



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



IFAE 2023
Incontri di Fisica delle Alte Energie



Fisica elettrodebole nella regione in avanti con LHCb

DAVIDE ZULIANI

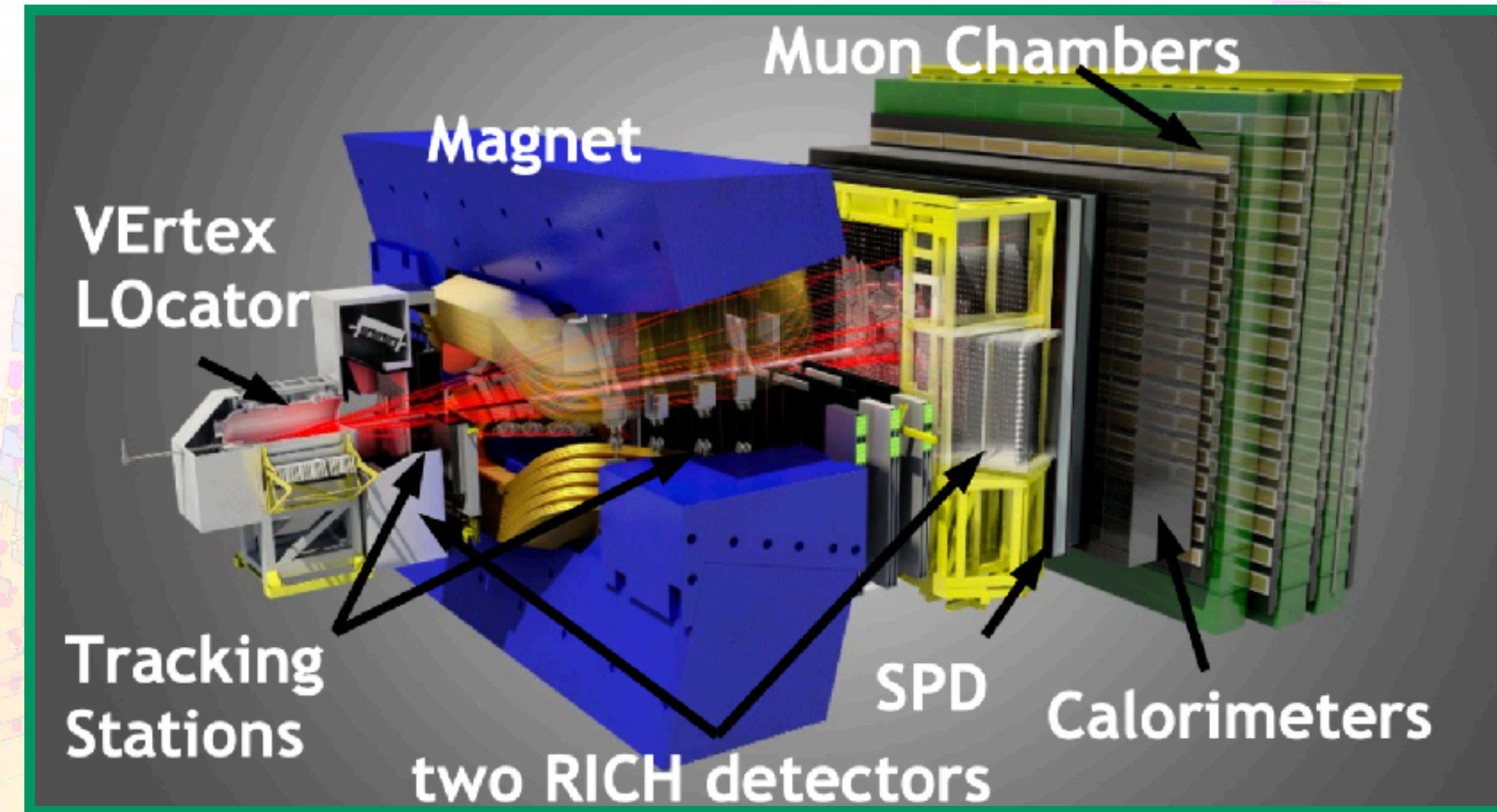
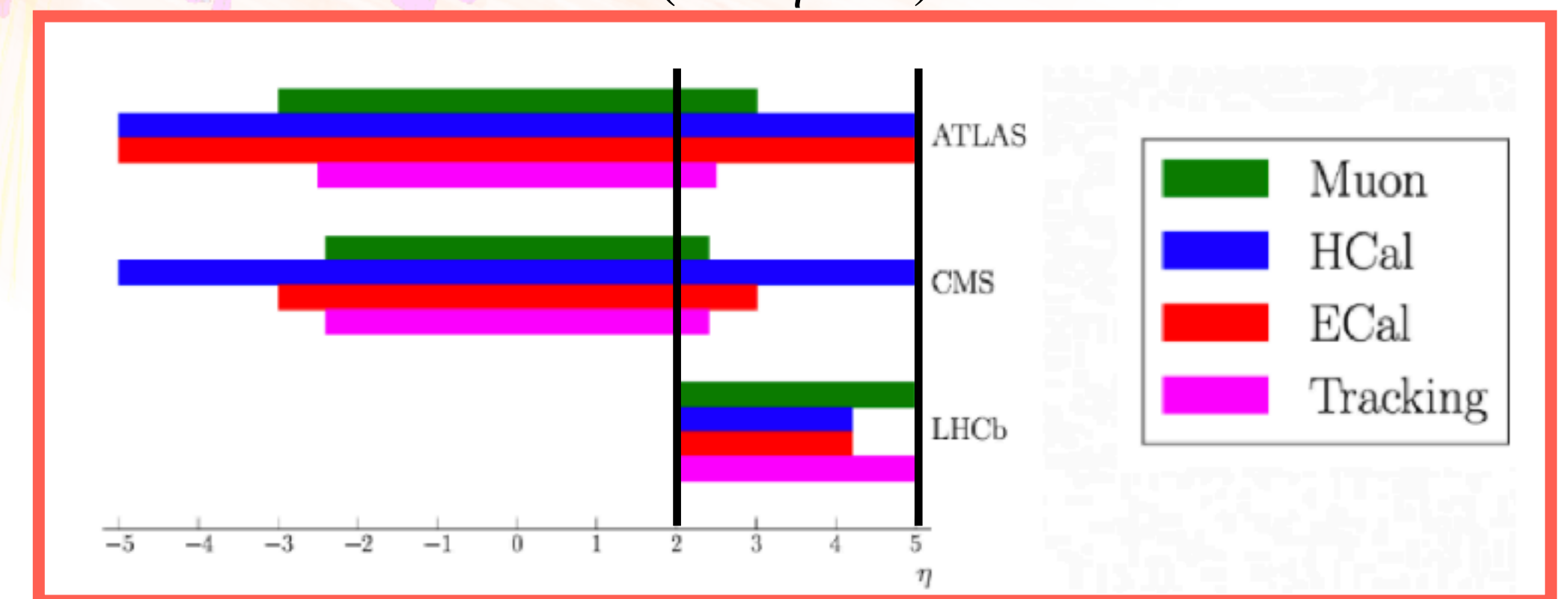
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA E INFN PADOVA

