



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



IFAE 2023  
Incontri di Fisica delle Alte Energie



# Fisica elettrodebole nella regione in avanti con LHCb

DAVIDE ZULIANI

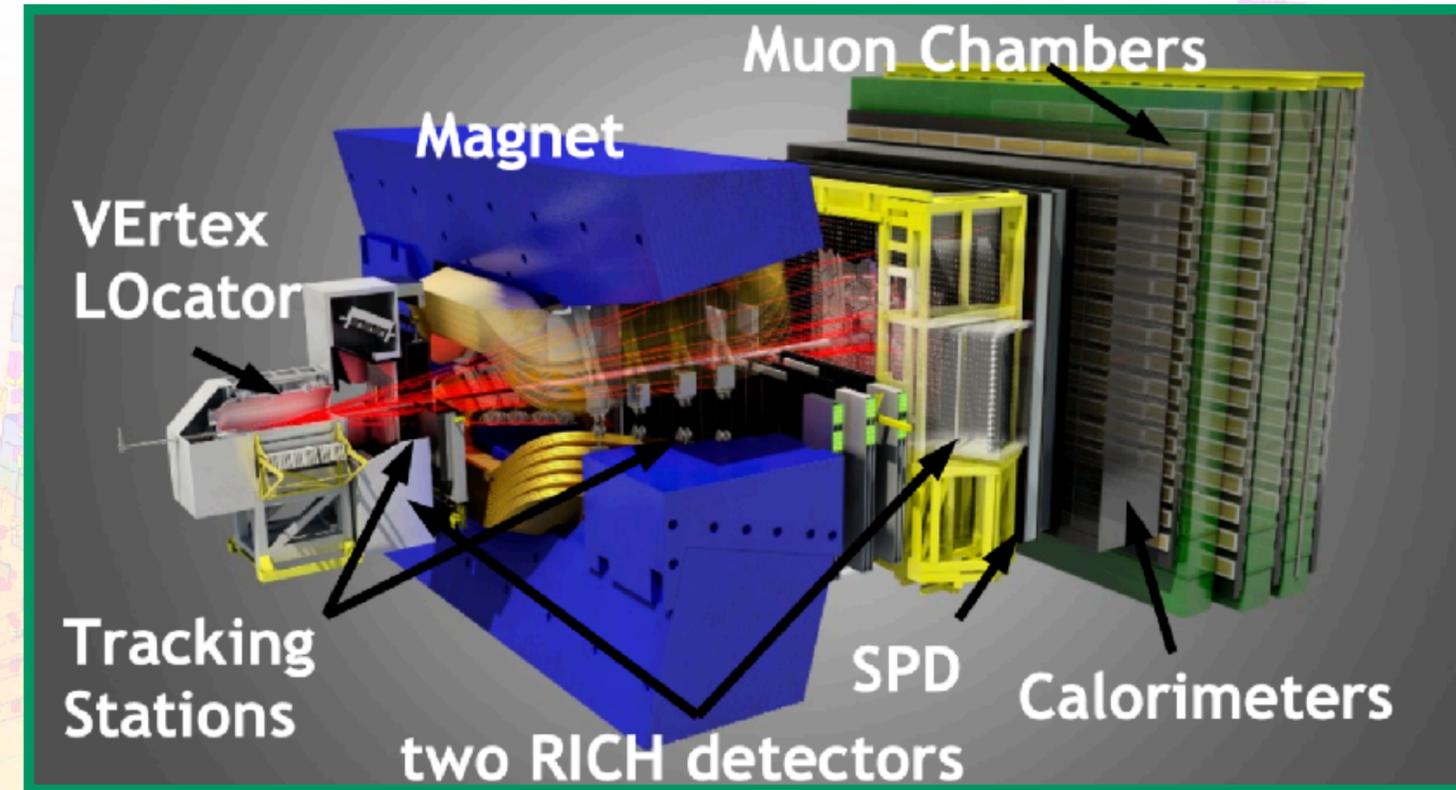
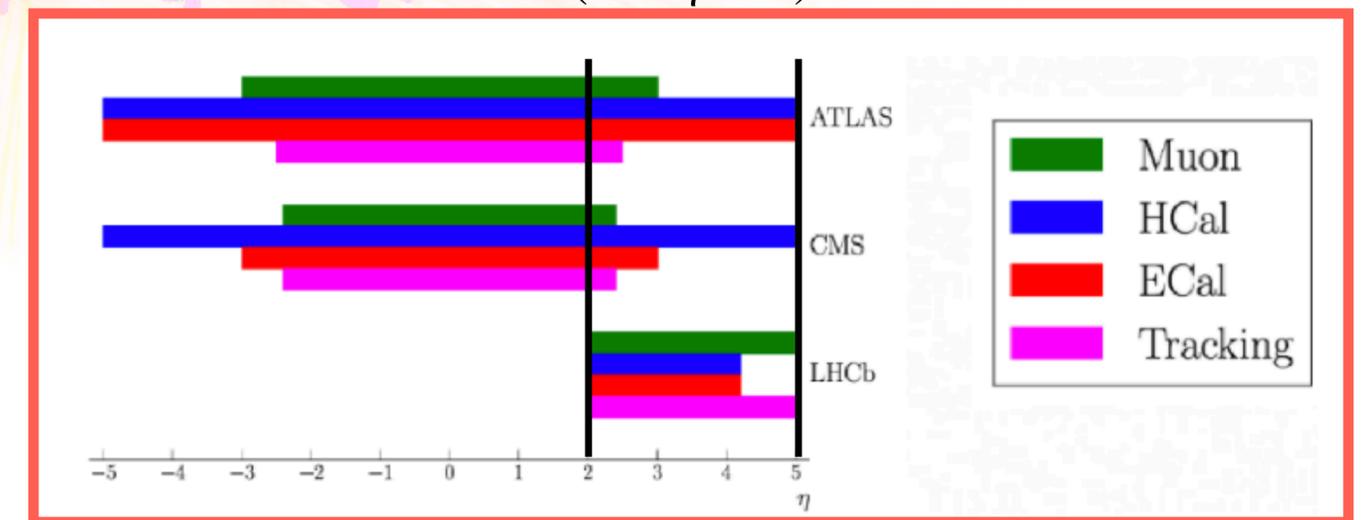
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA E INFN PADOVA

CATANIA, 12-14 APRILE 2023

# Esperimento LHCb

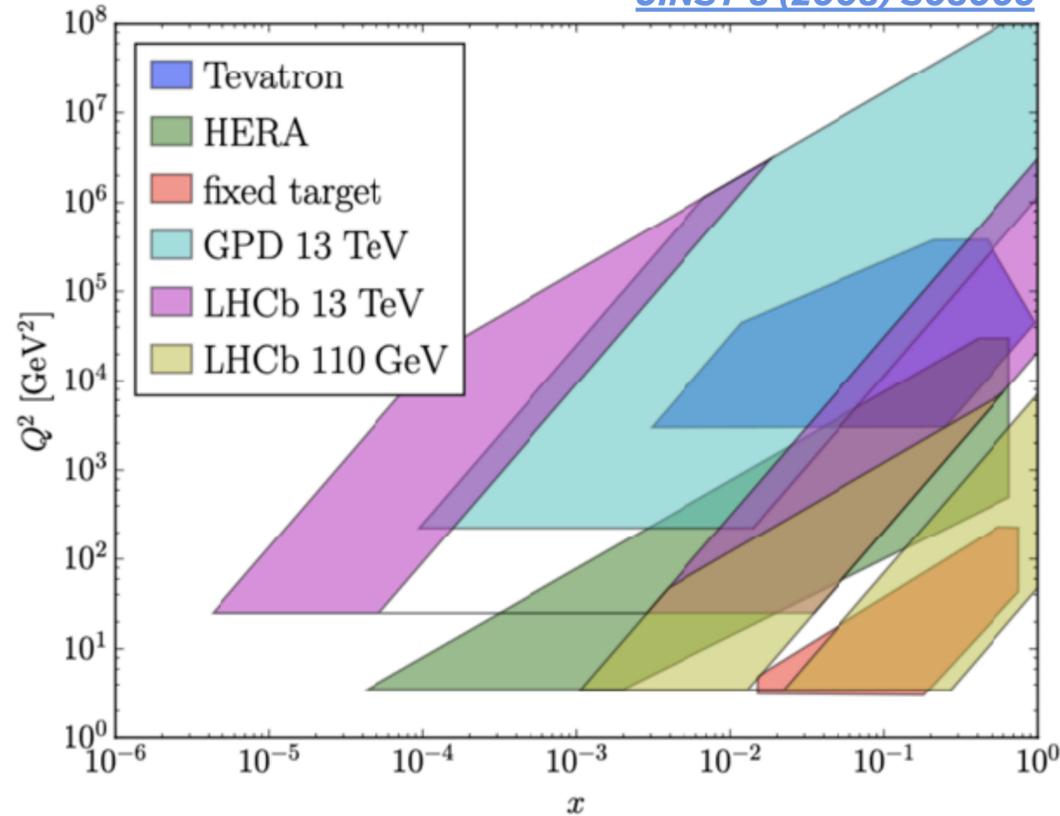
- **Spettrometro a singolo braccio**, originariamente progettato per studiare la fisica degli adroni  $b$  e  $c$
- Studia la regione **“in avanti”, complementare** ad ATLAS e CMS
  - Pseudorapidità  $2 < \eta < 5$
- **Eccellenti prestazioni** nella ricostruzione delle **tracce**
  - $\delta p/p \sim 0.5 - 1\%$  per tracce con  $p \sim 5 - 100$  GeV
  - Risoluzione IP  $\sim 20 \mu\text{m}$  per tracce con alto  $p_T$
- **Basso numero di collisioni per evento**
- Possibilità di **selezionare eventi con basso  $p_T$**
- Svantaggi:
  - **Luminosità ridotta** rispetto ad ATLAS e CMS
  - Accettanza angolare **ridotta**
  - **Impossibile** misurare l'**energia mancante**

