



Misura dell'asimmetria di CP nei decadimenti $D^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0$

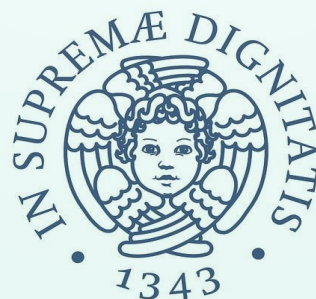
Incontri di Fisica delle Alte Energie, Milano 05/04/2018

Giulia Tuci, *Università di Pisa & INFN*

giulia.tuci@pi.infn.it

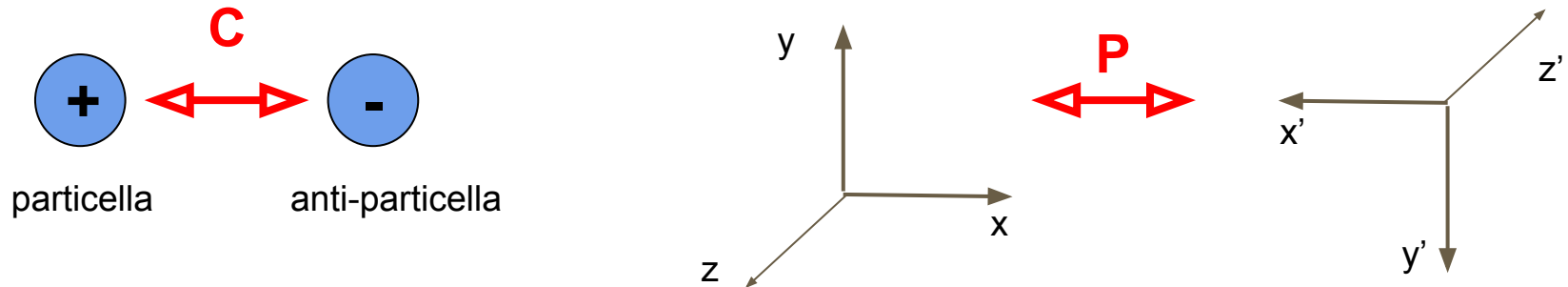


Istituto Nazionale di Fisica Nucleare



Violazione di CP nel Modello Standard

- ❖ Violazione di CP (CPV): non-invarianza delle leggi della fisica sotto la trasformazione combinata di coniugazione di carica (C) e parità (P)



- ❖ Nel MS, CPV è descritta da una fase complessa δ nella matrice CKM, che descrive interazioni tra quark e W^\pm

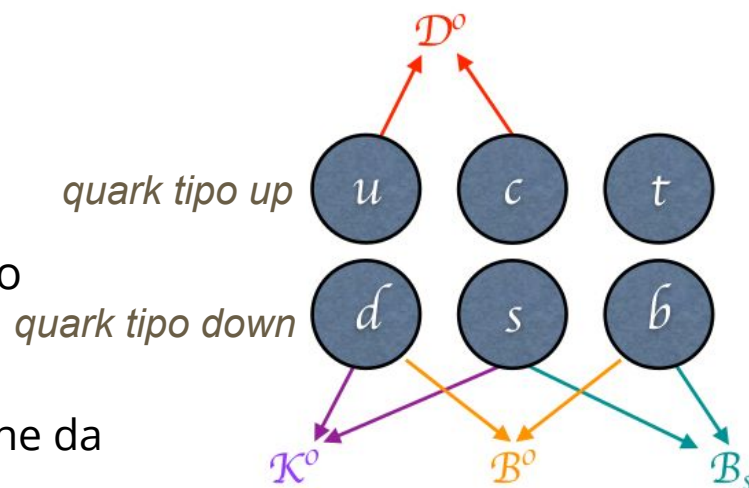
$$\mathcal{L}_{int}^{CC} = -\frac{g_2}{\sqrt{2}} (\bar{u}_L, \bar{c}_L, \bar{t}_L) \gamma^\mu V_{CKM} \begin{pmatrix} d_L \\ s_L \\ b_L \end{pmatrix} W_\mu^\dagger + h.c.$$

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

Può essere parametrizzata con 3 parametri reali + 1 fase complessa δ

Quark charm: perché studiarlo?

- ❖ Mesoni con charm: unici con quark pesante di tipo up in cui si può osservare mescolamento e CPV
 - Quark top decade prima di adronizzare
 - Il π^0 è antiparticella di se stesso
- ❖ Decadimenti di mesoni con charm coinvolgono transizioni $c \rightarrow$ quark più leggeri
 - Ampiezze descritte in buona approssimazione da fisica delle prime due generazioni \rightarrow CPV piccola, attesa $\sim O(10^{-3})$
- ❖ Fondo MS piccolo, più sensibile a contributi di “nuova fisica”
- ❖ **Violazione di CP non ancora osservata**



Decadimento $D^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0$

- ❖ Studio canali $D^0 \rightarrow K^+ K^-$ e $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ non ha portato a risultati conclusivi
- ❖ Possibile approccio: cercare CPV in canali con ampiezze soppresse
 - $D^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0$
- ❖ Vale che:

$$\mathcal{A}^{\text{dir}} = \text{Im} \frac{\lambda_b}{(\lambda_s - \lambda_d)} \text{Im} \frac{A_b}{A_{sd}}$$

Decadimento $D^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0$

- ❖ Studio canali $D^0 \rightarrow K^+ K^-$ e $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ non ha portato a risultati conclusivi
- ❖ Possibile approccio: cercare CPV in canali con ampiezze sopresse
 - $D^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0$
- ❖ Vale che:

$$\mathcal{A}^{\text{dir}} = \text{Im} \frac{\lambda_b}{(\lambda_s - \lambda_d)} \text{Im} \frac{A_b}{A_{sd}}$$

$$\lambda_q \equiv V_{cq}^* V_{uq}$$

$\sim 6 \times 10^{-4}$

Decadimento $D^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0$

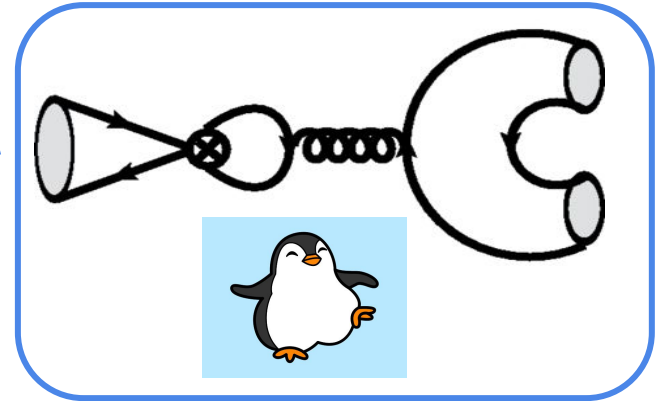
- ❖ Studio canali $D^0 \rightarrow K^+ K^-$ e $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ non ha portato a risultati conclusivi
- ❖ Possibile approccio: cercare CPV in canali con ampiezze sopresse
 - $D^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0$
- ❖ Vale che:

$$\mathcal{A}^{\text{dir}} = \text{Im} \frac{\lambda_b}{(\lambda_s - \lambda_d)} \text{Im} \frac{A_b}{A_{sd}}$$

$$\lambda_q \equiv V_{cq}^* V_{uq}$$

$$\sim 6 \times 10^{-4}$$

contribuisce a



Decadimento $D^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0$

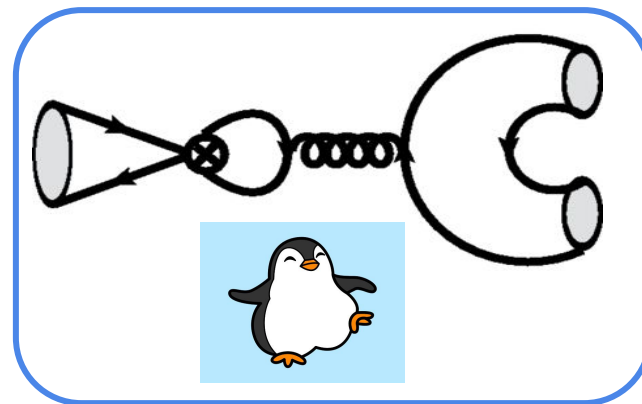
- ❖ Studio canali $D^0 \rightarrow K^+ K^-$ e $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ non ha portato a risultati conclusivi
- ❖ Possibile approccio: cercare CPV in canali con ampiezze sopresse
 - $D^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0$
- ❖ Vale che:

$$\mathcal{A}^{\text{dir}} = \text{Im} \frac{\lambda_b}{(\lambda_s - \lambda_d)} \text{Im} \frac{A_b}{A_{sd}}$$

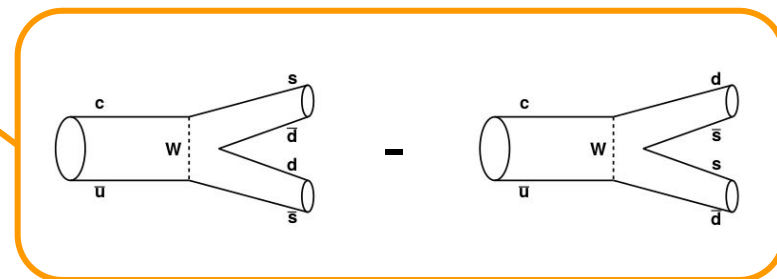
$$\lambda_q \equiv V_{cq}^* V_{uq}$$

$$\sim 6 \times 10^{-4}$$

contribuisce a



contribuisce a



Decadimento $D^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0$

- ❖ Studio canali $D^0 \rightarrow K^+ K^-$ e $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ non ha portato a risultati conclusivi
- ❖ Possibile approccio: cercare CPV in canali con ampiezze sopresse
 - $D^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0$

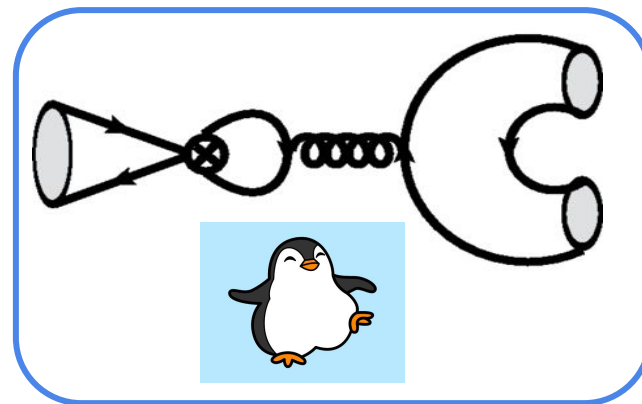
❖ Vale che:

$$\mathcal{A}^{\text{dir}} = \text{Im} \frac{\lambda_b}{(\lambda_s - \lambda_d)} \text{Im} \frac{A_b}{A_{sd}}$$

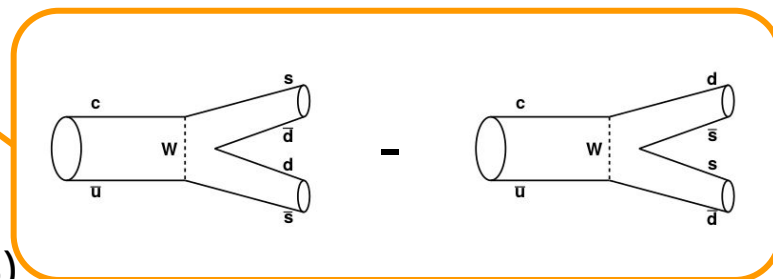
$$\lambda_q \equiv V_{cq}^* V_{uq}$$

$$\sim 6 \times 10^{-4}$$

- ❖ $A_{sd} = 0$ nel limite simmetria SU(3)
- ❖ A_b piccolo ma $\neq 0$ nel limite simmetria SU(3)
- ❖ **CPV potrebbe raggiungere 1%**



contribuisce a

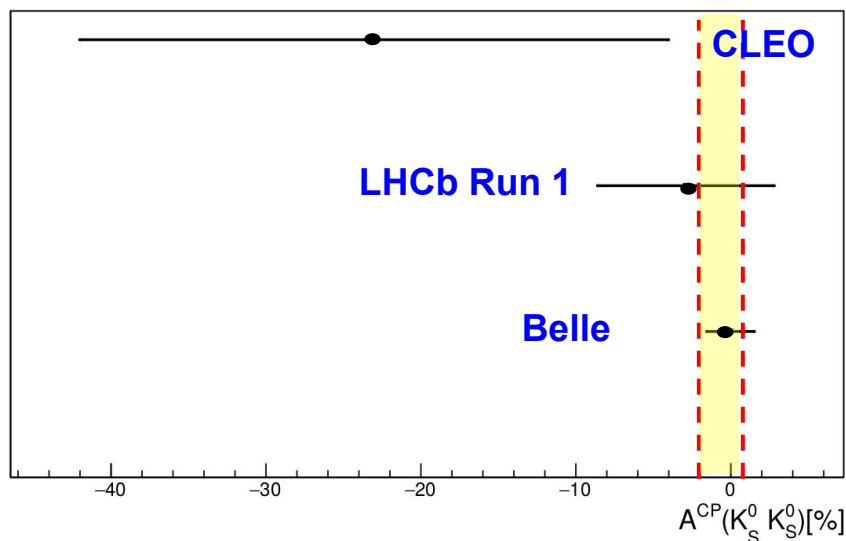


contribuisce a

Stato sperimentale

- ❖ Migliore misura al mondo effettuata da Belle
- ❖ Misura LHCb Run 1: 5.2% errore statistico