CATANIA, 12-14 APRILE 2023

Esperimento LHCb

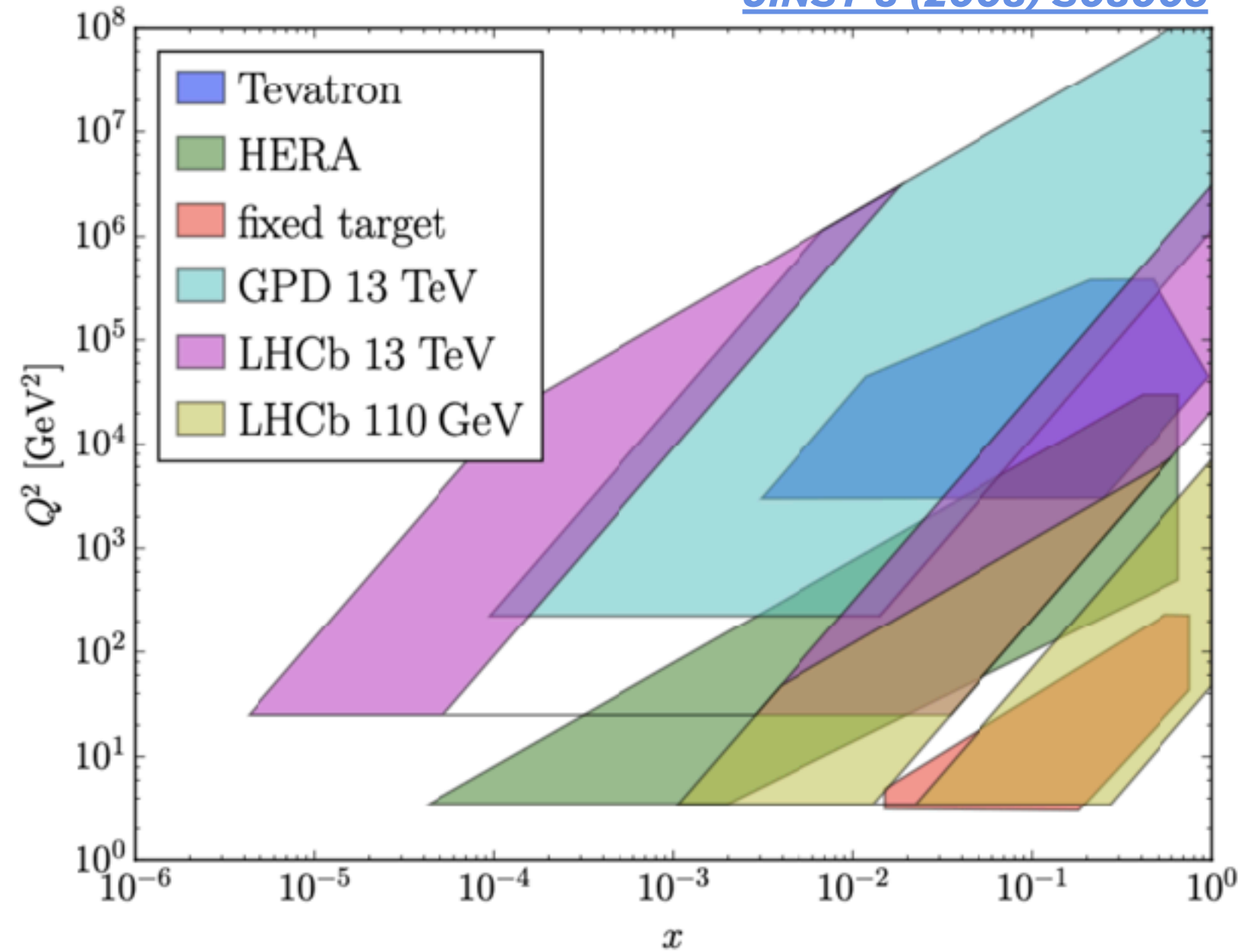
JINST 3 (2008) S08005

- **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**

 $(2 < \eta < 5)$ 

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

- 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**

Risultati QEE

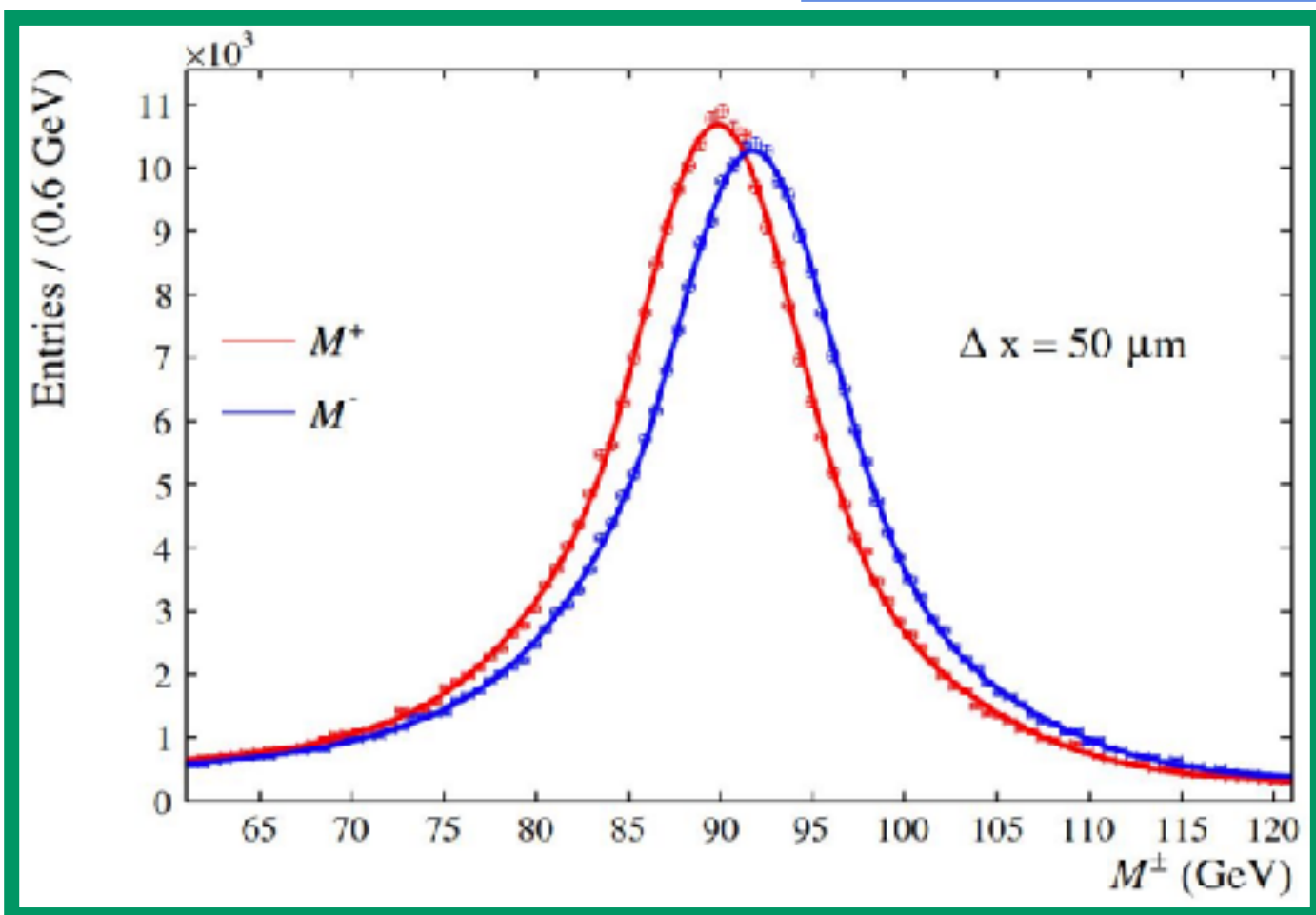
TITLE	DOCUMENT NUMBER	JOURNAL	SUBMITTED ON
Search for the rare decays $W^+ \rightarrow D_s^+ \gamma$ and $Z \rightarrow D^0 \gamma$ at LHCb	PAPER-2022-033 arXiv:2212.07120 [PDF]	Chin. Phys. C	14 Dec 2022
Multidifferential study of identified charged hadron distributions in Z-tagged jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV	PAPER-2022-013 arXiv:2208.11691 [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 arXiv:2203.01602 [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 arXiv:2112.07458 [PDF]	JHEP 07 (2022) 26	14 Dec 2021
Search for massive long-lived particles decaying semileptonically at $\sqrt{s} = 13$ TeV	PAPER-2021-028 arXiv:2110.07293 [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 arXiv:2109.08084 [PDF]	Phys. Rev. Lett. 128 (2022) 082001	16 Sep 2021
Measurement of the W boson mass	PAPER-2021-024 arXiv:2109.01113 [PDF]	JHEP 01 (2022) 036	02 Sep 2021

