

Decadimenti rari a CMS e prospettive per Run 3

Incontri di Fisica delle Alte Energie – 05/04/2024



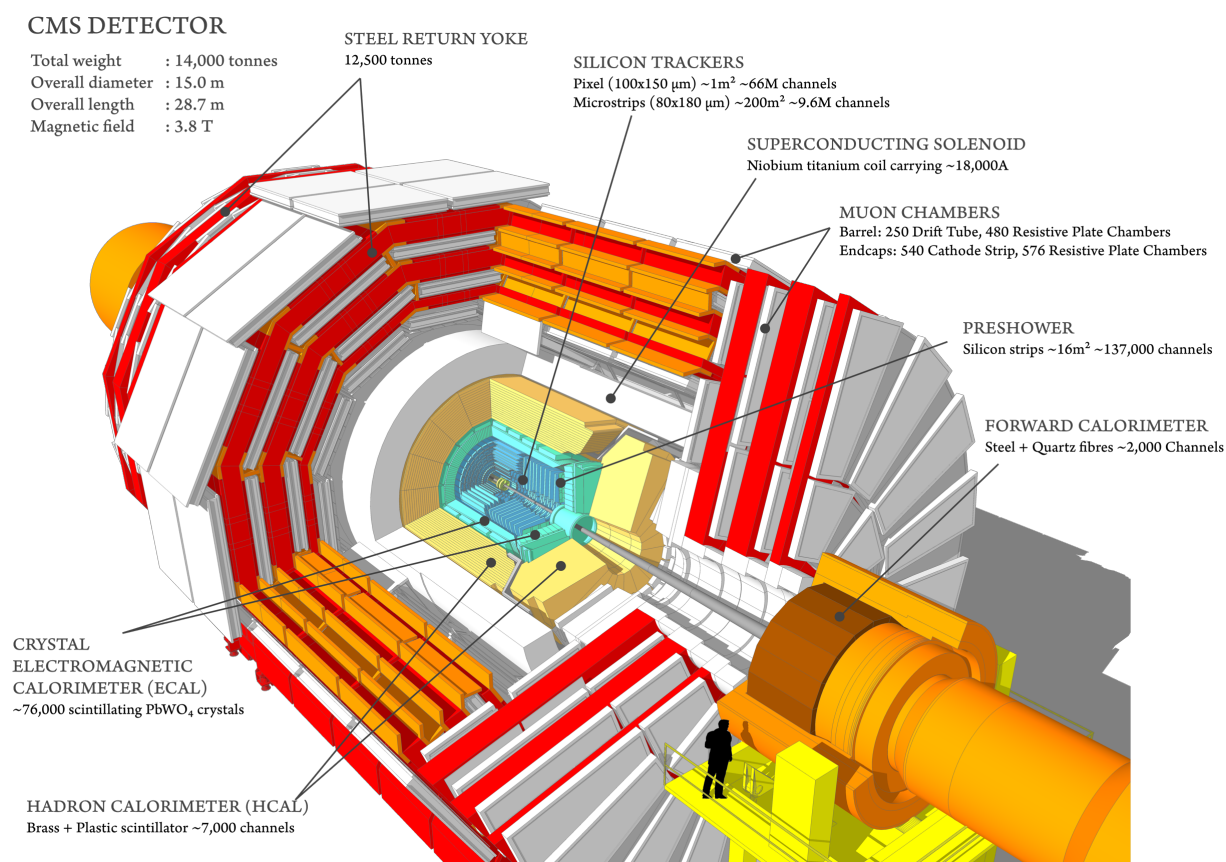
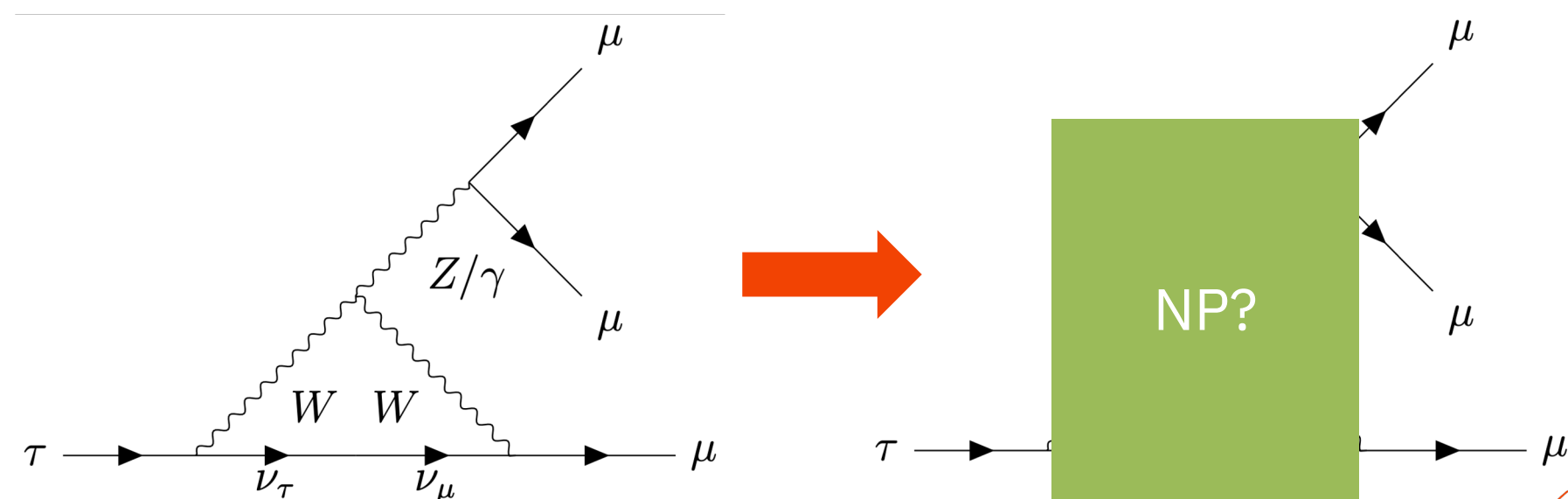
Marco Buonsante (Università & INFN Bari)

Per la collaborazione CMS

Panoramica

Decadimenti rari:

- Soppressi nel Modello Standard (MS)
- Previsioni teoriche precise
- Sensibili a nuova fisica
 - modifica delle frazioni di decadimento (BR)
- Accessibili sperimentalmente a CMS
 - BR $\mathcal{O}(10^{-9} - 10^{-8})$



Panoramica

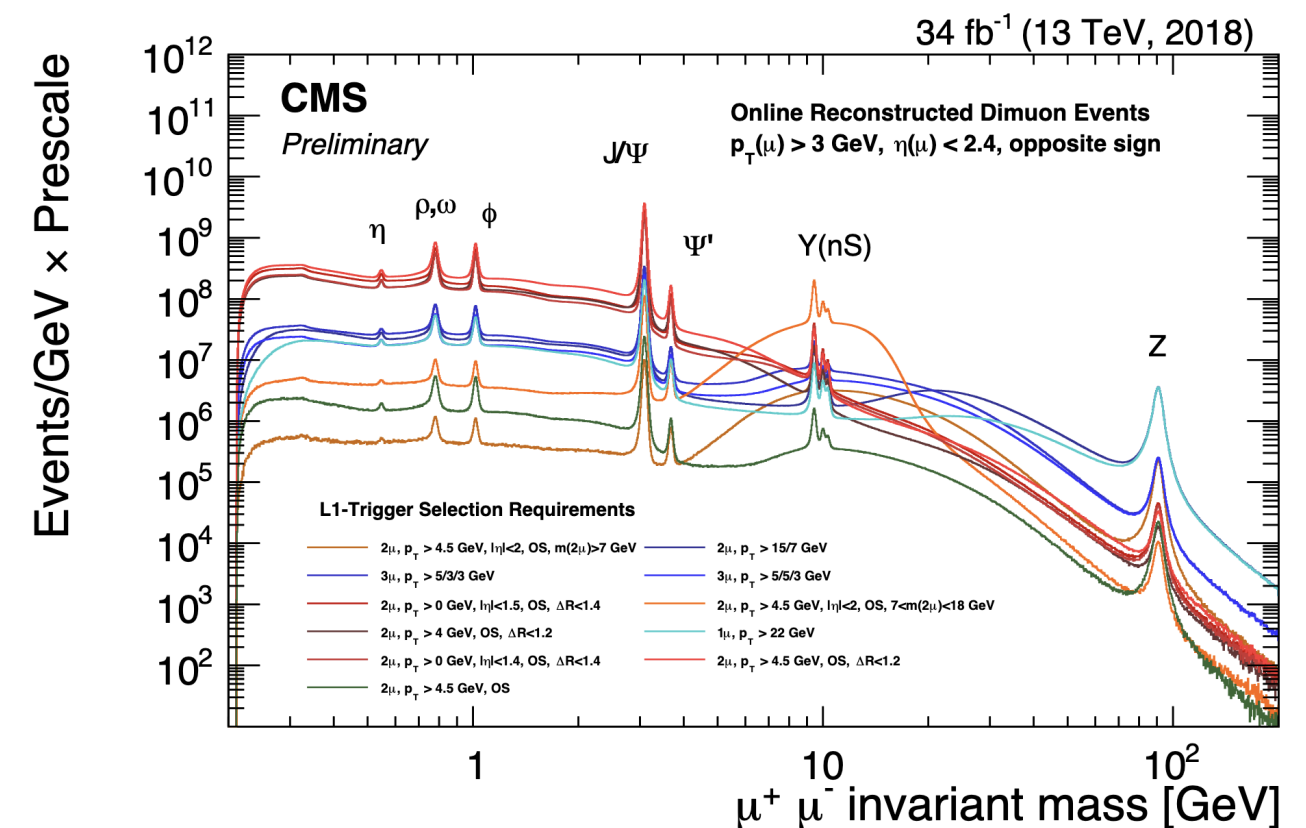
Decadimenti rari:

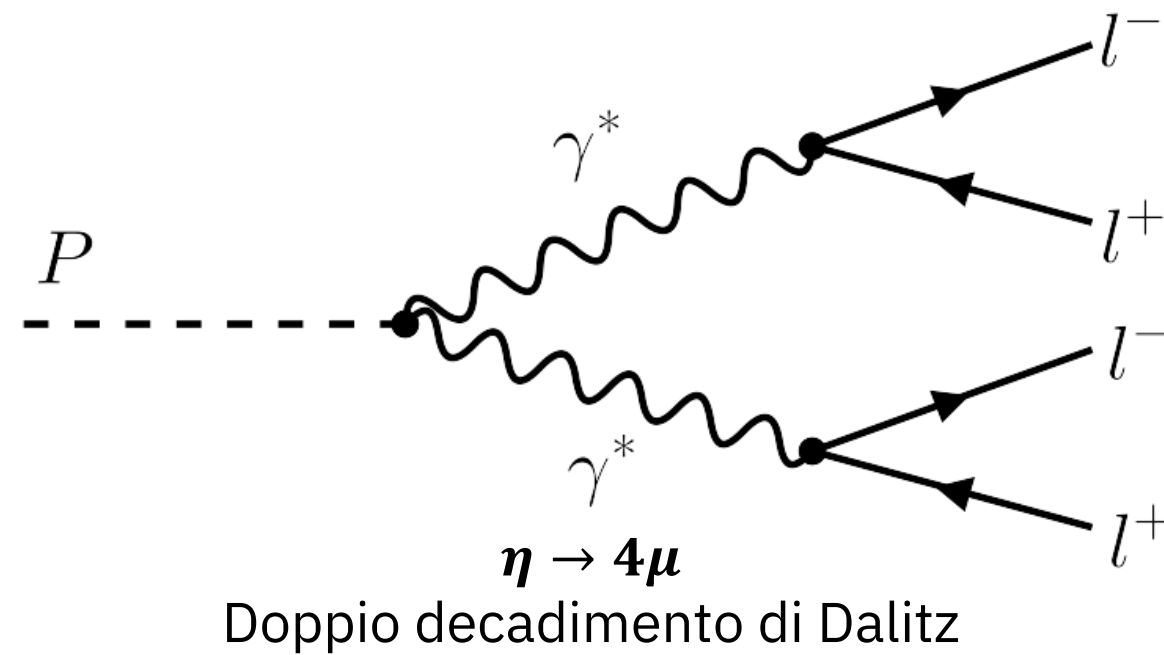
- In questa presentazione:
 - Decadimenti multi-muonici di mesoni neutri
 - Decadimenti proibiti da simmetrie (accidentali) del MS (LUV, LNV e LFV)
- Necessitiamo di tanta statistica:
 - Limitata dalla rate del trigger
- In queste analisi, tre approcci diversi al problema:
 - Scouting, B-Parking e Standard

$\eta \rightarrow 4\mu$ [\[arXiv:2305.04904\]](https://arxiv.org/abs/2305.04904)
 $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$ [\[arXiv:2403.11352\]](https://arxiv.org/abs/2403.11352)

Entrambi osservati a CMS!