JINST 3 (2008) S08005

 $(2 < \eta < 5)$ 

# Fisica Elettrodebole a LHCb

JINST 3 (2008) S08005



- Ad LHCb è possibile studiare una **regione dello spazio delle fasi inesplorata** da altri esperimenti
- Questo permette di studiare la **QCD perturbativa** (pQCD) e le **distribuzioni di probabilità dei partoni** (PDF):
  - Per **alti valori di  $x$**
  - Per **bassi valori di  $x$  e alti valori di  $Q^2$**
- Per testare le predizioni teoriche del Modello Standard, si possono misurare **processi di Fisica Elettrodebole** che coinvolgono i bosoni vettori  $W$  e  $Z$

Risultati QEE

- Negli ultimi anni, ad LHCb sono state effettuate **una serie di misure di Fisica Elettrodebole**
- Fondamentale apporto di queste misure, soprattutto in vista del **futuro caso di fisica dell'esperimento**

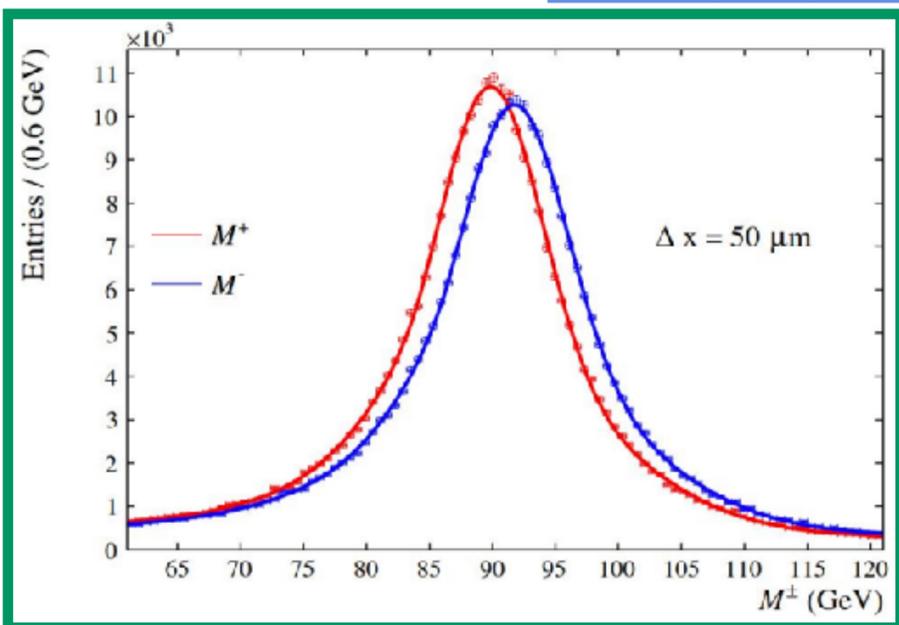
| TITLE  | DOCUMENT NUMBER                             | JOURNAL                            | SUBMITTED ON |
|--|---|------------------------------------|--------------|
| Search for the rare decays $W^+ \rightarrow D_s^+ \gamma$ and $Z \rightarrow D^0 \gamma$ at LHCb                                     | PAPER-2022-033<br>arXiv:2212.07120<br>[PDF] | Chin. Phys. C                      | 14 Dec 2022  |
| Multidifferential study of identified charged hadron distributions in Z-tagged jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV | PAPER-2022-013<br>arXiv:2208.11691<br>[PDF] | PRD Lett                           | 24 Aug 2022  |
| First measurement of $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$ angular coefficients in the forward region of pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV  | PAPER-2021-048<br>arXiv:2203.01602<br>[PDF] | Phys. Rev. Lett. 129 (2022) 091801 | 03 Mar 2022  |
| Precision measurement of forward Z boson production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV                               | PAPER-2021-037<br>arXiv:2112.07458<br>[PDF] | JHEP 07 (2022) 26                  | 14 Dec 2021  |
| Search for massive long-lived particles decaying semileptonically at $\sqrt{s} = 13$ TeV   | PAPER-2021-028<br>arXiv:2110.07293<br>[PDF] | Eur. Phys. J. C82 (2022) 373       | 14 Oct 2021  |
| Study of Z bosons produced in association with charm in the forward region   | PAPER-2021-029<br>arXiv:2109.08084<br>[PDF] | Phys. Rev. Lett. 128 (2022) 082001 | 16 Sep 2021  |
| Measurement of the W boson mass  | PAPER-2021-024<br>arXiv:2109.01113<br>[PDF] | JHEP 01 (2022) 036                 | 02 Sep 2021  |

Misure descritte in questa presentazione

# Misura di $m_W$ a LHCb

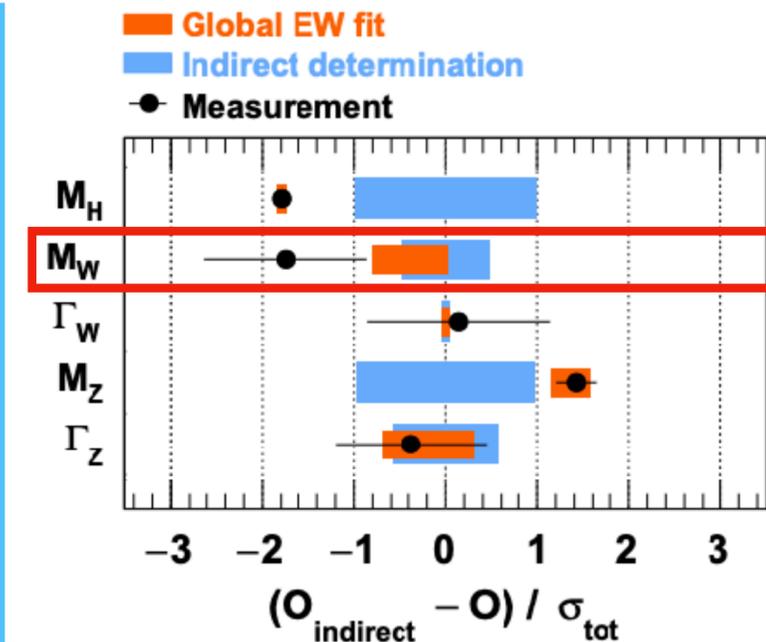
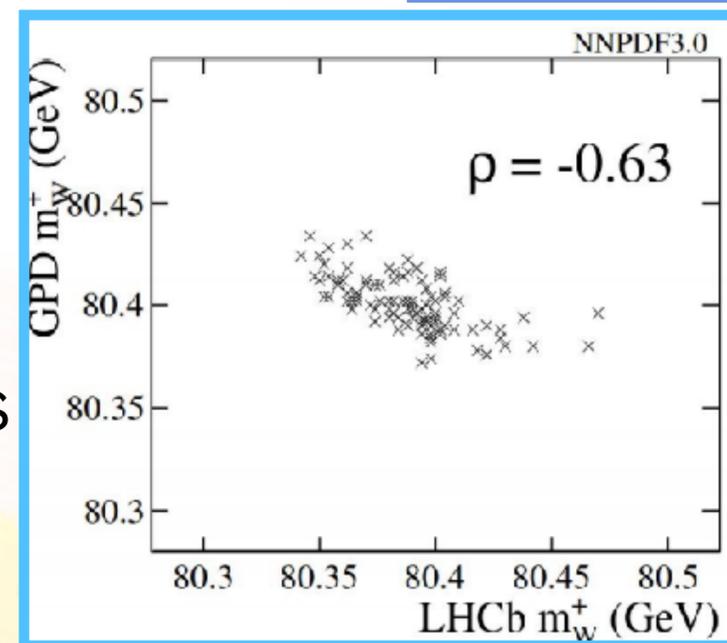
- **Parametro fondamentale** del Modello Standard
- Le incertezze sulle PDF misurate a LHCb sono **anticorrelate** con le incertezze misurate ad ATLAS/CMS
- Possibilità di raggiungere una **sensibilità vicina al fit elettrodebole** ( $\sim 7$  MeV) **combinando** le misure di LHC