Misure descritte in questa presentazione

Misura di m_W a LHCb

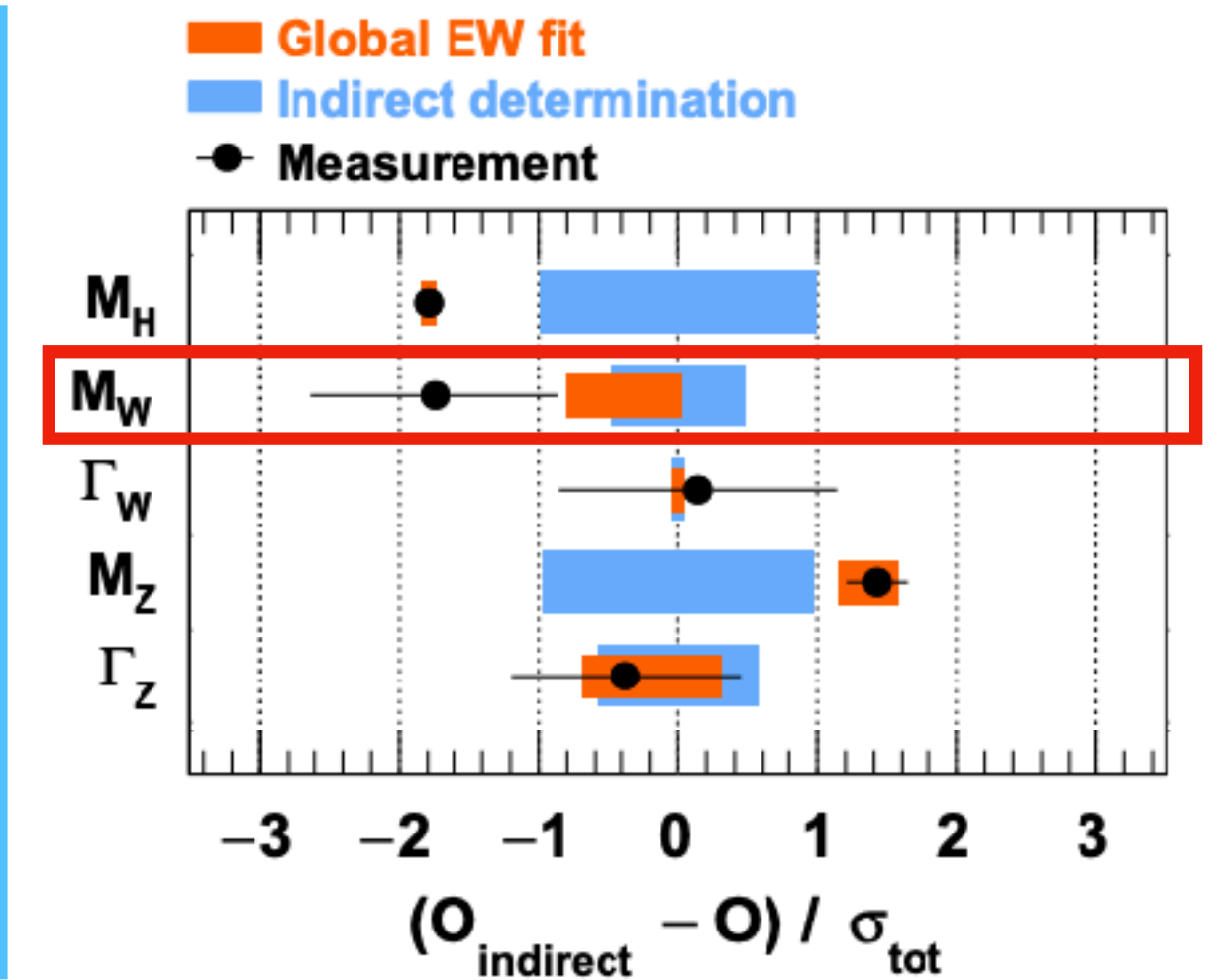
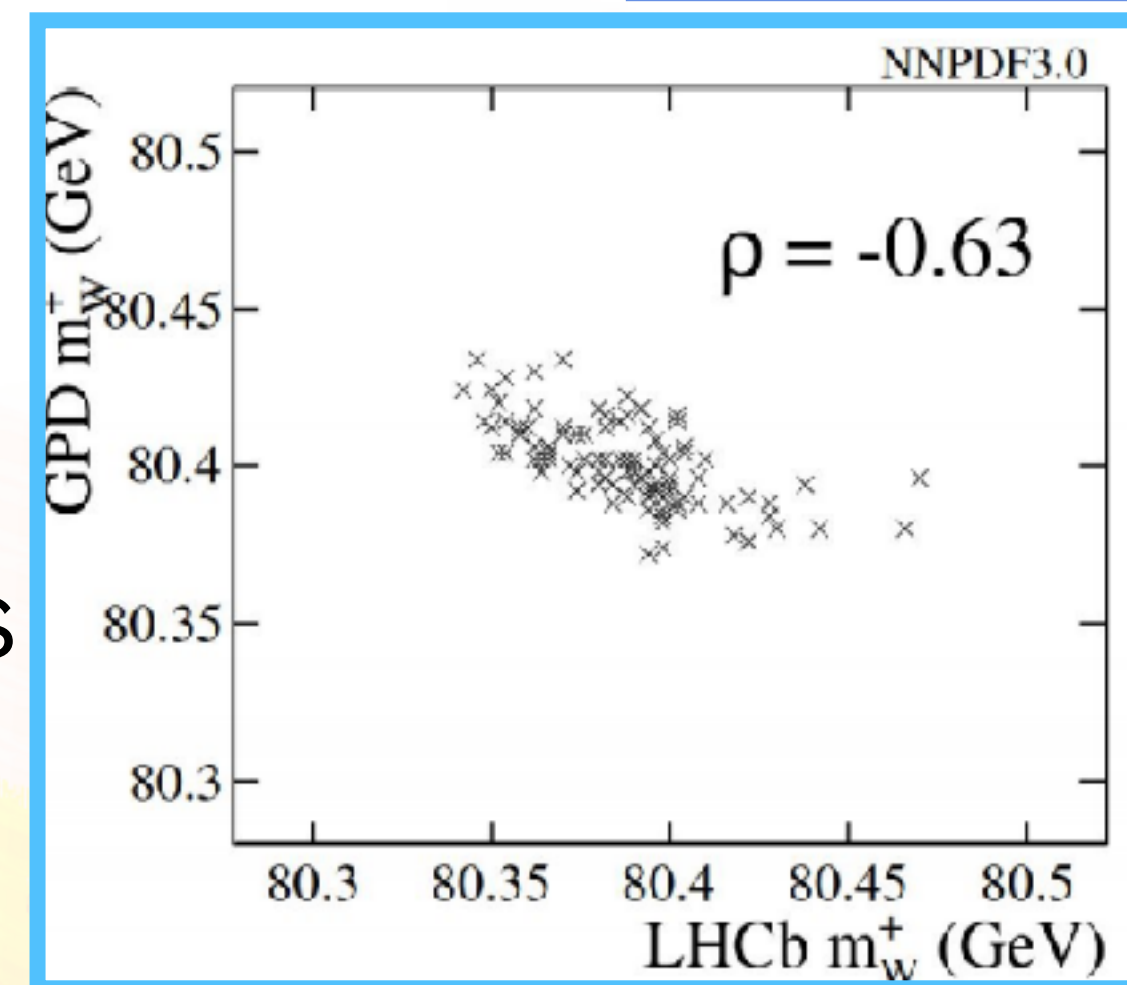
- **Parametro fondamentale** del Modello Standard
- Le incertezze sulle PDF misurate a LHCb sono **anticorrelate** con le incertezze misurate ad ATLAS/CMS
- Possibilità di raggiungere una **sensibilità vicina al fit elettrodebole** (~ 7 MeV) **combinando** le misure di LHC