$\tau \rightarrow 3\mu$ [\[arXiv:2312.02371\]](https://arxiv.org/abs/2312.02371)





$$\eta \rightarrow 4\mu$$

Motivazioni:

- Predetto dal Modello Standard (SM) con frazione di decadimento (BR) molto piccola: $\mathcal{B}(\eta \rightarrow 4\mu) = (3.98 \pm 0.15) \times 10^{-9}$ [\[Chinese Phys. C 42 \(2018\) 023109\]](#)
- Banco di prova di nuova fisica [\[Rep. Prog. Phys. 86 016201\]](#)
 - Sensibile alla presenza di nuove particelle (*hidden photons*, Higgs scalari leggeri e assioni)
 - Test di violazione della simmetria discreta

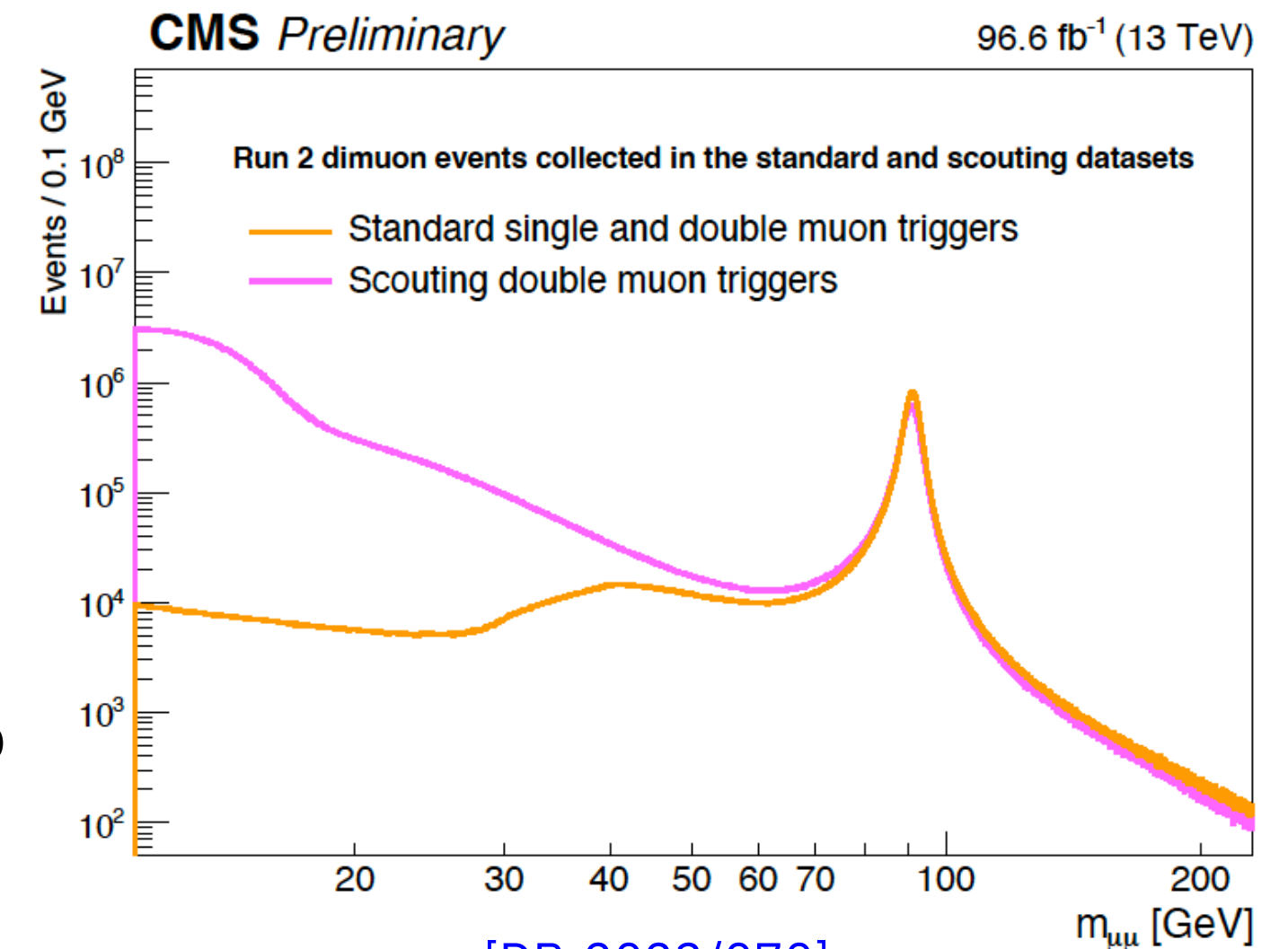
$$\eta \rightarrow 4\mu$$

Dati:

- Collisioni pp a 13 TeV 2017-2018 (~ 101 /fb)
- Eventi con almeno 2 μ nello stato finale

Strategia di trigger: “Muon Scouting stream”

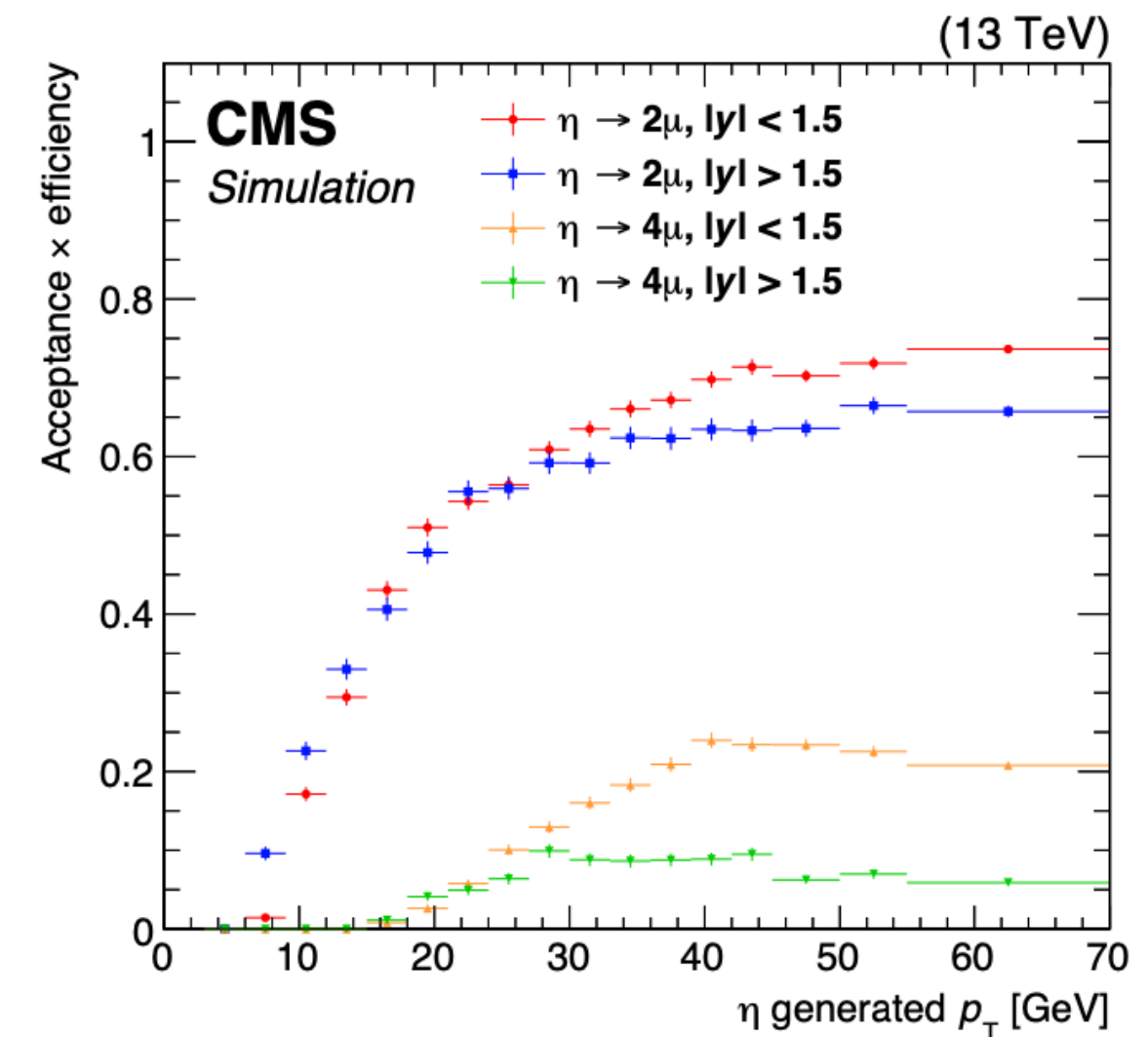
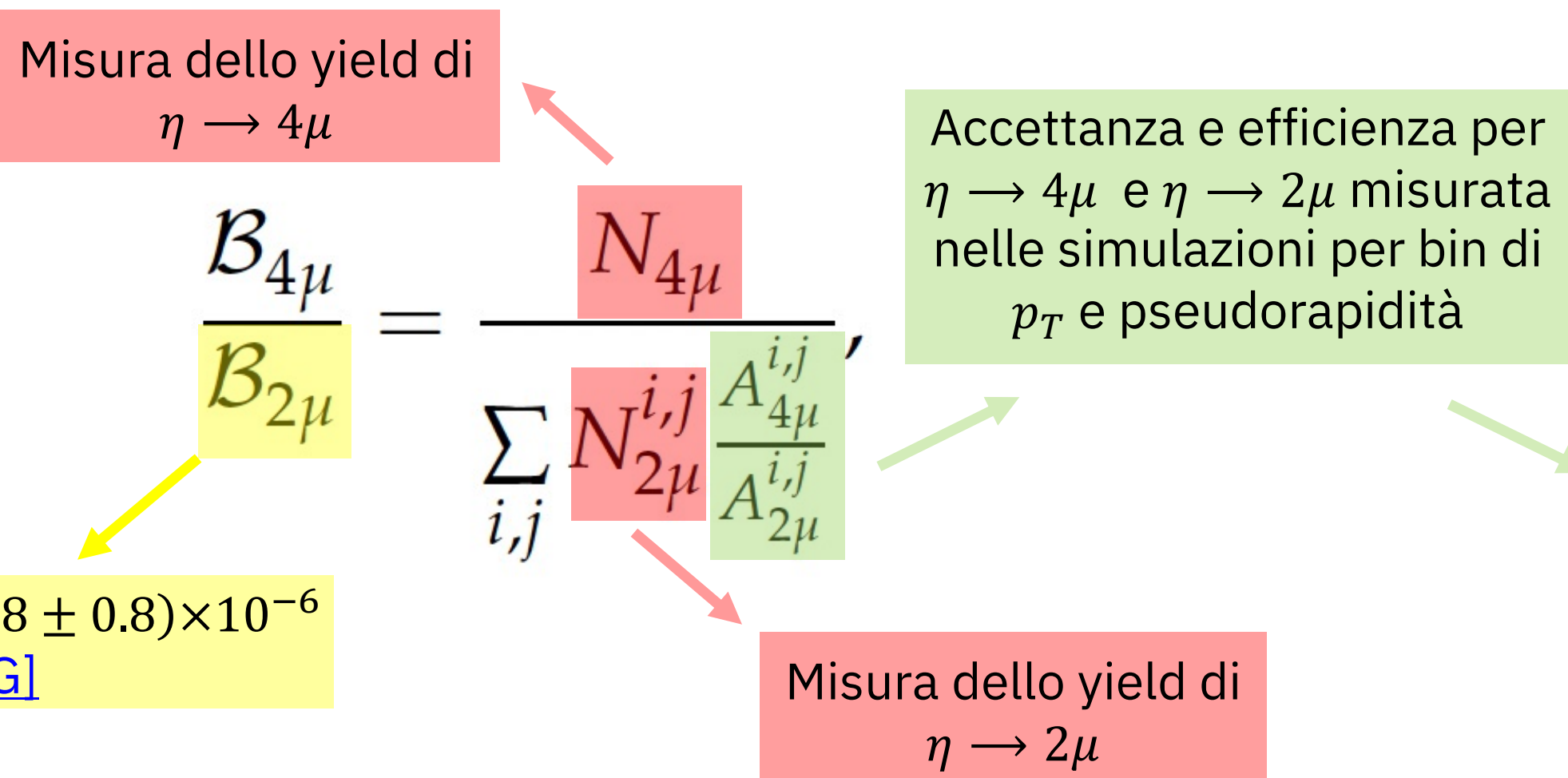
- Obiettivo: Acquisire più eventi mantenendo la stessa bandwidth rispetto allo standard stream
 - Salvare solo una quantità limitata di info per evento (~ 8 kB/event)
 - Trigger di due muoni ad alta rate (~ 2 kHz)



