

THE BEAUTY OF CHARM @ LHCb EXPERIMENT

Roberto Ribatti
SNS & INFN Pisa
27 maggio 2023

MI PRESENTO!

Sono Roberto Ribatti,

- Ex studente del corso ordinario SNS
- Adesso all'ultimo anno del corso di PhD
- Il mio percorso in HEP è iniziato come summer student a CMS al CERN (2017) e g-2 al Fermilab (2018)
- Nella collaborazione LHCb a partire dalla mia tesi magistrale (2019)
- Da un anno basato qui al CERN
- Analisi dati per misurare le oscillazioni e la violazione di CP del mesone D^0
- Sviluppo una libreria per la simulazione veloce del calorimetro di LHCb



MISURARE LE OSCILLAZIONI E
LA VIOLAZIONE DI CP NEI MESONI D^0

OSCILLAZIONI DEI MESONI NEUTRI

- Nei mesoni neutri gli autostati di massa $|M_{1,2}\rangle$ si possono scrivere come una combinazione lineare degli autostati di interazione $|M^0\rangle$ e $|\bar{M}^0\rangle$

$$|M_{1,2}\rangle = p|M^0\rangle \pm q|\bar{M}^0\rangle$$

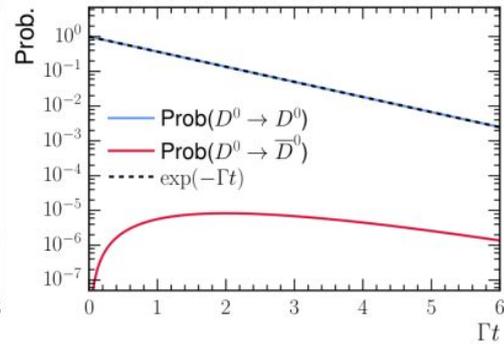
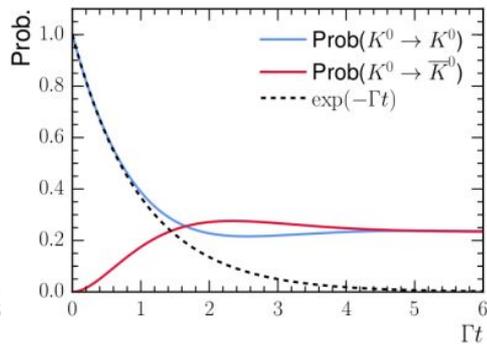
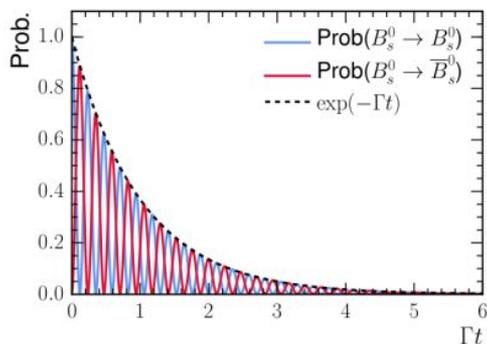
$$\text{Prob}[M^0(0) \rightarrow M^0(t)] \propto e^{-\Gamma t} [\cosh(y\Gamma t) + \cos(x\Gamma t)]$$

$$\text{Prob}[M^0(0) \rightarrow \bar{M}^0(t)] \propto e^{-\Gamma t} [\cosh(y\Gamma t) - \cos(x\Gamma t)] \cdot \left| \frac{q}{p} \right|$$

where

$$x = \frac{m_1 - m_2}{\Gamma}$$

$$y = \frac{\Gamma_1 - \Gamma_2}{2\Gamma}$$



MISURARE LE OSCILLAZIONI DEL D^0

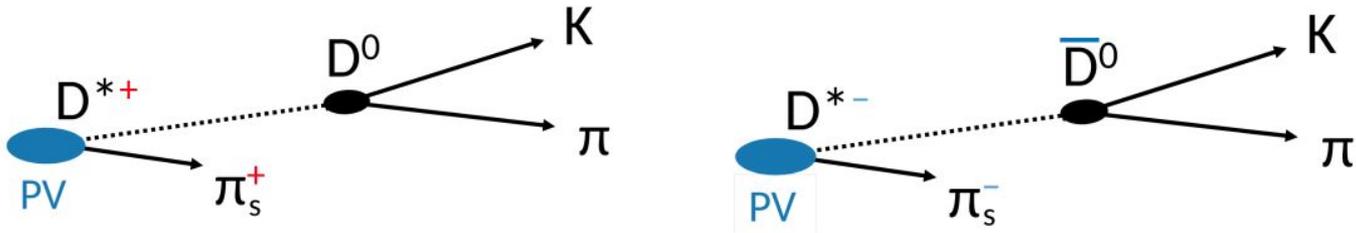
- Grandissime quantità di quark charm sono prodotte ad LHCb, ~ 1 MHz !
- I mesoni D^0 (stati legati di quark charm e up) vengono prodotti nei vertici primari delle collisioni protone-protone e percorrono qualche mm prima di decadere
- Un mesone D^0 ha un certa probabilità (molta bassa) di oscillare dallo stato di particella allo stato di antiparticella, sono detti flavour, diventando un \bar{D}^0 prima di decadere
- Per determinare se un D^0 ha oscillato bisogna quindi conoscerne il flavour al momento della produzione e del decadimento, questo procedimento è noto come flavour tagging

