

Ricerca del decadimento $\tau \rightarrow 3\mu$ nell'esperimento CMS

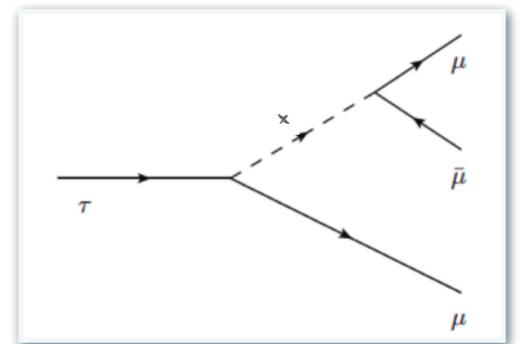
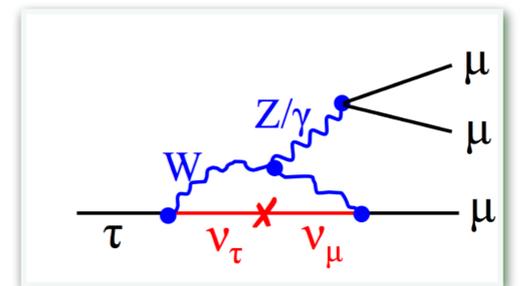
LUCA GUZZI

UNIVERSITÀ & INFN DI
MILANO BICOCCA

CASO DI FISICA

Violazione del sapore leptonic (*Lepton Flavour Violation*, LFV) soppressa all'interno del Modello Standard (MS)

- osservate **oscillazioni di neutrino**
 - possibile violazione del numero leptonic
 - *Branching Ratio* MS (BR) $\tau \rightarrow 3\mu \sim \mathcal{O}(10^{-14})$ [[arXiv:hep-ph/9810484](https://arxiv.org/abs/hep-ph/9810484)]



I decadimenti LFV sono ottimi canali di ricerca di **fisica oltre il MS**

Decadimento $\tau \rightarrow 3\mu$

- collisioni pp sono una ricca sorgente di leptoni τ
- canale ben identificabile grazie alla presenza di tre muoni nello stato finale
- alcuni modelli oltre il MS prevedono accoppiamenti favoriti alla terza famiglia

STATO DELL'ARTE

Ricerca $\tau \rightarrow 3\mu$ a **collider leptonici**

- esperimento **Belle** (KEKB), $BR(\tau \rightarrow 3\mu) < 2.1 \times 10^{-8}$ @ 90% di Confidence Level (CL) [[arXiv:1001.3221](https://arxiv.org/abs/1001.3221)]
 - miglior limite superiore ad oggi
- esperimento **BaBar** (SLAC), $BR(\tau \rightarrow 3\mu) < 3.3 \times 10^{-8}$ @ 90% di CL [[arXiv:1002.4550](https://arxiv.org/abs/1002.4550)]

Ricerca $\tau \rightarrow 3\mu$ a **collider adronici**

- esperimento **LHCb** (LHC), $BR(\tau \rightarrow 3\mu) < 4.6 \times 10^{-8}$ @ 90% di CL [[https://doi.org/10.1007/JHEP02\(2015\)121](https://doi.org/10.1007/JHEP02(2015)121)]
- esperimento **ATLAS** (LHC), $BR(\tau \rightarrow 3\mu) < 3.8 \times 10^{-7}$ @ 90% di CL [[arXiv:1601.03567](https://arxiv.org/abs/1601.03567)]

CANALI DI RICERCA A CMS

Possibile investigare sia produzione di *Heavy Flavour* (HF) ($D \rightarrow \tau\nu$, $B \rightarrow \tau\nu\dots$, $B \rightarrow D(\tau\nu)\dots$) sia di bosoni **W** ($W \rightarrow \tau\nu$)

Dati 2016 (Run II, pp @ 13 TeV): luminosità integrata **33 fb⁻¹**

- **Canale HF:** $\mathcal{O}(10^{12})$ leptoni τ prodotti
 - **$\sim 10^4$ eventi** $\tau \rightarrow 3\mu$ (assumendo limite di Belle)
 - eventi caratterizzati da basso momento trasverso e bassa energia trasversa mancante
- **Canale W:** $\mathcal{O}(10^9)$ leptoni τ prodotti
 - **~ 10 eventi** $\tau \rightarrow 3\mu$ (assumendo limite di Belle)
 - segnatura più forte degli eventi di segnale

Prima analisi $\tau \rightarrow 3\mu$ a CMS

- analisi nel canale HF [ref]
- analisi nel canale W (in approvazione)
- combinazione dei risultati

CANALI DI RICERCA A CMS

Possibile investigare sia produzione di *Heavy Flavour* (HF) ($D \rightarrow \tau\nu$, $B \rightarrow \tau\nu\dots$, $B \rightarrow D(\tau\nu)\dots$) sia di bosoni **W** ($W \rightarrow \tau\nu$)

Dati 2016 (Run II, pp @ 13 TeV): luminosità integrata **33 fb⁻¹**

- **Canale HF:** $\mathcal{O}(10^{12})$ leptoni τ prodotti
 - **$\sim 10^4$ eventi** $\tau \rightarrow 3\mu$ (assumendo limite di Belle)
 - eventi caratterizzati da basso momento trasverso e bassa energia trasversa mancante
- **Canale W:** $\mathcal{O}(10^9)$ leptoni τ prodotti
 - **~ 10 eventi** $\tau \rightarrow 3\mu$ (assumendo limite di Belle)
 - segnatura più forte degli eventi di segnale