$\eta \rightarrow 4\mu$

Strategia d'analisi:

- Selezioni offline basate su carica totale e vertice comune
- La BR di $\eta \rightarrow 4\mu$ è determinata in termini di quella di $\eta \rightarrow 2\mu$



$\eta \rightarrow 4\mu$

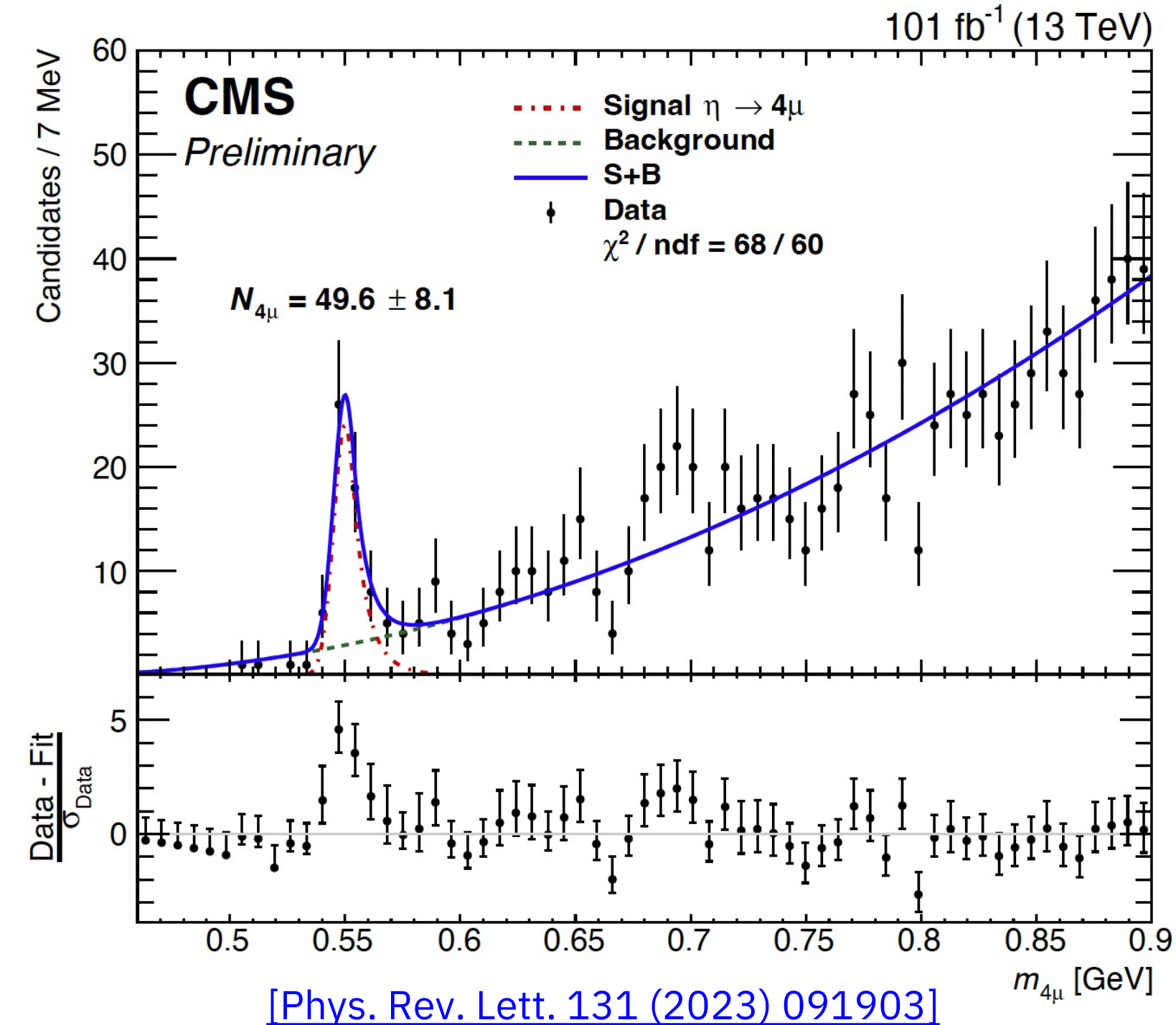
Risultati:

- Si osserva un picco nello spettro della massa inv. dei 4 muoni
- Significanza statistica $> 5\sigma$

$$\frac{\mathcal{B}_{4\mu}}{\mathcal{B}_{2\mu}} = (0.9 \pm 0.1(\text{stat}) \pm 0.1(\text{syst})) \times 10^{-3}$$

$$\mathcal{B}(\eta \rightarrow 4\mu) = (5.0 \pm 0.8(\text{stat}) \pm 0.7(\text{syst}) \pm 0.7(\mathcal{B}_{2\mu})) \times 10^{-9}$$

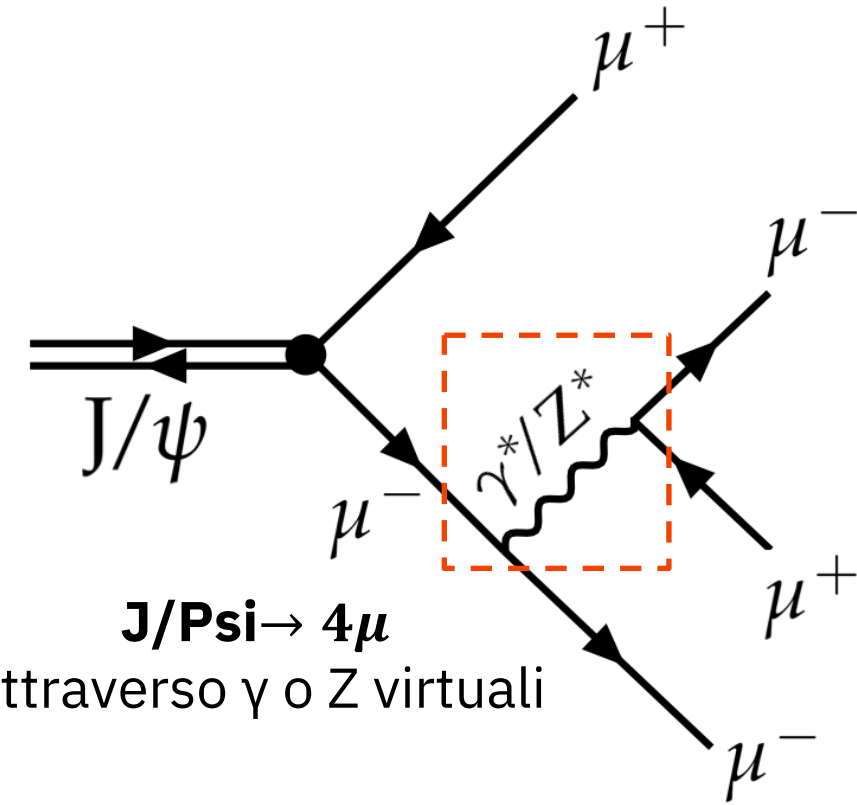
- Compatibile con il valore atteso dal MS:
 $\mathcal{B}(\eta \rightarrow 4\mu) = (3.98 \pm 0.15) \times 10^{-9}$



J/Psi → 4μ

Motivazioni:

- Predetto dal Modello Standard (SM) con frazione di decadimento (BR):
 $B(J/Psi \rightarrow 4\mu) = (9.74 \pm 0.05) \times 10^{-7}$ [[PhysRevD.104.094023](#)]
- Sensibile alla presenza di nuova fisica [[s10052-020-08816-9](#)]



Strategia d'analisi:

- Collisioni pp a 13 TeV (33.6 /fb) (2018 B Parking: Alta rate (5kHz), delayed processing)
- Selezioni offline basate su vertice comune, prob. del vertice e sulla cinematica della J/Psi
- La BR di J/Psi → 4μ è determinata in termini di quella di J/Psi → 2μ

$$\frac{\mathcal{B}_{J/Psi \rightarrow 4\mu}}{\mathcal{B}_{J/Psi \rightarrow 2\mu}} = \frac{N_{J/Psi \rightarrow 4\mu}}{N_{J/Psi \rightarrow 2\mu}} \frac{\epsilon_{J/Psi \rightarrow 4\mu}}{\epsilon_{J/Psi \rightarrow 2\mu}}$$

Ciascuna efficienza è ottenuta dal MC come rapporto fra eventi ricostruiti e generati

$$\mathcal{B}(J/Psi \rightarrow 2\mu) = (5.961 \pm 0.033) \times 10^{-2}$$
 [[PDG](#)]



J/Psi → 4μ

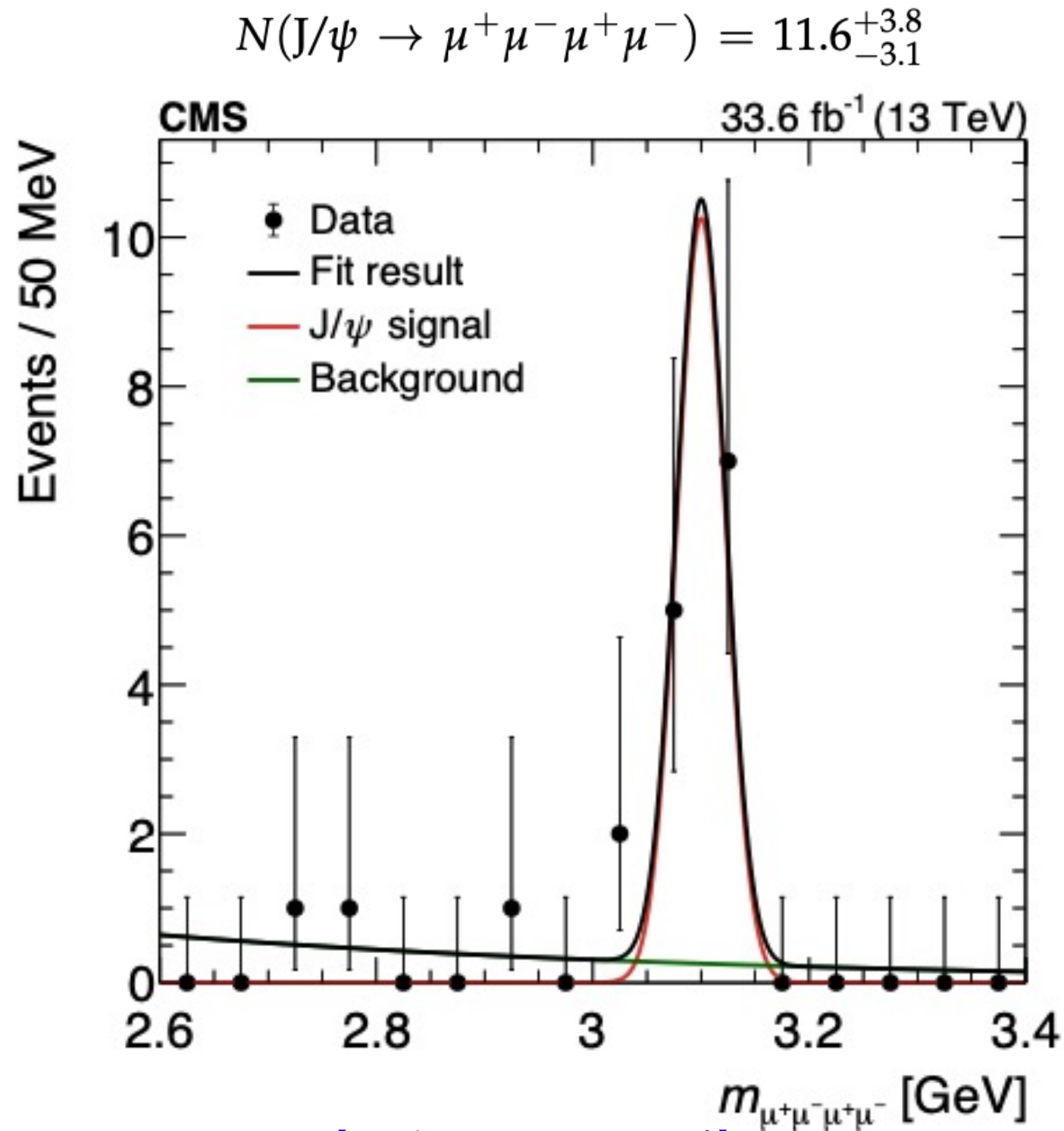
Risultati:

- Si osserva un picco nello spettro della massa inv. dei 4 muoni
- Significanza statistica > 7σ

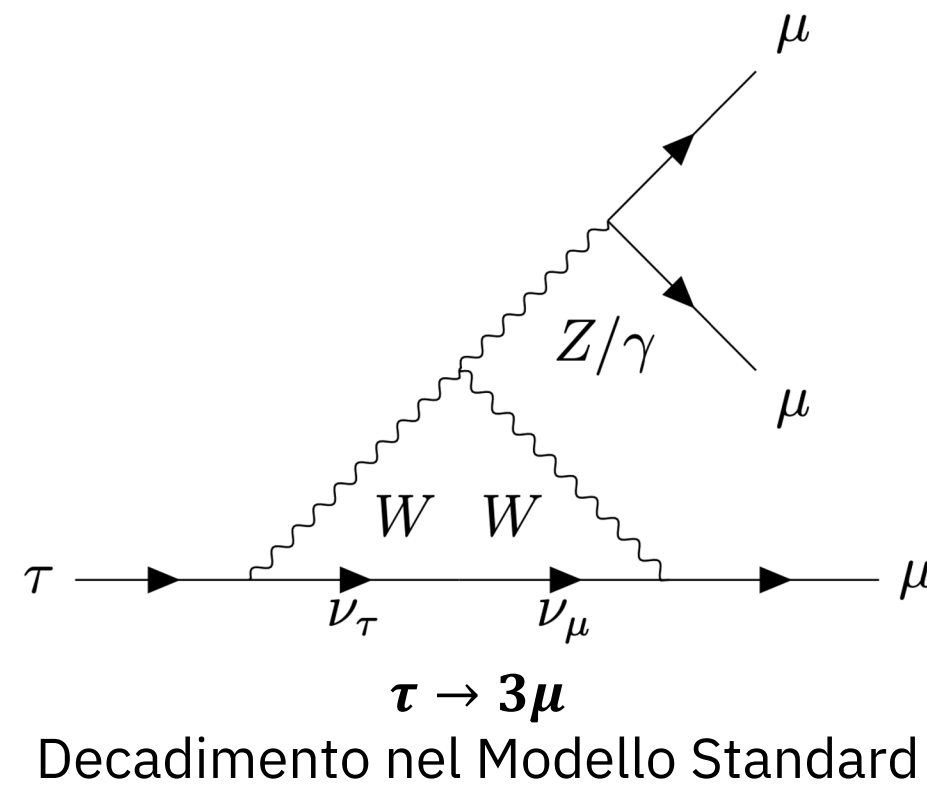
$$\frac{\mathcal{B}_{J/\psi \rightarrow 4\mu}}{\mathcal{B}_{J/\psi \rightarrow 2\mu}} = (16.9_{-4.6}^{+5.5}(\text{stat}) \pm 0.6(\text{syst})) \times 10^{-6}$$

$$\mathcal{B}(J/\psi \rightarrow 4\mu) = (10.1_{-2.7}^{+3.3}(\text{stat}) \pm 0.4(\text{syst})) \times 10^{-7}$$

- Compatibile con il valore atteso dal MS:
 $\mathcal{B}(J/\psi \rightarrow 4\mu) = (9.74 \pm 0.05) \times 10^{-7}$



[\[arXiv:2403.11352*\]](https://arxiv.org/abs/2403.11352)



$\tau \rightarrow 3\mu$

Motivazioni:

- Il MS consente la violazione del sapore dei leptoni carichi (LFV) attraverso l'oscillazione dei neutrini, ma con BR piccole:

$$\mathcal{B}(\tau \rightarrow 3\mu) \sim \mathcal{O}(10^{-54}) \quad [\text{Eur. Phys. J. C (2019) 79:84 Eur. Phys. J. C (2020) 80: 438}]$$

- I decadimenti LFV sono un banco di prova per le testare nuova fisica

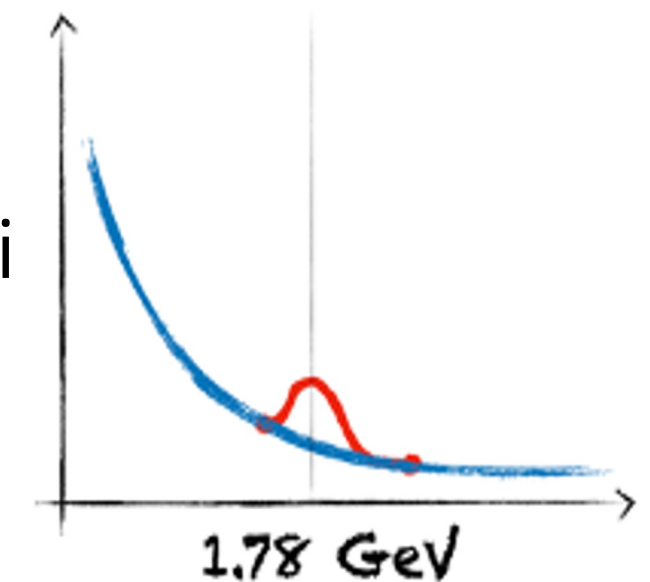
[\[JHEP10\(2018\)148\]](#)

- BR predette: $\mathcal{B}(\tau \rightarrow 3\mu) \sim \mathcal{O}(10^{-8})$

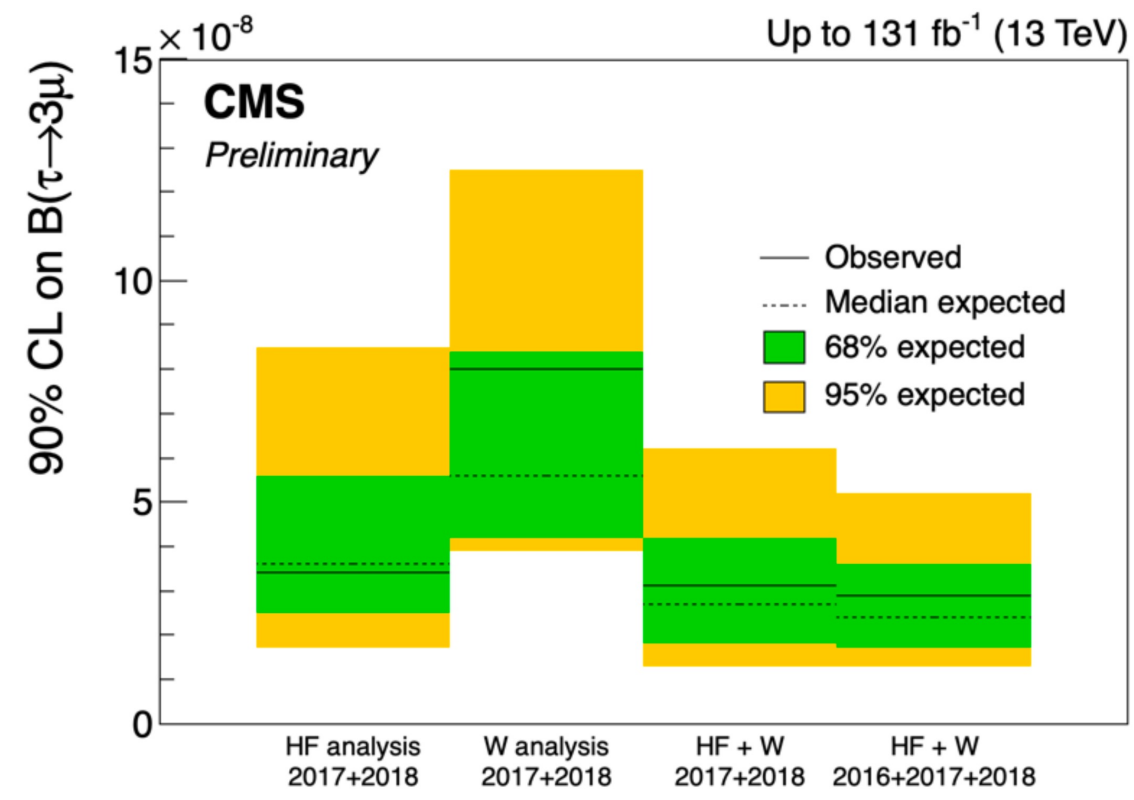
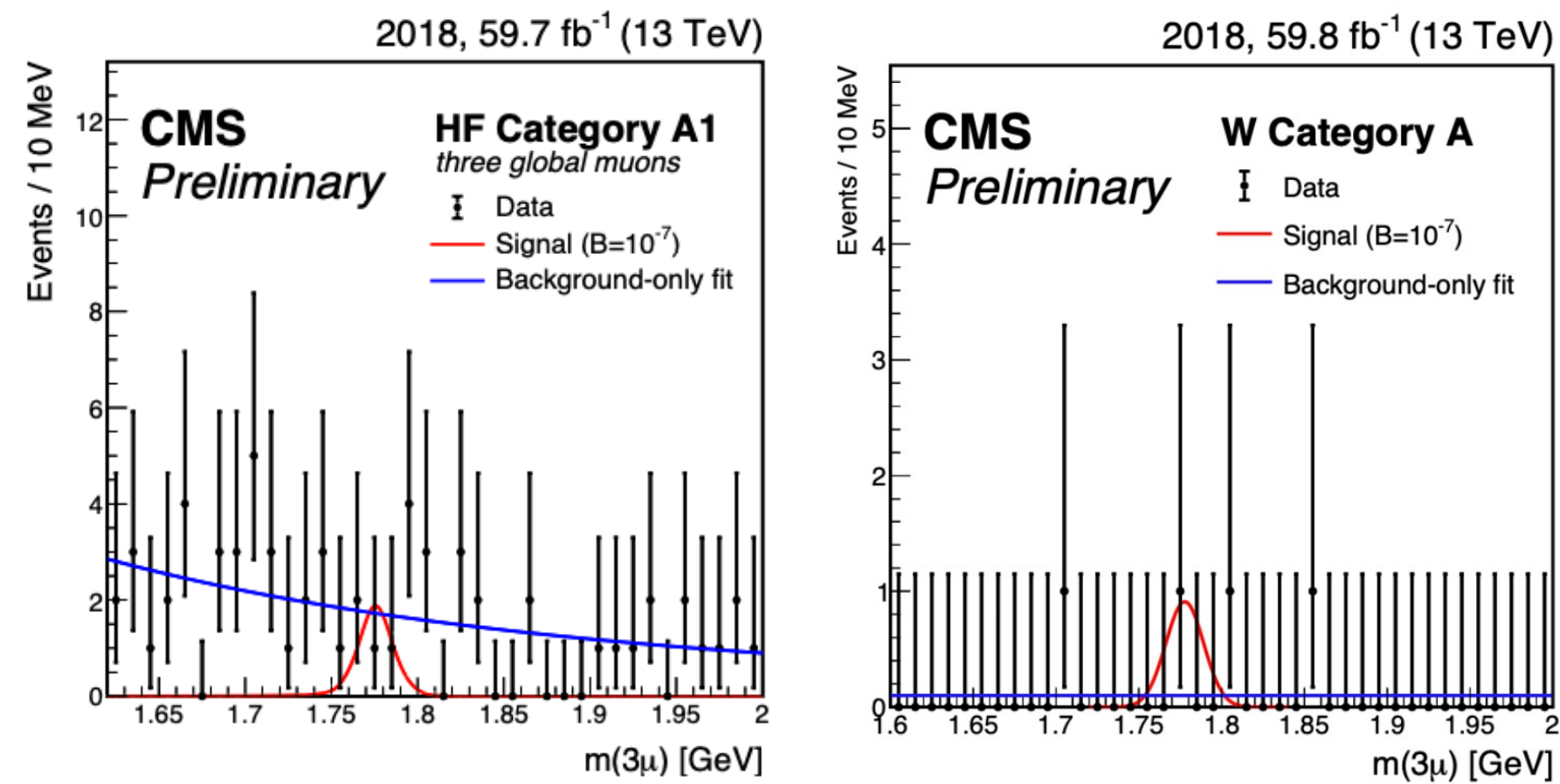
$$\tau \rightarrow 3\mu$$