FLAVOUR TAGGING

- Per determinare il flavour dei mesoni D^0 al momento della loro produzione si sfrutta un “trucco”
- Al posto di studiare i D^0 prodotti direttamente nelle collisioni pp , si guardano i D^0 che sono prodotti di decadimento dei mesoni D^{*+}/D^{*-}
- Questo decadimento è (di fatti) istantaneo e conserva il flavour:

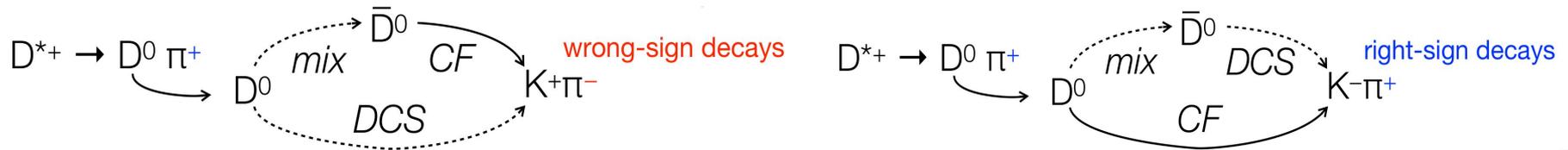
$$D^{*+} \rightarrow D^0 \pi^+ \text{ e } D^{*-} \rightarrow \bar{D}^0 \pi^-.$$

La carica del pione emesso insieme al D^0 ne determina univocamente il flavour



IL "MIO" CANALE DI DECADIMENTO: $D^0 \rightarrow K\pi$

- Capire il flavour del D^0 al momento del decadimento è più complicato! Non c'è un modo univoco ma esistono canali di decadimento che sono molto più probabili per il D^0 piuttosto che per il \bar{D}^0 , e viceversa
- Ad esempio il canale che studio io è $D^0 \rightarrow K\pi$:
 - la probabilità che $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$ o $\bar{D}^0 \rightarrow K^+ \pi^-$ è del 4%
 - la probabilità che $D^0 \rightarrow K^+ \pi^-$ o $\bar{D}^0 \rightarrow K^- \pi^+$ è 300 volte più piccola
- Si può distinguere tra decadimenti right-sign e wrong-sign:



MISURARE IL RAPPORTO WS/RS

- L'obiettivo dell'analisi è misurare il rapporto tra decadimenti di tipo wrong-sign e right-sign al variare del tempo di decadimento del D^0
- Dall'andamento di questo rapporto è possibile estrarre il valore di x e y per i mesoni D^0 (i parametri di mixing):

$$R(t) \simeq R_D + \sqrt{R_D} y' t / \tau_{D^0} + \frac{x'^2 + y'^2}{4} (t / \tau_{D^0})^2$$

- Si possono anche misurare separatamente i due rapporti:

$$R'^+(t) = \frac{\Gamma(D^0 \rightarrow K^+ \pi^-; t)}{\Gamma(\bar{D}^0 \rightarrow K^+ \pi^-; t)} \quad \text{e} \quad R'^-(t) = \frac{\Gamma(\bar{D}^0 \rightarrow K^- \pi^+; t)}{\Gamma(D^0 \rightarrow K^- \pi^+; t)}.$$

Una differenza tra i due sarebbe un segnale di violazione di CP!

TUTTO SEMPLICE, DOV'È L'INGHIPPO ?

- Grazie all'incredibile statistica di particelle con charm raccolta da LHCb nello scorso Run e in quello in corso, queste misure di mixing e violazione di CP, stanno raggiungendo velocemente livelli di precisione prima inesplorati
- Questo vuol dire che molti background che prima potevano essere trascurati ora iniziano ad essere rilevanti, molti altri non li si conosceva/aspettava nemmeno prima di imbattercisi
- In esperimenti di questa complessità ci sono moltissimi fattori da tenere in conto e errori sistematici di calibrazione/allineamento possono essere rilevanti

SVILUPPARE TECNOLOGIE DI
FAST-SIMULATION DEL CALORIMETRO

PERCHÈ LA FAST-SIMULATION DEL CALORIMETRO ?

- Nel Run 2 (2015-18) più del 75% della potenza di calcolo di LHCb è stata utilizzata per produrre eventi simulati
- Questo ha anche un impatto rilevante sul budget: per dare un'idea simulare 100M eventi ad LHCb costa $O(10k€)$
- Con l'aumentare della luminosità nel Run 3, l'aumento della potenza di calcolo non terrà più il passo con l'aumento di complessità computazionale
- La maggior parte del tempo CPU (~90%) è speso nella simulazione del passaggio delle particelle nel calorimetro (basato sulla libreria Geant4)

LA NOSTRA SOLUZIONE

- La geometria del calorimetro di LHCb è particolarmente semplice: con buona approssimazione un parallelepipedo uniforme
- Le caratteristiche principali degli sciami di particelle che si sviluppano al suo interno hanno pochi gradi di libertà
- L'idea è quella di creare una specie di look-up table: una grande libreria di tutti i possibili sciami, costruita in maniera furba sfruttando le “simmetrie” del problema



CURIOSITÀ?