Prima analisi $\tau \rightarrow 3\mu$ a CMS

- analisi nel canale HF [\[ref\]](#)
- analisi nel canale W (in approvazione)
- combinazione dei risultati

RICOSTRUZIONE DEGLI EVENTI

Online: **trigger di alto livello** (*High Level Trigger*, **HLT**) dedicato

- selezione di due muoni collimati provenienti dallo stesso vertice
- selezione di una traccia compatibile con il vertice di- μ

Offline: **ricostruzione degli eventi** $\tau \rightarrow 3\mu$ tra gli **oggetti** ricostruiti **offline**

- identificazione di tre muoni provenienti da vertice comune
 - accettazione cinematica: $p_T > 1 \text{ GeV}$, $|\eta| < 2.4$

Discriminazione segnale/fondo

- **discriminazione del segnale dal fondo** tramite tecniche multivariate (**MVA**)
- **addestramento** con eventi simulati (segnale) e dati esterni alla regione di segnale (fondo)

ANALISI MULTIVARIATA

Discriminazione di fondo e segnale affidata a **Boosted Decision Tree** (BDT)

- miglior efficienza rispetto ad un'analisi basata su una sequenza di tagli indipendenti
- sfruttate le **proprietà del segnale** per istruire il discriminatore
 - buon **vertice comune** dei tre muoni di segnale

- χ^2 del vertice
- distanza dal punto di interazione
- ...

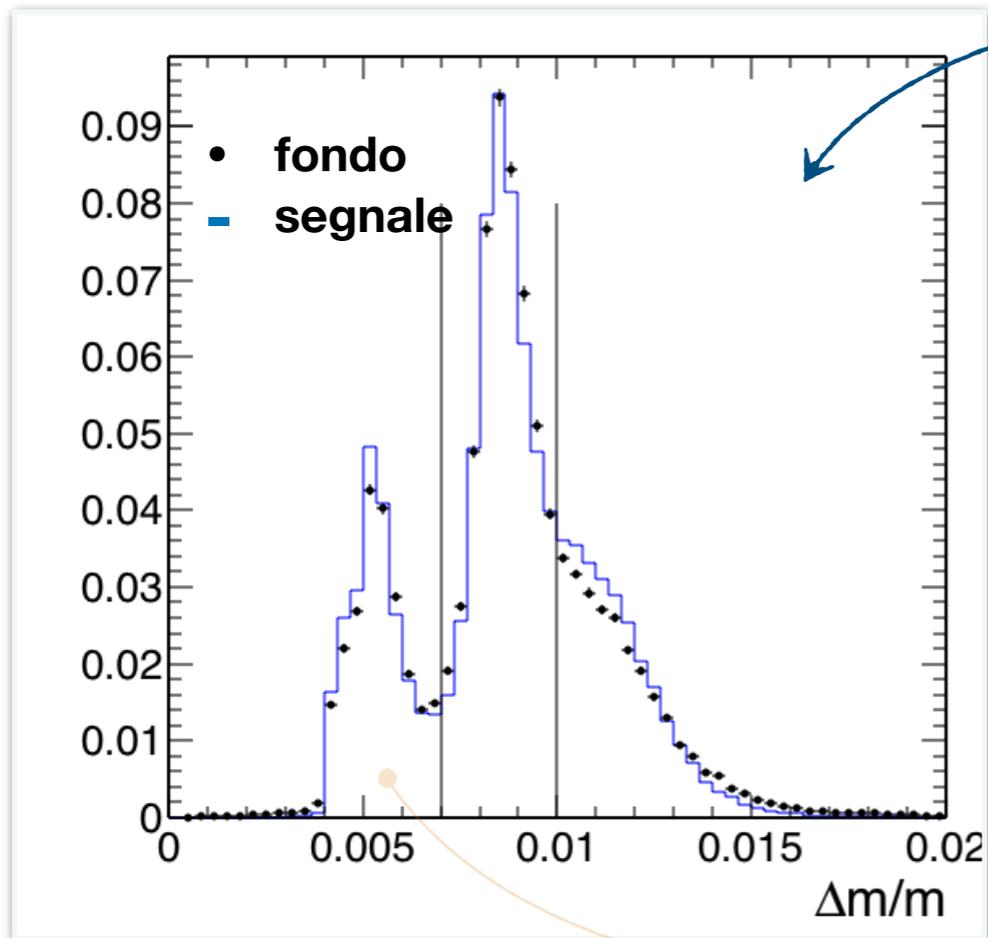
- qualità delle tracce ricostruite
- isolamento delle tracce
- ...

Eventi divisi in **categorie** in base alla risoluzione della massa del τ ricostruito