$A^{\text{CP}}(K_S^0 K_S^0)$ (%)	Anno	Collaborazione
-23 ± 19	2008	CLEO
$-2.9 \pm 5.2 \pm 2.2$	2015	LHCb (Run 1)
$-0.02 \pm 1.53 \pm 0.17$	2017	Belle
-0.38 ± 1.46	Media Mondiale	



$D^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0$ ad LHCb

- ❖ Canale difficile da selezionare a livello di trigger ad LHCb
- ❖ I K_S^0 spesso decadono al di fuori dell'accettazione del rivelatore
- ❖ $\tau(K_S^0) = 0.9 \times 10^{-10} \text{ s}$, $\langle \beta\gamma \rangle \sim 80 \rightarrow \beta\gamma c\tau \sim 216 \text{ cm}$
- ❖ Nel Run 1 nessun trigger dedicato per questo canale
- ❖ Situazione differente nel Run 2 \rightarrow **Introdotta trigger dedicato per questo canale**
- ❖ Questa presentazione: **misura con dati LHCb Run 2 (2015+2016)**

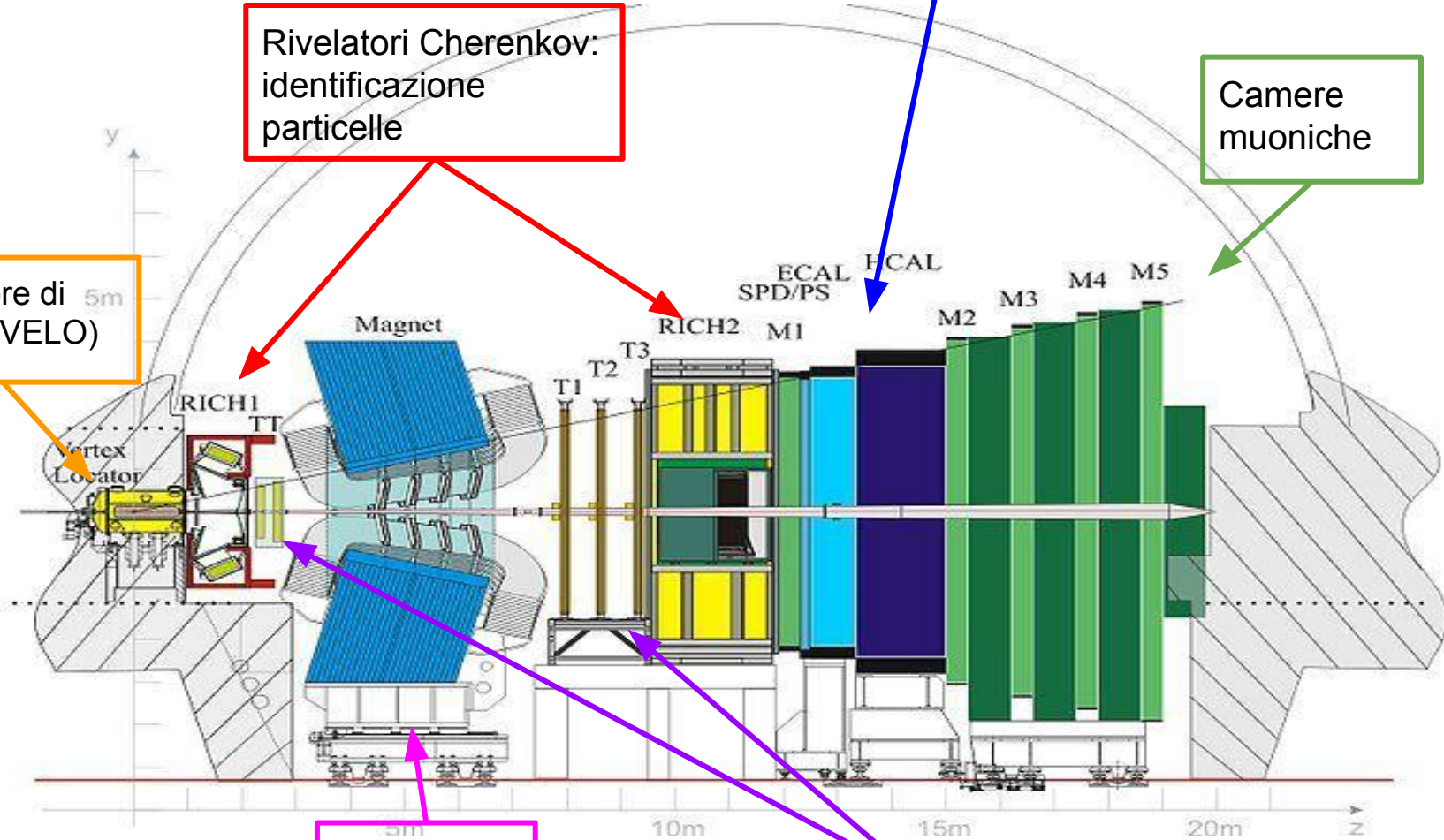
L' esperimento LHCb

Calorimetri elettromagnetico e adronico: identificazione particelle

Rivelatori Cherenkov: identificazione particelle

Camere muoniche

Rivelatore di vertice (VELO)



