

Ricerca del decadimento raro $K_S^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ a LHCb

Search for the $K_S^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ rare decay at LHCb

Candidato: Alessio Borgheresi
Relatore: Giacomo Graziani
Correlatore: Giovanni Passaleva

Abstract

Il Modello Standard (SM) ha mostrato di descrivere e predire i fenomeni studiati nella Fisica delle Alte Energie (HEP) in maniera eccellente, tuttavia vi sono alcune evidenze sperimentali che rimangono ancora non spiegate. Modelli di Nuova Fisica (NP) devono, quindi, essere sviluppati e testati in esperimenti di HEP presso acceleratori come il Large Hadron Collider (LHC). LHC fa collidere protoni ad un'energia nominale nel centro di massa di $\sqrt{s} = 14$ TeV ($\sqrt{s} = 7$ TeV nel 2011 e $\sqrt{s} = 8$ TeV nel 2012). Uno dei quattro principali rivelatori di LHC è LHCb, il cui programma di ricerca originariamente verteva sulla fisica dei quark b e c , focalizzandosi su processi di violazione di CP e nella ricerca di decadimenti rari, utilizzati per investigare contributi indiretti derivanti da NP nei diagrammi a loop.

Tra i processi di questo tipo dovuti a *flavour-changing neutral-current* (FCNC) il decadimento raro $K_S^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ emerge come un nuovo modo di sfruttare le eccellenti qualità di LHCb. Storicamente la mancata osservazione del decadimento $K_S^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ ha giocato un ruolo importante nella fisica delle particelle, in quanto ha ispirato il meccanismo GIM che predice la soppressione dei decadimenti di FCNC mediante l'introduzione di un nuovo quark, successivamente identificato come il quark c e ossevato con la scoperta del mesone J/ψ . L'ampiezza del decadimento $K_S^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ è ben predetta dal SM e un eventuale valore superiore a quello predetto da questo ($(5.1 \pm 1.5) \cdot 10^{-12}$) sarebbe un chiaro segnale di NP, mentre una mancata osservazione di tale aumento porterebbe notevoli limitazioni agli scenari di NP.

La ricerca del $K_S^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ è tuttora una sfida a LHCb perchè il rivelatore è ottimizzato per i mesoni B e, quindi, nel caso del K_S^0 risulta avere peggiori performance di ricostruzione e di trigger di cui l'analisi deve tener conto. Nonostante ciò, un'analisi del decadimento del $K_S^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ è già stata realizzata con il set di dati di LHCb del 2011 dando un limite superiore sulla frazione di decadimento di $\mathcal{B}(K_S^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) < 11.2(9.0) \cdot 10^{-9}$ con livello di confidenza del 95 (90) % che ha migliorato il precedente limite, stabilito a PS al CERN nel 1973, di circa un fattore 30.

In questa tesi è stato dato un contributo al miglioramento dell'analisi del $K_S^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ a LHCb, usando i dati acquisiti a LHCb nel 2012, corrispondenti a 2 fb^{-1} di luminosità integrata, e si è valutato il possibile miglioramento della sensibilità della misura. I miei contributi originali all'analisi hanno riguardato in particolare lo studio del trigger, lo sviluppo del Boosted Decision Tree (BDT) per ridurre il contributo del fondo combinatorio e l'ottimizzazione sulla richiesta di identificazione dei muoni necessaria a rigettare il fondo di eventi malidentificati $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ che contribuiscono alla regione di segnale solo con la coda della distribuzione grazie all'eccellente risoluzione sulla massa del K_S^0 , di circa $4 \text{ MeV}/c^2$, ottenuta ad LHCb. Inoltre, è stato sviluppato un metodo *data-driven* per permettere il *training* del BDT con dati reali, evitando l'uso della simulazione. Per evitare un possibile condizionamento sulla procedura di analisi, la regione di segnale non è stata presa in considerazione nell'intero lavoro di tesi.

Una stima preliminare del fondo atteso è ottenuta, dopo la riduzione del fondo combinatorio e della coda del $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$, tramite un fit nelle regioni adiacenti a quella del segnale, dal quale si ottiene un fondo atteso di pochi eventi, confrontabile al caso dei dati 2011. Questo risultato è stato raggiunto grazie al metodo *data-driven* sviluppato, al miglioramento dell'algoritmo di identificazione dei muoni e

all’ottimizzazione di quest’ultima. Dai risultati di questo lavoro è stato possibile predire che, in caso che nessun segnale sia osservato, il limite atteso sulla frazione di decadimento diminuirà di oltre un fattore 4 rispetto a quello attuale; questo grazie al raddoppio della luminosità integrata e soprattutto grazie al miglioramento dell’efficienza di trigger, la quale è stata misurata essere circa 2.5% in questa tesi (un fattore 3 in più rispetto al 2011).