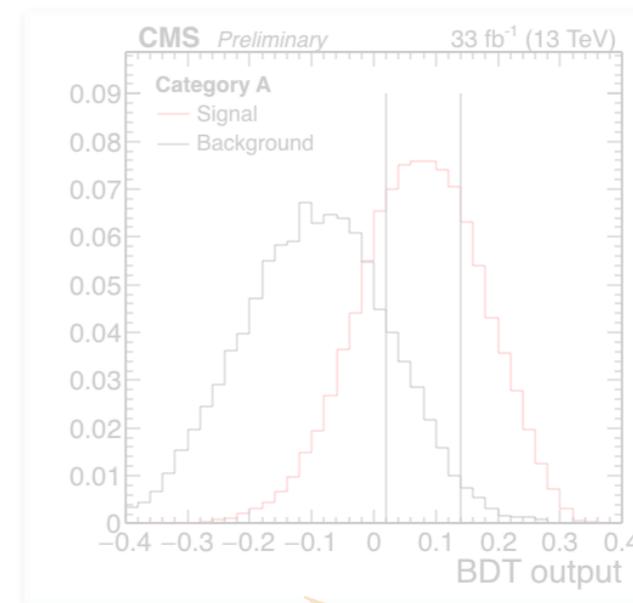
ANALISI HEAVY FLAVOUR

Eventi divisi in sei categorie per la stima del limite

- divisione in tre categorie in base alla **risoluzione in massa**



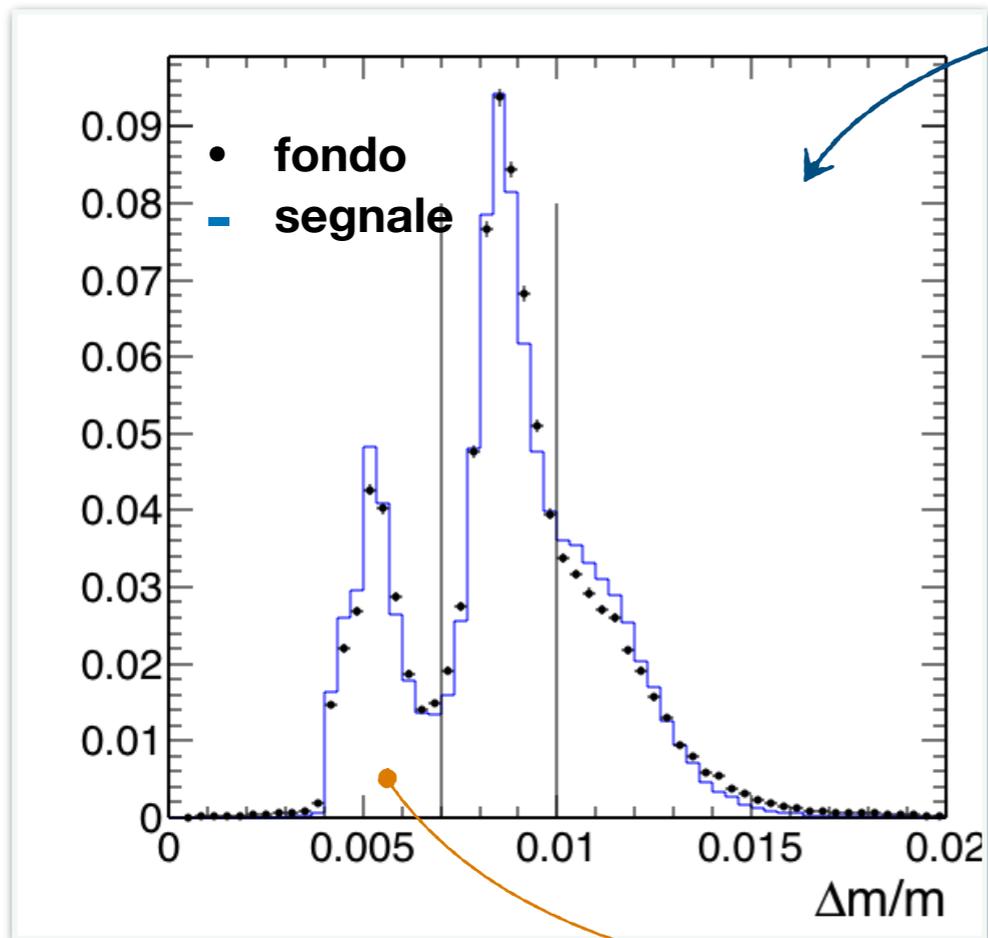
- Ulteriore divisione in tre sottocategorie in base all'**output BDT**



