

Decadimenti rari di adroni con charm a LHCb

Davide Brundu

Università di Cagliari e INFN

IFAE 2018 - *Milano*



Sommario

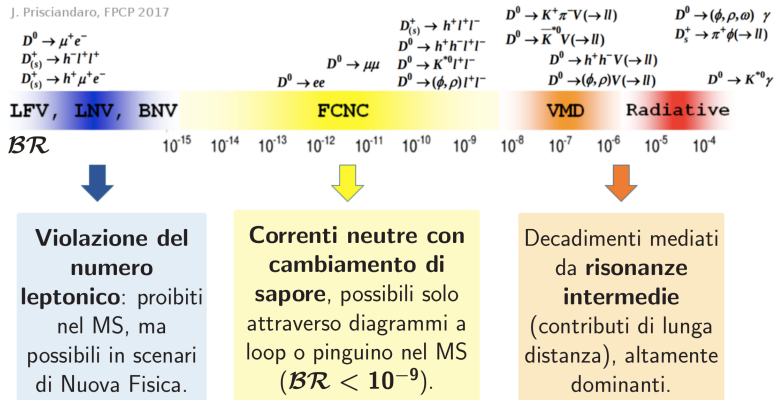
- Motivazioni Fisiche
- Stato attuale
 - $D^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$
 - $D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \rho^0 / \omega (\rightarrow \mu^+ \mu^-)$
 - $D^0 \rightarrow h^+ h^- \mu^+ \mu^-$
 - $D_{(s)}^\pm \rightarrow \pi^\pm \mu^+ \mu^-$ e $\Lambda_c \rightarrow p \mu^+ \mu^-$
 - Decadimenti con elettroni nello stato finale
- Conclusioni e prospettive

Perché studiare i decadimenti rari del charm?

- **Fisica del charm:** possibilità unica di sondare indirettamente Nuova Fisica nel settore dei quark-up (complementare ai sistemi K e B);
- **Ricerca indiretta di Nuova Fisica:** in processi altamente soppressi nel Modello Standard (MS), nuove particelle pesanti possono contribuire sensibilmente come particelle virtuali;
- Possibile aumento dei rapporti di diramazione, o modifica delle distribuzioni angolari.

Perché studiare i decadimenti rari del charm?

J. Prisciandaro, FPCP 2017



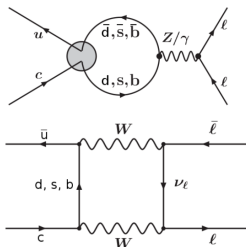
- Grande varietà di decadimenti;
- **LHCb** esperimento ideale: ottima identificazione delle particelle e risoluzione nel momento, ricostruzione dei vertici e misura dei tempi di vita. Vasto campione $N(c\bar{c}) \sim 8 \cdot 10^{12}$ (RunI+RunII);

Decadimenti rari del charm

- Si utilizzano teorie di campo effettive alla scala $\mu \sim m_{charm}$ (T.Mannel, EFT in Flavour Physics)

$$\mathcal{H} = -\frac{4G_F}{\sqrt{2}} \sum_i C_i(\mu) \mathcal{O}_i(\mu)$$

- Nuova Fisica ad una scala $\Lambda > \mu$ può modificare le condizioni iniziali sui coefficienti di Wilson $C_i(\Lambda)$;
- Contributi a lunga distanza possono nascondere o "diluire" tali effetti.
- Processi FCNC: vasta base di operatori (corrente-corrente, pinguino elettrodeboli e di QCD);
- Nei processi semi-leptonici, i C_i sono particolarmente sensibili a effetti di nuova fisica**, soprattutto nelle regioni a bassa $m(l^+l^-)$ [PRD 66, 014009 (2002)];
- Muoni nello stato finale: favorevoli dal punto di vista sperimentale.



