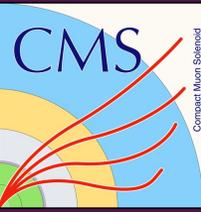


**IFAE 2025**  
**Incontri di Fisica delle Alte Energie**  
**Cagliari, 9-11 Aprile 2025**

# **Violazione del sapore leptonic e della sua universalità in decadimenti da adroni B a CMS**

Felice Nenna<sup>1</sup> per la collaborazione CMS

<sup>1</sup>Università di Padova e INFN Bari

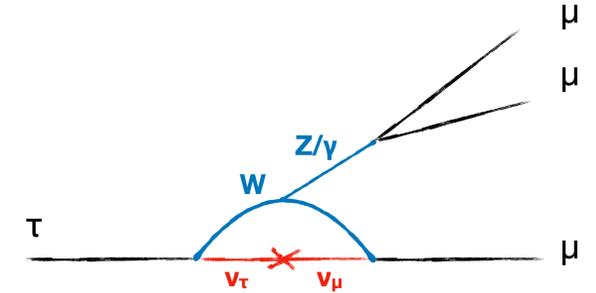


# Violazioni del sapore leptonic

## Lepton Flavor Violation (LFV)

Nel **Modello Standard** non ci sono simmetrie che precludano la possibilità di LFV:

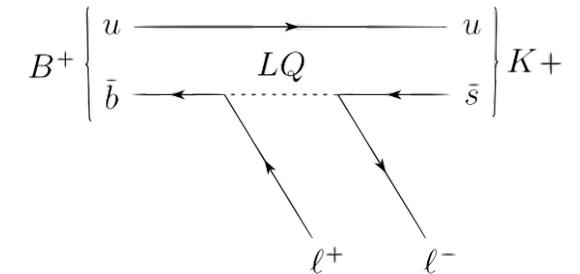
- ❖ Oscillazioni di neutrini  $\rightarrow \mathcal{B} \sim 10^{-55}$
- ❖ Estensioni del modello standard  $\rightarrow \mathcal{B} \sim 10^{-8}$



## Lepton Flavor Universality Violation (LFUV)

Nel settore di gauge del Modello Standard il sapore leptonic è universale:

- ❖ Gli accoppiamenti delle tre famiglie leptoniche con i bosoni W, Z e  $\gamma$  sono uguali
- ❖ Violazioni dell'universalità  $\rightarrow$  prova di Nuova Fisica



Teorie BSM predicono LFV con rate **accessibili negli esperimenti odierni!**

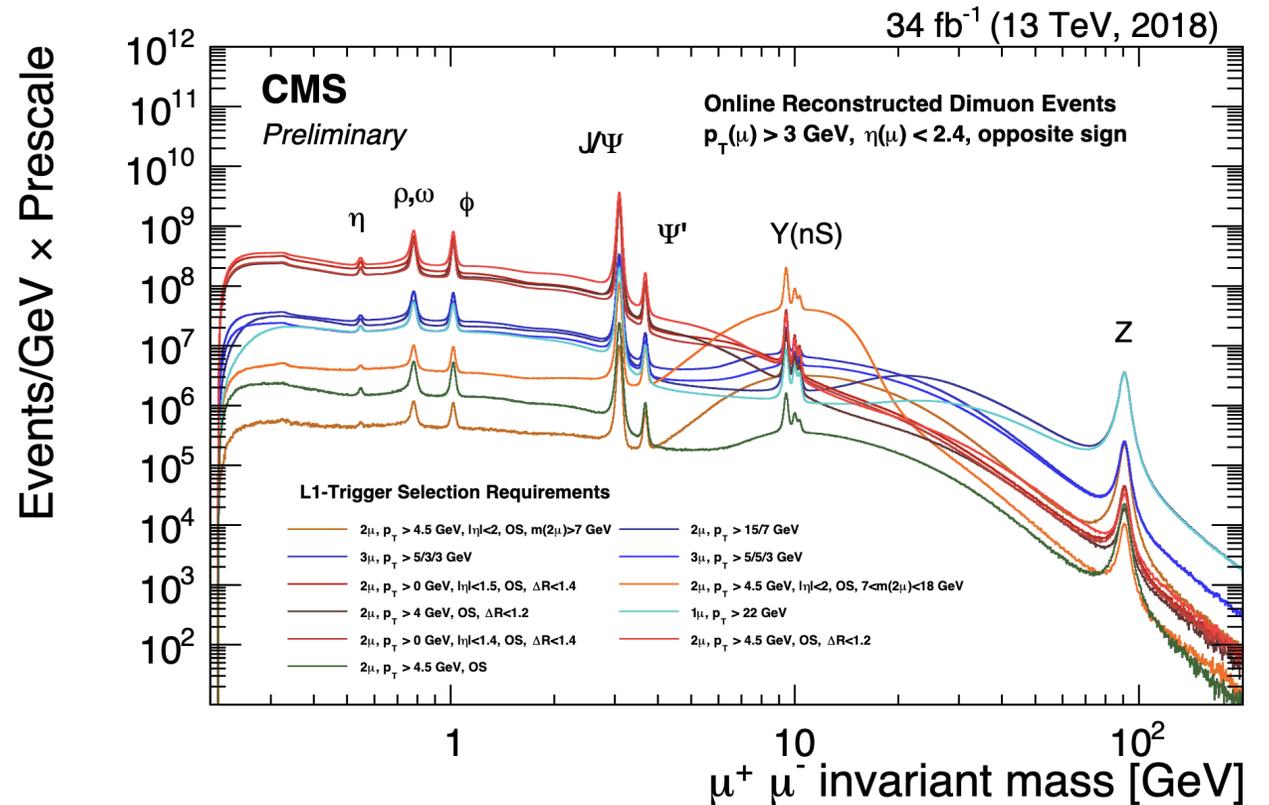
Per questo motivo lo studio della Fisica dei sapori pesanti rappresenta un terreno fertile per investigare le frontiere oltre il modello standard

# Principali canali di interesse per LFV e LFUV

L'esperimento CMS può investigare una moltitudine di scenari oltre il Modello Standard (BSM).

Nonostante sia un detector «general purpose», diverse strategie a livello di **trigger** e **ricostruzione** sono state adottate per rendere possibili misure di LFV e LFUV anche nel settore di Fisica degli adroni B

Range di fisica accessibile a CMS



# Ricerca del decadimento $\tau \rightarrow 3\mu$ a CMS

Si tratta del **golden channel** per la LFV a LHC:

- ❖ Stato finale **completamente ricostruito**
- ❖ Segnatura sperimentale **pulita**
- ❖ **Abbondante** produzione di  $\tau$  a LHC ( $\sim 0(10^{11})$  per  $\text{fb}^{-1}$ )

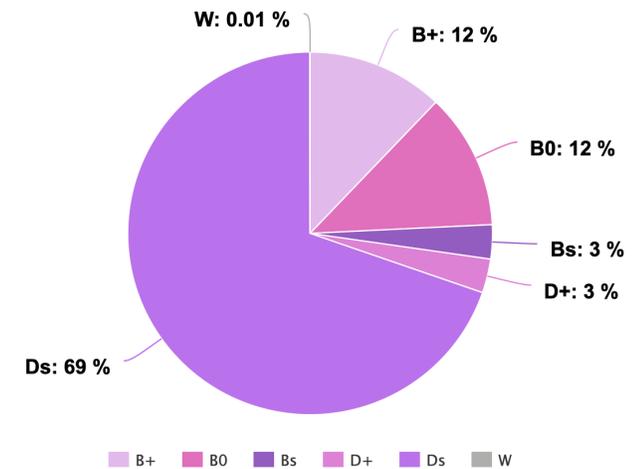
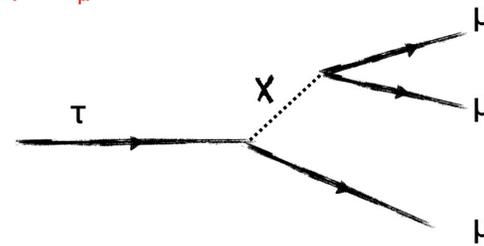
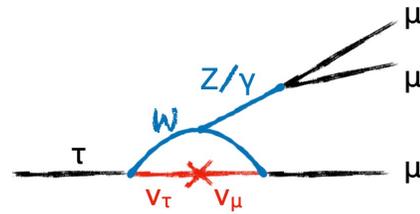
Sorgenti di leptoni  $\tau$  a LHC:

- **Principale:** decadimenti di mesoni pesanti
- 0.01% è prodotto da decadimenti di W



La differenza tra HF e W è di un fattore 10

**CMS esplora entrambi i settori!**

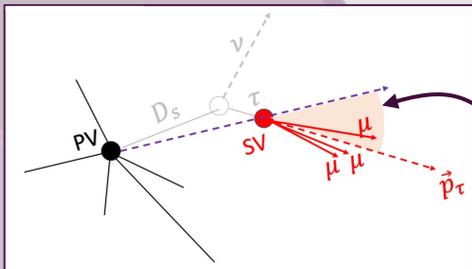


Year	Collab.	Process	Data	Exp.*	Obs.*
<a href="#">2010</a>	Belle	$ee \rightarrow \tau\tau$	782 $\text{fb}^{-1}$	-	2.1
<a href="#">2010</a>	BaBar	$ee \rightarrow \tau\tau$	468 $\text{fb}^{-1}$	4.0	3.3
<a href="#">2014</a>	LHCb	$D/B \rightarrow \tau X$	3.0 $\text{fb}^{-1}$ (pp 7-8 TeV)	5.0	4.6
<a href="#">2016</a>	ATLAS	$W \rightarrow \tau\nu$	20.3 $\text{fb}^{-1}$ (pp 8 TeV)	39	38
<a href="#">2023</a>	CMS	$D/B$ and W	131 $\text{fb}^{-1}$ (pp 13 TeV)	2.4	2.9
<a href="#">2024</a>	Belle II	$ee \rightarrow \tau\tau$	424 $\text{fb}^{-1}$	-	1.9

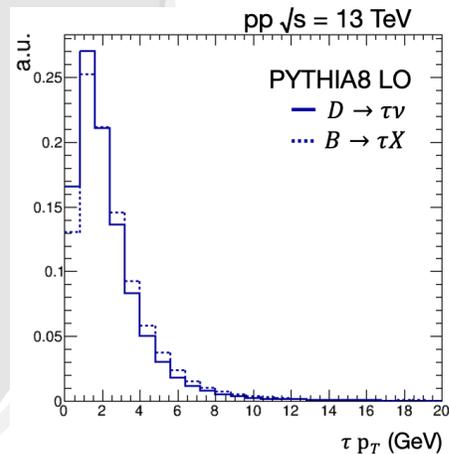
[\*]  $\times 10^{-8}$  @ 90% C.L.

# Ricostruzione

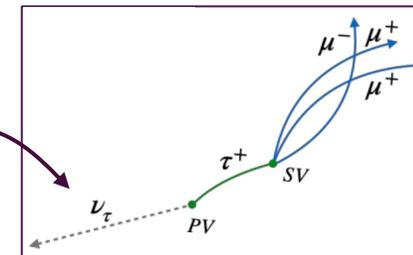
## CANALE HF



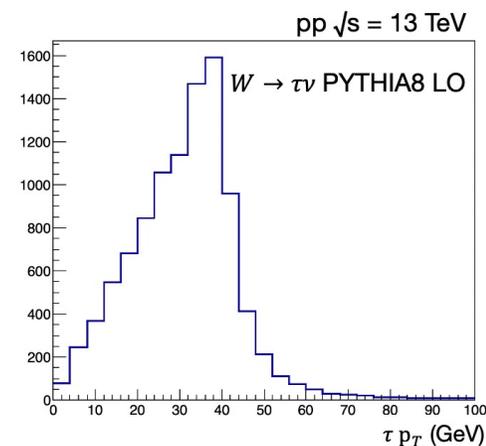
- Leptoni di **bassa energia** nello stato finale
- Piccolo *pointing angle*



## CANALE W



- Leptoni di **alta energia** nello stato finale
- *Missing energy* del neutrino

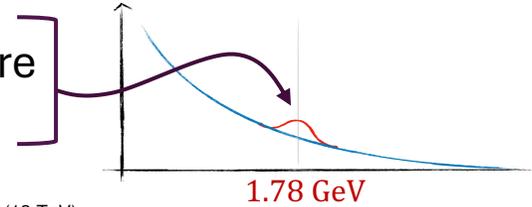


Comune

- *SV displaced* formato da 3 muoni
- Tracce isolate dall'attività adronica
- Carica totale  $\pm 1$

# Strategia di analisi

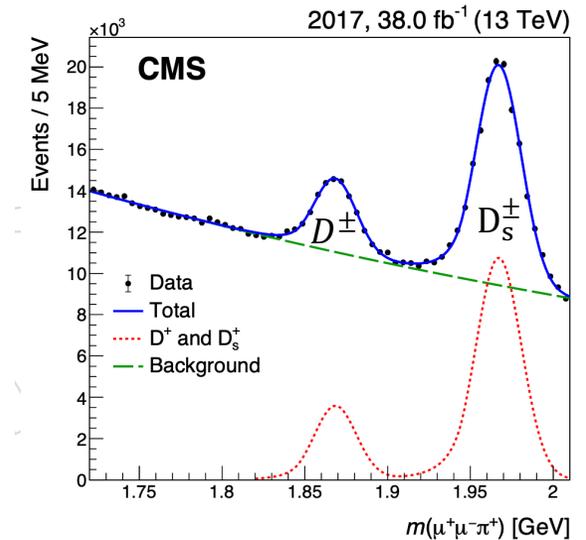
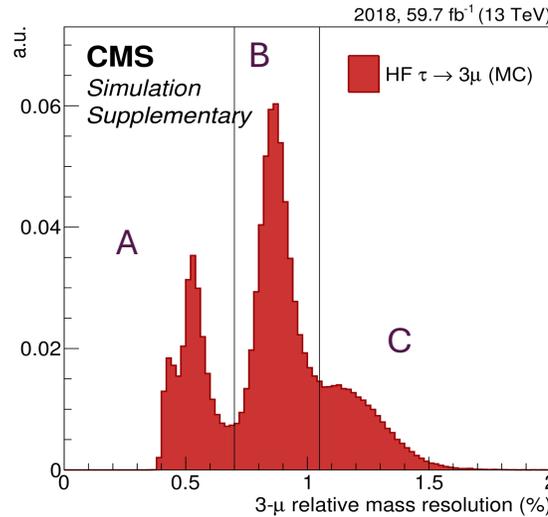
Cerchiamo un **picco** nella distribuzione di **massa** del sistema di tre muoni nel range di segnale [1.6, 2.0] GeV



La contaminazione dal fondo dipende dalla risoluzione di massa

→ **3 categorie** con risoluzione crescente:

- A. ~ Barrel
- B. ~ Overlap
- C. ~ Endcap



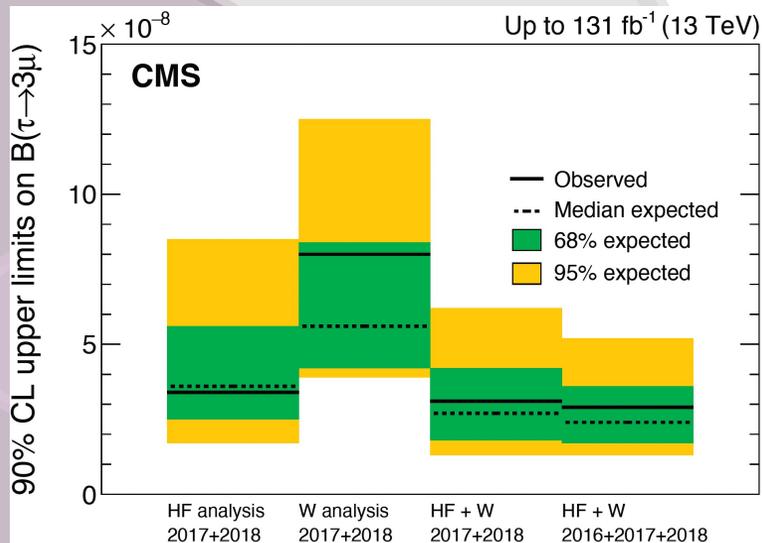
Si utilizzano **due BDT**:

1. Addestrato su MC per distinguere muoni genuini da muoni da decadimenti in volo
2. Distingue muoni di segnale da muoni di fondo, addestrato su MC (per segnale) e dati dalla SB (per fondo)

Canale di **controllo**  $D_s \rightarrow \phi(\rightarrow \mu\mu)\pi$  :

- Validare variabili di input del BDT
- **Normalizzazione** ← Solo HF
- Sistematiche del BDT
- Differenze dati/MC

# Risultati e proiezioni



## Risultati dell'analisi (vs exp.) 2017-2018:

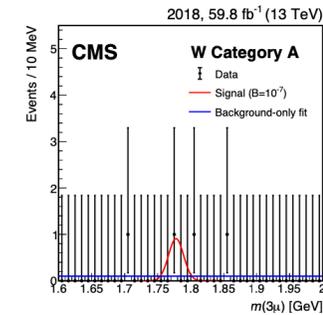
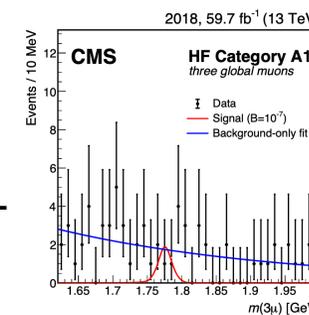
➤ **Canale HF:**  $3.4 \times 10^{-8}$  ( $3.6 \times 10^{-8}$ ) 90% CL

➤ **Canale W:**  $8.0 \times 10^{-8}$  ( $5.6 \times 10^{-8}$ ) 90% CL

+ 2016\* → **Full Run 2:**  $2.9 \times 10^{-8}$  ( $2.4 \times 10^{-8}$ ) 90% CL

Dominati dall'incertezza statistica!

[PLB 853 \(2024\) 138633](#)



Proiezioni ESPP

[CMS-NOTE-2025-004](#)

HL-LHC:  $\int L = 2 - 3 \text{ ab}^{-1}$  e  $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$

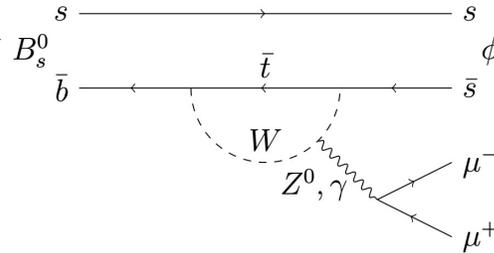
➔ Riscalando Run 2

Lumi.	Canale	$\pm 1\sigma (\times 10^{-9})$
$2 \text{ ab}^{-1}$	HF	5.2 – 11.3
	W	4.4 – 10.1
	Combinato	3.3 – 7.2
$3 \text{ ab}^{-1}$	HF	4.2 – 9.2
	W	3.5 – 8.0
	Combinato	2.7 – 5.8

\* [doi:10.1007/JHEP01\(2021\)163](https://doi.org/10.1007/JHEP01(2021)163)

# R(K) overview

- $b \rightarrow sll$**
- $R(H_s) = \frac{\mathcal{B}(H_b \rightarrow H_s \mu \mu)}{\mathcal{B}(H_b \rightarrow H_s ee)}$
  - BR basso (loop level)



Focus sul rapporto:

$$R(K) = \frac{\mathcal{B}(B \rightarrow K \mu \mu)}{\mathcal{B}(B \rightarrow K ee)}$$

SM  $\rightarrow R(K) = 1.00 \pm 0.01$

$$R(K) = \frac{\mathcal{B}(B \rightarrow K \mu \mu)}{\mathcal{B}(B \rightarrow J/\psi K, J/\psi \rightarrow \mu \mu)} \times \frac{\mathcal{B}(B \rightarrow J/\psi K, J/\psi \rightarrow ee)}{\mathcal{B}(B \rightarrow K ee)}$$

- ❖  $\mathcal{B}(J/\psi \rightarrow ee) = \mathcal{B}(J/\psi \rightarrow \mu \mu)$  within 0.7%
- ❖ Sperimentalmente pulito
- ❖ Alcune sistematiche si cancellano

$O(10^{10})$  decadimenti da adroni B

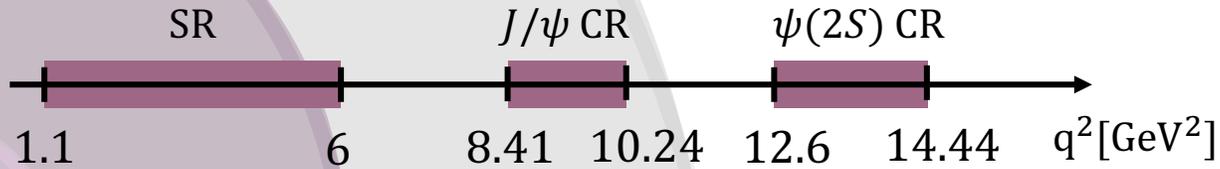
- ❖ I dati analizzati sono stati raccolti nel 2018 triggerando su un muone da mesone B (*tag side*) per salvare anche l'altra parte (*probe side*)
- ❖ L'algoritmo di Particle Flow è usato unitamente a un algoritmo ottimizzato per ricostruzione e identificazione di **elettroni di basso  $p_T$**  (fino a 1GeV)

Aumentare statistica del canale elettronico

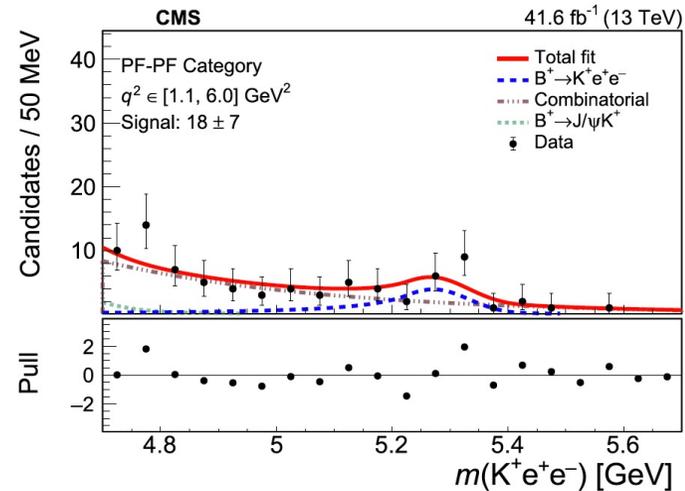
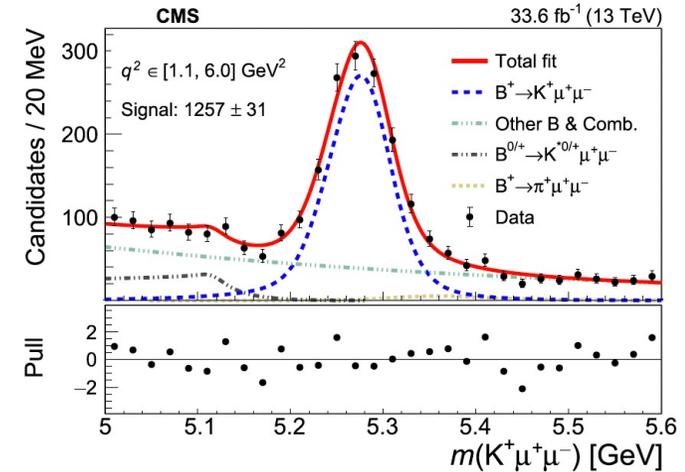
[Rep. Prog. Phys. 87 \(2024\) 077802](#)

# R(K): risultati

La massa invariante di  $K^\pm \ell^+ \ell^-$  è fittata in 3 regioni di  $q^2$ :