JHEP 01 (2022) 036

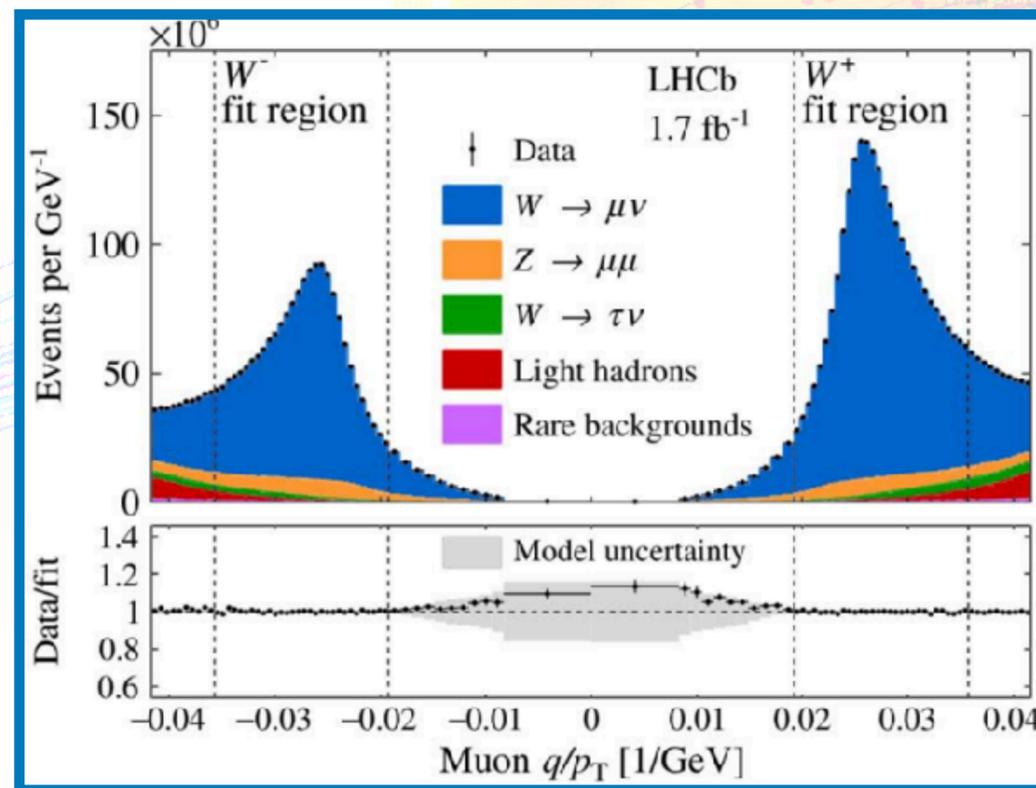


$$M^\pm = \sqrt{2p^\pm p_T^\pm \frac{p^\mp}{p_T^\mp} (1 - \cos \theta)}$$

EPJC 75 001 (2015)



JHEP 01 (2022) 036



- Misura basata sul  $p_T$  **del muone** derivante dal decadimento del bosone  $W$
- Sono stati utilizzati i **dati del 2016**,  $\mathcal{L} \sim 1.7 \text{ fb}^{-1}$
- È necessaria un'accurata modellizzazione del rivelatore, in particolare vanno **corretti effetti di disallineamento**
- Misura effettuata tramite un **fit alla distribuzione di  $q/p_T$**

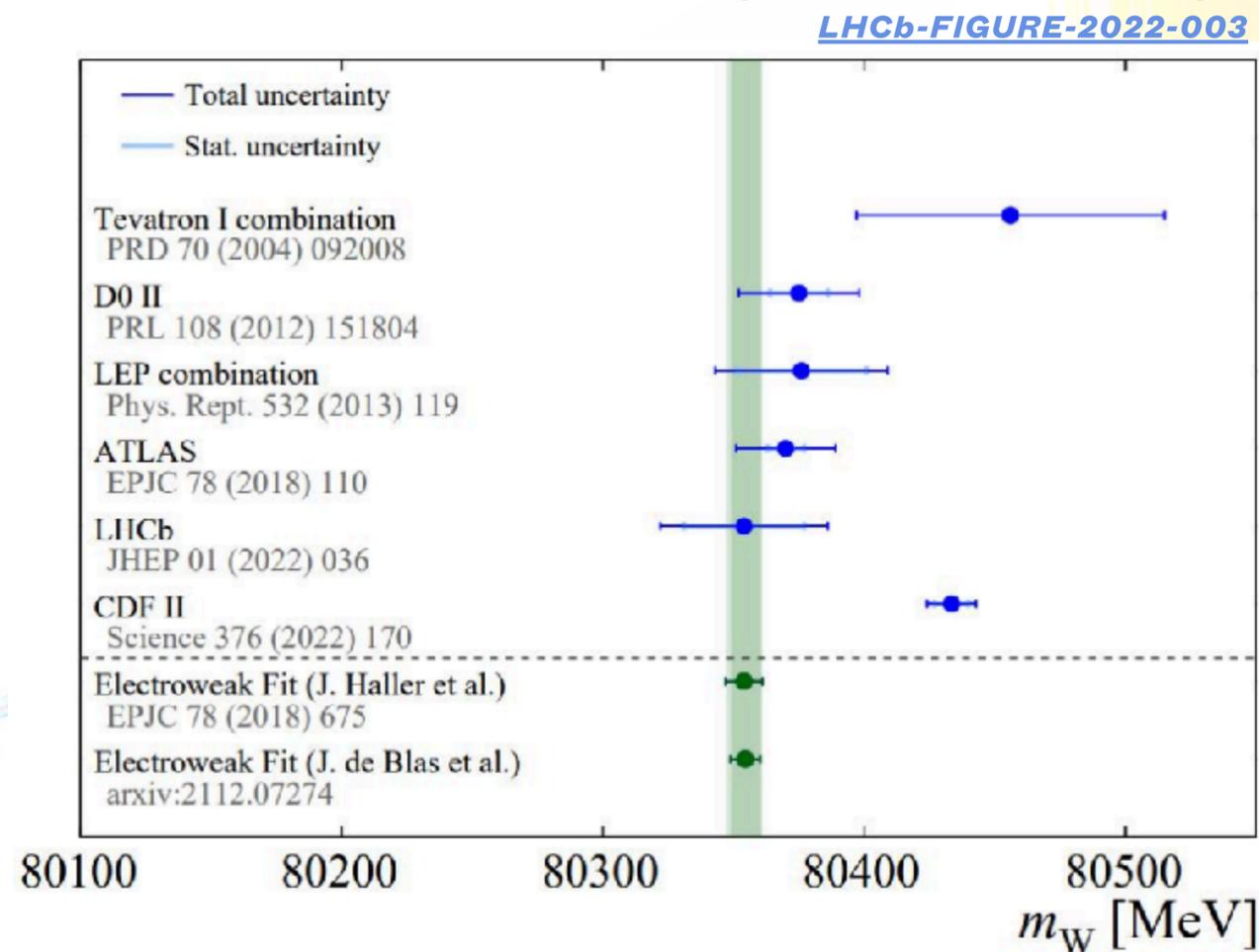
# Misura di $m_W$ a LHCb

- Particolare attenzione al calcolo delle **incertezze sistematiche**
  - **PDF**
  - **Modelli teorici utilizzati**
  - **Incetnze sperimentali legate alla strategia utilizzata**

| Source                                   | Size [ MeV ] |
|--|--------------|
| Parton distribution functions            | 9            |
| Theory (excl. PDFs) total                | 17           |
| Transverse momentum model                | 11           |
| Angular coefficients                     | 10           |
| QED FSR model                            | 7            |
| Additional electroweak corrections       | 5            |
| Experimental total                       | 10           |
| Momentum scale and resolution modelling  | 7            |
| Muon ID, trigger and tracking efficiency | 6            |
| Isolation efficiency                     | 4            |
| QCD background                           | 2            |
| Statistical                              | 23           |
| <b>Total</b>                             | <b>32</b>    |