Contributi leptonici
(pinguino EW e box)

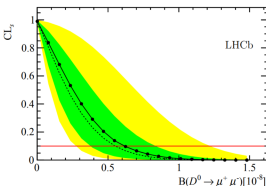
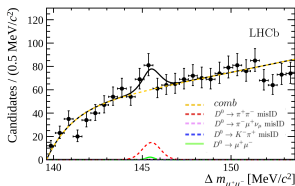
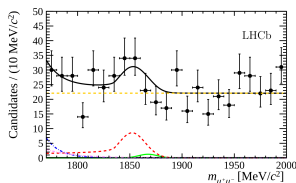
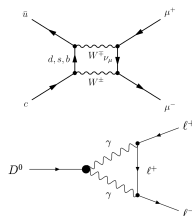
$$\mathcal{O}_7, \mathcal{O}_9, \mathcal{O}_{10}$$

Ricerca di $D^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$

[PLB 725 (2013) 15-24]

- Decadimento FCNC, con soppressione di elicità;
- Dominato da stati intermedi a due fotoni;
- Nel MS $\mathcal{B}_{LD}(D^0 \rightarrow \mu\mu) \sim 2.7 \cdot 10^{-5} \mathcal{B}(D^0 \rightarrow \gamma\gamma) \sim 2 \cdot 10^{-11}$ dal recente limite posto da Belle.

[PRD 66, 014009 (2002)], [PRD 93, 051102 (2016)]



- Miglior limite attuale di LHCb, con 1fb^{-1} :

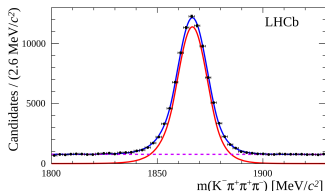
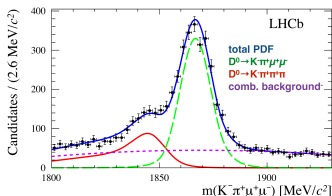
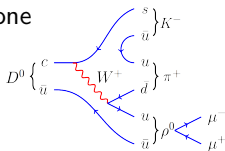
$$\mathcal{B}(D^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) < 6.2(7.6) \cdot 10^{-9} \text{ al } 90\% (95\%) \text{ C.L.}$$

- In corso l'aggiornamento dell'analisi con luminosità 3fb^{-1} .

Osservazione di $D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \rho^0 / \omega (\rightarrow \mu^+ \mu^-)$

[PLB 757 (2016) 558-567]

- Decadimento Cabibbo-favorito, ideale come normalizzazione per $D^0 \rightarrow h^+ h^- \mu^+ \mu^-$,
- Cercato in $m(\mu\mu) \in [675, 875] \text{ MeV}/c^2$,
- D^0 selezionati da $D^{*+} \rightarrow D^0 \pi_s^+$, normalizzazione $D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+ \pi^-$.



- Rapporto di diramazione misurato da LHCb, con luminosità 2fb^{-1} :

$$\mathcal{B}(D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \mu^+ \mu^-) = (4.17 \pm 0.12 \pm 0.40) \cdot 10^{-6}$$

- **Prima osservazione**, compatibile con il MS ($6.7 \cdot 10^{-6}$) [JHEP 04 (2013) 135]

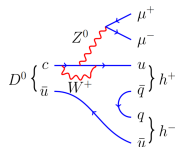
Osservazione di $D^0 \rightarrow h^+ h^- \mu^+ \mu^-$

[PRL 119 (2017) 181805]

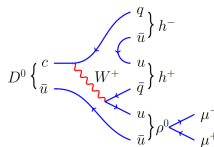
Decadimento Cabibbo-soppresso con contributi a lunga distanza dominanti.

Strategia di analisi:

- Campioni di dati del 2012 (2fb^{-1}),
- D^0 selezionati da $D^{*+} \rightarrow D^0 \pi_s^+$,
- Canale di normalizzazione: $D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \mu^+ \mu^-$,
- Misura del rapporto di diramazione in intervalli di $m(\mu\mu)$, sensibile ai contributi di corta distanza, lontano dalle risonanze dimuoniche.