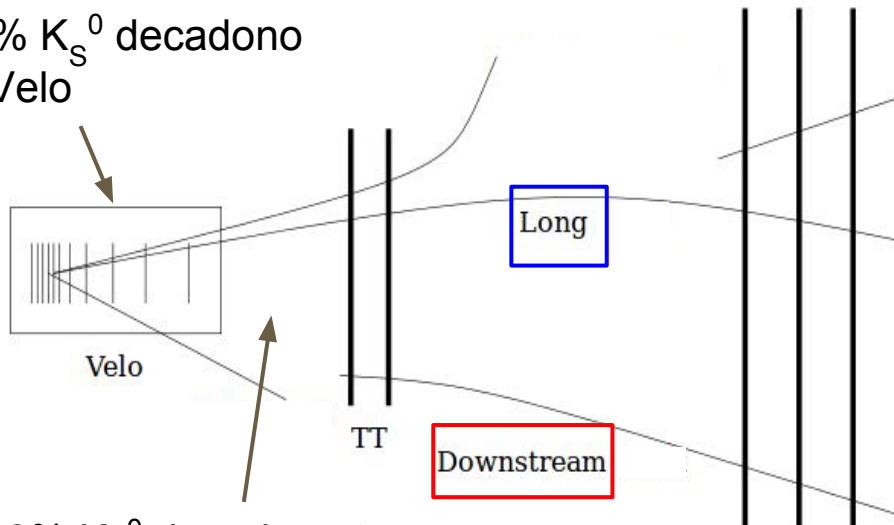
Magnete

Tracciatori: misura traiettoria particelle cariche → impulso

Candidati

- ❖ Dati raccolti nel 2015 e 2016 → $\sim 2\text{fb}^{-1}$ luminosità integrata
- ❖ Classificazione tracce a seconda del rivelatore attraversato

$\sim 20\%$ K_S^0 decadono nel Velo



$\sim 40\%$ K_S^0 decadono tra Velo e prima stazione TT

2 campioni utilizzati in questa analisi:

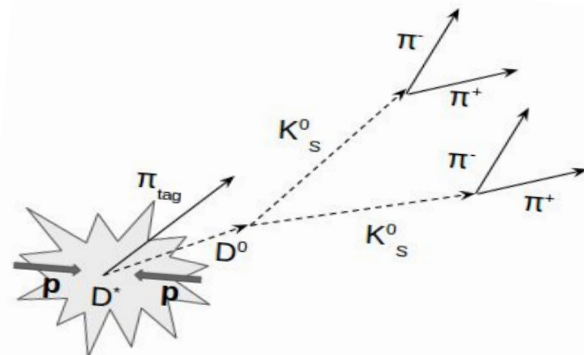
- **LL** : entrambi i K_S^0 sono ricostruiti da tracce **Long**
- **LD** : un K_S^0 è ricostruito da tracce **Long** e l'altro è ricostruito da tracce **Downstream**

La misura in breve

- ❖ Misura integrata nel tempo

$$\mathcal{A}^{CP}(D^0 \rightarrow K_s^0 K_s^0) \equiv \frac{\Gamma(D^0 \rightarrow K_s^0 K_s^0) - \Gamma(\bar{D}^0 \rightarrow K_s^0 K_s^0)}{\Gamma(D^0 \rightarrow K_s^0 K_s^0) + \Gamma(\bar{D}^0 \rightarrow K_s^0 K_s^0)}$$

- ❖ Determinazione flavor D^0 : richiesta provenienza da $D^{*+} \rightarrow D^0 \pi^+$



- ❖ Quantità misurata in LHCb

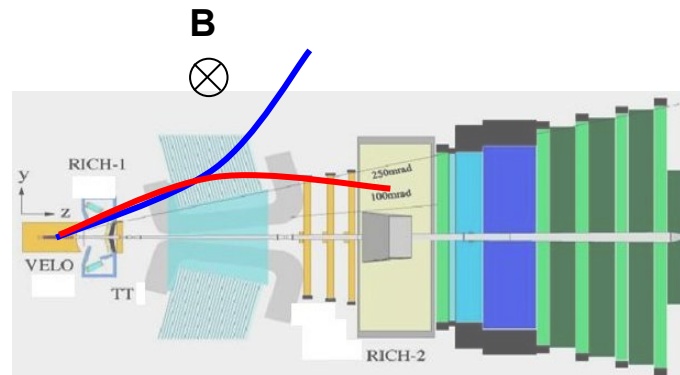
$$A_{raw}(f) = \frac{N(D^{*+} \rightarrow D^0(f)\pi_s^+) - N(D^{*-} \rightarrow \bar{D}^0(\bar{f})\pi_s^-)}{N(D^{*+} \rightarrow D^0(f)\pi_s^+) + N(D^{*-} \rightarrow \bar{D}^0(\bar{f})\pi_s^-)}$$

Da A_{raw} ad A^{CP}

Stato iniziale pp non autostato CP: $\sigma_{prod}(D^{*+}) \neq \sigma_{prod}(D^{*-})$

$$A^{raw} \approx A^{CP} + A^{prod} + A^{det}$$

Campo magnetico può curvare i pioni al di fuori dell'accettazione del rivelatore a seconda della carica



❖ Utilizzo di un canale di controllo $D^0 \rightarrow K^+K^-$ e misura differenza asimmetrie

➤ $A^{CP}(D^0 \rightarrow K^+K^-) = (0.04 \pm 0.12 \text{ (stat)} \pm 0.10 \text{ (sist)})\%$ (LHCb-Run1)

➤ $A^{CP}(K_S^0 K_S^0) = A^{raw}(K_S^0 K_S^0) - A^{raw}(K^+K^-) + A^{CP}(K^+K^-)$

Contributi di fondo

- Numero di eventi di segnale estratto con fit a $\Delta m = m(D^{*\pm}) - m(D^0)$