JHEP 01 (2022) 036

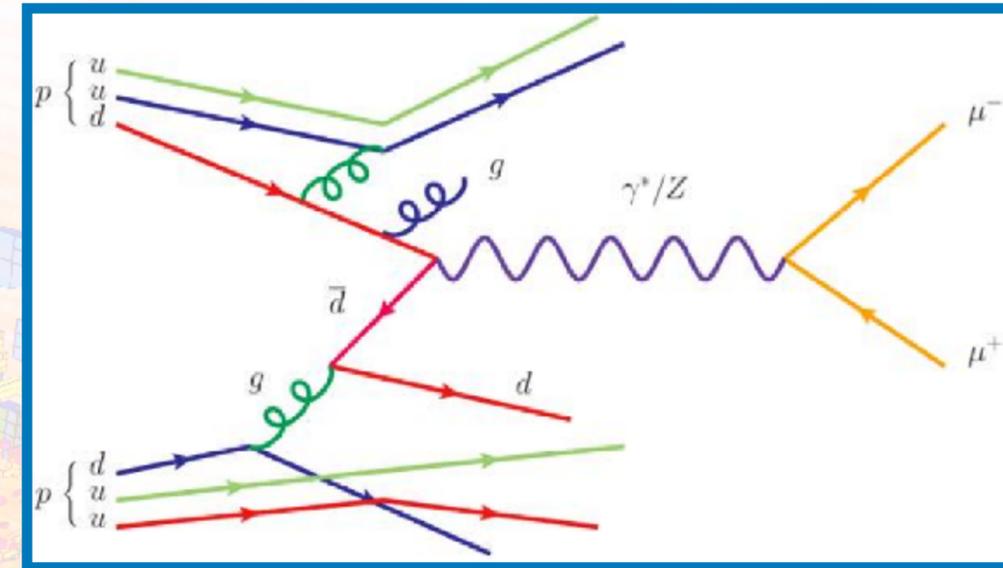
$$m_W = 80364 \pm 23_{\text{stat}} \pm 11_{\text{exp}} \pm 17_{\text{theory}} \pm 9_{\text{PDF}} \text{ MeV}$$



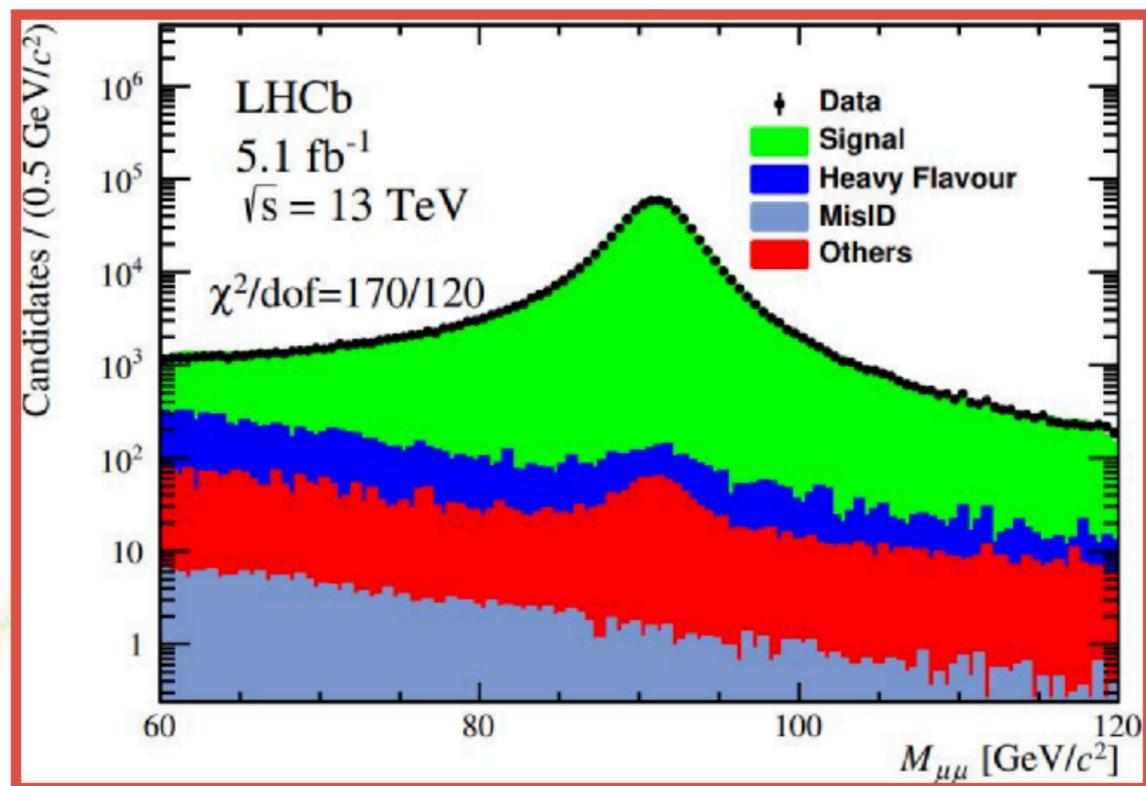
- Con 1/3 dei dati analizzati, la massa del bosone  $W$  è stata misurata con **un'incertezza**  $\sim 32$  MeV
- C'è un notevole impegno per:
  - Terminare l'analisi di tutti i dati del Run 2
  - **Migliorare la modellizzazione e ridurre le incertezze sistematiche**
- **È possibile raggiungere un'incertezza  $\sim 20$  MeV con tutti i dati del Run 2**

# Misura della sezione d'urto di $Z \rightarrow \mu\mu$

- Misura di precisione delle predizioni di **pQCD al NNLO**
- **Precisione sperimentale simile a quella teorica  $\mathcal{O}(1\%)$**
- Misura fondamentale per le **PDF dei quark  $u$  e  $d$**  nella regione ad alto  $x$
- Analizzati tutti i dati del Run 2 ( $\mathcal{L} \sim 5.1 \text{ fb}^{-1}$ )



[JHEP 07 \(2022\) 026](#)



