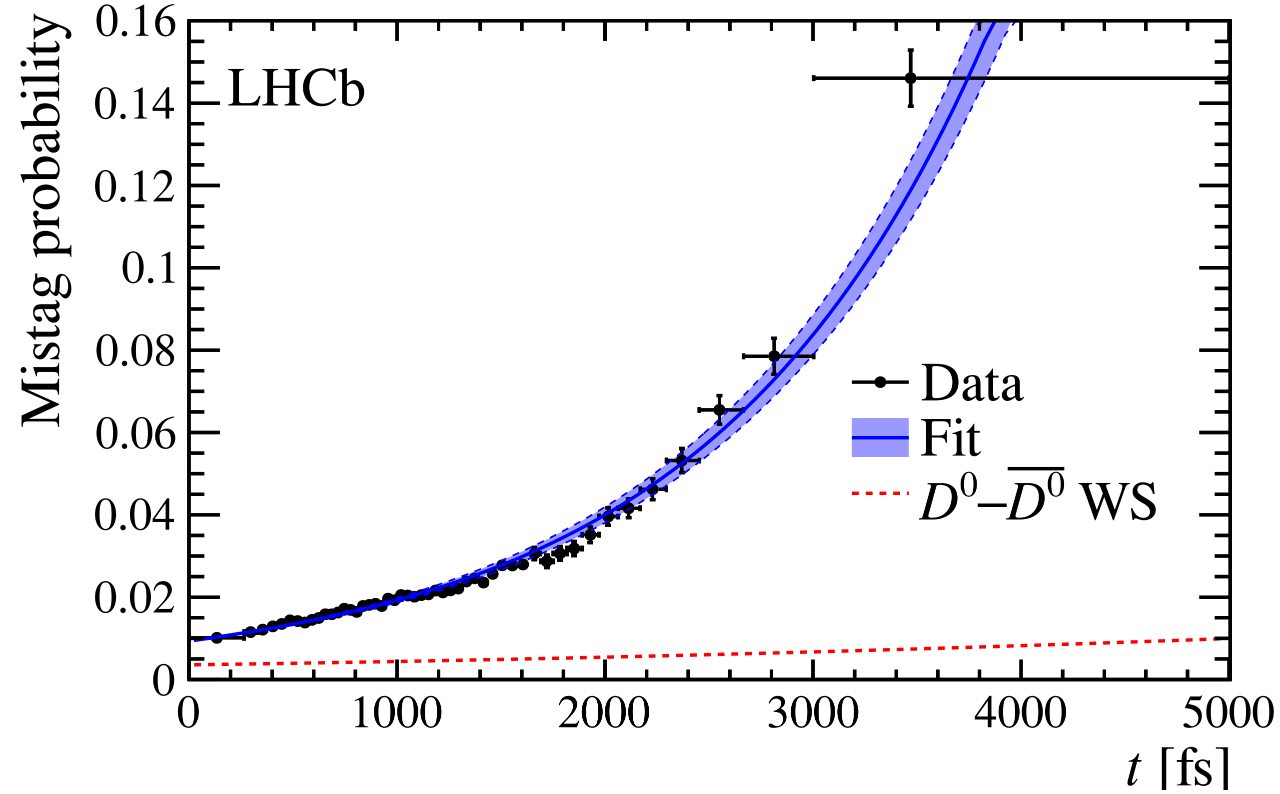
Category	N^+	N^-	$\mathcal{A}_{CP}$
LL	86 ± 11	86 ± 12	0.00 ± 0.09
LD	82 ± 14	83 ± 13	-0.00 ± 0.11
DD	29 ± 14	66 ± 14	-0.39 ± 0.23
LLtrig	96 ± 11	99 ± 11	-0.02 ± 0.08
combined			-0.029 ± 0.052