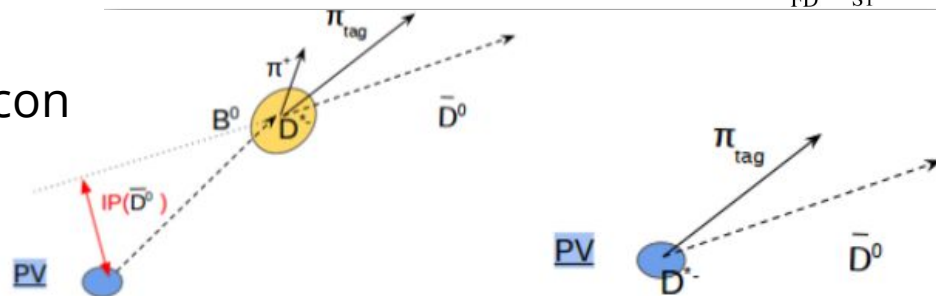
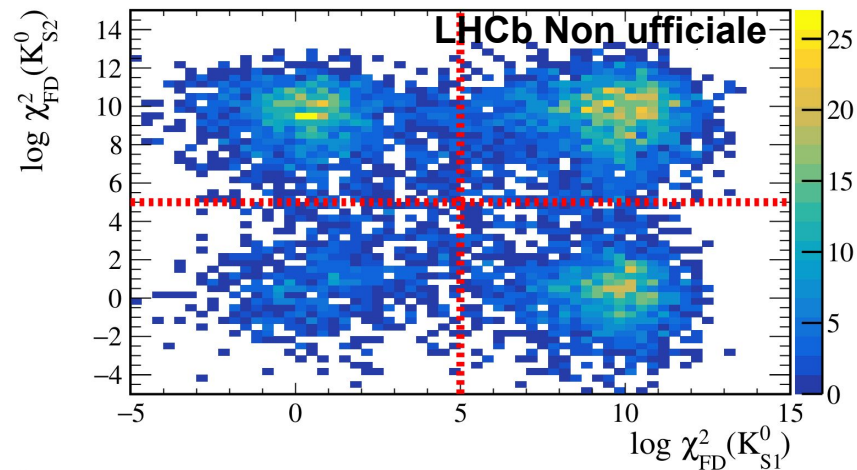
- Fondo che si manifesta come un picco nella distribuzione Δm :

- $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$: fondo ridotto con taglio su distanza di volo K_S^0

- Decadimenti secondari**: ridotti con taglio su parametri di impatto D^0

- Fondo **combinatorio** che non picca nella distribuzione Δm

- Riduzione fondo mediante classificatore kNN

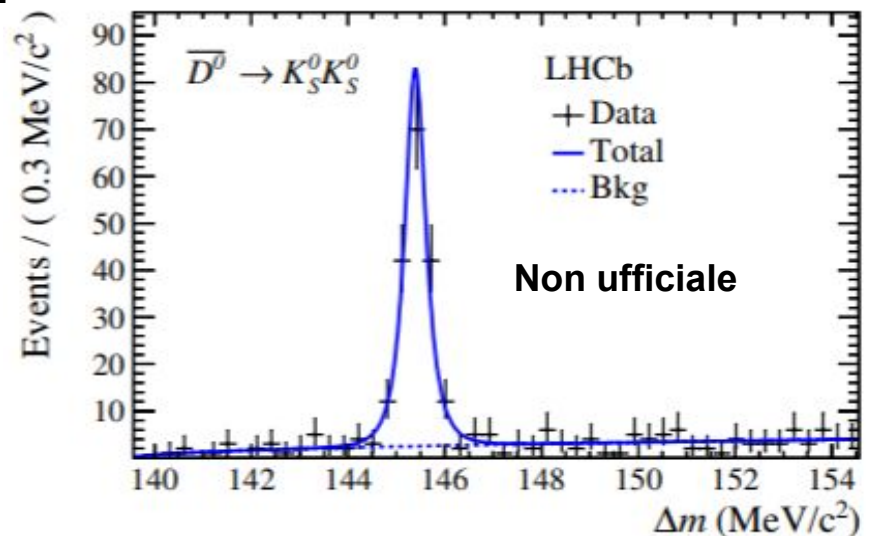
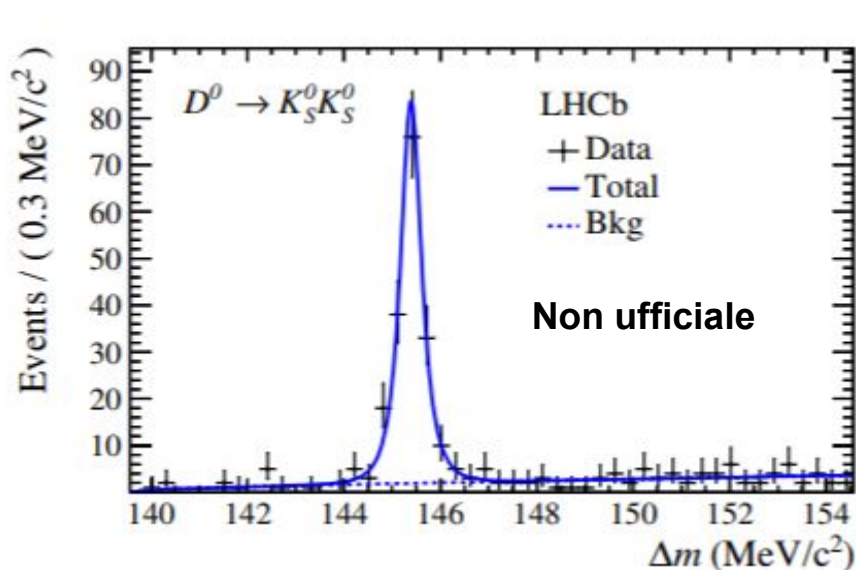