JHEP 01 (2022) 036

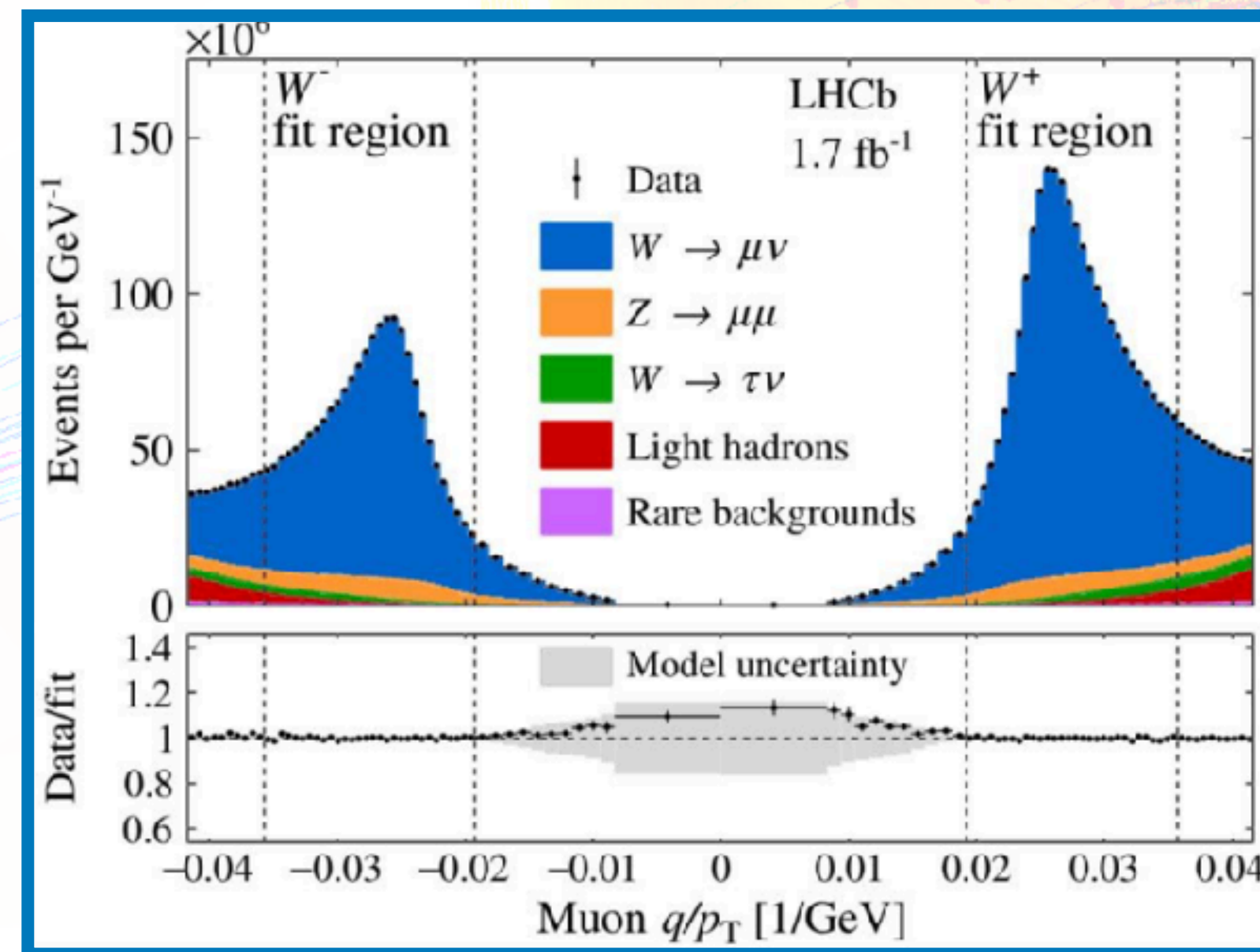


$$M^\pm = \sqrt{2p^\pm p_T^\pm \frac{p^\mp}{p_T^\mp} (1 - \cos \theta)}$$

EPJC 75 001 (2015)