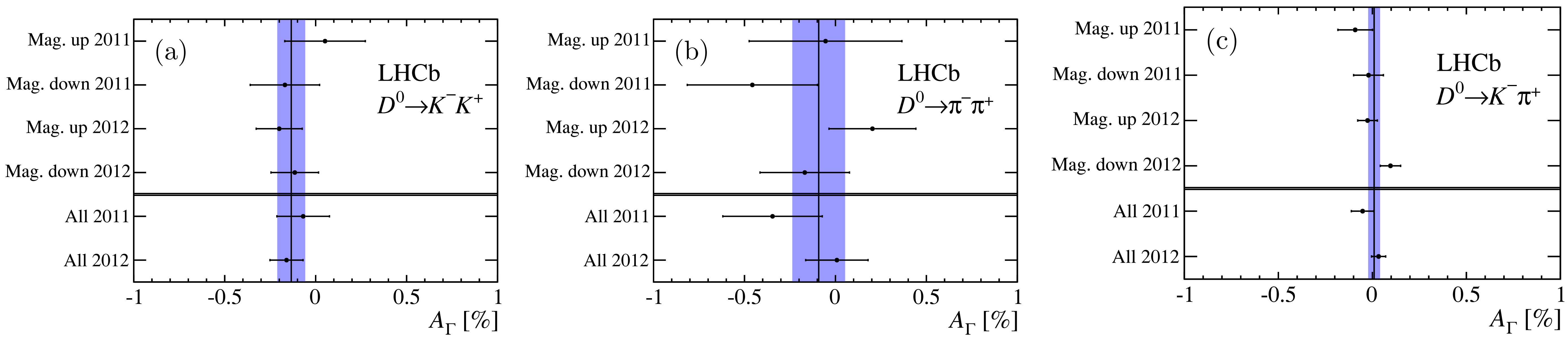




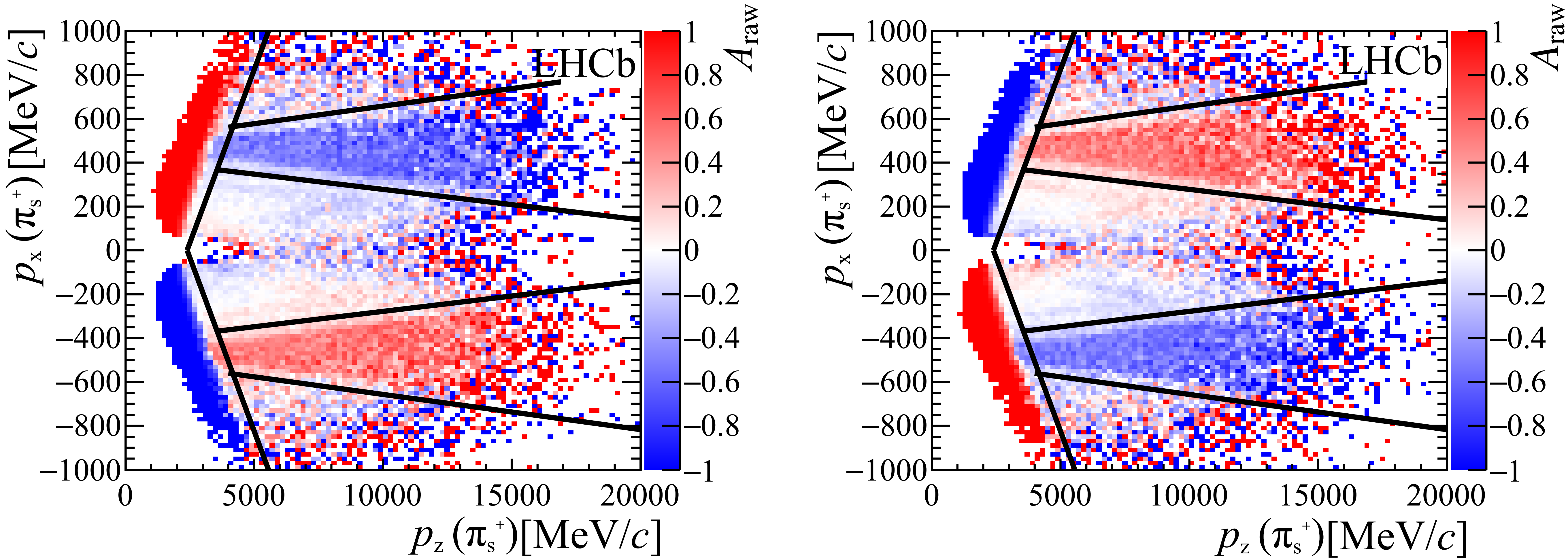
A_Γ: CPV indiretta $D^0 \to h^+h^-$: sistematici

Source of uncertainty	$D^0 \to K^-K^+$ constant	$D^0 \to K^-K^+$ scale	$D^0 \to \pi^-\pi^+$ constant	$D^0 \to \pi^-\pi^+$ scale
Mistag probability	0.006%	0.05	0.008%	0.05
Mistag asymmetry	0.016%		0.016%	
Time-dependent efficiency	0.010%		0.010%	
Detection and production asymmetries	0.010%		0.010%	
D^0 mass fit model	0.011%		0.007%	
D^0 decay-time resolution		0.09		0.07
B^0–$\overline{B}^0$ mixing	0.007%		0.007%	
Quadratic sum	0.026%	0.10	0.025%	0.09