Metodo di fit

- ❖ Fit simultaneo distribuzione D^{*+} e D^{*-}

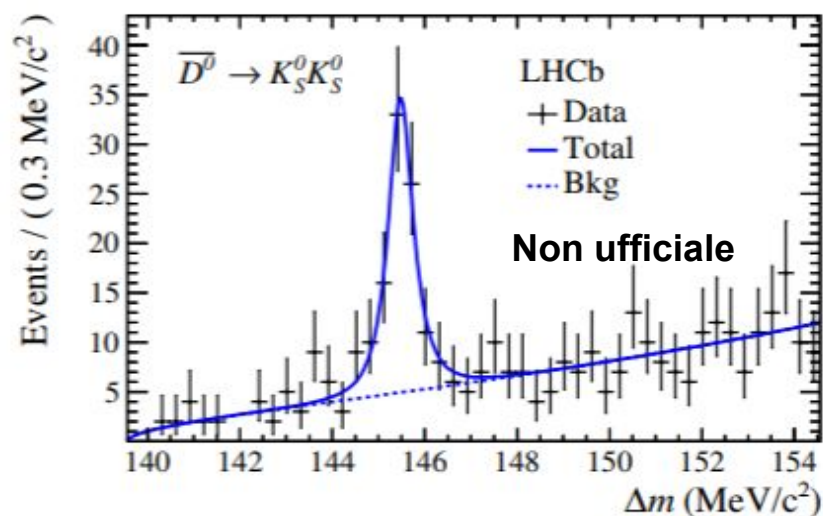
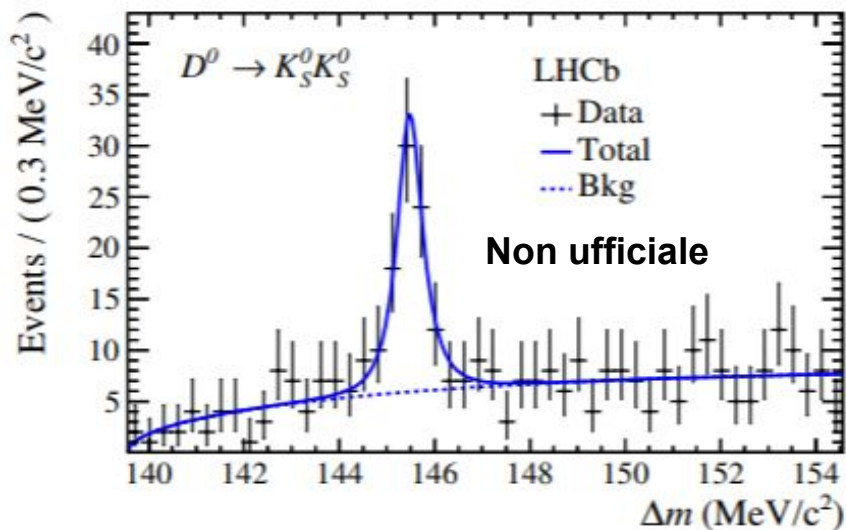
$$\mathcal{L}(p) = \frac{e^{-N_{exp}}}{N_{obs}!} \prod_i \left[n_s \frac{1 + q_i \mathcal{A}^{CP}_{sig}}{2} S^{q_i}(x) + n_b \frac{1 + q_i \mathcal{A}^{CP}_{bkg}}{2} B^{q_i}(x) \right]$$

- ❖ 2 componenti: segnale + fondo, entrambi descritti mediante funzioni empiriche
- ❖ Sistemático associato a scelta modello di fit $\sim 6 \times 10^{-3}$
 - Contributo maggiore all'errore sistemático totale

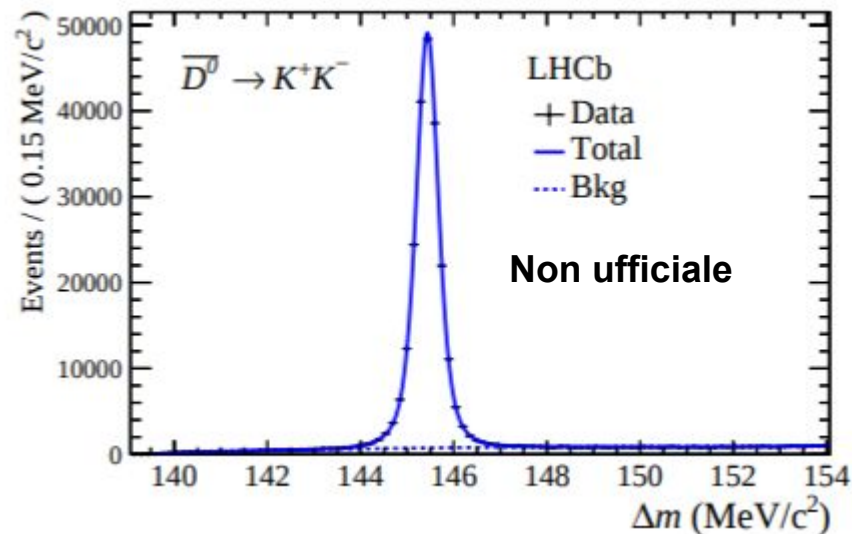
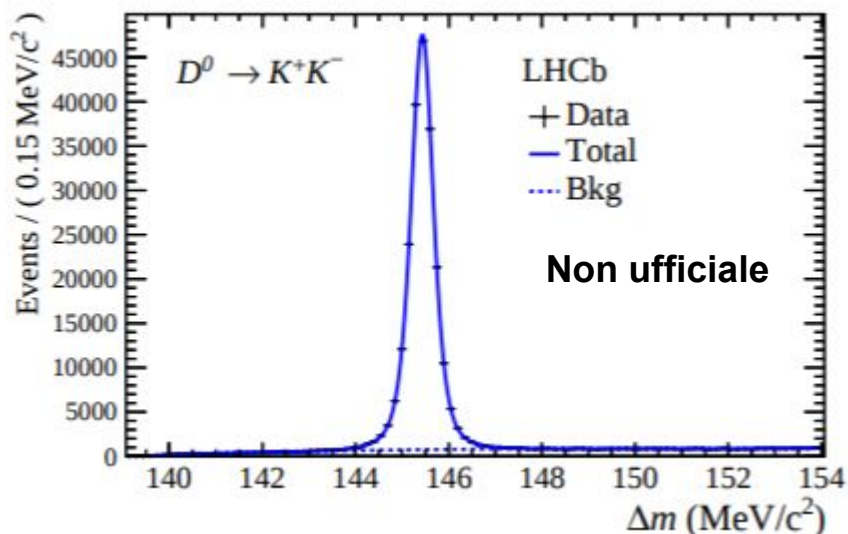