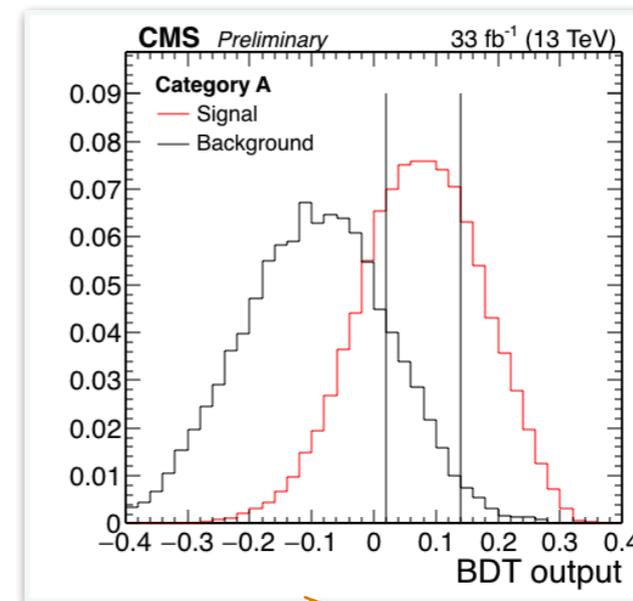
ANALISI HEAVY FLAVOUR

Eventi divisi in sei categorie per la stima del limite

- divisione in tre categorie in base alla **risoluzione in massa**



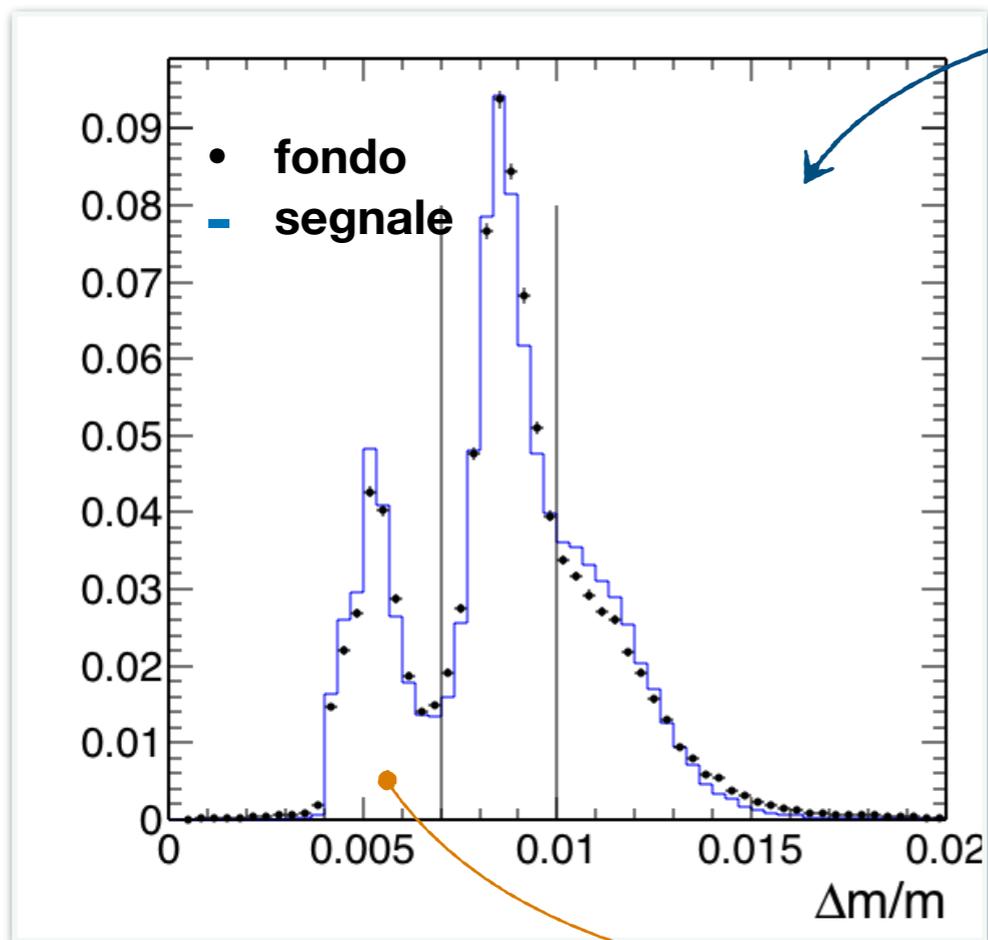
- Ulteriore divisione in tre sottocategorie in base all'**output BDT**



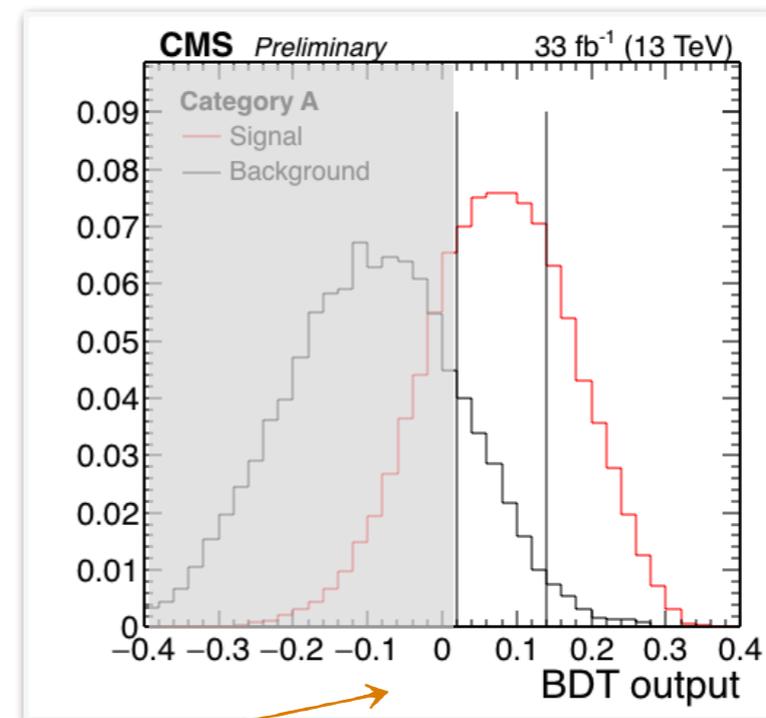
ANALISI HEAVY FLAVOUR

Eventi divisi in sei categorie per la stima del limite

- divisione in tre categorie in base alla **risoluzione in massa**



- Ulteriore divisione in tre sottocategorie in base all'**output BDT**



- **Taglio BDT** definito su ogni categoria

SISTEMATICHE

Diverse categorie di errore sistematico

- Relative alla **normalizzazione** dei campioni MC (15 %)
 - normalizzazione dei campioni $D_s \rightarrow \tau\nu$, $B \rightarrow \tau\nu$
 - valori *branching ratio* D , $B \rightarrow \tau\nu$, $D_s \rightarrow \phi(\mu\mu)\pi$
 - accettazione di segnale ed eventi $D_s \rightarrow \phi(\mu\mu)\pi$
- Efficienza **ricostruzione** muoni e pioni (3 %)
- Taglio **BDT** (5 %)
- Relative alla **forma funzionale** del segnale (2.6 %)
 - scala di massa
 - risoluzione in massa
- Relative alla forma funzionale del fondo (< 1 %)
 - esponenziale, polinomio di secondo o terzo grado