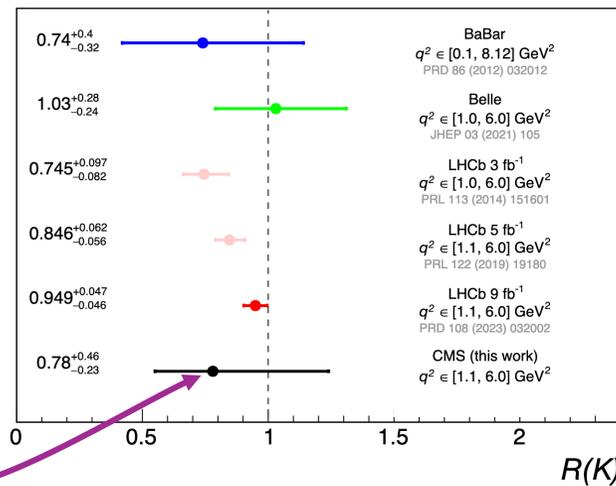
**FONDO:** decadimenti semileptonici di mesoni pesanti (soppresso con BDT addestrato su segnale da MC e fondo dai dati delle SB)



$$R(K) = 0.78^{+0.46}_{-0.23} (\text{stat})^{+0.09}_{-0.05} (\text{syst})$$

La precisione è dominata dalla **ridotta statistica del canale elettronico**

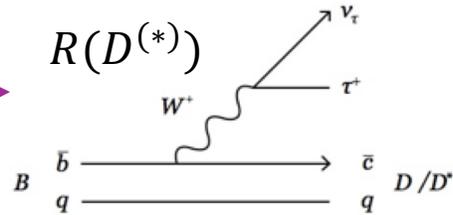
Il risultato è **compatibile entro 1σ con lo SM**



# R(J/ψ) overview

$$b \rightarrow cl\nu_l$$

- $R(H_c) = \frac{B(H_b \rightarrow H_c \tau \nu_\tau)}{B(H_b \rightarrow H_c \mu \nu_\mu)}$
- BR alto (tree level)



Focus sul rapporto:

$$R(J/\psi) = \frac{B(B_c^+ \rightarrow J/\psi \tau \nu_\tau)}{B(B_c^+ \rightarrow J/\psi \mu \nu_\mu)}$$

$$\text{SM} \rightarrow R(J/\psi) = 0.2582 \pm 0.0038$$

Non molto studiato finora, perchè adroni  $B_c$  non possono essere prodotti nelle B-factories.

Possono essere considerati separatamente due canali di decadimento del leptone  $\tau$ : **leptonico** e **adronico**

$$\tau^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \bar{\nu}_\tau$$

**Dataset:** eventi con 3 muoni nello stato finale raccolti nel 2018 ( $59.7 \text{ fb}^{-1}$ )

**Segnale:**  $3\mu + \text{neutrini} \rightarrow$  numeratore e denominatore hanno lo stesso stato finale

$$\tau^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ (+\pi^0) \nu_\tau$$

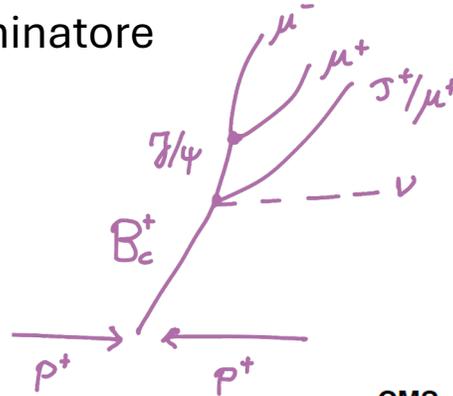
**Dataset:** full Run 2 e trigger J/ψ + traccia

**Segnale:**  $J/\psi \rightarrow \mu\mu$  e  $\tau \rightarrow \pi\pi\pi(+\pi^0)$

# R(J/ψ) con τ leptónico

Per distinguere gli stati finali di numeratore e denominatore si utilizzano osservabili cinematiche e topologiche:

- $q^2 = (\mathbf{p}_{B_c} - \mathbf{p}_{J/\psi})^2$  dipende da  $\Delta m_{\mu,\tau}$  e 1ν vs 3ν
- Minima distanza tra (terzo) μ e J/ψ →  $IP_{3D}/\sigma_{IP_{3D}}$
- Distanza trasv. tra J/ψ e BS →  $L_{xy}/\sigma_{L_{xy}}$



## Fondo:

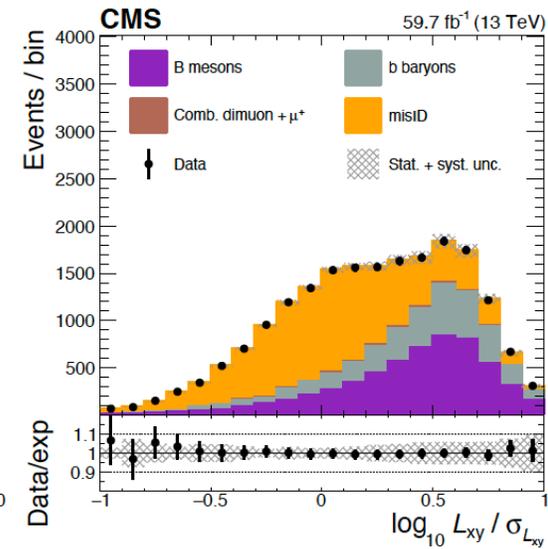
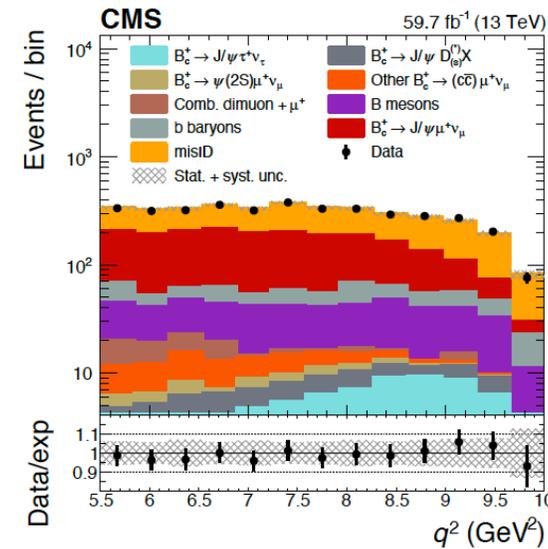
- Pioni e kaoni identificati come muoni
- Decadimenti semileptonici di adroni pesanti

## Strategia di analisi:

- NN per sottrarre fondo di muoni da «decay-in-flight»
- fit di  $L_{xy}$  usato come **constraint** sul fondo ( $J/\psi + \mu$ ) e sul denominatore
- fit sul  $q^2$  per estrarre il **segnale** (miglior discriminazione  $\mu/\tau$ )

simultaneo

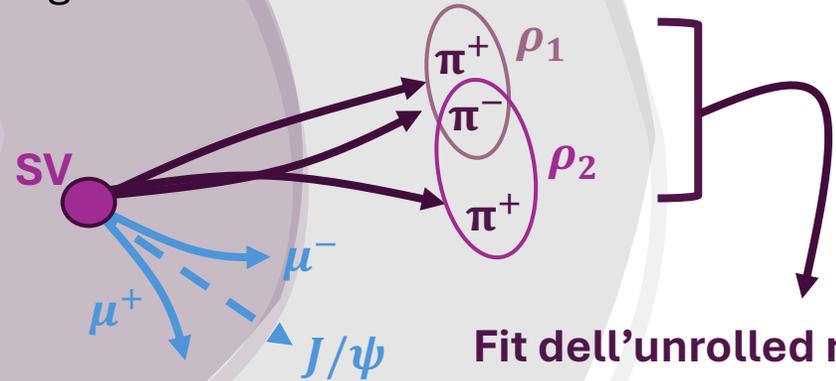
$$R(J/\psi) = 0.17^{+0.18}_{-0.17} \text{ (stat)}^{+0.21}_{-0.22} \text{ (syst)}^{+0.19}_{-0.18} \text{ (theo)}$$



*Phys. Rev. D 111 (2025) L051102*

# R(J/ψ) con τ adronico

**Fondo:** decadimenti J/ψ inclusivi da B<sub>d</sub> e B<sup>±</sup> → BDT addestrato utilizzando sample di B<sub>c</sub><sup>+</sup> → J/ψτν<sub>τ</sub> come segnale e decadimenti J/ψX come fondo, distingue **SB** e **SR**.