JHEP 01 (2022) 036

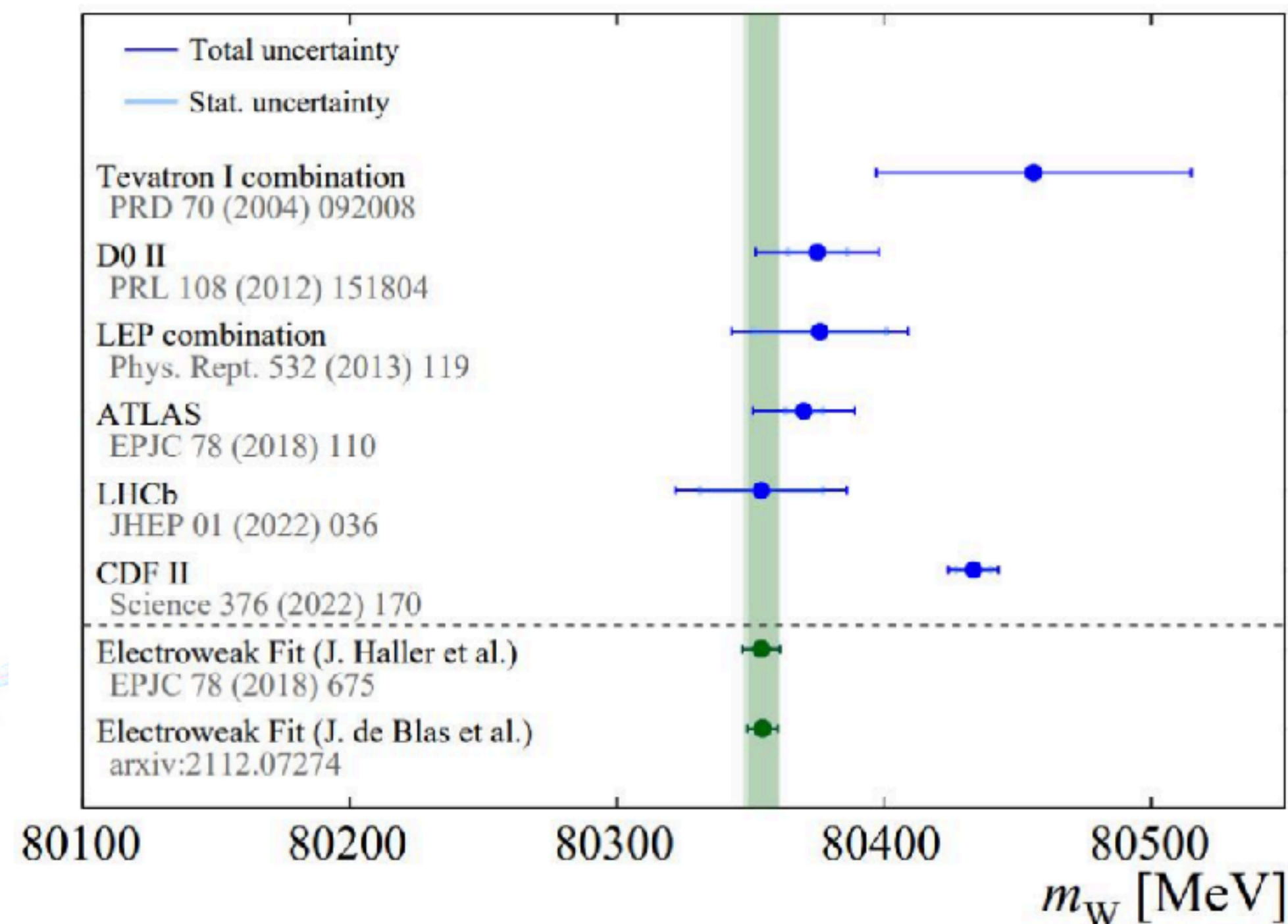


- Misura basata sul p_T **del muone** derivante dal decadimento del bosone W
- Sono stati utilizzati i **dati del 2016**, $\mathcal{L} \sim 1.7 \text{ fb}^{-1}$
- È necessaria un'accurata modellizzazione del rivelatore, in particolare vanno **corretti effetti di disallineamento**
- Misura effettuata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