Strategia d'analisi:

- Collisioni pp a 13 TeV (97.7 /fb) con un **trigger dedicato** per ciascun canale dell'analisi:
 - **Heavy flavour (HF):** tau da decadimenti di mesoni B e D
 - **W:** tau da decadimento del bosone W
- **Candidati di segnale:** 3 muoni a carica ± 1 selezionati dal trigger + selezioni offline (vertice comune, qualità di ricostruzione, massa invariante)
- **Soppressione del fondo:**
 - Veti sulle risonanze $\varphi \rightarrow \mu\mu$ e $\omega \rightarrow \mu\mu$
 - MVA per sopprimere i fake sviluppata appositamente per il canale HF
 - MVA per la soppressione del background combinatorio
- **Categorizzazione degli eventi** basata sulla risoluzione della massa invariante
 - 3 categorie per anno e per canale



$\tau \rightarrow 3\mu$



Risultati:

- Segnale estratto da fit di massima verosimiglianza della massa invariante dei 3 muoni per ciascuna categoria
- HF: (gaussiana + crystalball) + esponenziale
- W: gaussiana + polinomio
- Limite superiore osservato (atteso) al L.C. del 90%:
 - $B(\tau \rightarrow 3\mu) < 3.1(2.7) \cdot 10^{-8}$ con i dati 2017/2018
- Includendo il risultato 2016 [\[JHEP01\(2021\)163\]](#)
 - $B(\tau \rightarrow 3\mu) < 2.9(2.4) \cdot 10^{-8}$ al L.C. del 90%

Il miglior risultato ottenuto ad un collisore adronico!

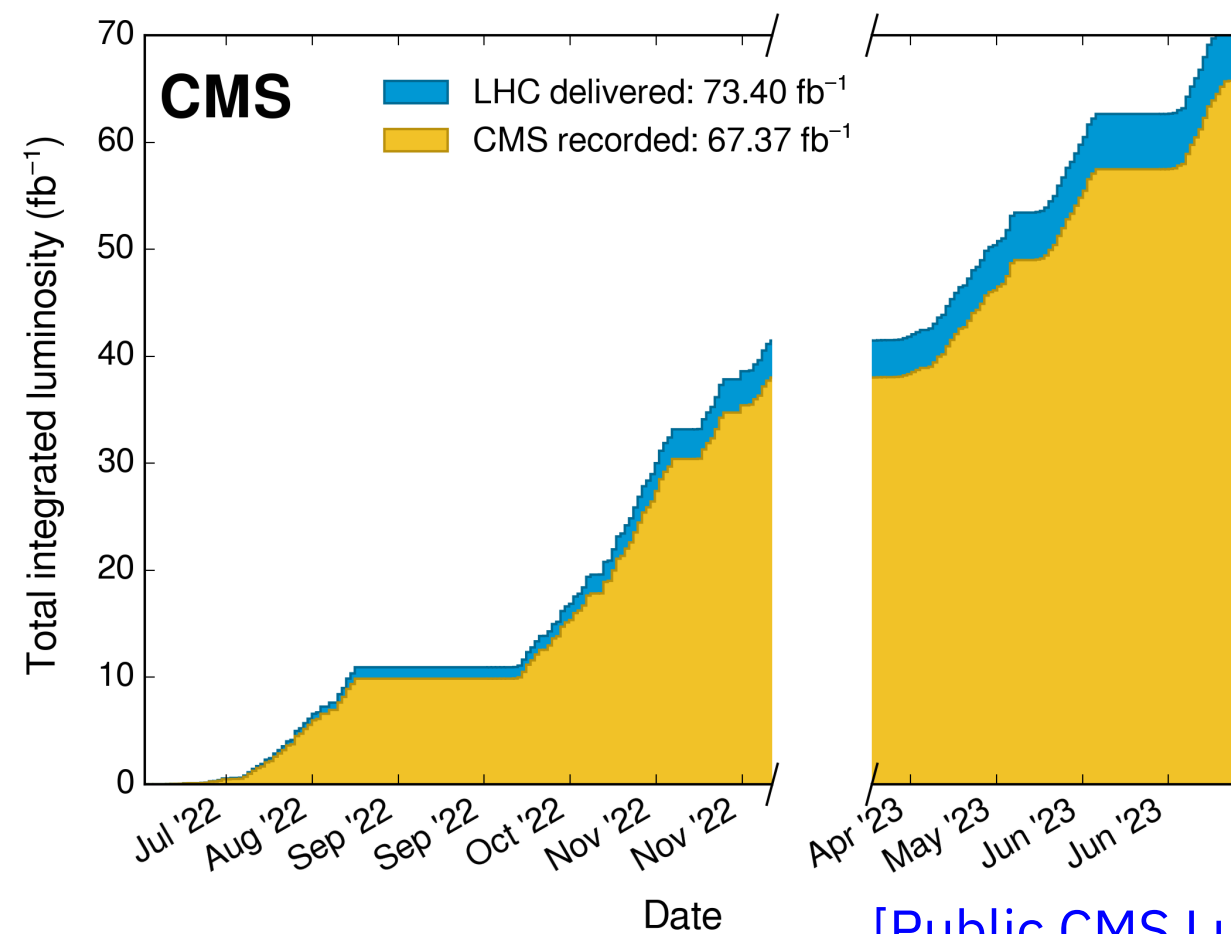
[\[arXiv:2312.02371*\]](#)



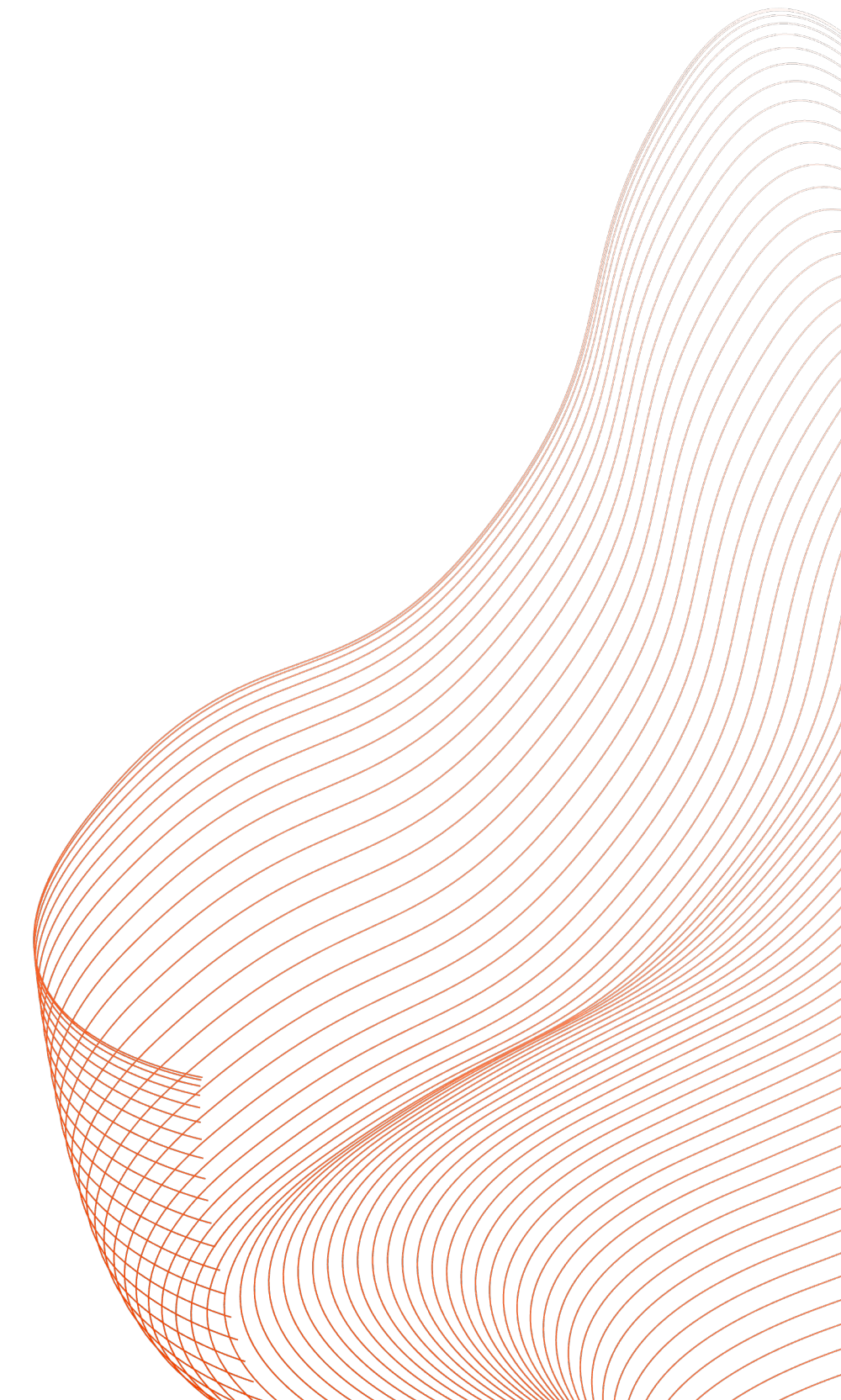
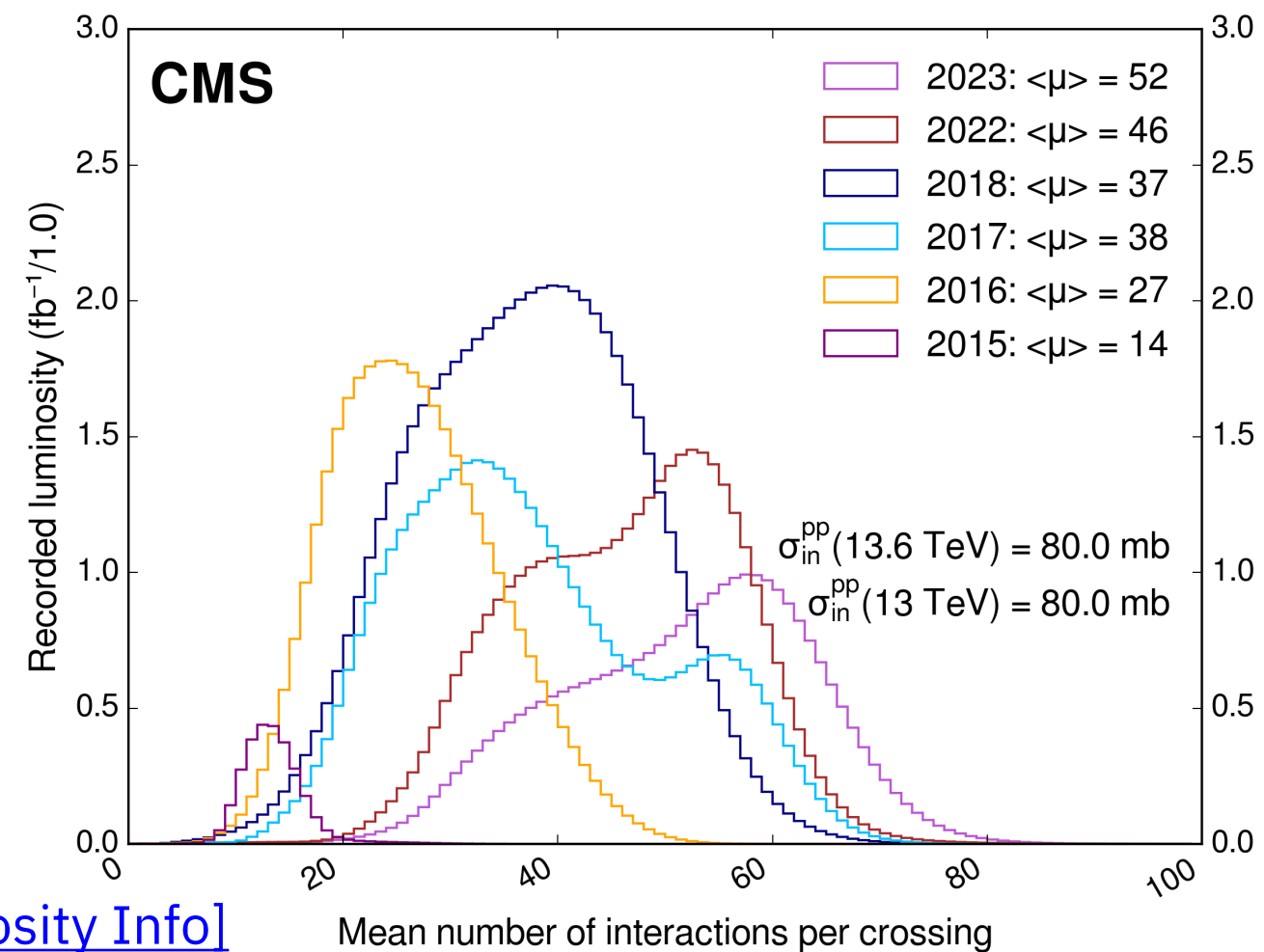
Prospettive per Run 3