ESTRAZIONE DEL SEGNALE

Eventi di segnale ricavati da **fit maximum likelihood** alla distribuzione della massa

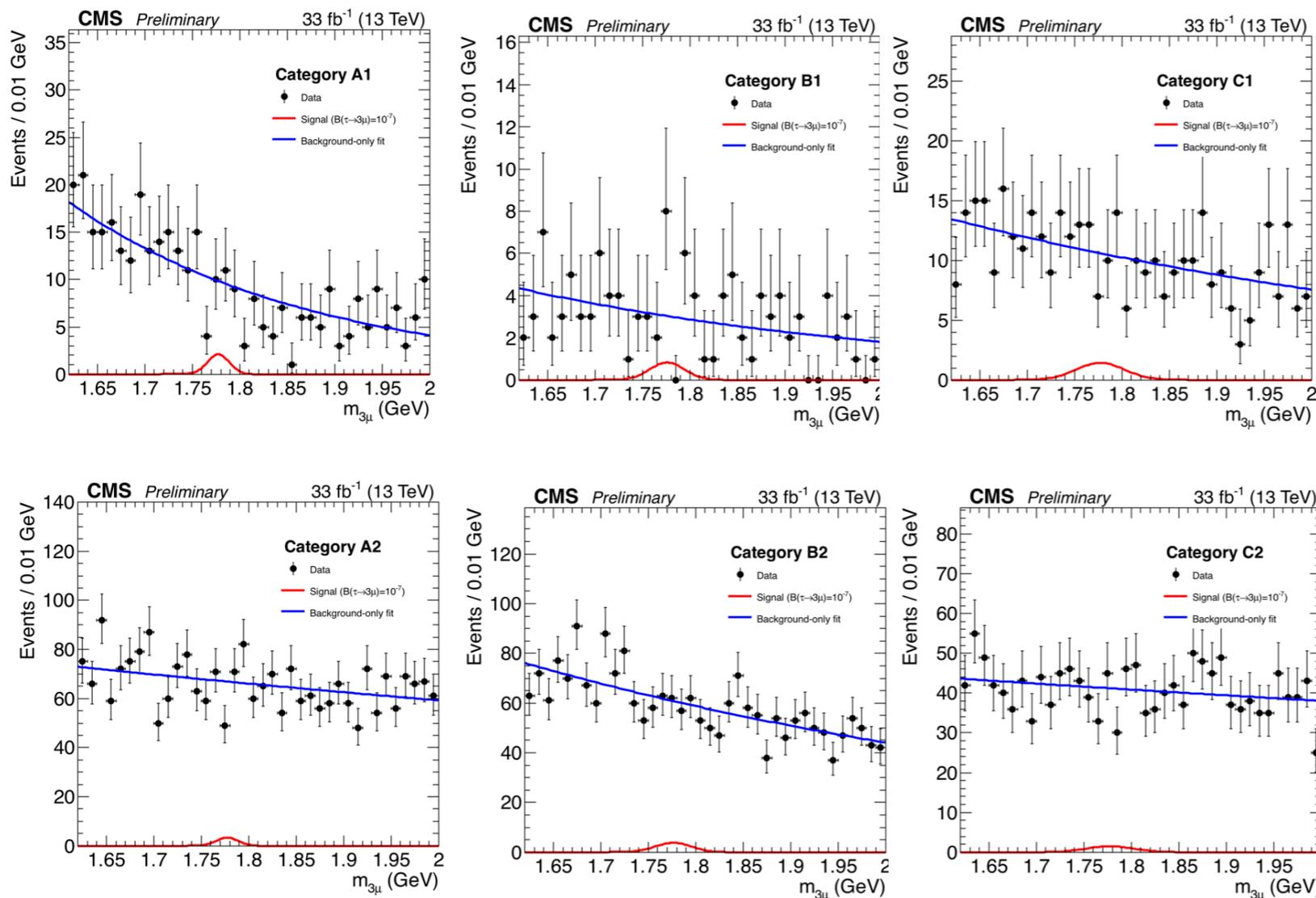
$\tau \rightarrow 3\mu$ ricostruita offline

- limite calcolato sulle **sei differenti categorie e combinato**
- segnale parametrizzato da MC con funzioni *Crystal Ball*
- ipotesi di background testate: esponenziale, polinomio (grado due e tre)

Incertezze sistematiche trattate come parametri di *nuisance* nel **profiled likelihood ratio**