Esempio di contributo a corta distanza (pinguino elettrodebole)



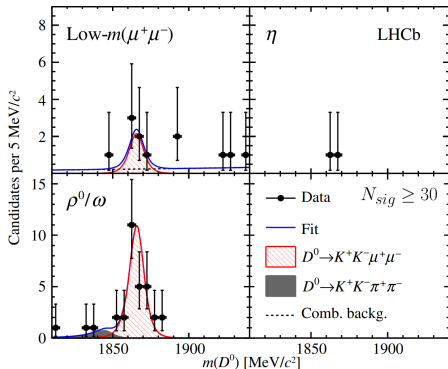
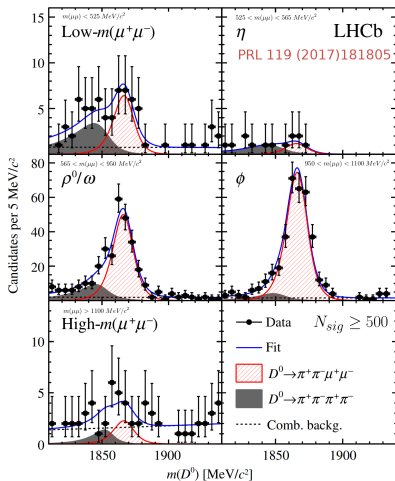
Esempio di contributo a lunga distanza con $\rho^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$

bin	bassa massa	η	ρ/ω	ϕ	alta massa
$m(\mu^+ \mu^-)$ [MeV/c ²]	< 525	525 – 565	565 – 950	950 – 1100	> 1100
$D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \mu^+ \mu^-$	✓	✓	✓	✓	✓
$D^0 \rightarrow K^+ K^- \mu^+ \mu^-$	✓	✓	✓		

Osservazione di $D^0 \rightarrow h^+ h^- \mu^+ \mu^-$

[PRL 119 (2017) 181805]

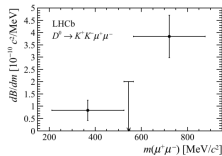
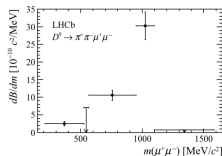
Interpolazione con il metodo della massima verosimiglianza per entrambi i canali.



Osservazione di $D^0 \rightarrow h^+ h^- \mu^+ \mu^-$

[PRL 119 (2017) 181805]

Misurato il rapporto di diramazione, totale e differenziale.



$D^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\mu^+\mu^-$		
$m(\mu^+\mu^-)$ region	[MeV/c ²]	\mathcal{B} [10 ⁻⁸]
Low mass	< 525	$7.8 \pm 1.9 \pm 0.5 \pm 0.8$
η	525-565	< 2.4 (2.8)
ρ^0/ω	565-950	$40.6 \pm 3.3 \pm 2.1 \pm 4.1$
ϕ	950-1100	$45.4 \pm 2.9 \pm 2.5 \pm 4.5$
High mass	> 1100	< 2.8 (3.3)
$D^0 \rightarrow K^+K^-\mu^+\mu^-$		
$m(\mu^+\mu^-)$ region	[MeV/c ²]	\mathcal{B} [10 ⁻⁸]
Low mass	< 525	$2.6 \pm 1.2 \pm 0.2 \pm 0.3$
η	525-565	< 0.7 (0.8)
ρ^0/ω	> 565	$12.0 \pm 2.3 \pm 0.7 \pm 1.2$

- Rapporti di diramazione totali:

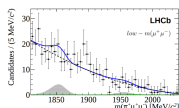
$$\mathcal{B}(D^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\mu^+\mu^-) = (9.64 \pm 0.48 \pm 0.51 \pm 0.97) \cdot 10^{-7}$$

$$\mathcal{B}(D^0 \rightarrow K^+K^-\mu^+\mu^-) = (1.54 \pm 0.27 \pm 0.09 \pm 0.16) \cdot 10^{-7}$$

- **Il più raro decadimento del charm osservato**, compatibile con il MS.
 $\mathcal{B}(D^0 \rightarrow \pi\pi\mu\mu) = 1.4 \cdot 10^{-6}$ e $\mathcal{B}(D^0 \rightarrow KK\mu\mu) = 1.1 \cdot 10^{-7}$ [JHEP 04(2013)135]
- **Prime misure di asimmetrie angolari e CP** in fase di finalizzazione.