Presenza dati Run 3:

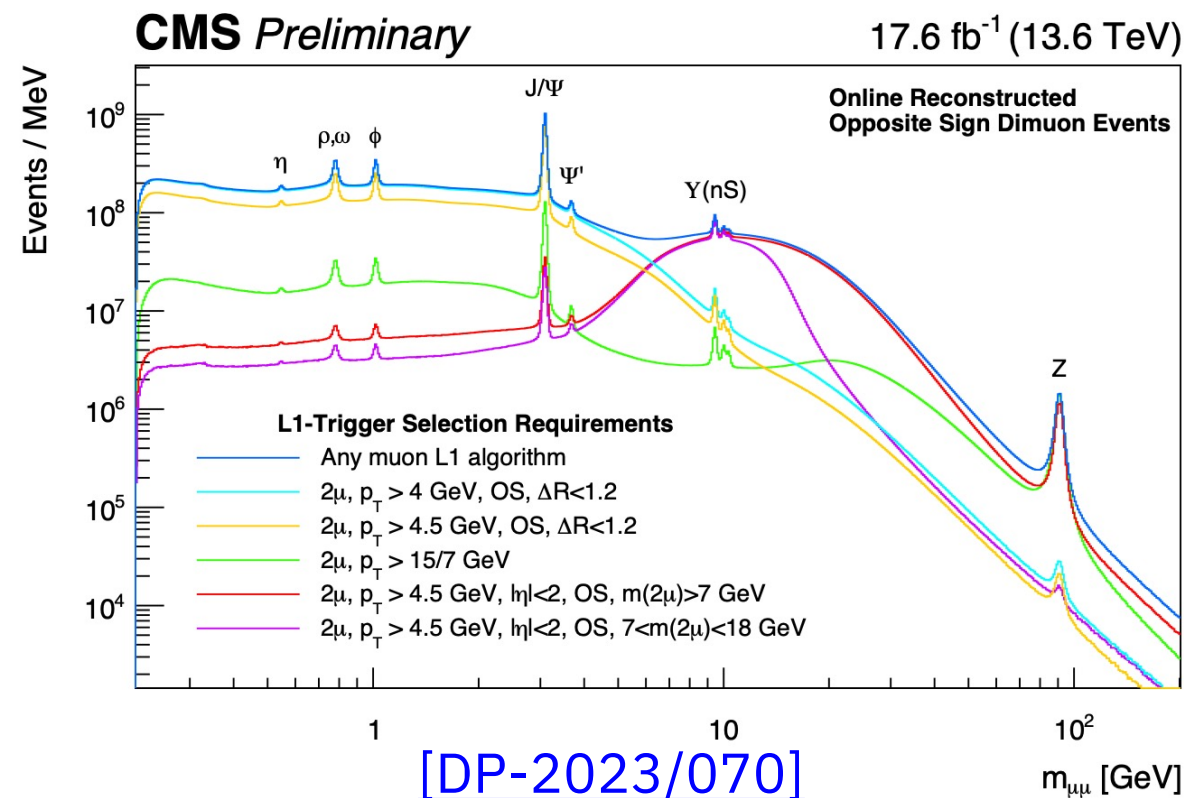
- Condizioni di acquisizione dati più impegnative:
 - Maggiore PU (35 → 50 interazioni per crossing) e stessa bandwidth.



[\[Public CMS Luminosity Info\]](#)



Prospettive per Run 3

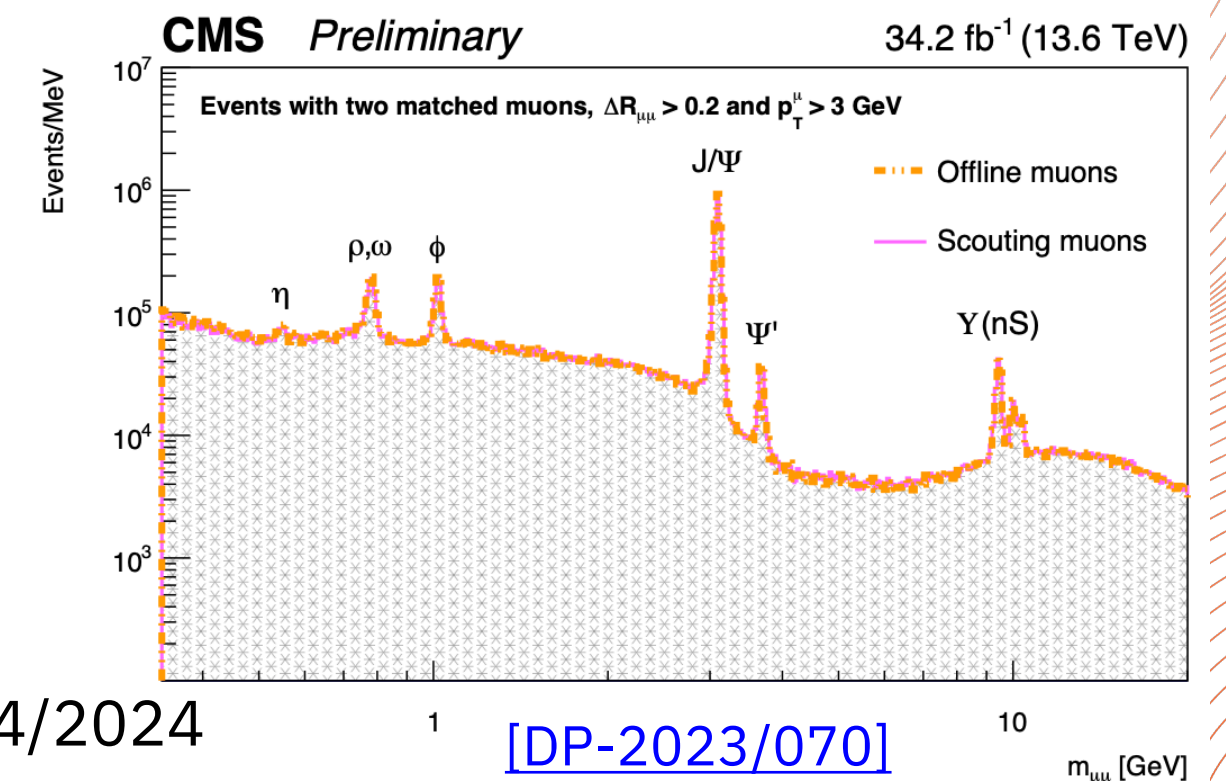


Strategia di trigger Run 3:

- Trigger inclusivo di due muoni:
 - Adatto per diversi studi $b \rightarrow sll$, charmonio e spettroscopia del B, LFV $\tau \rightarrow \mu\mu\mu$, ricerche esotiche e ricerca di $\eta \rightarrow \mu^+\mu^-e^+e^-$
- Di-electron trigger [\[PoS ICHEP2022 \(2022\) 681\]](#)
 - Adatto a ricerca di violazione dell'universalità del sapore leptonic

- Scouting migliorato: [\[arXiv:2403.16134*\]](#)

- Per le risonanze sotto 11 GeV, performance di ricostruzione dei muoni scouting vs offline compatibili a 1-1.5%
- Aumento della rate

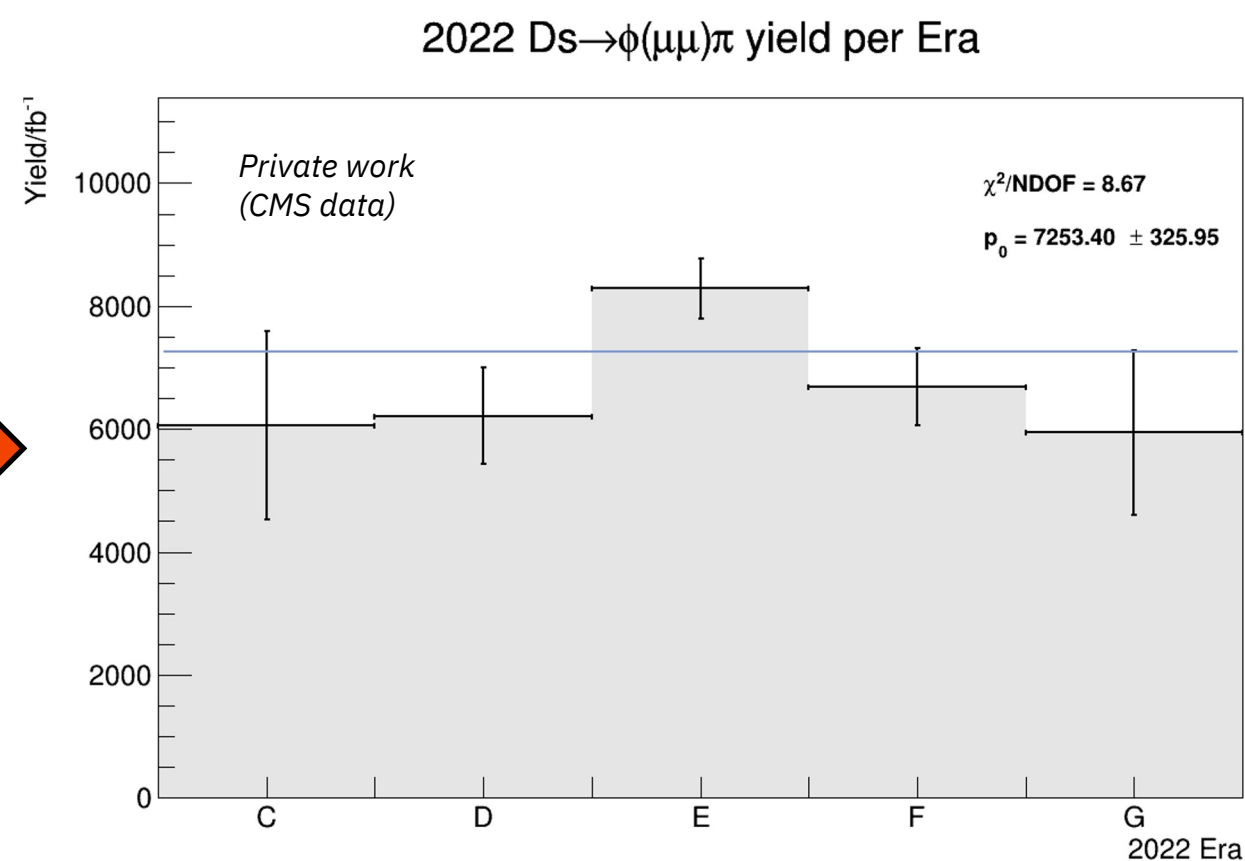
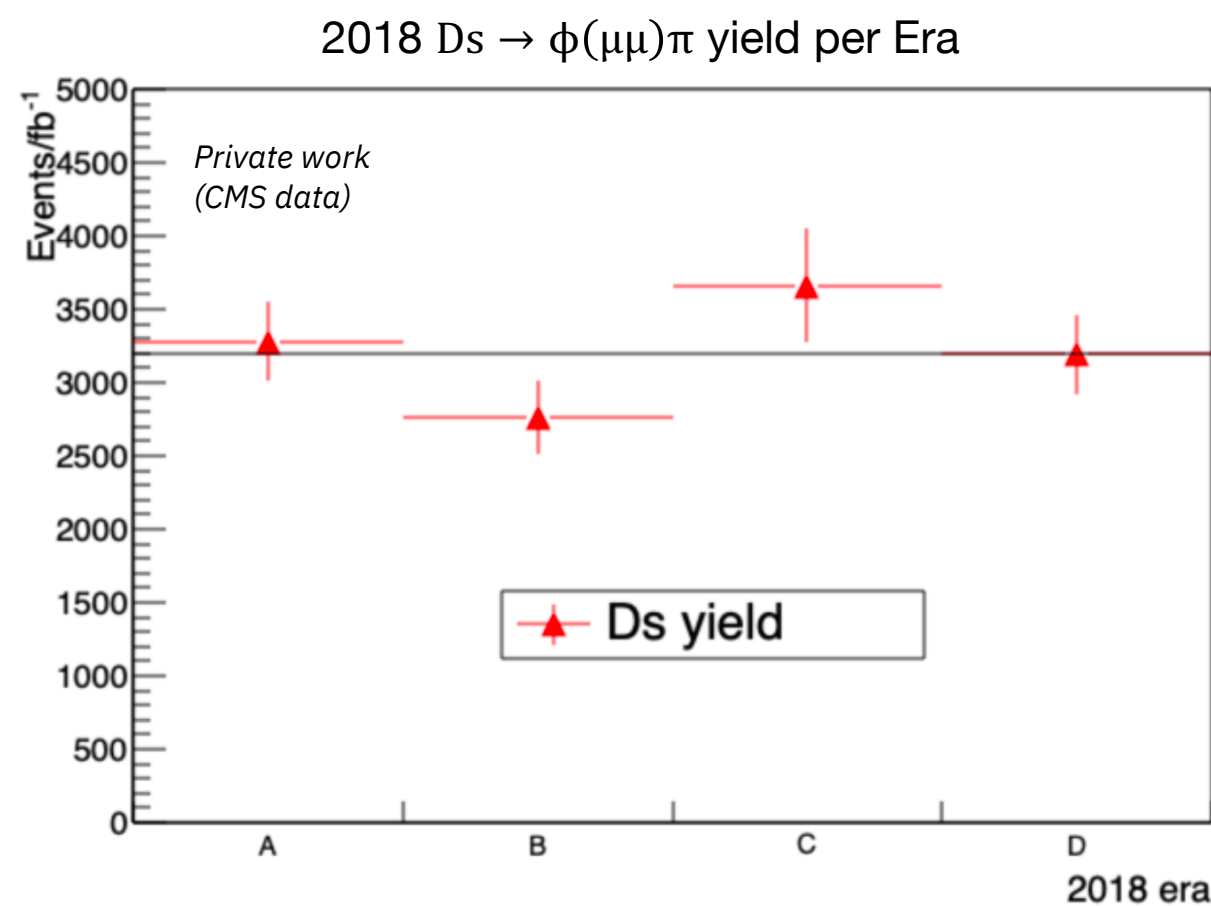