RISULTATI NEL CANALE HEAVY FLAVOUR

Non è osservato **nessun eccesso di eventi di segnale** significativo



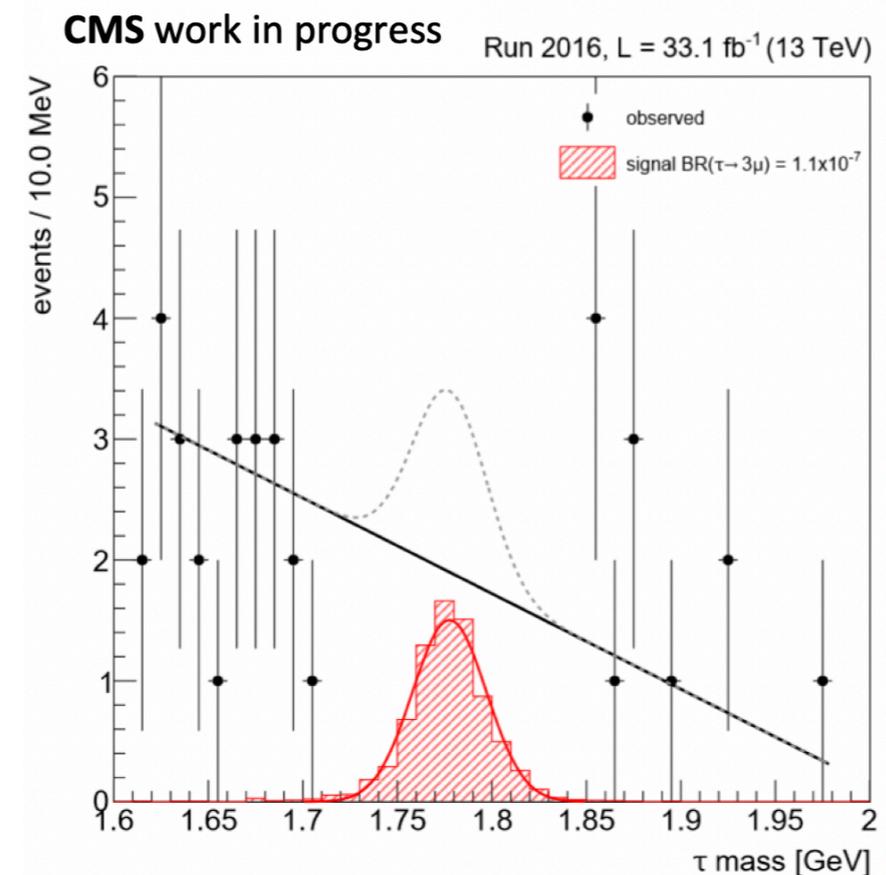
Ottenuto limite al *branching ratio* $\tau \rightarrow 3\mu$ pari a **8.8×10^{-8}** al **90% CL**

Ottenuto limite al *branching ratio* $\tau \rightarrow 3\mu$ pari a 1.1×10^{-7} al 95% CL

PREVISIONI NEL CANALE W

Canale $W \rightarrow \tau\nu, \tau \rightarrow 3\mu$

- Procedura di ricostruzione simile
- Utilizzo di tecniche multivariate
- Estrazione del limite analoga



Analisi ancora in corso, limite atteso 1.1×10^{-7} @ 90% CL

CONCLUSIONI E PROSPETTIVE

- Prima analisi di CMS $\tau \rightarrow 3\mu$ sui dati 2016 (33 fb⁻¹)
 - **limite ottenuto 8.8×10^{-8} nel canale HF** (4 volte il limite di Belle)
 - **Limite atteso** canale complementare **W 1.1×10^{-7}**
 - Prevista combinazione dei risultati
 - Prospettive con dati 2017-2018
 - x3 statistica (108 fb⁻¹)
 - nuovo trigger per canale W (guadagno ~60% accettazione) e HF (guadagno ~30% accettazione)
- finestra di opportunità per CMS di ottenere un limite a BR($\tau \rightarrow 3\mu$) competitivo prima che Belle II presenti nuovi risultati

Grazie per
l'attenzione

Backup

PROSPETTIVE PER FASE II

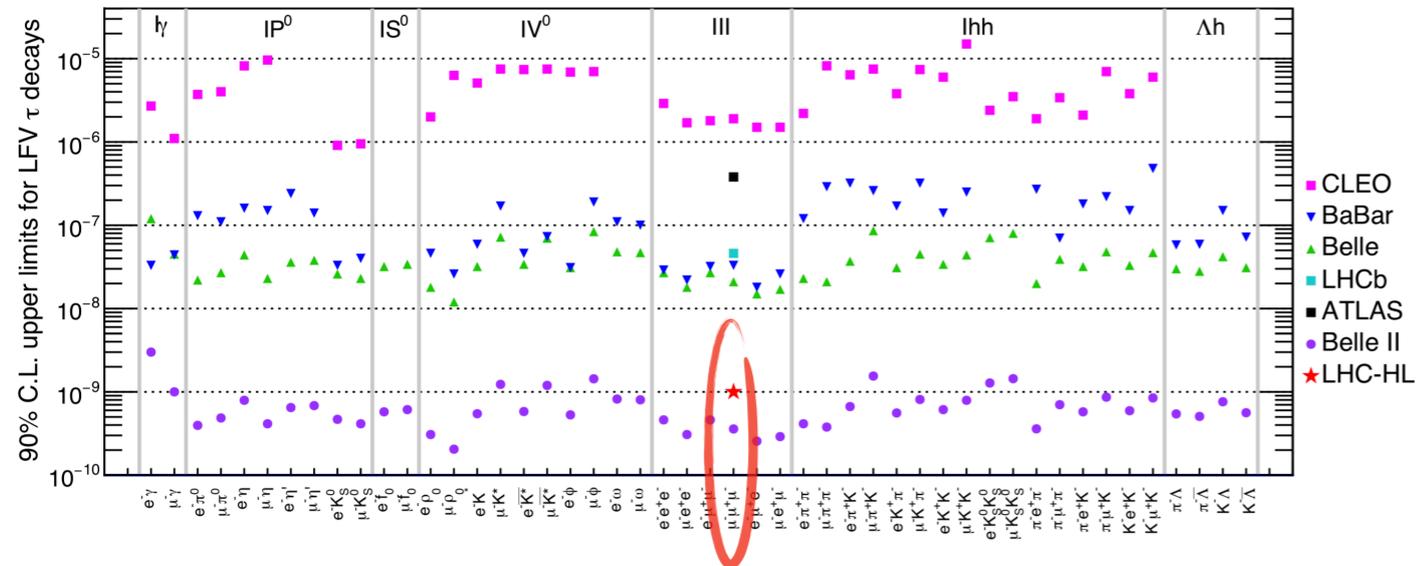


Fig. 35: Bounds on Tau Lepton Flavour Data from the existing experiments are compiled by HFLAV [197]; projections of the Belle-II bounds were performed by the Belle-II collaboration assuming 50 ab^{-1} of integrated luminosity [196].