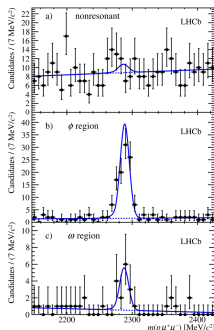
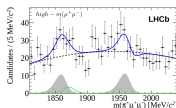
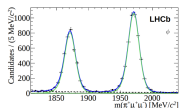
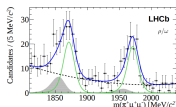
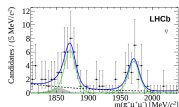
Ricerca di $D_{(s)}^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm} \mu^{+} \mu^{-}$ e $\Lambda_c \rightarrow p \mu^{+} \mu^{-}$

- Simile approccio: analisi in intervalli di $m(\mu\mu)$ per ricerca di contributi non risonanti; normalizzazione ai decadimenti contenenti $\phi \rightarrow \mu^{+} \mu^{-}$.



PLB 724 (2013) 203-212

— $D_{(s)}^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ \mu^-$
 ■ $D_{(s)}^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$
 ... comb



$$B(D_{(s)}^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm} \mu^{+} \mu^{-}) < 0.83(4.8) \cdot 10^{-7} \quad 95\% \text{ C.L.}$$

$$B(D_{(s)}^{\pm} \rightarrow \pi^{\mp} \mu^{\pm} \mu^{\pm}) < 0.25(1.4) \cdot 10^{-7} \quad 95\% \text{ C.L.}$$

$$B(\Lambda_c \rightarrow p \mu^{+} \mu^{-}) < 9.6 \cdot 10^{-8} \quad 95\% \text{ C.L.}$$

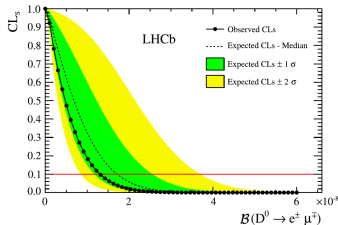
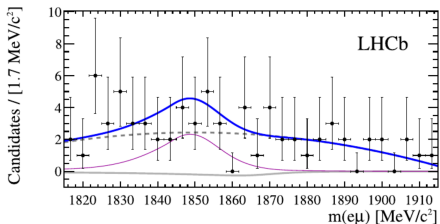
Decadimenti con elettroni nello stato finale

- Interessanti per indagare processi con **violazione del numero leptonico** (LFV) o l'**universalità leptonica** (LU), similmente al settore dei mesoni B, in $\mathcal{B}(D \rightarrow Xe^+e^-)/\mathcal{B}(D \rightarrow X\mu^+\mu^-)$
- Possibile ricerca anche dei decadimenti a 4 corpi $D^0 \rightarrow h^+h^-e^+e^-$, già indagati da BESIII, CLEO e E791. [[arXiv:1802.09752](#)],[[PRL 76 2147 \(1996\)](#)],[[PRL 86 3969 \(2001\)](#)]
- In fase di avvio la ricerca di $D^0 \rightarrow K^-\pi^+e^+e^-$.
- Efficienze di selezione e ricostruzione inferiori, maggiori incertezze sistematiche,
- Fondi esclusivi con errata identificazione $\pi \rightarrow e$ non trascurabili.