Il risultato ottenuto dalla nuova analisi sulla luminosità integrata di 2 fb^{-1} acquisita da LHCb nel 2012, sarà pubblicata dalla collaborazione LHCb quando l’analisi sarà completa e approvata dopo la revisione interna di LHCb. Solo a questo punto gli eventi nella regione di segnale saranno contati e il risultato sulla frazione di decadimento pubblicato.

Abstract

The Standard Model (SM) has proven to be excellent in describing and predicting the phenomena studied in High Energy Physics (HEP), but there are some experimental evidences that are still not explained. New Physics (NP) models have been developed and they are tested in HEP experiments at accelerator such as the Large Hadron Collider (LHC). LHC collides protons almost head-on at a nominal center-of-mass energy of $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$ ($\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ during 2011 and $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ during 2012). One of the four main detectors at LHC is LHCb, with a physics programme originally focused on b and c quark physics, CP violating processes and rare decays, intended for indirect searches for NP as unexpected contribution arising in loop diagrams.

The flavour-changing neutral-current (FCNC) $K_S^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ decay is also a rare decay whose search has been proposed as a novel way to profit from the excellent performance of the LHCb detector. The non observation of the $K_S^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ decay played an historical role in particle physics, inspiring the GIM mechanism which predicts the suppression of FCNC decay with the introduction of a new quark, later identified as the c quark and observed with the discovery of the J/ψ meson. The $K_S^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ amplitude in the SM is well predicted and evidence of $K_S^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ well above the SM prediction ($(5.1 \pm 1.5) \cdot 10^{-12}$) would be a clear signal of NP, while the non observation of such enhancement will provide significant constraints on several consistent NP scenarios.

The search for $K_S^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ is challenging at LHCb because the LHCb detector is optimised for B mesons resulting, in the K_S^0 case, in a lower reconstruction and trigger performances that have to be taken in account. However, an analysis of the $K_S^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ decay was performed with the 2011 LHCb data set, yielding an upper limit $\mathcal{B}(K_S^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) < 11.2(9.0) \cdot 10^{-9}$ at 95 (90) % confidence level which improved the previous limit, set at the CERN PS in the 1973, by a factor of about 30.

In this thesis, a contribution to the upgrade $K_S^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ analysis at LHCb, using the not yet analyzed 2 fb^{-1} data acquired in 2012, has been given and the potential improvement of the search sensitivity has been estimated. My original contributions to the analysis included the trigger studies, for the development of the Boosted Decision Tree (BDT) to reduce the combinatorial background, and for the optimization of the muon identification requirement to reject the misidentified $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ events that contribute to the background in the signal region only through their tail in the invariant mass distribution, thanks to the excellent K_S^0 mass resolution of about $4 \text{ MeV}/c^2$ achieved by LHCb. A data-driven method to allow the training of the BDT in real data, avoiding the usage of the simulation, has been developed in this work of thesis. To avoid potential bias in the decisions taken in the analysis, the signal region ($[492, 504] \text{ MeV}/c^2$) was not considered for the entire work of thesis.

A preliminary estimation of the background expectation from a fit into the data mass sidebands after the rejection of the combinatorial background and the $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ tail is obtained and it is found to consist of a few events, as was the case in the 2011 result. This result is achieved thanks to the developed data-driven method, an improved muon identification algorithm, and the optimization of the muon identification requirement. From the results of this work it is possible to predict that, in case of no signal observation, a limit will be set that will likely overcome the current result by more than a factor 4, achieved thanks to the double integrated luminosity and, moreover, to the better trigger efficiency, measured in this thesis to be about 2.5% (a factor of about 3 larger than the 2011 case).

The result from this new analysis on the integrated luminosity of 2 fb^{-1} acquired by LHCb in the 2012, will be published by the LHCb Collaboration when the analysis will be completed and approved after a LHCb internal review. Only at that stage, events in the signal region will be counted and a result for the branching ratio will be given.