Table 25: (Top) The expected numbers of signal and background events in the mass window 1.55 -2.0 GeV for CMS. An integrated luminosity of 3000 fb^{-1} and a signal $\mathcal{B}(\tau \rightarrow 3\mu) = 2 \times 10^{-8}$ is assumed. (Bottom) The search sensitivities for the combined categories.

	Category 1	Category 2
Number of background events	2.4×10^6	2.6×10^6
Number of signal events	4580	3640
Trimuon mass resolution	18 MeV	31 MeV
$\mathcal{B}(\tau \rightarrow 3\mu)$ limit per event category	4.3×10^{-9}	7.0×10^{-9}
$\mathcal{B}(\tau \rightarrow 3\mu)$ 90% C.L. limit	3.7×10^{-9}	
$\mathcal{B}(\tau \rightarrow 3\mu)$ for 3- σ evidence	6.7×10^{-9}	
$\mathcal{B}(\tau \rightarrow 3\mu)$ for 5- σ observation	1.1×10^{-8}	

[arXiv:1812.07638](https://arxiv.org/abs/1812.07638)

Eventi di segnale

Process	number of τ leptons ($L=33 \text{ fb}^{-1}$)
$pp \rightarrow c \bar{c} + \dots$ $D \rightarrow \tau \nu$	4.0×10^{12} (95% D_s , 5% D^\pm)
$pp \rightarrow b \bar{b} + \dots$ $B \rightarrow \tau \nu + \dots$ $B \rightarrow D(\tau \nu) + \dots$	1.5×10^{12} (44% B^\pm , 45% B^0 , 11% B_s^0 , 0% B_c^\pm) 6.3×10^{11} (98% D_s , 2% D^\pm)
$pp \rightarrow W + \dots \rightarrow \tau \nu + \dots$	6.7×10^8
$pp \rightarrow Z + \dots \rightarrow \tau \tau + \dots$	1.3×10^8 ($60 < m(\tau\tau) < 120 \text{ GeV}$)

	Signal		Data
	$D_s \rightarrow \tau \nu$	$B^\pm/B^0 \rightarrow \tau \dots$	
Produced in pp collisions (with three muons in fiducial volume)	4.4×10^5 (6.6×10^3)	1.5×10^5 (2.3×10^3)	
L1/HLT trigger	214	114	
At least 3 global muons ($p_T > 2 \text{ GeV}$)	88	47	1.0×10^7
Trimuon candidate selection	64	29	1.0×10^5

Process	Branching ratio	Reference
$D_s \rightarrow \tau \nu$	$5.48 \pm 0.23\%$	PDG [13]
$B^+ \rightarrow \tau + \nu + D^{0(*)}$	$2.7 \pm 0.3\%$	PDG [13]
Other $B^+ \rightarrow \tau + X$ decays	0.7%	PYTHIA [6]
$B^0 \rightarrow \tau + \nu + D^{+(*)}$	$2.7 \pm 0.3\%$	PDG [13]
Other $B^0 \rightarrow \tau + X$ decays	0.7%	PYTHIA [6]
$B^+ \rightarrow D_s + X$	$9.0 \pm 1.5\%$	PDG [13]
$B^0 \rightarrow D_s + X$	$10.3 \pm 2.1\%$	PDG [13]
$D_s \rightarrow \phi(\mu\mu)\pi$	$1.3(\pm 0.1) \times 10^{-5}$	PDG [13]

Tabella delle sistematiche

Source of uncertainty	Yield	Shape
Uncertainty on D_s normalization [10%]	10%	
Relative uncertainty in $\mathcal{B}(D_s \rightarrow \tau\nu)$ [4%]	3%	
Relative uncertainty in $\mathcal{B}(D_s \rightarrow \phi\pi \rightarrow \mu\mu\pi)$ [8%]	8%	
Relative uncertainty in $\mathcal{B}(B \rightarrow D_s + \dots)$ [16%]	5%	
Relative uncertainty in $\mathcal{B}(B \rightarrow \tau + \dots)$ [11%]	3%	
Uncertainty in f (B/D ratio) [11%]	3%	
Uncertainty on D^+ as a source of τ [100%]	3%	
Uncertainty on B_s as a source of τ [100%]	4%	
Uncertainty in number of events triggered by trimuon trigger [8%]	2%	
Uncertainty in the ratio of acceptances $\mathcal{A}_{\text{sig}} / \mathcal{A}_{2\mu\pi}$ [1%]	1%	
Muon reconstruction efficiency [1.5%]	1.5%	
Charged pion reconstruction efficiency [2.3%]	2.3%	
BDT cut efficiency [5%]	5%	
Mass scale uncertainty [0.07%]	–	yes
Mass resolution uncertainty [2.5%]	–	yes