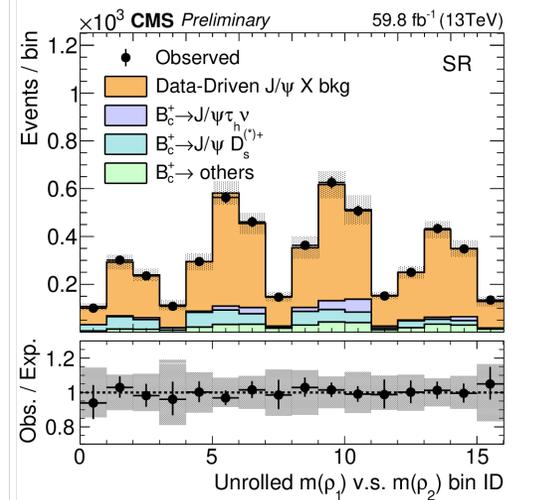
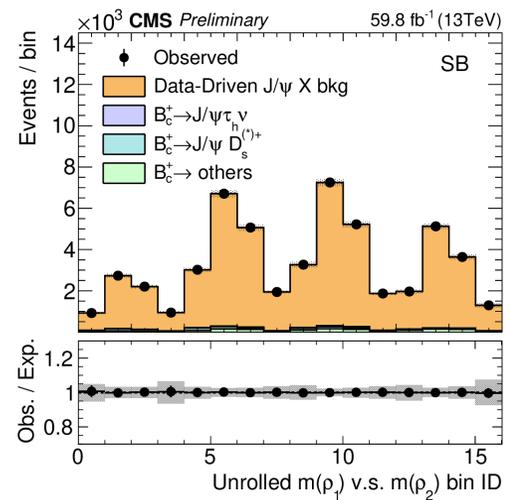
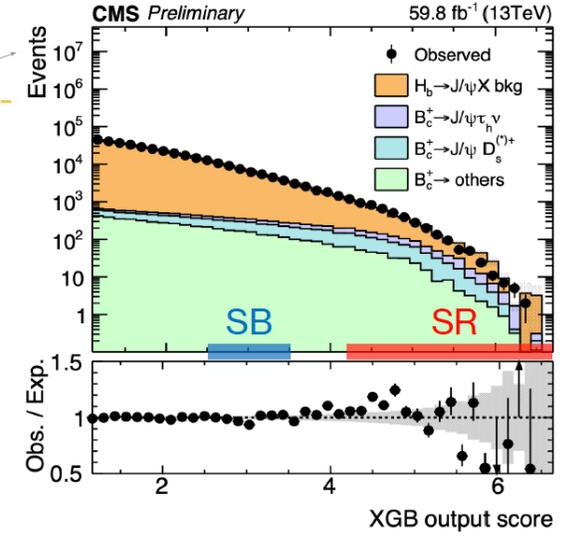
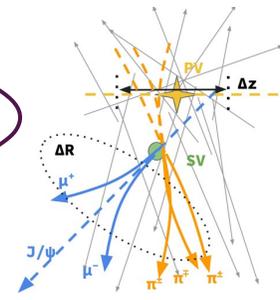
Fit dell'unrolled  $m(\rho_1)$  vs  $m(\rho_2)$

R(J/ψ) è calcolato con un fit simultaneo di analisi leptonica + analisi adronica:

$$R(J/\psi) = 0.49 \pm 0.09(stat) \pm 0.25(syst)$$

Combina buoni constraint dell'analisi leptonica + statistica incrementata dall'analisi adronica!

18 variabili di input: cinematica di B, τ, osservabili globali dell'evento



# Conclusioni

CMS porta avanti un esteso programma di fisica dei sapori pesanti:

- Misura dell'**upper limit** su  $\tau \rightarrow 3\mu$  dai dati di Run 2  
**Nuove proiezioni** per HL-LHC nell'ambito dell'ESPP

- Prima misura di **R(K)** a CMS  
→ Misura dominata dalla bassa statistica del canale elettronico

- Nuovo risultato su **R(J/ψ)** combinando  $\tau$  **leptonico** e  $\tau$  **adronico**

**Nuove strategie** di trigger per il **Run-3** ottimizzate per la ricerca nel settore della Fisica degli adroni pesanti



Grazie per  
l'attenzione

# References

---

- ❖ CMS Collaboration, «Search for the lepton flavor violating  $\tau \rightarrow 3\mu$  decay in proton-proton collisions at  $\sqrt{s}= 13$  TeV», 2024
- ❖ CMS Collaboration, «Search for the lepton flavor violating  $\tau \rightarrow 3\mu$  decay in proton-proton collisions at  $\sqrt{s}= 13$  TeV», 2021
- ❖ CMS Collaboration, «CMS flavor physics projections for the update of the European Strategy for Particle Physics», 2025
- ❖ CMS Collaboration, «Test of lepton flavor universality in  $B^\pm \rightarrow K^\pm \ell^+ \ell^-$  decays», 2023
- ❖ CMS Collaboration, «Test of lepton flavor universality violation in semileptonic  $B_c^+$  meson decays at CMS», 2023
- ❖ CMS Collaboration, «Measurement of the ratio of the  $B_c^+ \rightarrow J/\psi \tau^+ \nu_\tau$  and  $B_c^+ \rightarrow J/\psi \mu^+ \nu_\mu$  branching fractions using three-prong  $\tau$  lepton decays in proton-proton collisions at  $\sqrt{s}= 13$  TeV», 2024