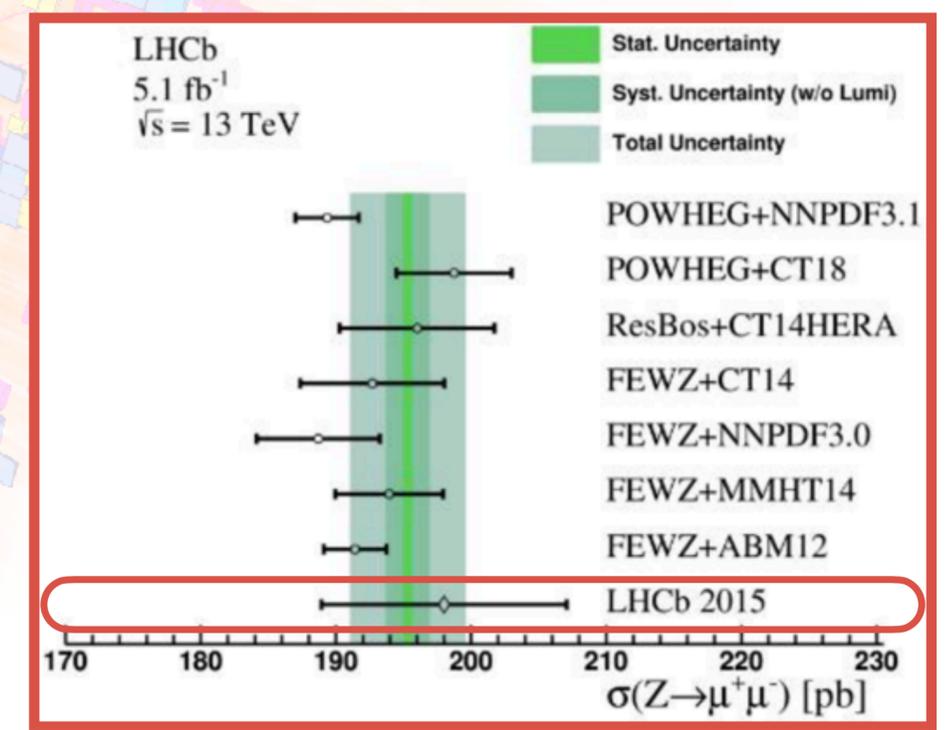
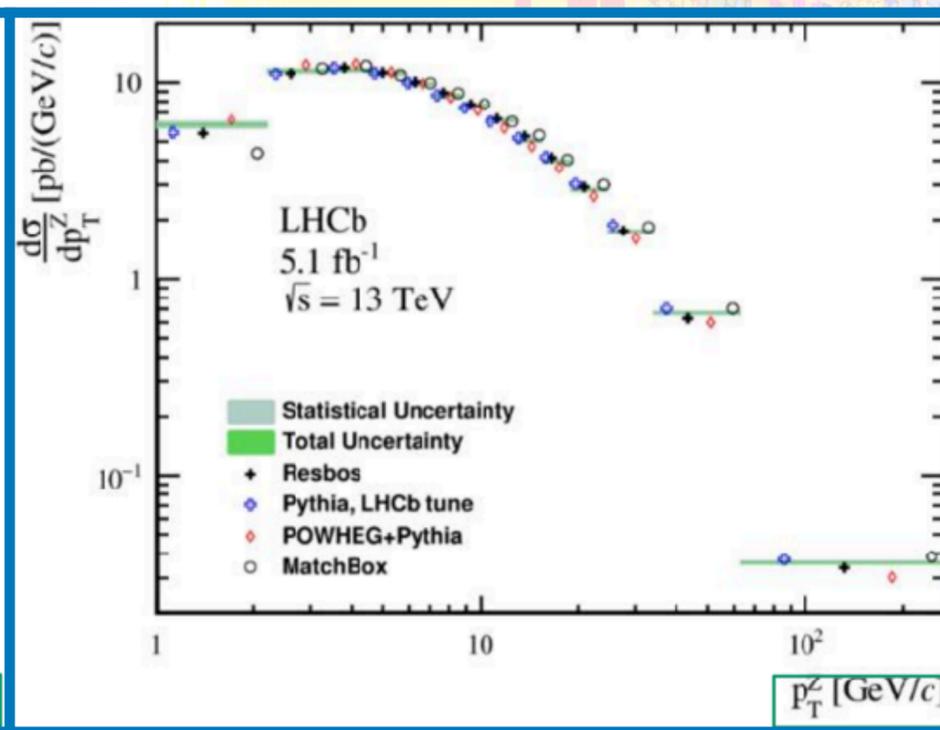
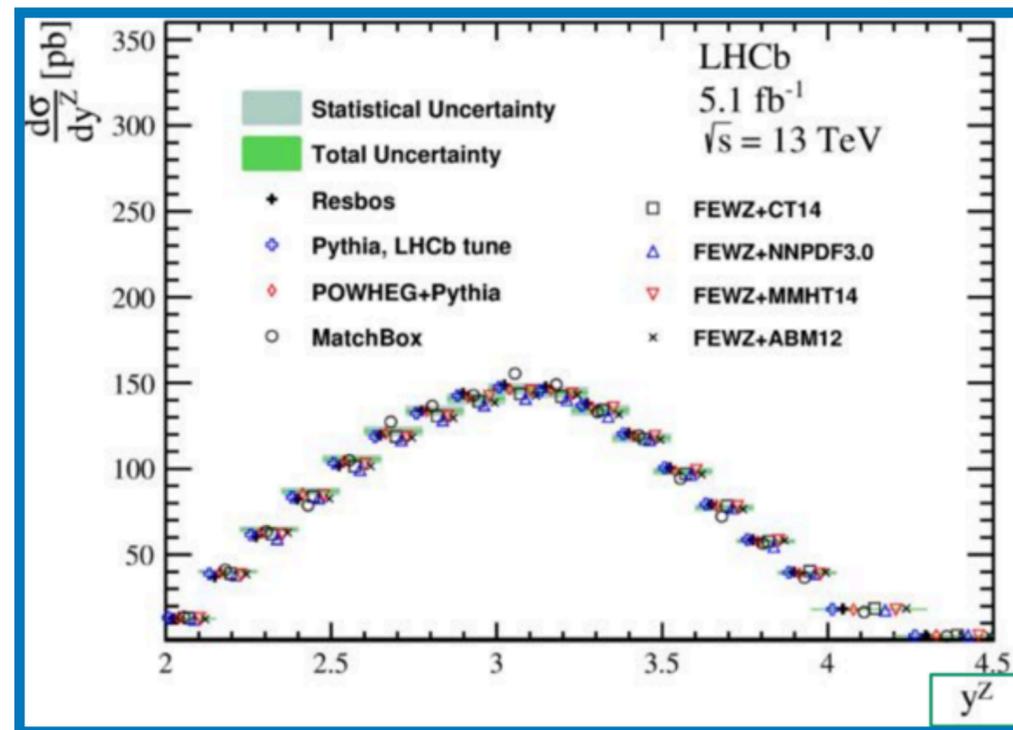
- **Due muoni** vengono ricostruiti nell'**accettanza del rivelatore**. I seguenti tagli vengono applicati
  - $p_T(\mu) > 20 \text{ GeV}$
  - $2 < \eta(\mu) < 4.5$
  - $60 < M_{\mu\mu} < 120 \text{ GeV}$
- La selezione è **dominata dal segnale** ( $N_{bkg} \sim 1.5 \% N_{sig}$ )

# Misura della sezione d'urto di $Z \rightarrow \mu\mu$

- Misura **fiduciale** e **differenziale** in funzione della **rapidità**  $y$  e del  $p_T$  **del bosone**  $Z$
- Confronto tra risultato sperimentale e predizioni teoriche:
  - **Diversi generatori** (POWHEG, ResBos, FEWZ)
  - **Diversi insiemi di PDF**

[JHEP 07 \(2022\) 026](#)

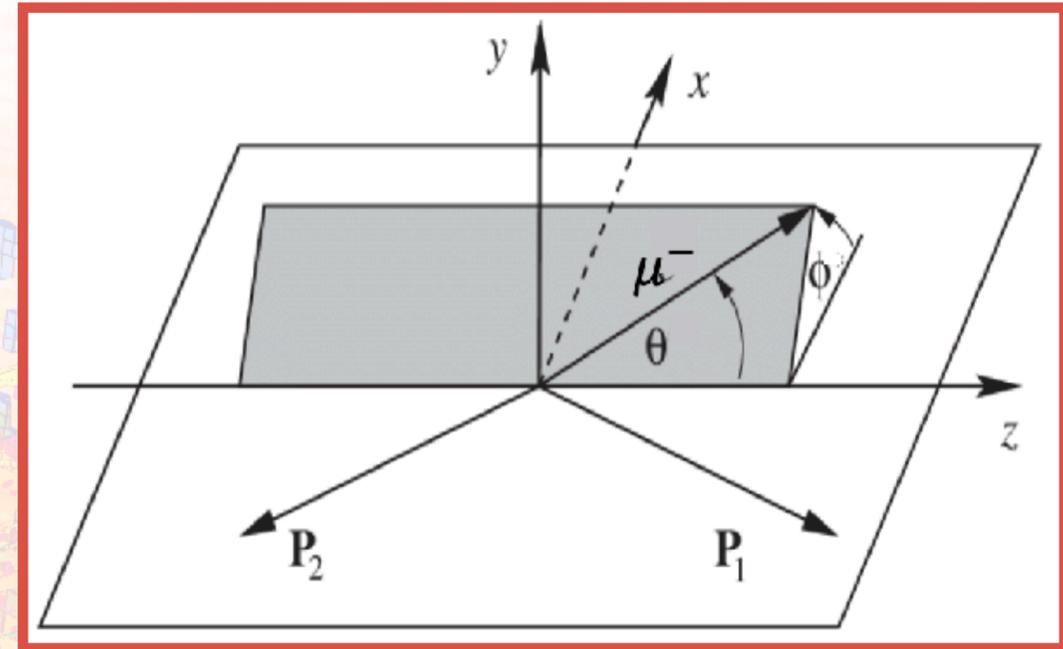
[JHEP 07 \(2022\) 026](#)



- Buon accordo tra le previsioni teoriche e i risultati sperimentali
- **Misura più precisa nella regione in avanti a 13 TeV**

# Misura dei coefficienti angolari di $Z \rightarrow \mu\mu$

- Selezione degli eventi simile alla precedente misura
- La misura della cinematica dei muoni provenienti dal bosone  $Z$  permette lo **studio della polarizzazione del bosone  $Z$**
- Il decadimento  $Z \rightarrow \mu\mu$  può essere rappresentato nel sistema di **riferimento di Collins-Soper**
- Con questa scelta di SdR, la sezione d'urto differenziale in funzione di  $\cos \theta$  e  $\phi$  può essere rappresentata come:



[PRL 129 \(2022\) 091801](#)

$$\frac{d\sigma}{d\cos\theta d\phi} \propto (1 + \cos^2\theta) + \frac{1}{2}A_0(1 - 3\cos^2\theta) + A_1 \sin 2\theta \cos \phi + \frac{1}{2}A_2 \sin^2\theta \cos 2\phi + A_3 \sin \theta \cos \phi + A_4 \cos \theta + A_5 \sin^2\theta \sin 2\phi + A_6 \sin 2\theta \sin \phi + A_7 \sin \theta \sin \phi$$

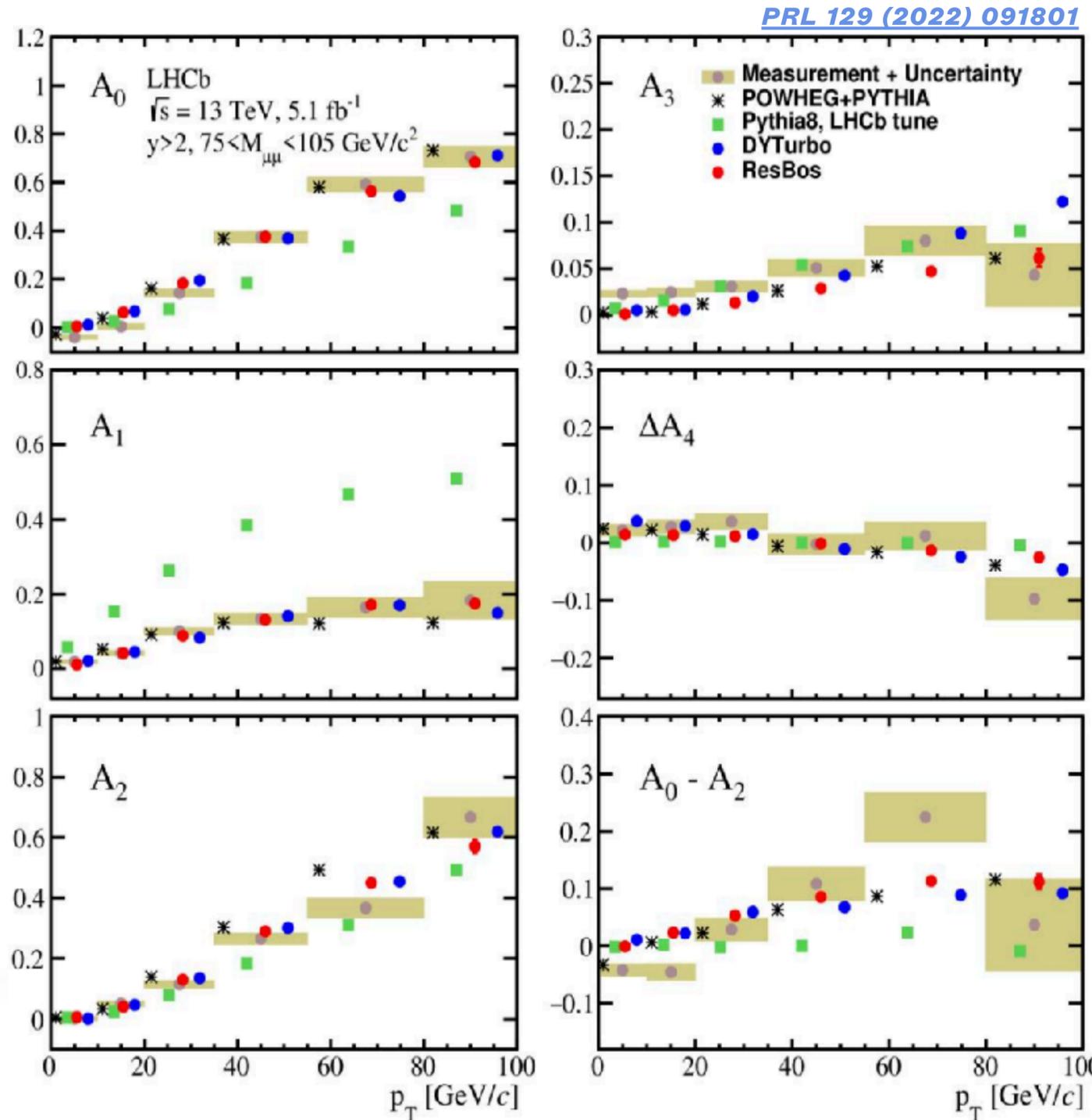
Termine principale (LO)

Termine  $\neq 0$  a NLO, studio della relazione Lam-Tung ( $A_0 = A_2$ ), dipendenza di  $A_2$  rispetto al  $p_T$

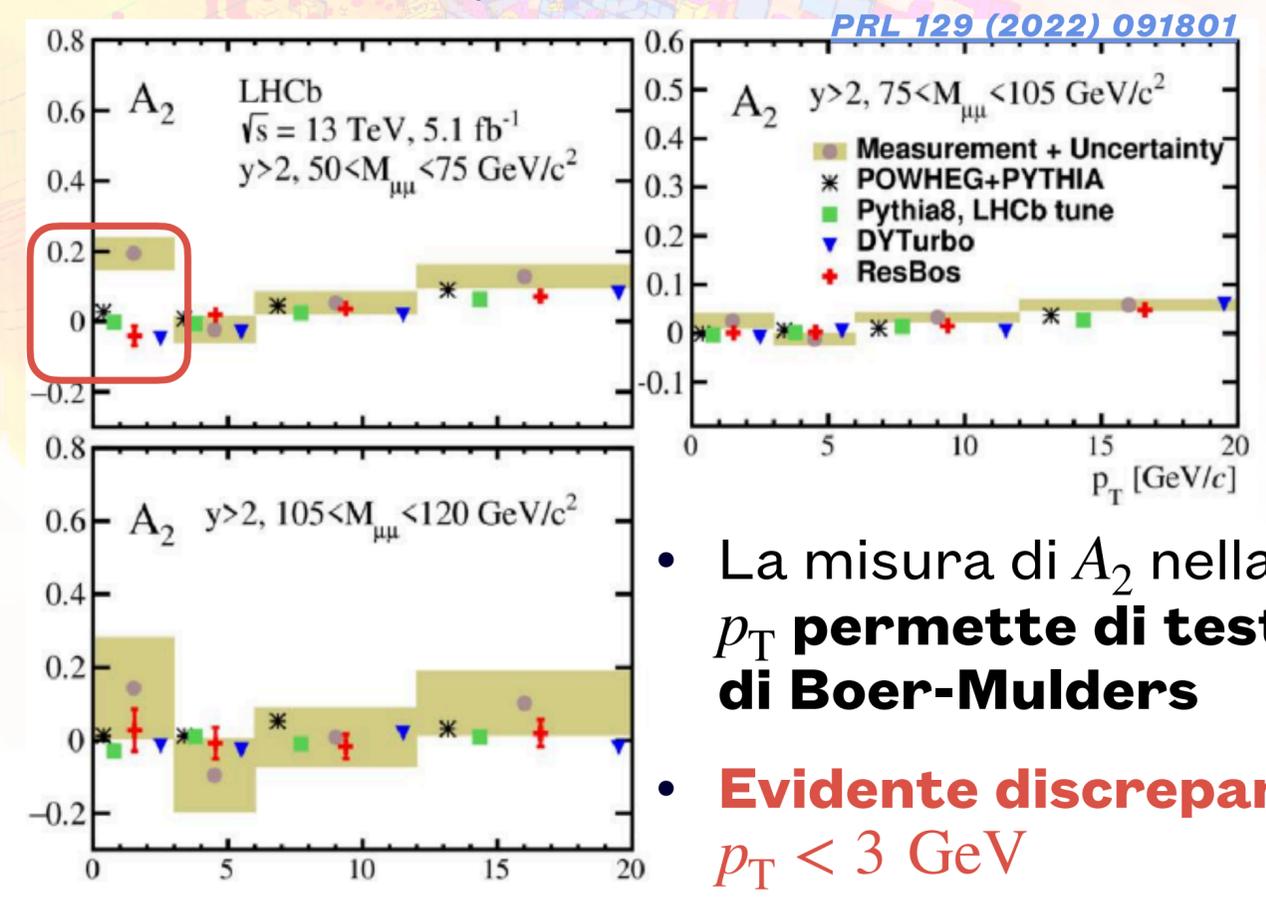
Termine principale (LO), violazione di parità

Termine quasi trascurabile ( $\neq 0$  NNLO)