Ricerca del decadimento $D^0 \rightarrow e^\pm \mu^\mp$

[PLB 754 (2016) 167]

- Proibito nel MS, ma possibile in scenari di Nuova Fisica con $\mathcal{BR} \sim 10^{-14} - 10^{-6}$ [PRD 66 (2002) 014009]
- Ricerca con l'intero campione del Run 1 (3 fb^{-1}), normalizzazione a $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$



- Miglior limite attuale di LHCb:

$$\mathcal{B}(D^0 \rightarrow e^\pm \mu^\mp) < 1.6 \cdot 10^{-8} \quad 95\% \text{ C.L.}$$

Prospettive

- Misura dei rapporti di diramazione o miglioramento dei limiti ad essi;
- Possibilità di misurare asimmetrie (A_{FB} , A_{CP} , A_ϕ);
- Ricerca di decadimenti con elettroni nello stato finale (LFV e LU);
- Ricerca di decadimenti radiativi $D^0 \rightarrow \{\phi/\rho/K^*\}\gamma$, utili per sondare nuova fisica nella misura di A_{CP} . [JHEP 08 (2017) 091]
- Possibilità di analisi di ampiezza e angolari, promettenti per separare i contributi a lunga e corta distanza.

Decadimento	Run II	Upgrade
$D^0 \rightarrow hh'\mu^+\mu^-$	10^{-7}	10^{-8}
$D^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$	10^{-9}	10^{-10}
$D^+ \rightarrow \pi^+\mu^+\mu^-$	10^{-8}	10^{-9}
$D_s^+ \rightarrow K^+\mu^+\mu^-$	10^{-7}	10^{-8}
$\Lambda \rightarrow p\mu\mu$	10^{-7}	10^{-8}
$D^0 \rightarrow e\mu$	10^{-8}	10^{-9}

Limiti ai rapporti di diramazione
(non risonanti)

Decadimento	Run II	Upgrade
$D^+ \rightarrow \pi^+\mu^+\mu^-$	0.6%(30K eventi)	0.2%(300K eventi)
$D^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\mu^+\mu^-$	3%(1500 eventi)	1%(15K eventi)
$D^0 \rightarrow K^-\pi^+\mu^+\mu^-$	1%(10K eventi)	0.3%(100K eventi)
$D^0 \rightarrow K^+\pi^-\mu^+\mu^-$	40%(30 eventi)	12%(300 eventi)
$D^0 \rightarrow K^+K^-\mu^+\mu^-$	11%(150 eventi)	4%(1500 eventi)

Precisione statistica su A_{CP}

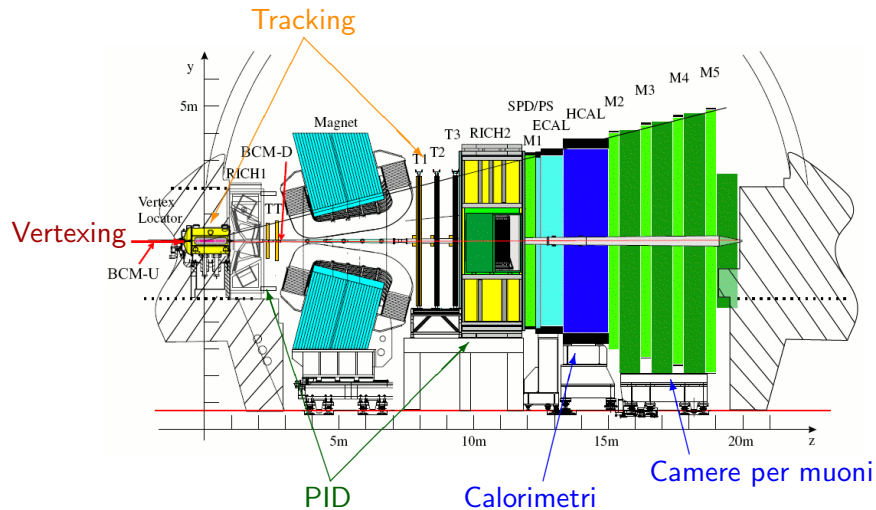
A. Contu
(BESIII/LHCb workshop)