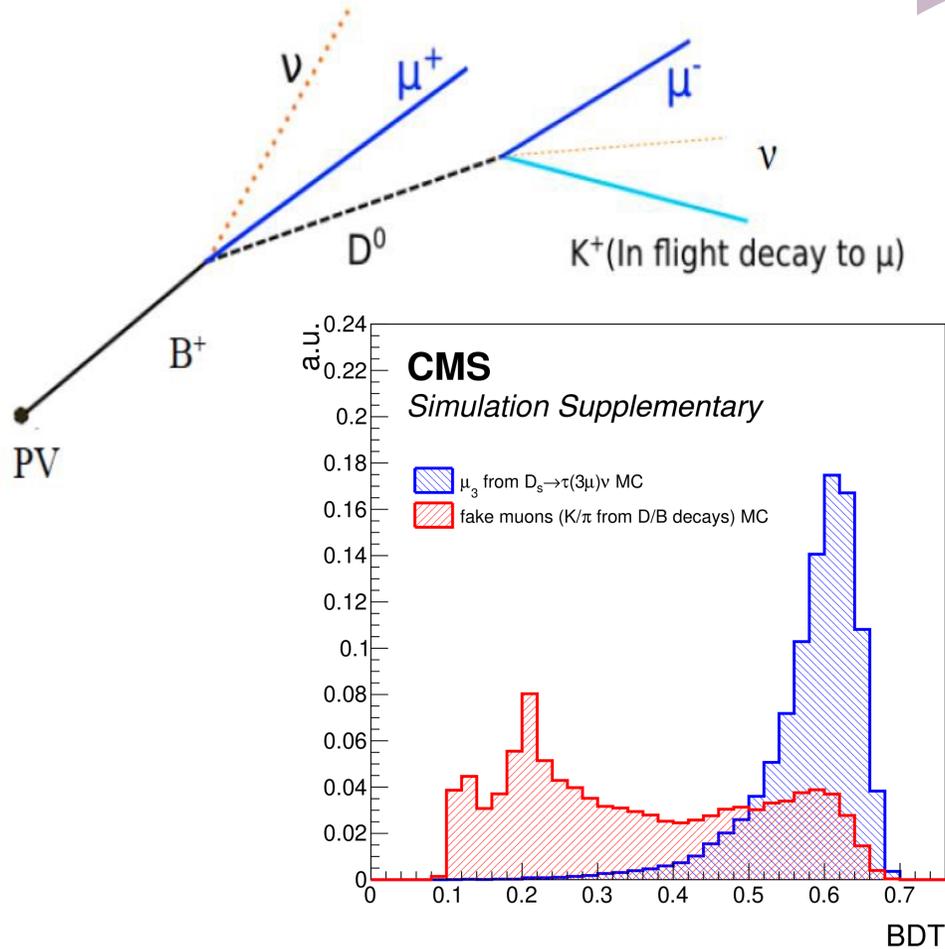
**BACKUP**

# HF- $\tau$ Branching Fractions

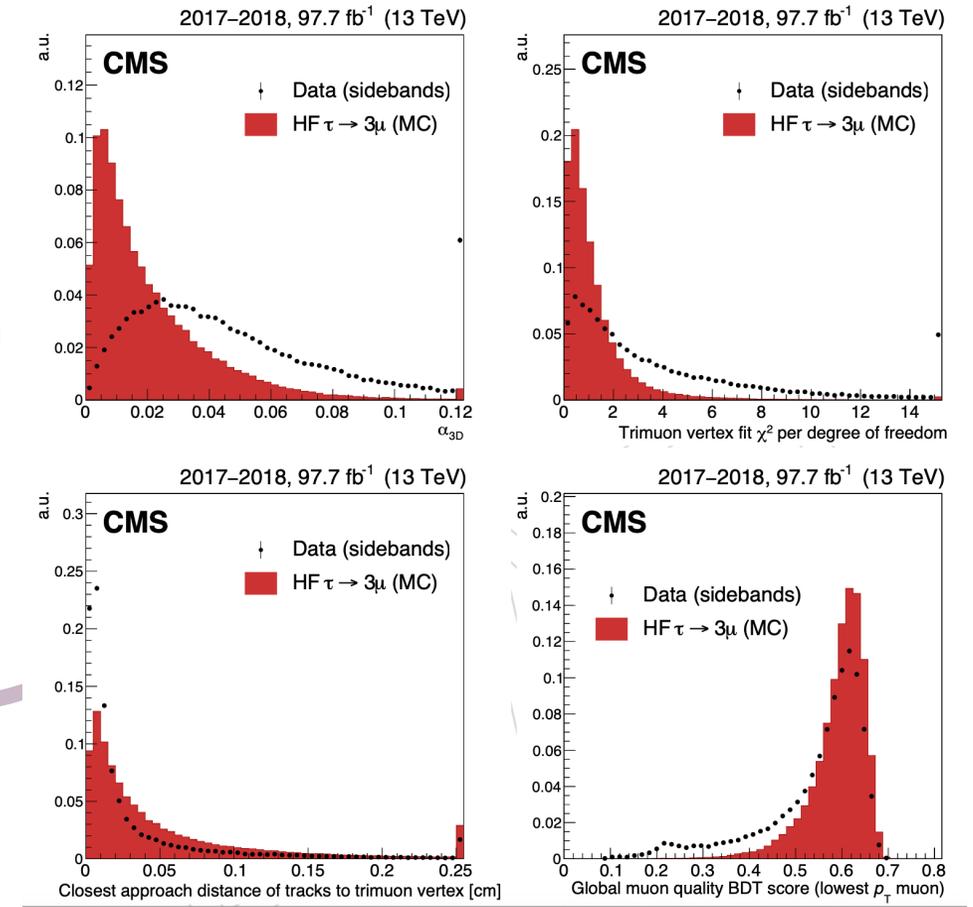
Process	Branching ratio (BR)	Reference
$D_s \rightarrow \tau\nu_\tau$	$(5.48 \pm 0.23) \cdot 10^{-2}$	PDG [10]
$B^+ \rightarrow \tau\nu_\tau \bar{D}^0$	$(7.7 \pm 2.5) \cdot 10^{-3}$	PDG [10]
$B^+ \rightarrow \tau\nu_\tau D^{*0}$	$(1.88 \pm 0.20) \cdot 10^{-2}$	PDG [10]
<i>other</i> $B^+ \rightarrow \tau\nu_\tau X$	$0.7 \cdot 10^{-2}$	PYTHIA [84]
$B^0 \rightarrow \tau\nu_\tau D^{*-}$	$(1.57 \pm 0.09) \cdot 10^{-2}$	PDG [10]
$B^0 \rightarrow \tau\nu_\tau D^-$	$(1.08 \pm 0.23) \cdot 10^{-2}$	PDG [10]
<i>other</i> $B^0 \rightarrow \tau\nu_\tau X$	$0.7 \cdot 10^{-2}$	PYTHIA [84]
$D_s \rightarrow \phi(\mu\mu)\pi$	$(1.3 \pm 0.1) \cdot 10^{-5}$	PDG [10]
$B^+ \rightarrow D_s X$	$(9.0 \pm 1.5) \cdot 10^{-2}$	PDG [10]
$B^0 \rightarrow D_s X$	$(10.3 \pm 2.1) \cdot 10^{-2}$	PDG [10]
$B_s^0 \rightarrow D_s X$	$(93 \pm 25) \cdot 10^{-2}$	PDG [10]

# Background rejection HF- $\tau \rightarrow 3\mu$

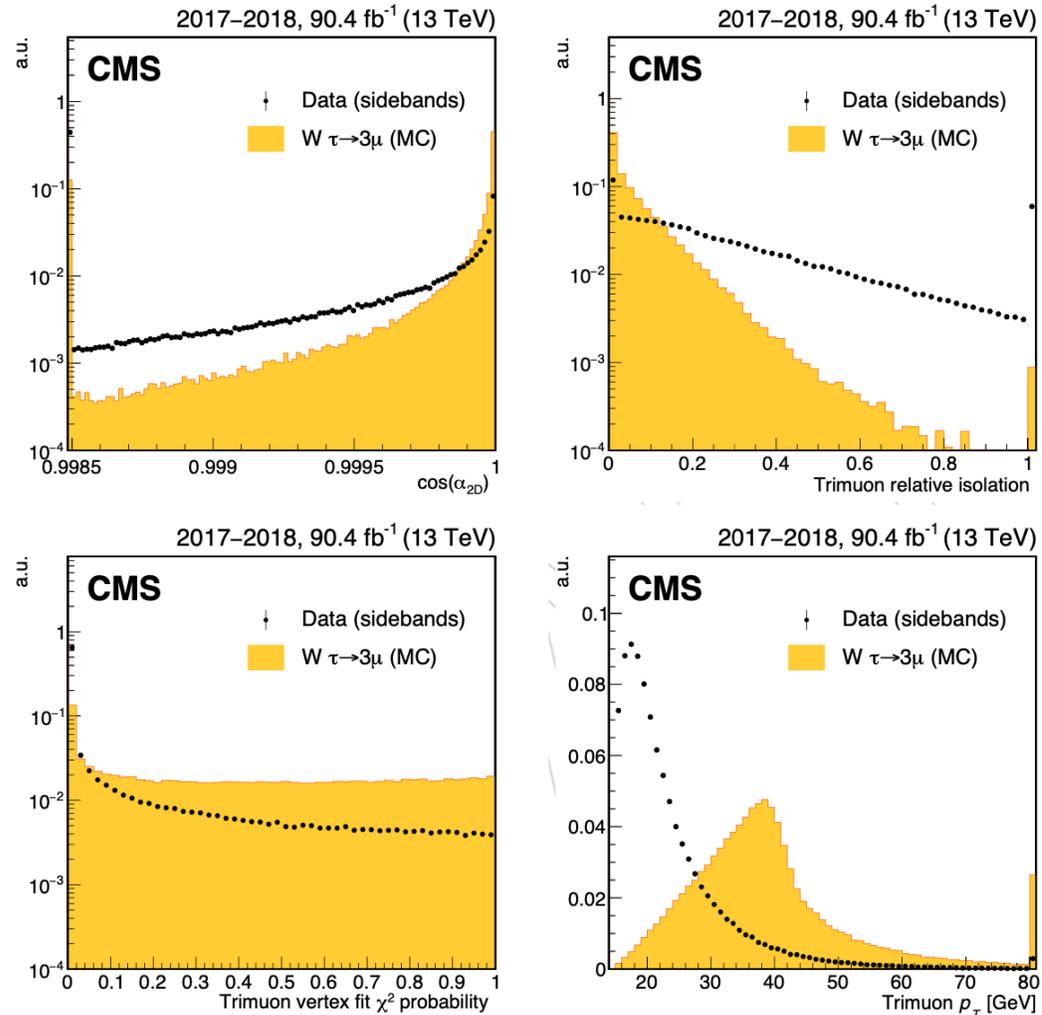
MVA muon discriminator:



Signal discrimination BDT:

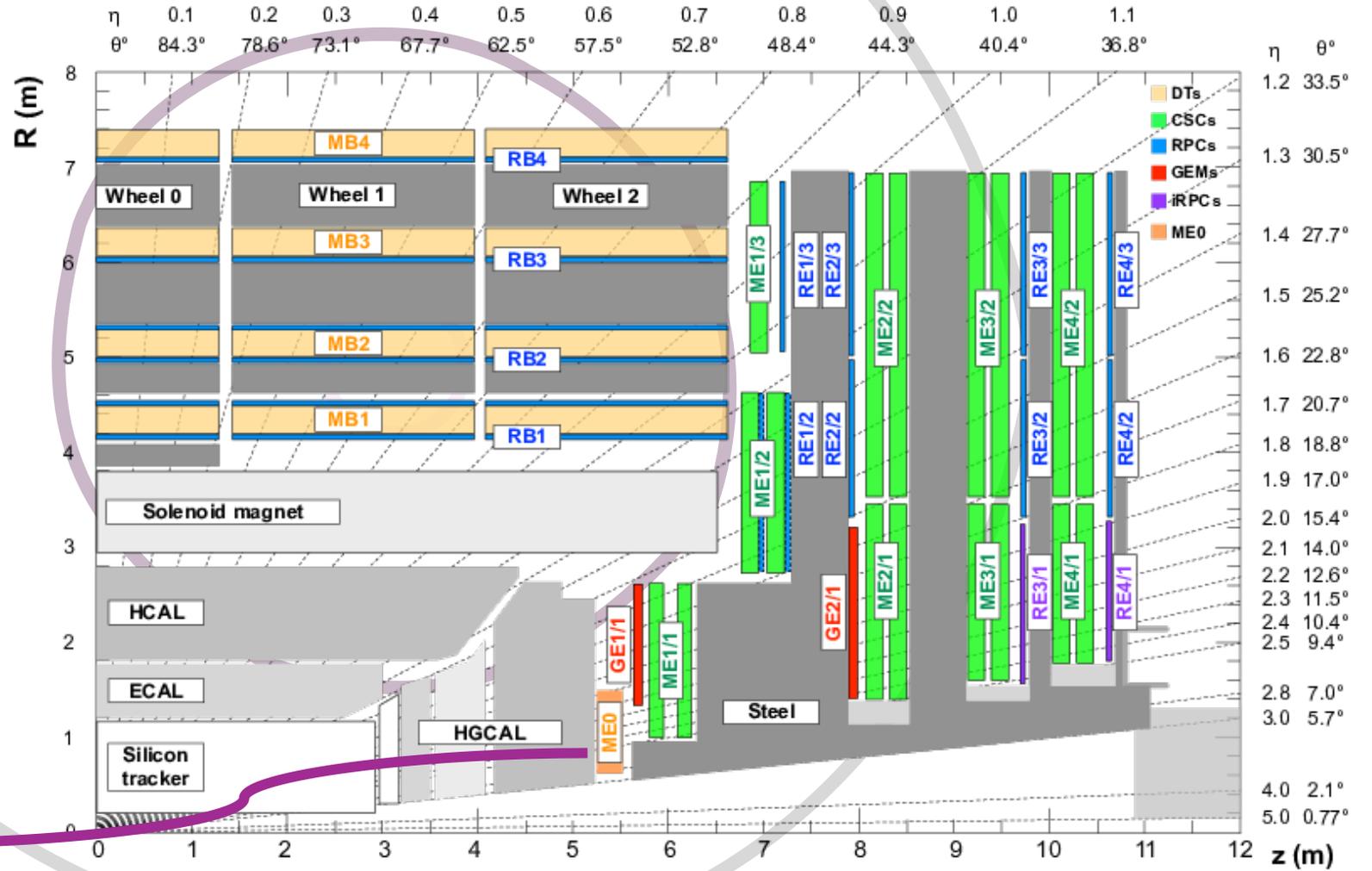
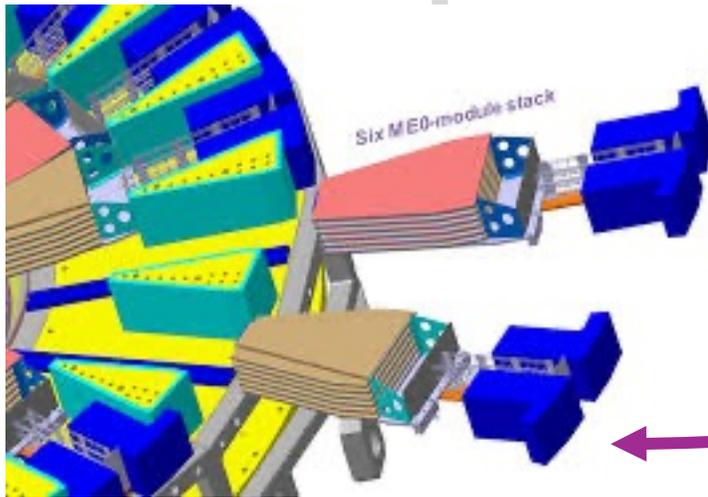


# Background rejection $W\text{-}\tau \rightarrow 3\mu$

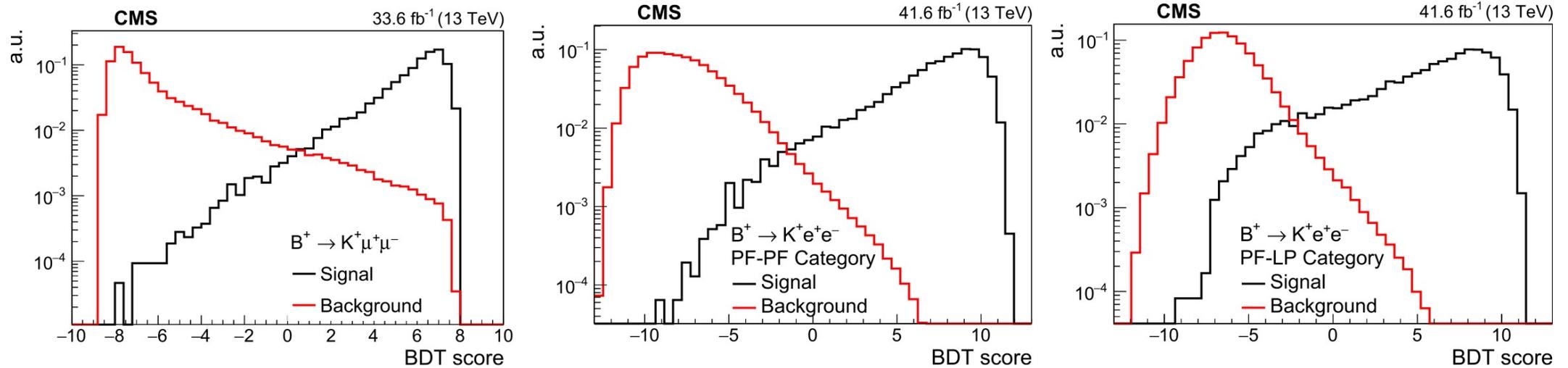


# CMS Phase 2 Muon system

Muon coverage  
 $|\eta| < 2.4 \rightarrow |\eta| < 2.8$

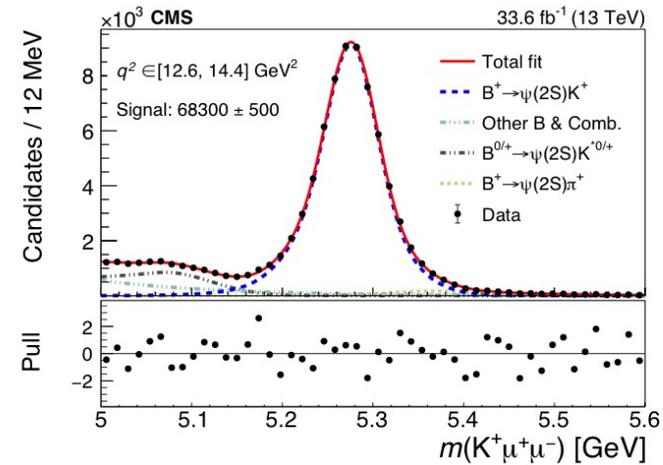
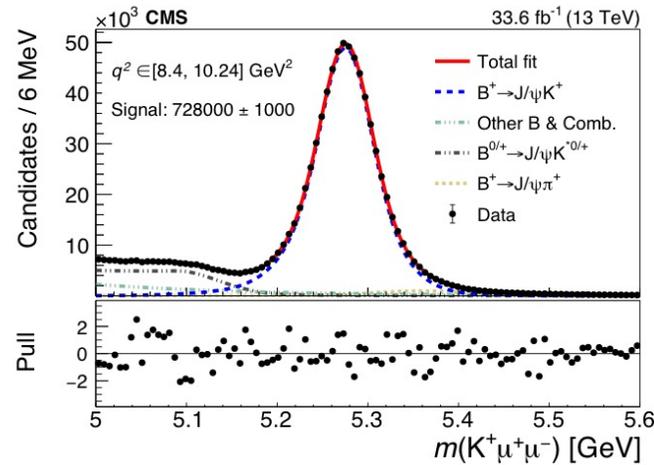
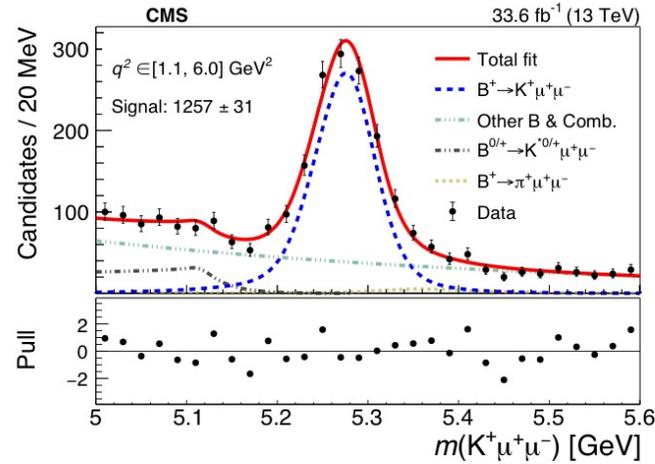