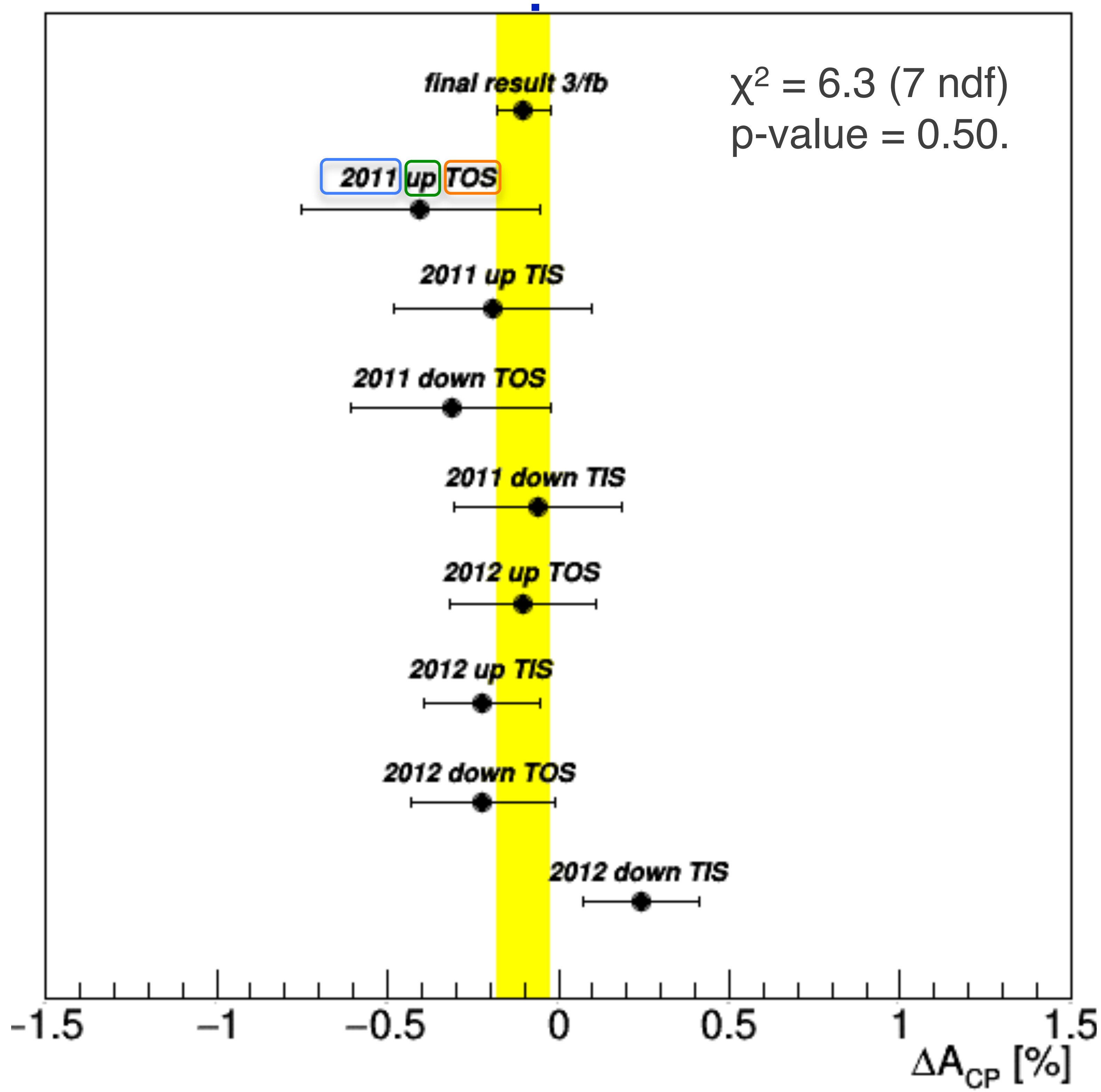
Tagli fiduciali



Cross-checks

- Anno di presa dati (= differente energia 7/8 TeV)
- Polarità del magnete
- Configurazione del trigger
  - TOS: trigger on signal
  - TIS: trigger independent from signs

- Vari cross-checks:
  - cinematica π-soft, D0
  - run numbers
  - richieste di PID
  - qualità del vertice del D*
  - …



arXiv:1602.03160