Fit al segnale e al canale di controllo

LD



Canale di controllo



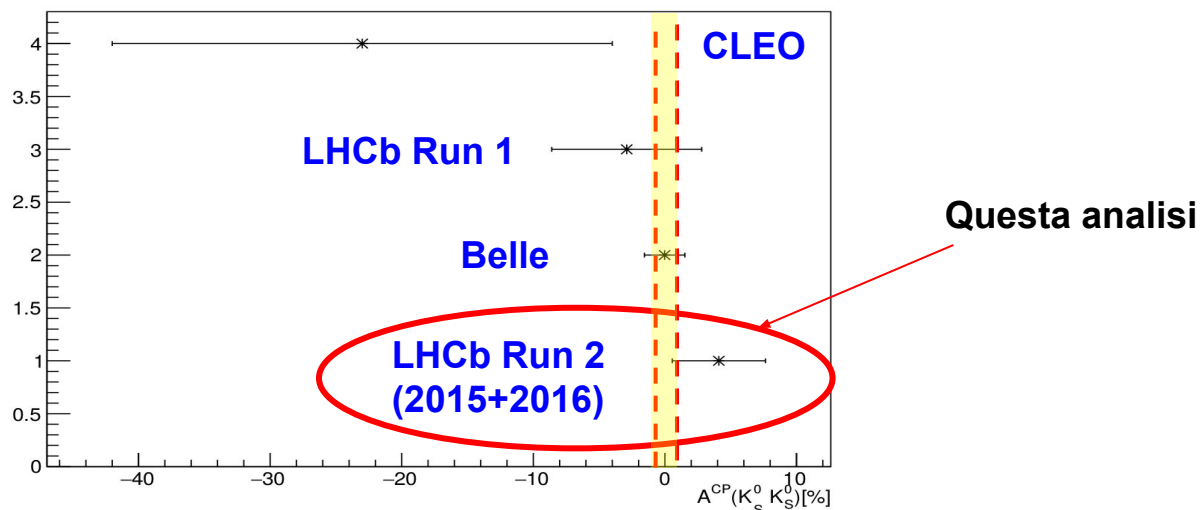
Risultato finale

- ❖ Risultato finale (non ufficiale, articolo LHCb-PAPER-2018-012 prossimo alla pubblicazione)

$$A^{\text{CP}}(K_S^0 K_S^0)_{\text{Run2}} = (4.2 \pm 3.4 \pm 1.0)\%$$

$$A^{\text{CP}}(K_S^0 K_S^0)_{\text{Run1+Run2}} = (2.0 \pm 2.9 \pm 1.0)\%$$

- ❖ Diminuito statistico misura Run1 di un fattore ~ 1.6 e sistematico di un fattore ~ 2



- ❖ Risultato compatibile con l'ipotesi di violazione di CP nulla e con misure precedenti

Grazie per l'attenzione

Domande?

Slides di supporto

Selezione Hlt2

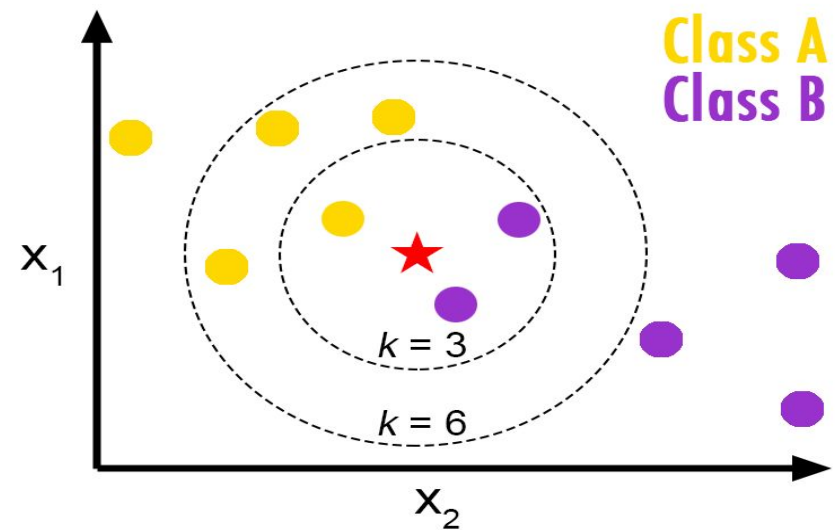
Variable	$K_{sL}^0 \rightarrow \pi_L^+ \pi_L^-$	$K_{sD}^0 \rightarrow \pi_D^+ \pi_D^-$
$\chi^2/\text{ndf}(\pi)$	< 3	< 4
$\mathcal{P}_{\text{ghost}}(\pi)$	< 0.4	< 0.4
$\chi_{\text{IP}}^2(\pi)$	> 36	–
$p_{\text{T}}(\pi)$	–	$> 175 \text{ MeV}/c$
$p(\pi)$	–	$> 3000 \text{ MeV}/c$
$ m(\pi^+ \pi^-) - m(K_s^0) $	$< 35 \text{ MeV}/c^2$	$< 64 \text{ MeV}/c^2$
$\chi_{\text{vtx}}^2/\text{ndf}(K_s^0)$	< 30	< 30
$\tau(K_s^0)$	$> 2 \text{ ps}$	$> 0.5 \text{ ps}$
$z(K_s^0) - z(PV)$	–	$> 400 \text{ mm}$
$z(K_s^0)$	$\in [-100, 500] \text{ mm}$	$\in [300, 2275] \text{ mm}$

Variable	$D^0 \rightarrow K_{sL}^0 K_{sL}^0$	$D^0 \rightarrow K_{sL}^0 K_{sD}^0$	$D^0 \rightarrow K_{sD}^0 K_{sD}^0$
$\sum_{K_s^0} p_{\text{T}}$	$> 1500 \text{ MeV}/c$	$> 2000 \text{ MeV}/c$	
$p_{\text{T}}(K_s^0)$	$> 500 \text{ MeV}/c$	$> 750 \text{ MeV}/c$	
$\chi_{\text{IP}}^2(K_s^0)$	> 9	> 4	
$\chi_{\text{VVD}}^2(D^0)$	> 20	> 10	
$m(K_s^0 K_s^0)$	$\in [1789, 1949] \text{ MeV}/c^2$		
$\chi_{\text{vtx}}^2/\text{ndf}(D^0)$	< 10		
$\theta_{\text{DIRA}}(D^0)$	$< 34.6 \text{ mrad}$		
$\tau(D^0)$	$> 0.2 \text{ ps}$		
$m(D^0 \pi_{\text{tag}}) - m(K_s^0 K_s^0)$	$\in [130.0, 160] \text{ MeV}/c^2$		
$p_{\text{T}}(\pi_{\text{tag}})$	$> 100 \text{ MeV}/c$		
$\mathcal{P}_{\text{ghost}}(\pi_{\text{tag}})$	< 0.4		
$\chi^2/\text{ndf}(\pi_{\text{tag}})$	< 3		
$\chi_{\text{vtx}}^2/\text{ndf}(D^*)$	< 25		
HLT1	$D^0 \text{ is Hlt1.*Track.*Decision\%TOS}$		

Algoritmo k-NN (k Nearest Neighbours)

- ❖ Classificazione di un oggetto x_i ★ a seconda delle caratteristiche dei k punti vicini x_j ● presi da un campione di training, utilizzando una distanza $d(x_i, x_j)$

$$P_S = \frac{k_S}{k_S + k_B} = \frac{k_S}{k}$$



- ❖ Ottimizzazione:
 - **Numero di vicini (k)**
 - **Numero di variabili:** partendo da un set di 21 variabili, rimuovendo una variabile per volta, scegliendo la configurazione che minimizza σ_S/S
 - **Variando opzioni di training** (numero di eventi di segnale o fondo, utilizzo di un kernel Gaussiano)