# $B \rightarrow K l l$ BDT

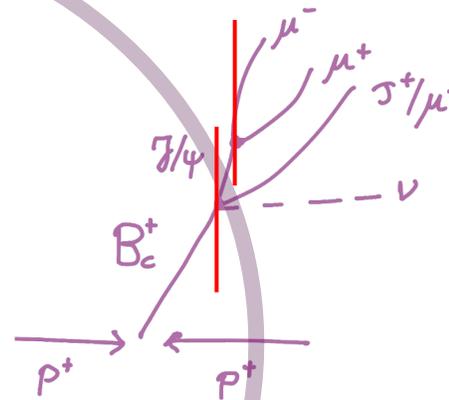
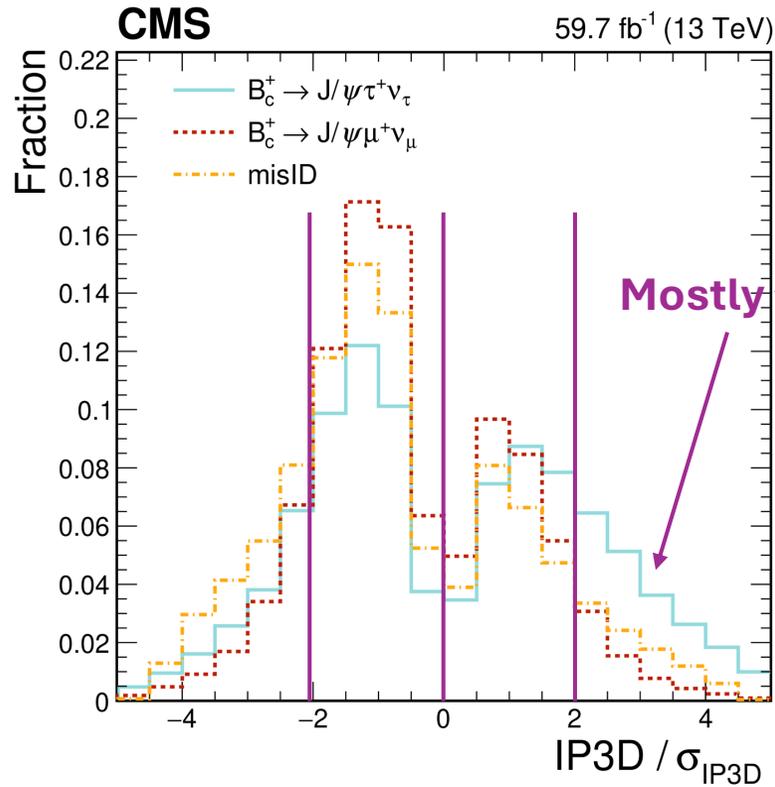


Analysis BDT output for signal (MC simulation, in black) and background (same-sign dilepton data, in red) for the muon channel (left) and for the PF-PF (center) and PF-LP (right) electron channels. The histograms are normalized to unit area.

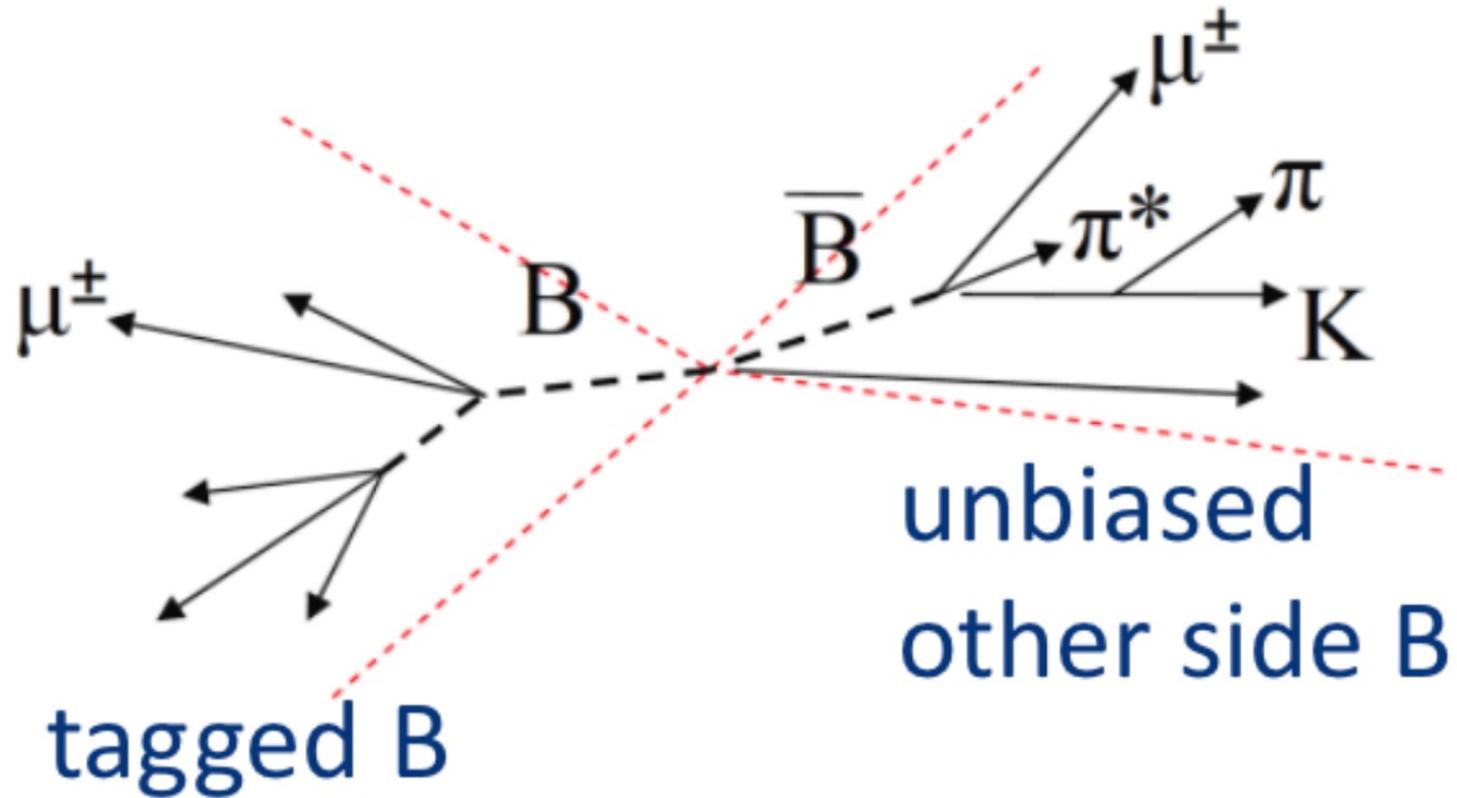
# $B \rightarrow K l l$ SR vs CR's



# $IP_{3D}/\sigma_{IP_{3D}}$ discrimination power



# B-parking



# Summary of $R(J/\psi)$ measurements