LHCb-FIGURE-2022-003



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
Total	32

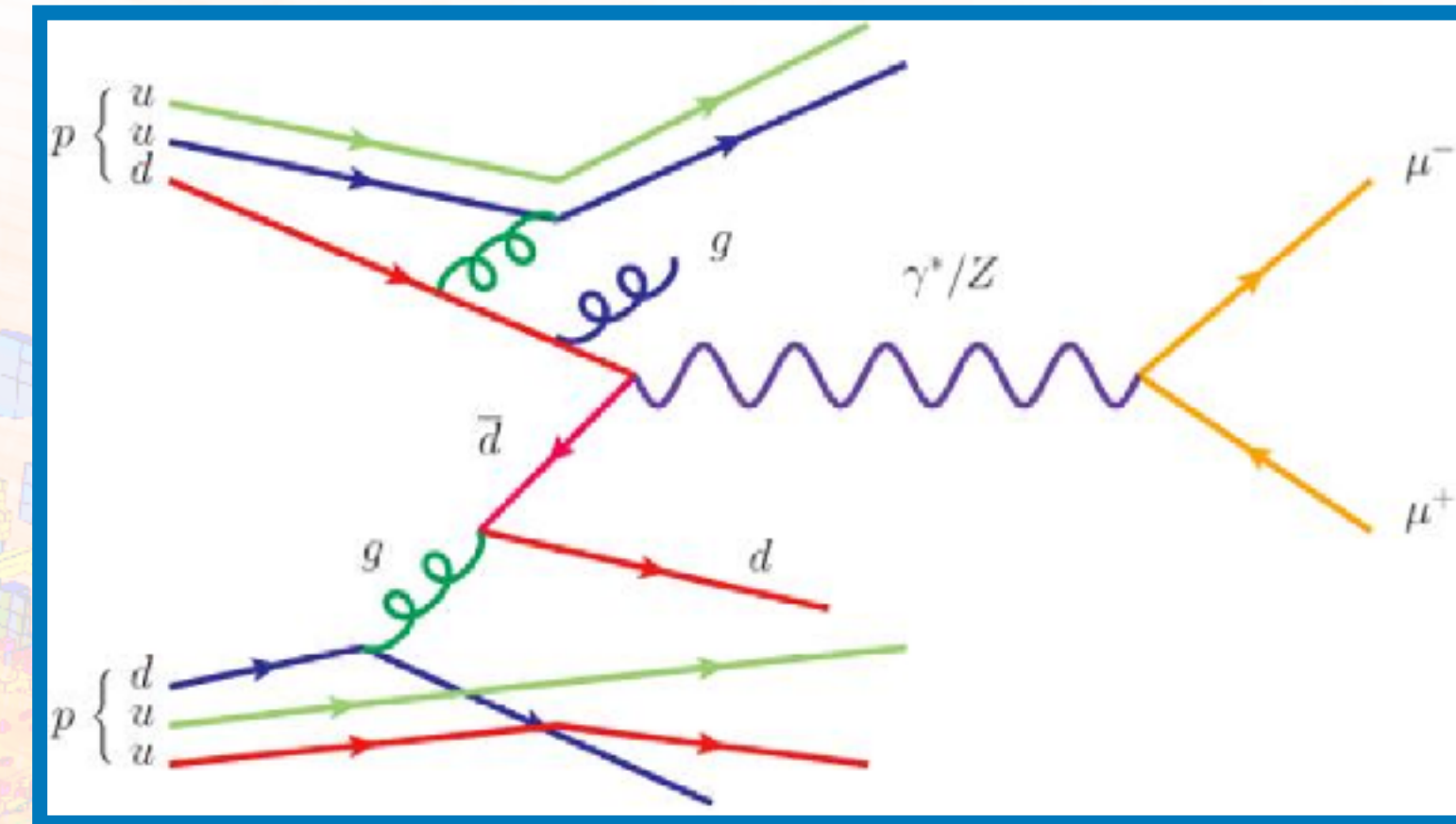
JHEP 01 (2022) 036

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

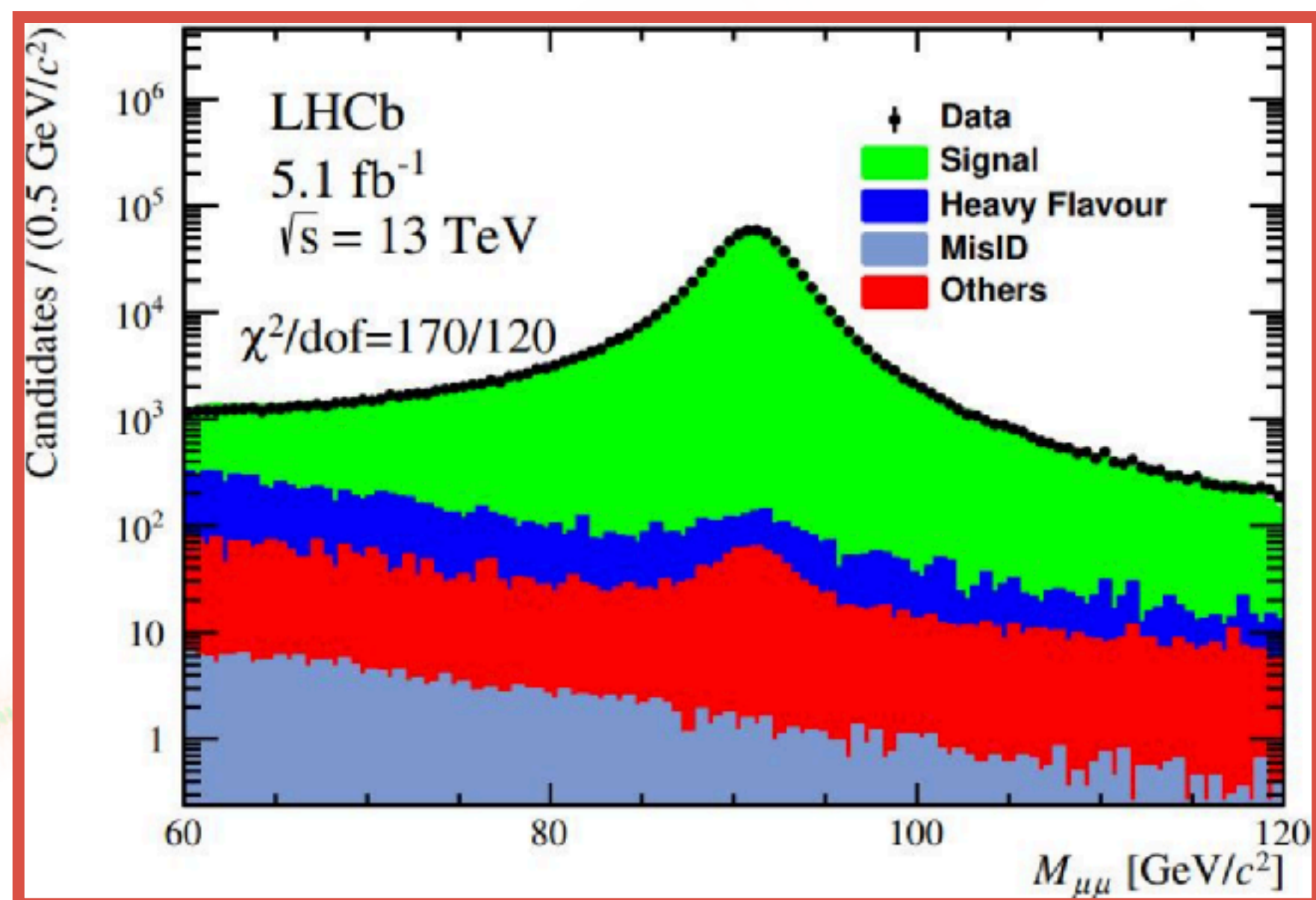
- Con 1/3 dei dati analizzati, la massa del bosone W è stata misurata con **un'incertezza** ~ 32 MeV
- C'è un notevole impegno per:
 - Terminare l'analisi di tutti i dati del Run 2
 - **Migliorare la modellizzazione e ridurre le incertezze sistematiche**
- **È possibile raggiungere un'incertezza** ~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