Conclusioni

- I decadimenti rari del charm offrono un unico scenario per cercare effetti indiretti di Nuova Fisica;
- Gran parte delle misure sui rapporti di diramazione, o i loro limiti, sono risultati migliori al mondo;
- Ancora nessuna evidenza di effetti di Nuova Fisica;
- **Possibilità di nuove interessanti misure grazie ai dati del Run II e dell'upgrade dell'esperimento.**

Backup

LHCb



Decay mode	Bremsstrahlung	Direct emission (E)	Direct emission (M)
$D^0 \rightarrow K^- \pi^+ e^+ e^-$	$9.9 \cdot 10^{-6}$	$6.2 \cdot 10^{-6}$	$4.8 \cdot 10^{-7}$
$D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ e^-$	$5.3 \cdot 10^{-7}$	$1.3 \cdot 10^{-6}$	$1.3 \cdot 10^{-7}$
$D^0 \rightarrow K^+ K^- e^+ e^-$	$5.4 \cdot 10^{-7}$	$1.1 \cdot 10^{-7}$	$5.0 \cdot 10^{-9}$
$D^0 \rightarrow K^+ \pi^- e^+ e^-$	$3.7 \cdot 10^{-8}$	$1.7 \cdot 10^{-8}$	$1.3 \cdot 10^{-9}$
$D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \mu^+ \mu^-$	$8.6 \cdot 10^{-8}$	$6.2 \cdot 10^{-6}$	$4.8 \cdot 10^{-7}$
$D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \mu^+ \mu^-$	$5.6 \cdot 10^{-9}$	$1.3 \cdot 10^{-6}$	$1.3 \cdot 10^{-7}$
$D^0 \rightarrow K^+ K^- \mu^+ \mu^-$	$3.3 \cdot 10^{-9}$	$1.1 \cdot 10^{-7}$	$5.0 \cdot 10^{-9}$
$D^0 \rightarrow K^+ \pi^- \mu^+ \mu^-$	$3.3 \cdot 10^{-10}$	$1.7 \cdot 10^{-8}$	$1.3 \cdot 10^{-9}$

incertezze: 30% - 50%

branching ratio	$D^0 \rightarrow \rho^0 \gamma$	$D^0 \rightarrow \omega \gamma$	$D^+ \rightarrow \rho^+ \gamma$	$D_s \rightarrow K^{*+} \gamma$
two-loop QCD	$(0.14 - 2.0) \cdot 10^{-8}$	$(0.14 - 2.0) \cdot 10^{-8}$	$(0.75 - 1.0) \cdot 10^{-8}$	$(0.32 - 5.5) \cdot 10^{-8}$
HSI+WA	$(0.11 - 3.8) \cdot 10^{-6}$	$(0.078 - 5.2) \cdot 10^{-6}$	$(1.6 - 1.9) \cdot 10^{-4}$	$(1.0 - 1.4) \cdot 10^{-4}$
hybrid	$(0.041 - 1.17) \cdot 10^{-5}$	$(0.042 - 1.12) \cdot 10^{-5}$	$(0.017 - 2.33) \cdot 10^{-4}$	$(0.053 - 1.54) \cdot 10^{-4}$
[5, 6]	$(0.1 - 1) \cdot 10^{-5}$	$(0.1 - 0.9) \cdot 10^{-5}$	$(0.4 - 6.3) \cdot 10^{-5}$	$(1.2 - 5.1) \cdot 10^{-5}$
[8]	$(0.1 - 0.5) \cdot 10^{-5}$	$0.2 \cdot 10^{-5}$	$(2 - 6) \cdot 10^{-5}$	$(0.8 - 3) \cdot 10^{-5}$
[9] ^a	$3.8 \cdot 10^{-6}$	–	$4.6 \cdot 10^{-6}$	–
data [†]	$(1.77 \pm 0.31) \cdot 10^{-5}$	$< 2.4 \cdot 10^{-4}$	–	–

<https://arxiv.org/pdf/1701.06392.pdf>