Selezione finale LL

Selection	Yields after selection	$\sigma(N_S)/N_S[\%]$
Preliminary selection L0: D0_L0Hadron_T0S or DS_L0Global_TIS L0 TCK \neq 0x1613 HLT1: KS_H1t1TrackMVA_T0S Fiducial cuts $R_{xy} < 5$ mm $[\log(\chi_{FD}^2(K_{S1}^0)) - 10]^2 + [\log(\chi_{FD}^2(K_{S2}^0)) - 10]^2 < 16$ $ m(K_{S1-2}^0) - 497.6 < 10.5$ MeV/ c^2 $\log(\chi_{IP}^2(D^0)) < 5$ $ m(D^0) - 1865 < 20$	1069 \pm 62	5.8
k-NN selection k-NN output > 0.5	964 \pm 47	4.9
Rectangular cuts $\log(\chi_{IP}^2(D^0)) < 3$ $\log(\chi_{IP}^2(\pi_{tag})) < 2.5$ $\mathcal{P}_{ghost}(\pi_{tag}) < 0.1$ $\sqrt{ m(K_{S1}^0) - 497.6 ^2 + m(K_{S2}^0) - 497.6 ^2} < 10.5$ MeV/ c^2	730 \pm 33	4.5
Multiple candidates	710 \pm 32	4.5

Selezione finale LD

Selection	Yields after selection	$\sigma(N_S)/N_S[\%]$
Preliminary selection L0: D0_L0Hadron_TOS or DS_LOGlobal_TIS L0 TCK \neq 0x1613 HLT1: KS_Hlt1TrackMVA_TOS Fiducial cuts $R_{xy} < 5$ mm $\log(\chi_{FD}^2(K_{SD}^0)) > 2.5$ $ m(K_{SL}^0) - 497.6 < 15$ MeV/ c^2 $\log(\chi_{IP}^2(D^0)) < 5$ $ m(D^0) - 1865 < 20$	621 \pm 71	11.4
k-NN selection k-NN output > 0.35	395 \pm 38	9.6
Rectangular cuts $\log(\chi_{IP}^2(D^0)) < 3.5$ $\log(\chi_{IP}^2(\pi_{tag})) < 2.5$ $\mathcal{P}_{ghost}(\pi_{tag}) < 0.1$ $\sqrt{\left \frac{m(K_{SL}^0) - 497.6}{10.5}\right ^2 + \left \frac{m(K_{SD}^0) - 497.6}{15}\right ^2} < 1$	298 \pm 28	9.4
Multiple candidates	294 \pm 33	11.2

Scelta modello fit

Aumentando il numero di parametri nel fit la likelihood diminuisce

→ Rischio di overfitting: non descrivo più la distribuzione, ma le fluttuazioni random

Per evitare ciò scelgo modello che minimizza BIC (Bayesian information criterion)

$$\text{BIC} = -2 \log \mathcal{L} + k \log(n)$$

Aggiunta di una penalità che dipende dal numero di parametri liberi nel fit

Funzioni fit segnale

Segnale descritto mediante Johnson S_U (4 parametri liberi):

$$S(x) \propto \left[1 + \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\delta + \gamma \sinh^{-1} \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]^2 \right\}$$

Fondo descritto mediante funzione empirica che va a 0 al valore di $m(\pi)$ (1 parametro libero):

$$B(x) \propto \sqrt{\frac{x}{m_\pi} - 1} \cdot \exp \left[c_2 \cdot \frac{x}{m_\pi} \right]$$

Sorgenti errore sistematico

❖ Misura dominata da incertezza statistica

❖ Principali fonti di errore sistematico:

➤ **Modello di fit**: possibile dipendenza A^{raw} dalla scelta del modello di fit



Stimato variando pdfs e utilizzando pseudo-esperimenti

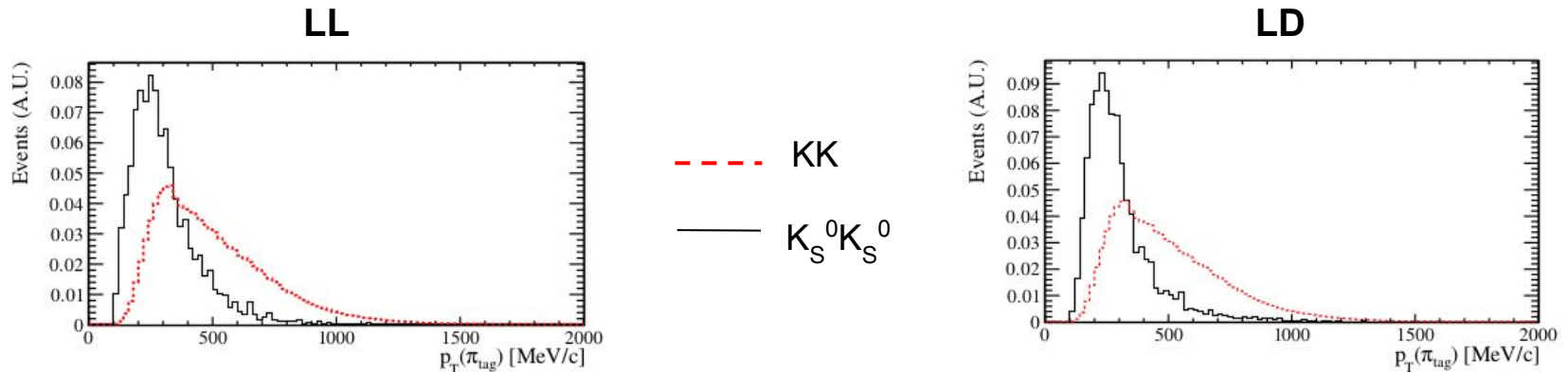
➤ **Frazione di fondo peaking residua**: bias dovuto ad una asimmetria CP diversa da quella del segnale



Stimato da frazione residua x differenza asimmetrie

Sorgenti errore sistematico

- **Ripesamento del canale di controllo:** A^{prod} e A^{det} dipendono dalla cinematica del D^* e del pione di tag \rightarrow necessario equalizzare distribuzioni nei due canali



Valutato effetto ripesamento su $A_{\text{raw}}(\text{KK})$

Totale: $\sigma(\text{sist.}) = 1.0\%$