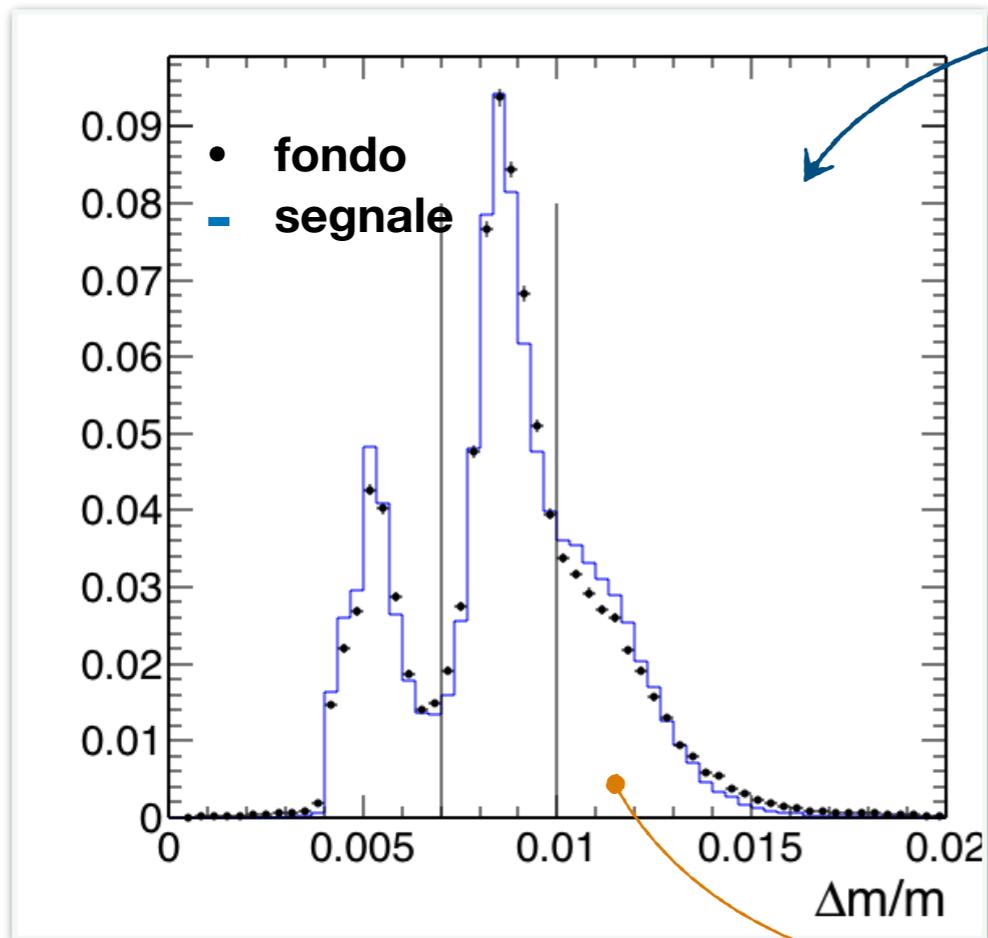
Limite osservato per categoria

	Signal		Data	
	sub-category 1	sub-category 2	sub-category 1	sub-category 2
Category A	6.3	10.3	360(44)	2502(319)
Category B	3.9	18.5	110(27)	2229(449)
Category C	9.4	9.6	389(107)	1549(400)

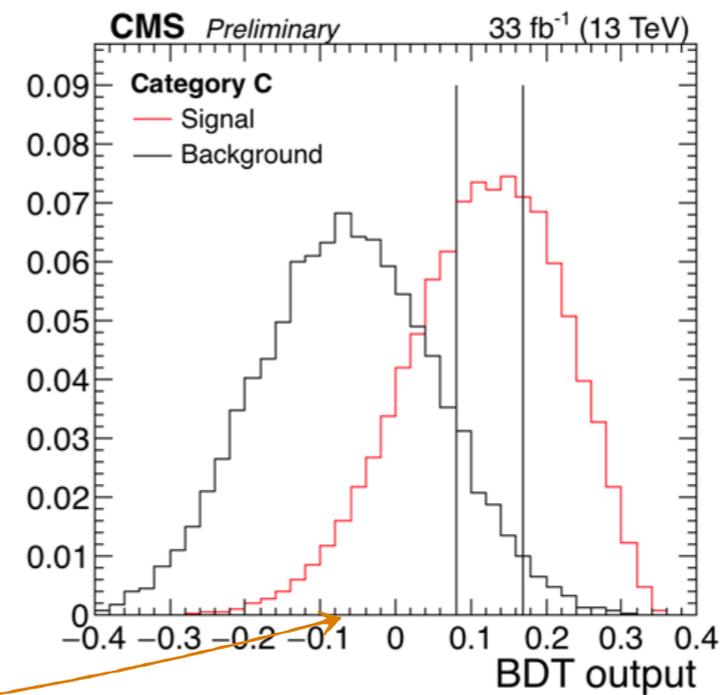
ANALISI HEAVY FLAVOUR

Eventi divisi in sei categorie per la stima del limite

- divisione in tre categorie in base alla **risoluzione in massa**



- Ulteriore divisione in tre sottocategorie in base all'**output BDT**



Profiled likelihood

$$q_{\mu} = -2 \ln \frac{\mathcal{L}(\text{obs} | \mu \cdot s + b, \hat{\theta}_{\mu})}{\mathcal{L}(\text{obs} | \hat{\mu} \cdot s + b, \hat{\theta})}$$

strength parameter (p.o.i.)

stima ML dei NP per valore μ

valori che massimizzano la likelihood