# Misura dei coefficienti angolari di $Z \rightarrow \mu\mu$



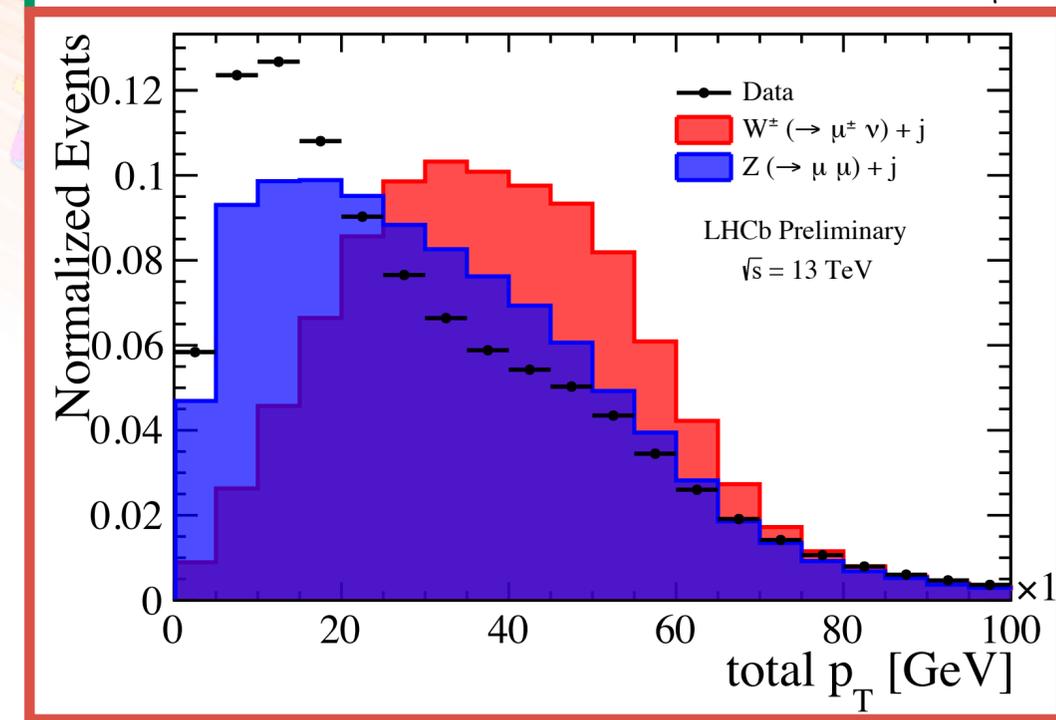
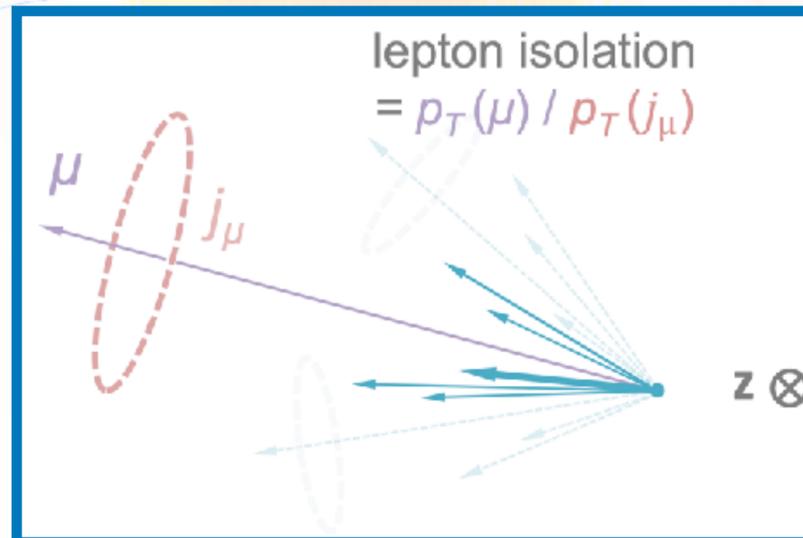
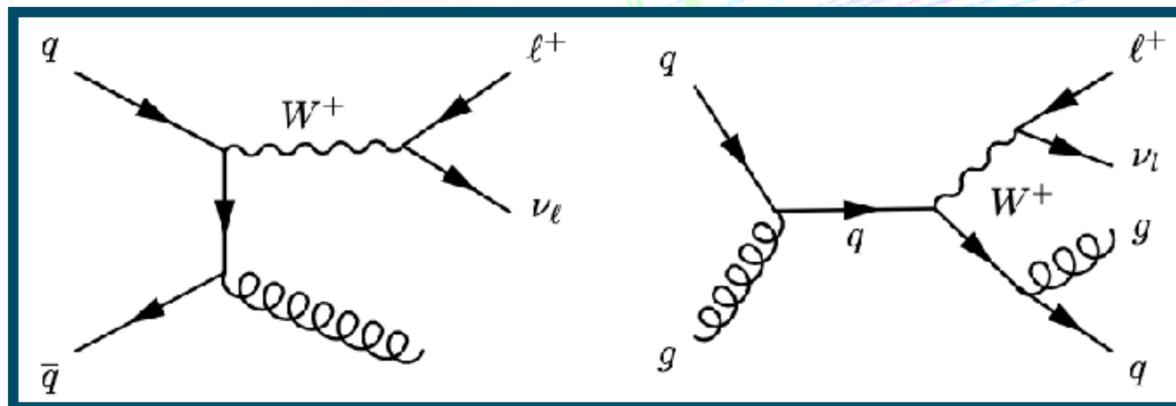
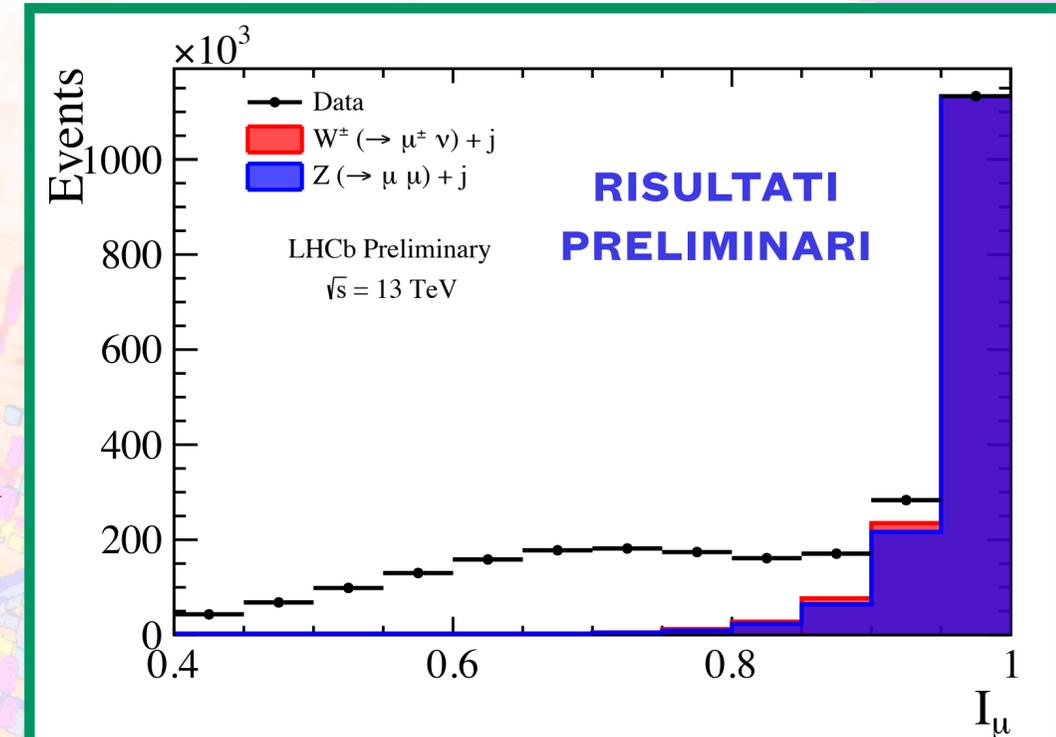
- Risultati per  $A_i$  in funzione del  $p_T$  del bosone  $Z$
- **La distribuzione di  $A_1$  non viene correttamente predetta da Pythia**
- La **relazione  $A_0 = A_2$  non viene rispettata**, confermando risultati precedentemente ottenuti da ATLAS e CMS
- Il valore di  $A_4$  è direttamente collegato al valore di  $\sin^2 \theta_W^{eff}$



- La misura di  $A_2$  nella regione a basso  $p_T$  **permette di testare le relazioni di Boer-Mulders**
- **Evidente discrepanza per  $p_T < 3 \text{ GeV}$**