Prospettive per Run 3

Esempio: analisi $\tau \rightarrow 3\mu$

Miglioramento anche del trigger dedicato a questa analisi con una minore soglia in p_T

- +60% di efficienza di trigger rispetto a Run 2
- Incremento $\text{yield}/\text{fb}^{-1}$ delle D_s misurato nei dati: $3200 \rightarrow 7200$



Conclusioni

Decadimenti rari:

- Tutte analisi con muoni nello stato finale:
 - Possibili grazie a 3 diverse strategie di trigger (Scouting, B-Parking e Standard)

Prima osservazione dei decadimenti $\eta \rightarrow 4\mu$

- BR 25% più alto dello SM ma comunque compatibile entro le incertezze

Prima osservazione del decadimento $J/\Psi \rightarrow 4\mu$

- BR compatibile con il le predizioni dello SM

Ricerca di $\tau \rightarrow 3\mu$

- Nessuna evidenza
- Miglior risultato ottenuto ad un collisore adronico

Prospettive Run 3:

- Condizioni di acquisizione dati più impegnative
- Miglioramenti nel sistema di trigger



Grazie per l'attenzione!



Backup



Marco Buonsante — IFAE — 05/04/2024

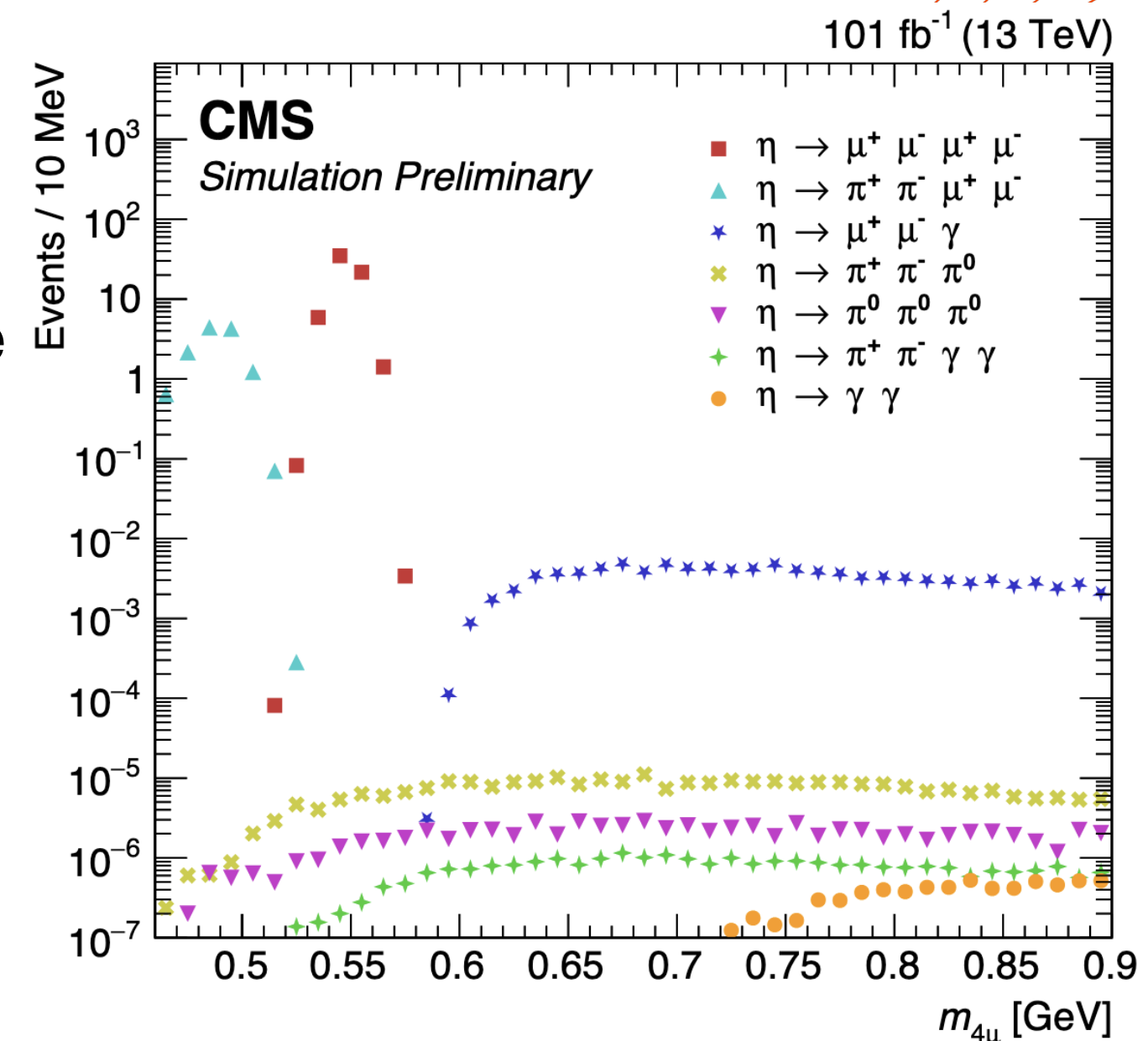
$$\eta \rightarrow 4\mu$$

Studi del fondo:

Controllo eseguito per verificare la presenza di fondi che piccano intorno alla massa di η

- $\eta \rightarrow \mu^+ \mu^- \gamma$ con γ che converte nel materiale: non picca ed è shiftato ad alta $m(4\mu)$
- $\eta \rightarrow \mu^+ \mu^- \pi^+ \pi^-$ con π mis-identificati come μ : picca ma è shiftato a massa più bassa per via dell'errata ipotesi sulla massa dei π

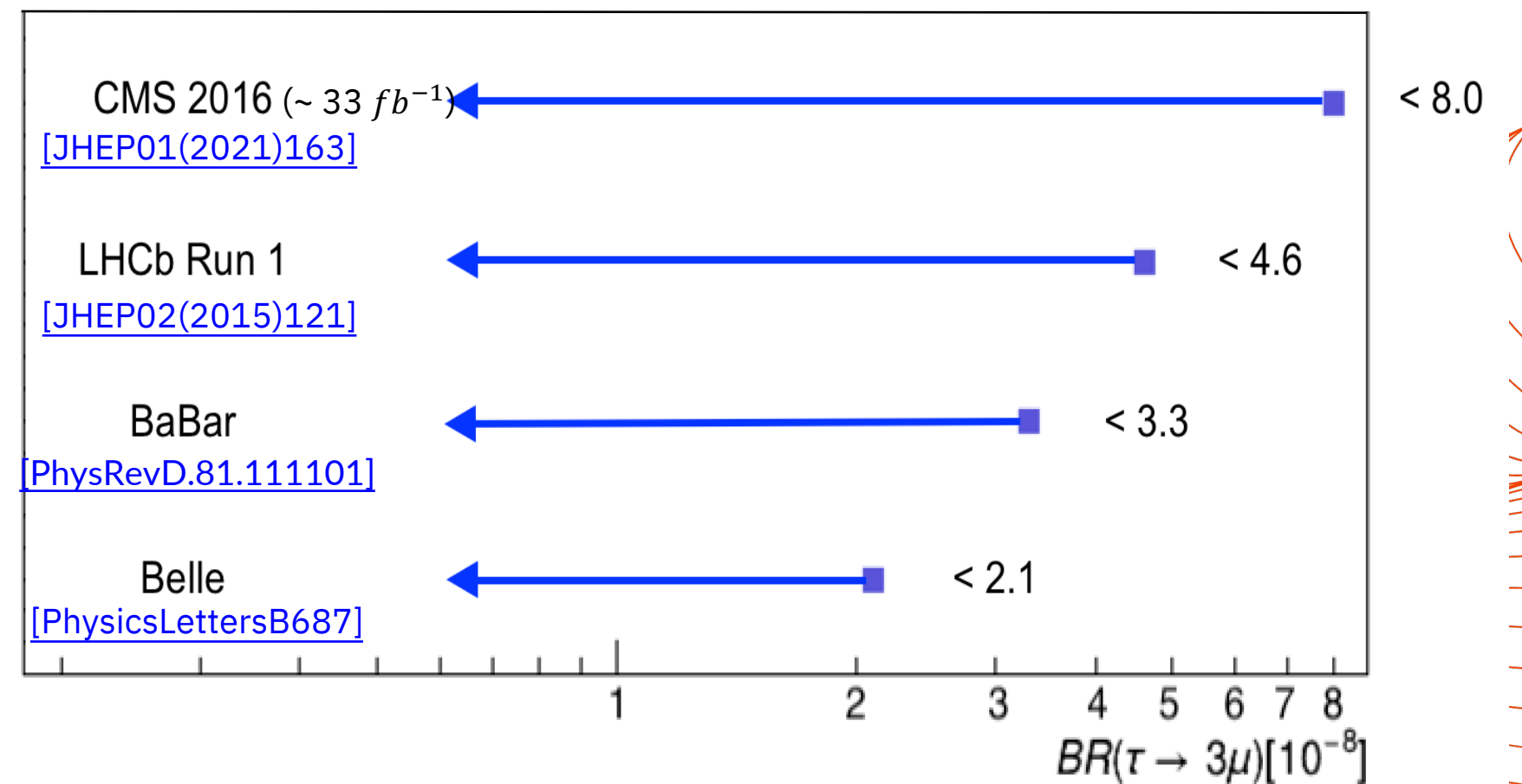
Conclusione: nessuna possibile componente del fondo che picchi intorno alla massa di η