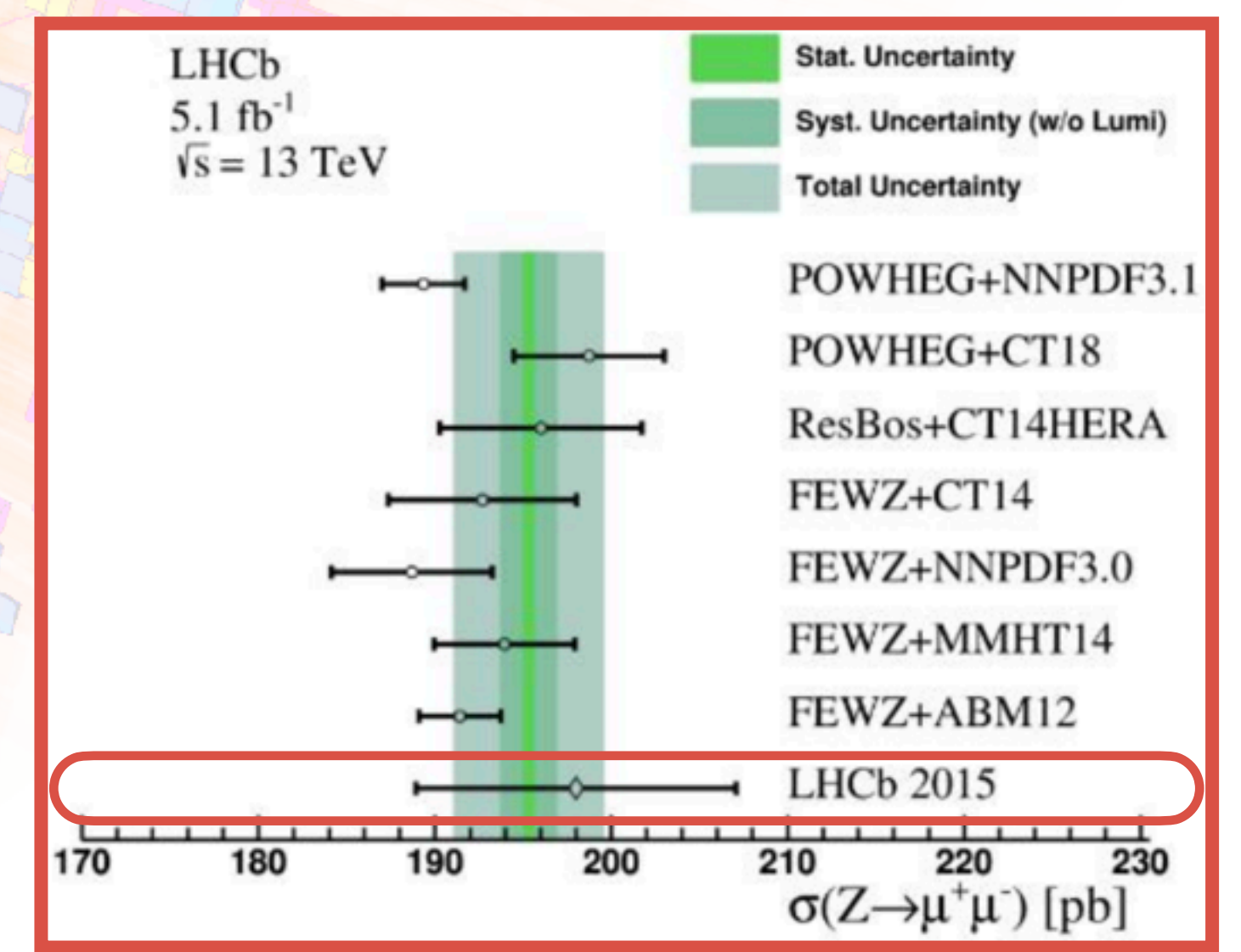
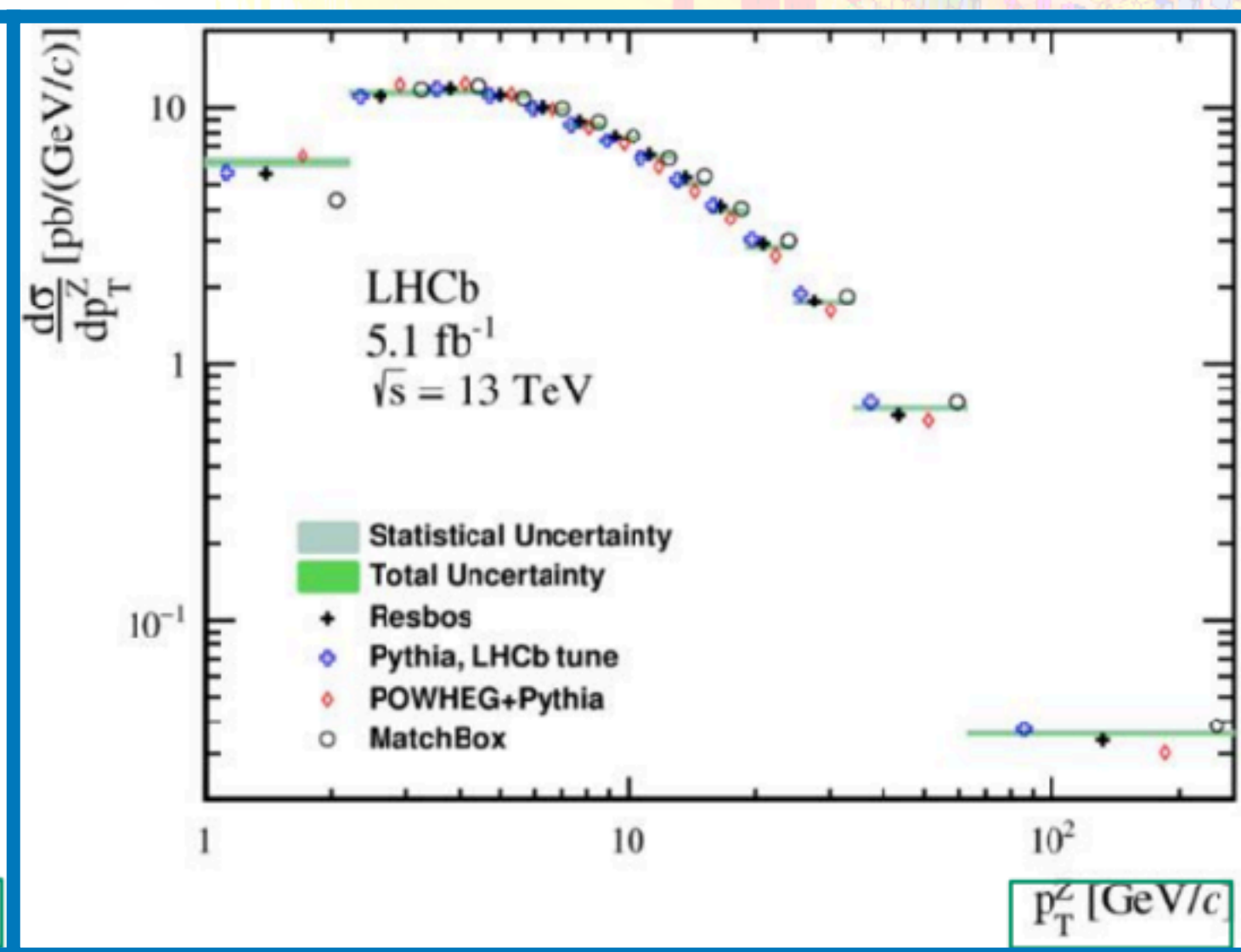
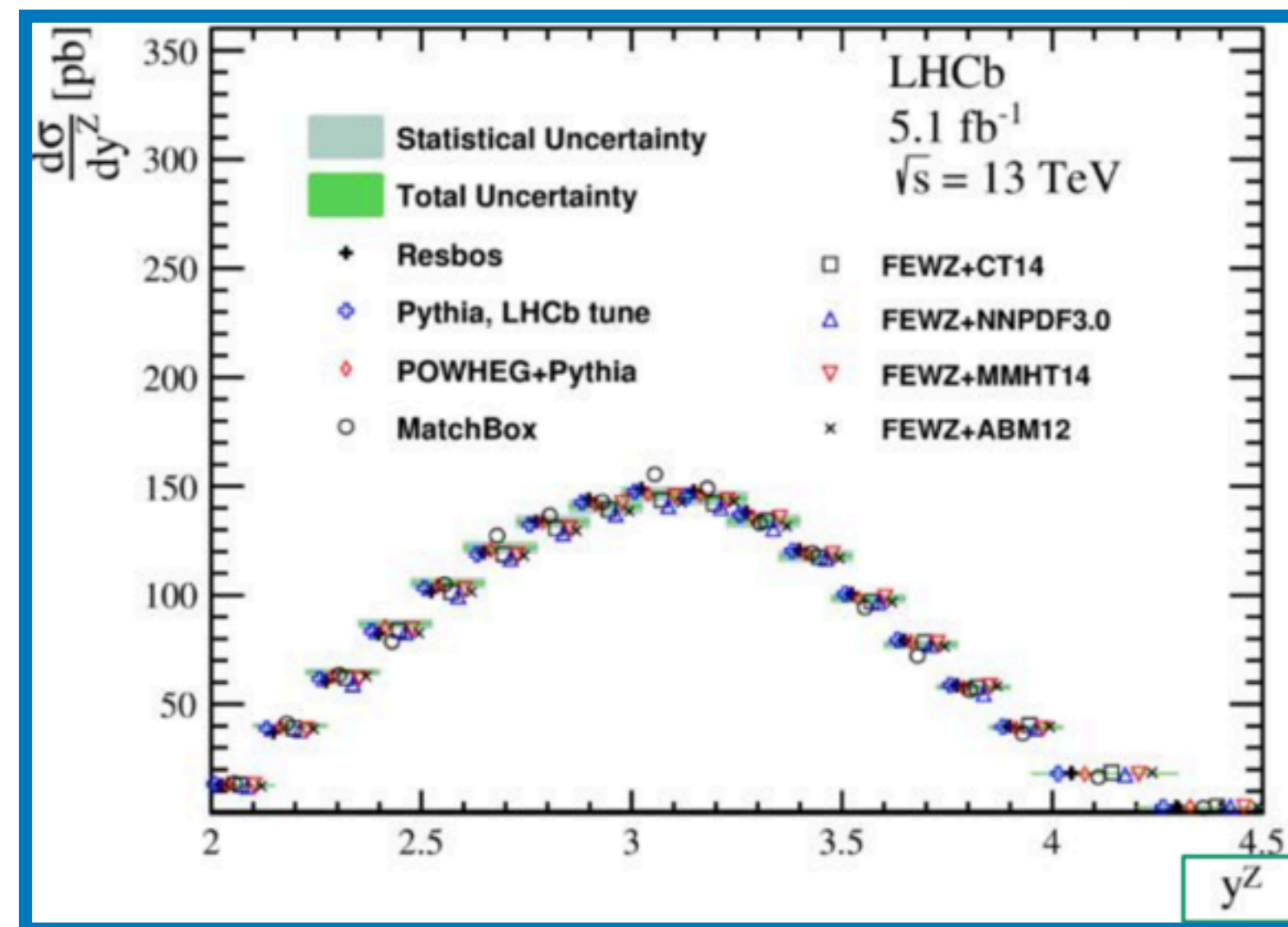
- **Due muoni** vengono ricostruiti nell'**accettanza del rivelatore**. I seguenti tagli vengono applicati
 - $p_T(\mu) > 20 \text{ GeV}$
 - $2 < \eta(\mu) < 4.5$
 - $60 < M_{\mu\mu} < 120 \text{ GeV}$
- La selezione è **dominata dal segnale** ($N_{bkg} \sim 1.5\% N_{sig}$)

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 previsioni teoriche:
 - **Diversi generatori** (POWHEG, ResBos, FEWZ)
 - **Diversi insiemi di PDF**