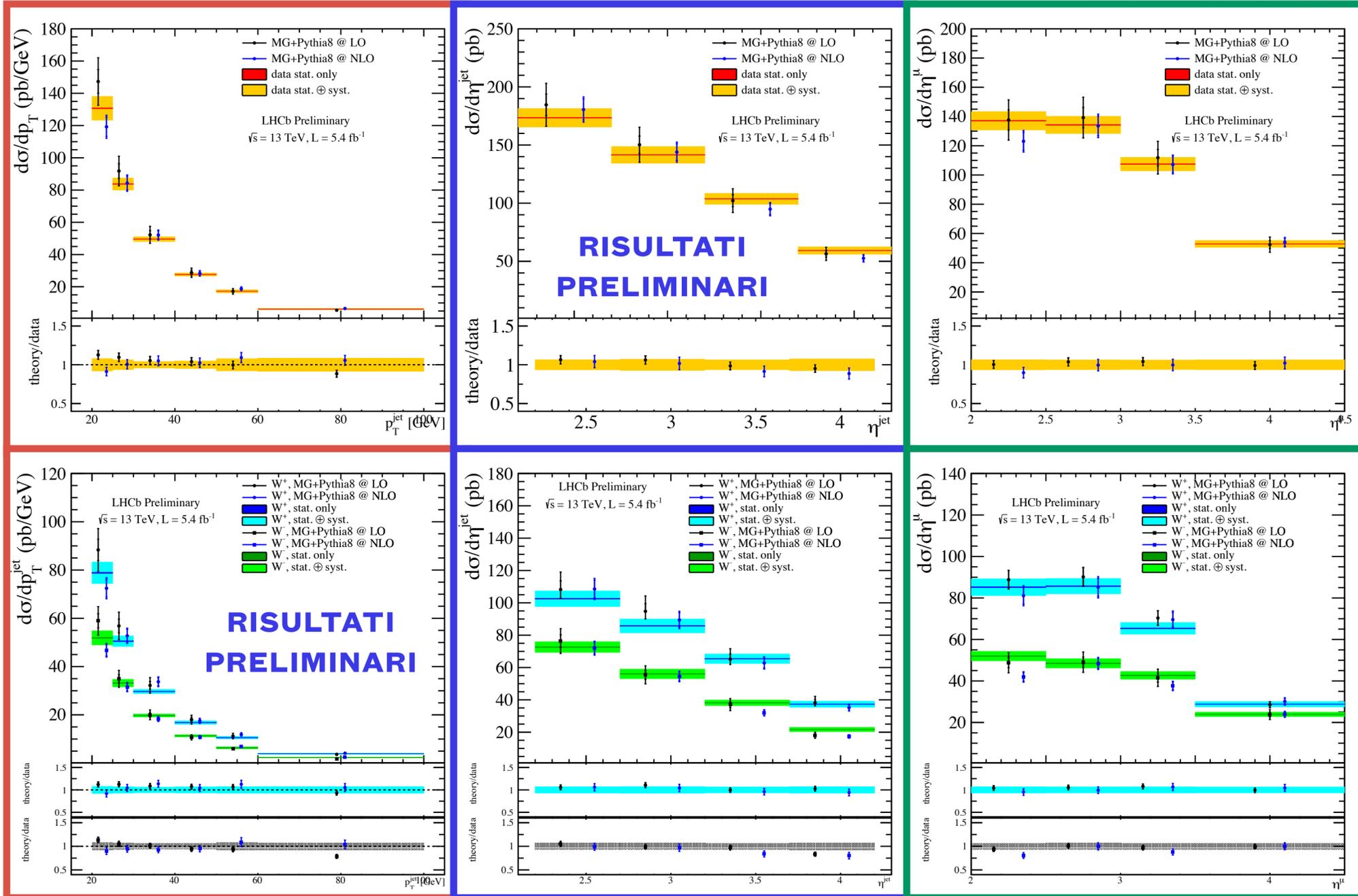
# Produzione di $W$ in associazione con getti

- **Prima misura della produzione di bosone  $W$  in associazione con getti nella regione in avanti a 13 TeV**
- Misura fondamentale per determinare le PDF e le predizioni del Modello Standard
- **Estensione della precedente misura fatta durante il Run 1**
  - Considerato anche lo stato finale con **almeno due getti con  $p_T > 20$  GeV**
- Fit alla **variabile  $I_\mu$**  che misura **l'attività attorno al muone** proveniente dal decadimento  $W \rightarrow \mu\nu$
- Background proveniente **non** da processi elettrodeboli  $\rightarrow$  **ottenuto direttamente dai dati**



# Produzione di $W$ in associazione con getti

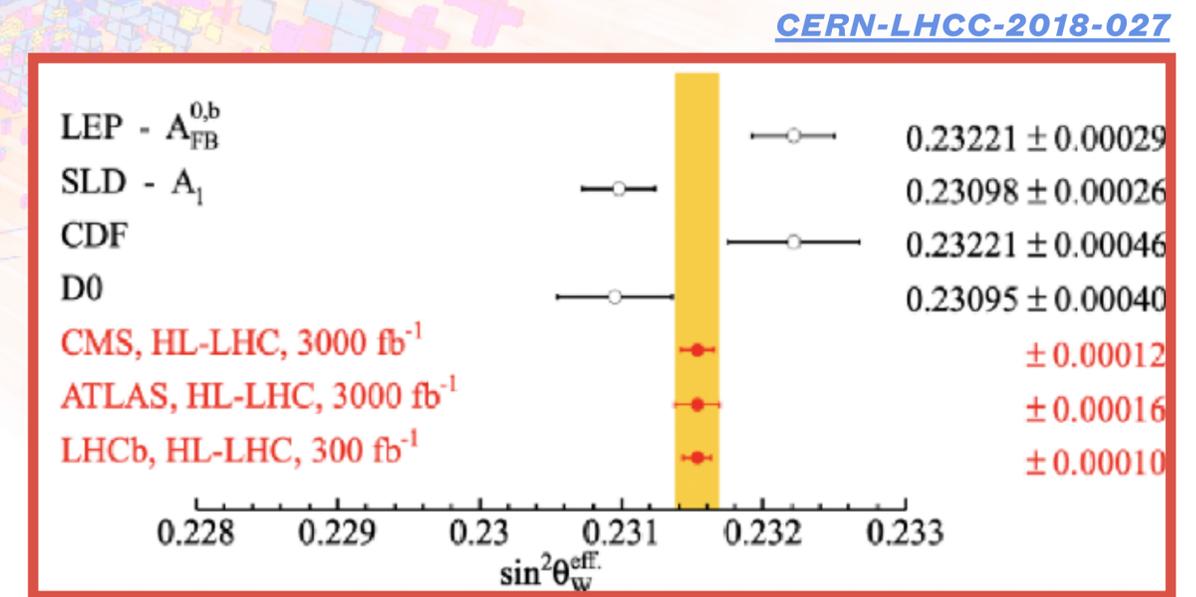
- Misura **differenziale** in funzione del  $p_T$  ed  $\eta$  del getto principale,  $\eta$  del muone e carica del muone



- I risultati sperimentali sono stati confrontati con previsione teoriche ottenute con MadGraph+Pythia, al LO e al NLO
- La misura è dominata dall'incertezza sistematica**
- In generale, un **buon accordo** è ottenuto tra teoria ed esperimento
- Ulteriori step:
  - Confrontare i risultati sperimentali con **diversi insiemi di PDF**
  - Ottenere le previsioni teoriche con **altri generatori** (POWHEG, ALPGEN)
- Questo risultato, una volta ultimato, verrà utilizzato nel fit delle PDF**

# Conclusioni

- Negli ultimi anni, l'esperimento LHCb si è dimostrato capace di effettuare **misure di precisione nel settore della Fisica Elettrodebole**:
  - In una regione dello spazio della fasi **complementare** a quella di **ATLAS e CMS**
  - In una regione dello spazio  $x - Q^2$  **inesplorata da altri esperimenti**
- L'esperimento LHCb può giocare un **ruolo fondamentale** nelle misure di precisione del settore elettrodebole, soprattutto in vista delle **prossime campagne di presa dati**:
  - **Miglioramento della misura di  $\sin^2 \theta_W^{eff}$** , riducendo sia l'incertezza statistica che quella sistematica
  - Misura di  $m_W$  ricostruendo anche il decadimento  $W \rightarrow e\nu$
  - ...e molto altro: fisica del **quark top**, fisica del **bosone di Higgs**...



**Grazie per l'attenzione :)**