$\tau \rightarrow 3\mu$

Stato dell'arte:

- Non è stata trovata alcuna prova di questo decadimento.
- Limiti superiori sul $\mathcal{B}(\tau \rightarrow 3\mu)$ misurati da esperimenti $e^+ e^-$ e collisori adronici



Limiti superiori al livello di confidenza del 90%



$\tau \rightarrow 3\mu$

LHC è una fabbrica di τ

Due sorgenti principali di leptoni τ a LHC:

- Heavy Flavour (HF) channel (~ 99.9 %)
 - Basso p_T e alto $|\eta|$
 - Sensibile alla presenza di K e π mis-identificati come muoni
- W channel (~ 0.01 %)
 - Alto p_T e basso $|\eta|$

Process 1	Process 2	No. of τ^*
$pp \rightarrow c\bar{c} + \dots$	$D \rightarrow \tau\nu_\tau$ (95% D_s , 5% D^\pm)	$11.8 \cdot 10^{12}$
$pp \rightarrow b\bar{b} + \dots$	$B \rightarrow \tau\nu_\tau + \dots$ (44% B^\pm , 45% B^0 , 11% B_s^0)	$5.45 \cdot 10^{12}$
	$B \rightarrow D(\tau\nu_\tau) + \dots$ (98% D_s , 2% D^\pm)	$1.86 \cdot 10^{12}$
$pp \rightarrow W + \dots$	$W \rightarrow \tau\nu_\tau$	$1.99 \cdot 10^9$
$pp \rightarrow Z + \dots$	$Z \rightarrow \tau\tau$	$3.86 \cdot 10^8$

* Si riferisce al numero di τ previsto per una luminosità integrata di 97.7 fb^{-1}



$\tau \rightarrow 3\mu$

Categorizzazione degli eventi

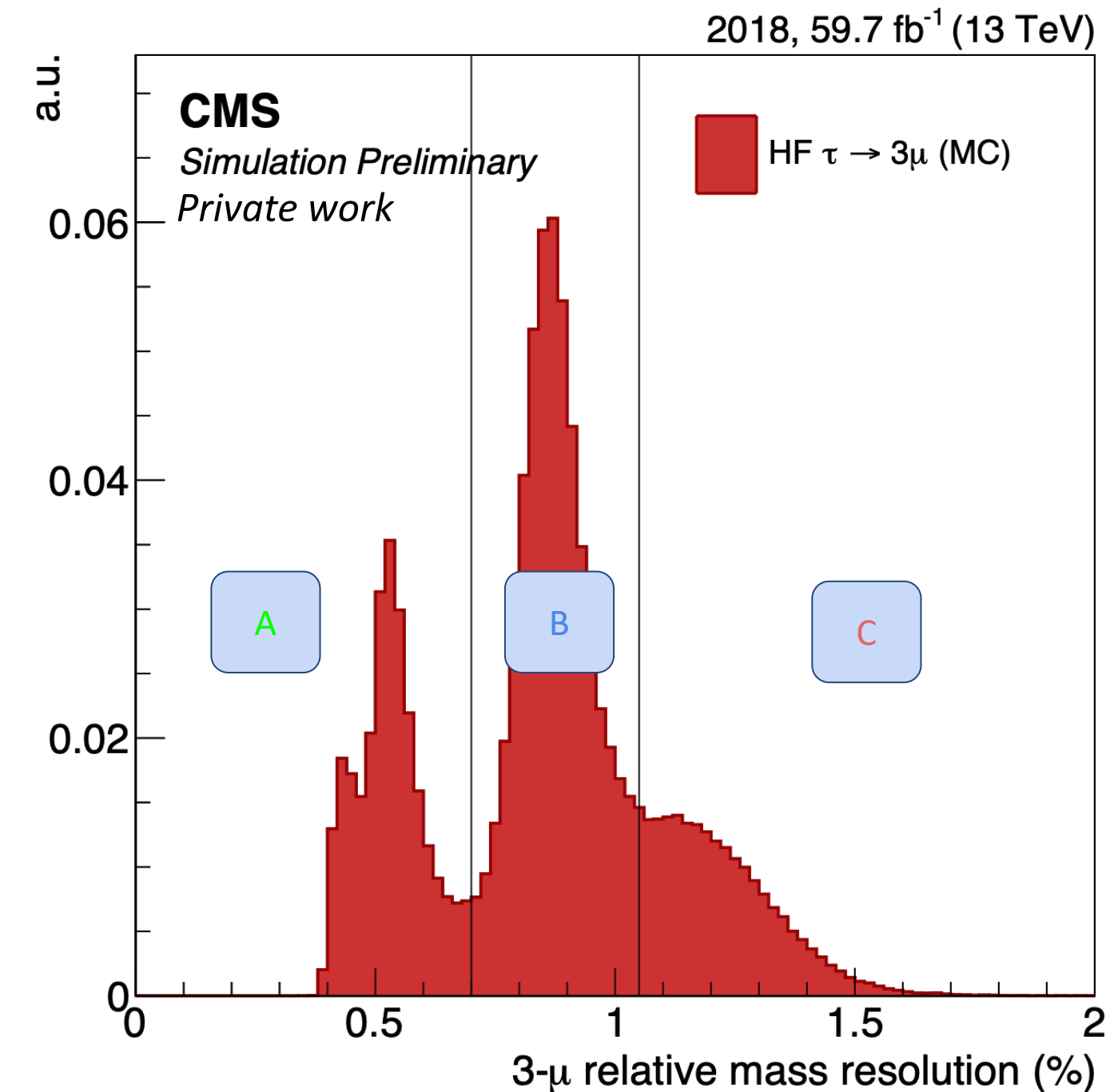
Dati e MC sono divisi in tre categorie basate sulla risoluzione della massa invariante:

$$\sigma_m/m = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^3 (m(\delta\tau_i) - m(\tau))^2}}{m(\tau)}$$

dove $\delta\tau_i = (p_{Ti} + \delta p_{Ti}, \eta_i, \phi_i, m_i) + \sum_{j=1, j \neq i}^3 (p_{Tj}, \eta_j, \phi_j, m_j)$

- **A** $\frac{\sigma_m}{m} < 0.7\%$
- **B**: $0.7\% \leq \frac{\sigma_m}{m} < 1.1\%$
- **C**: $\frac{\sigma_m}{m} > 1.1\%$

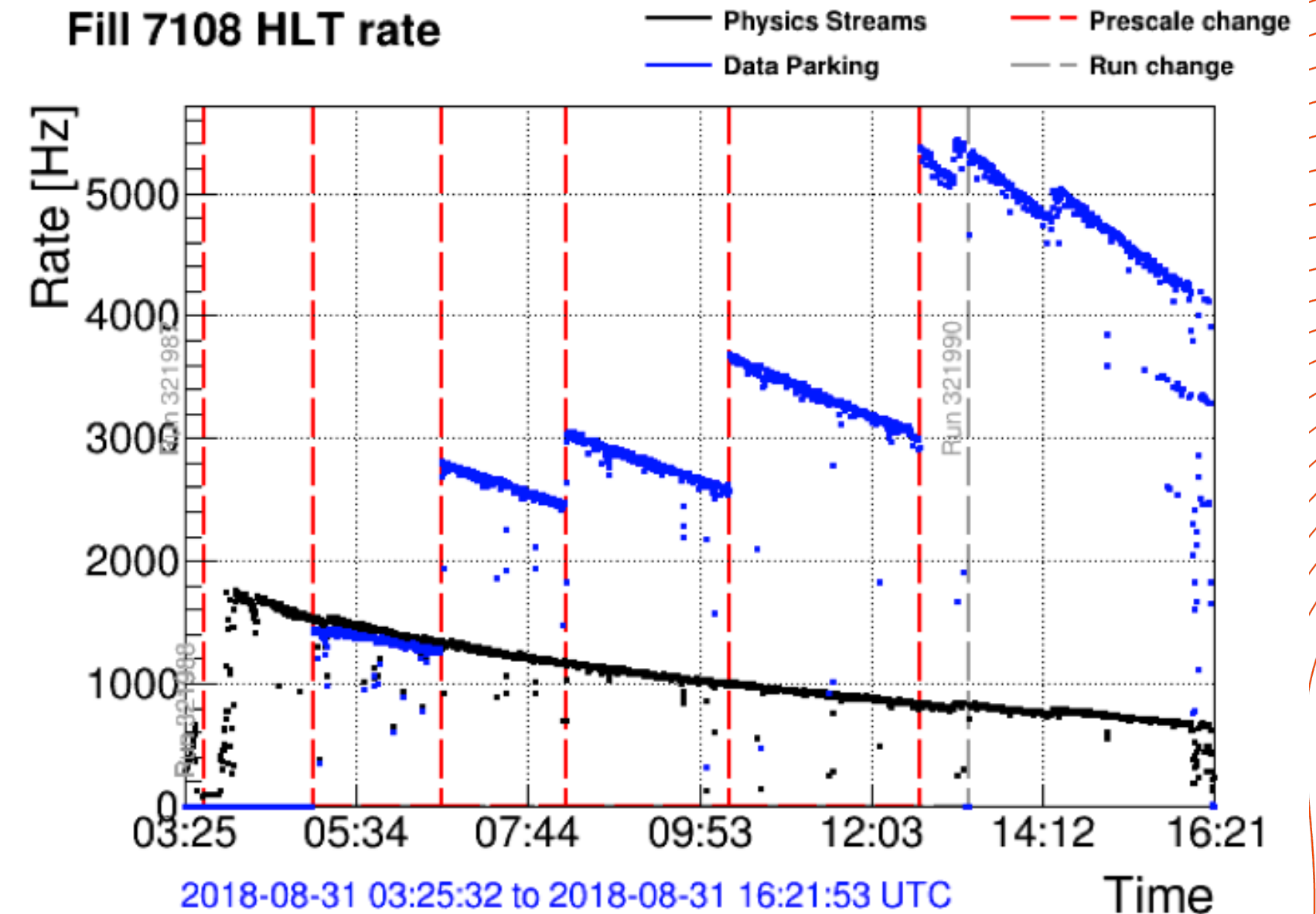
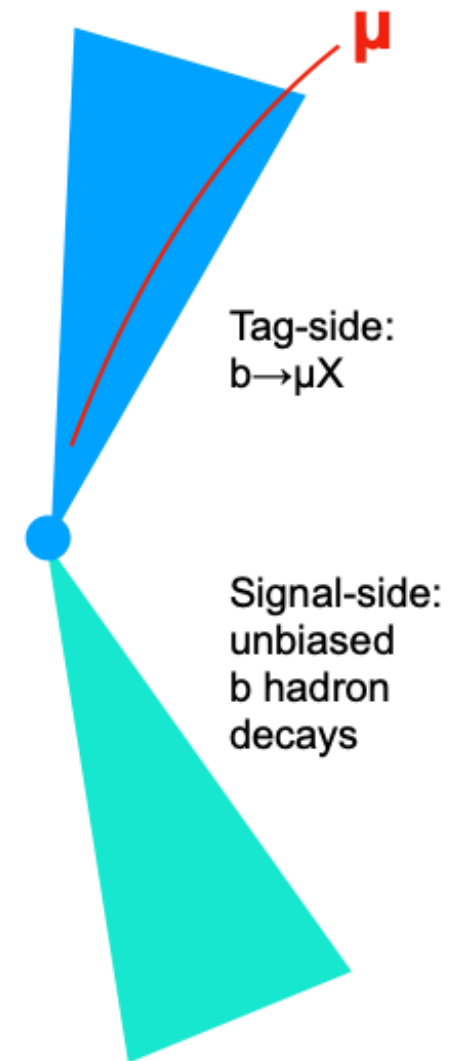
Queste regioni sono correlate alla pseudorapidità dei muoni nello stato finale e riflettono la geometria del tracker interno che domina la risoluzione sui p_T per muoni a basso p_T



J/Psi \rightarrow 4 μ

B-Parking dataset :

- Raccolti da trigger di singolo muone
- Rate che aumenta a gradini man mano che la rate del Physics Stream decresce
- Il dataset B-parking contiene ~10 miliardi di decadimenti unbiased di adroni contenenti quark b
- Luminosità integrata pari a 41.5 ± 1.0 fb⁻¹



[CMS DP -2019/043]