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

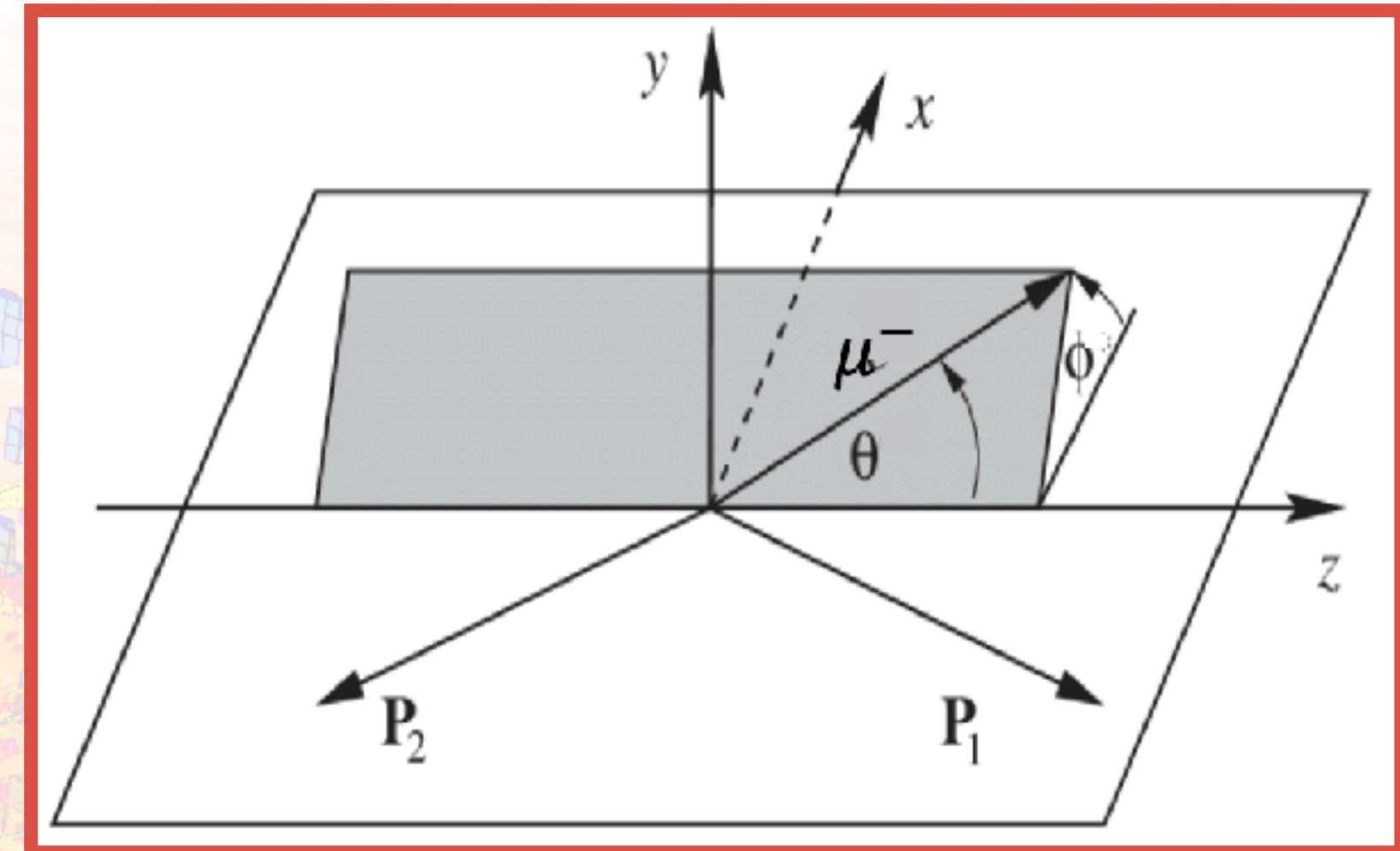
[JHEP 07 \(2022\) 026](#)



- 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 ϕ può essere rappresentata come:



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

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

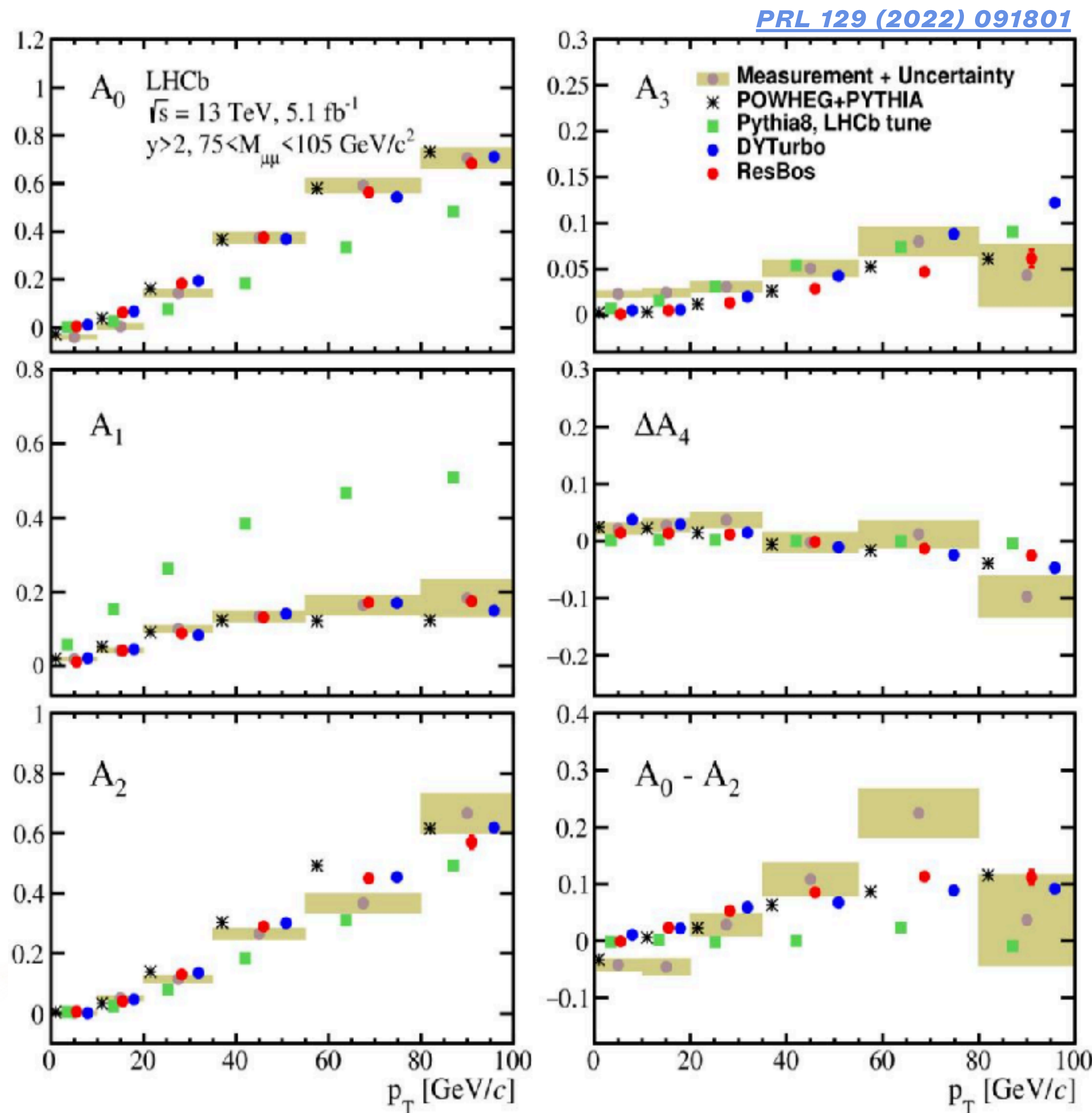
Termine principale (LO)

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

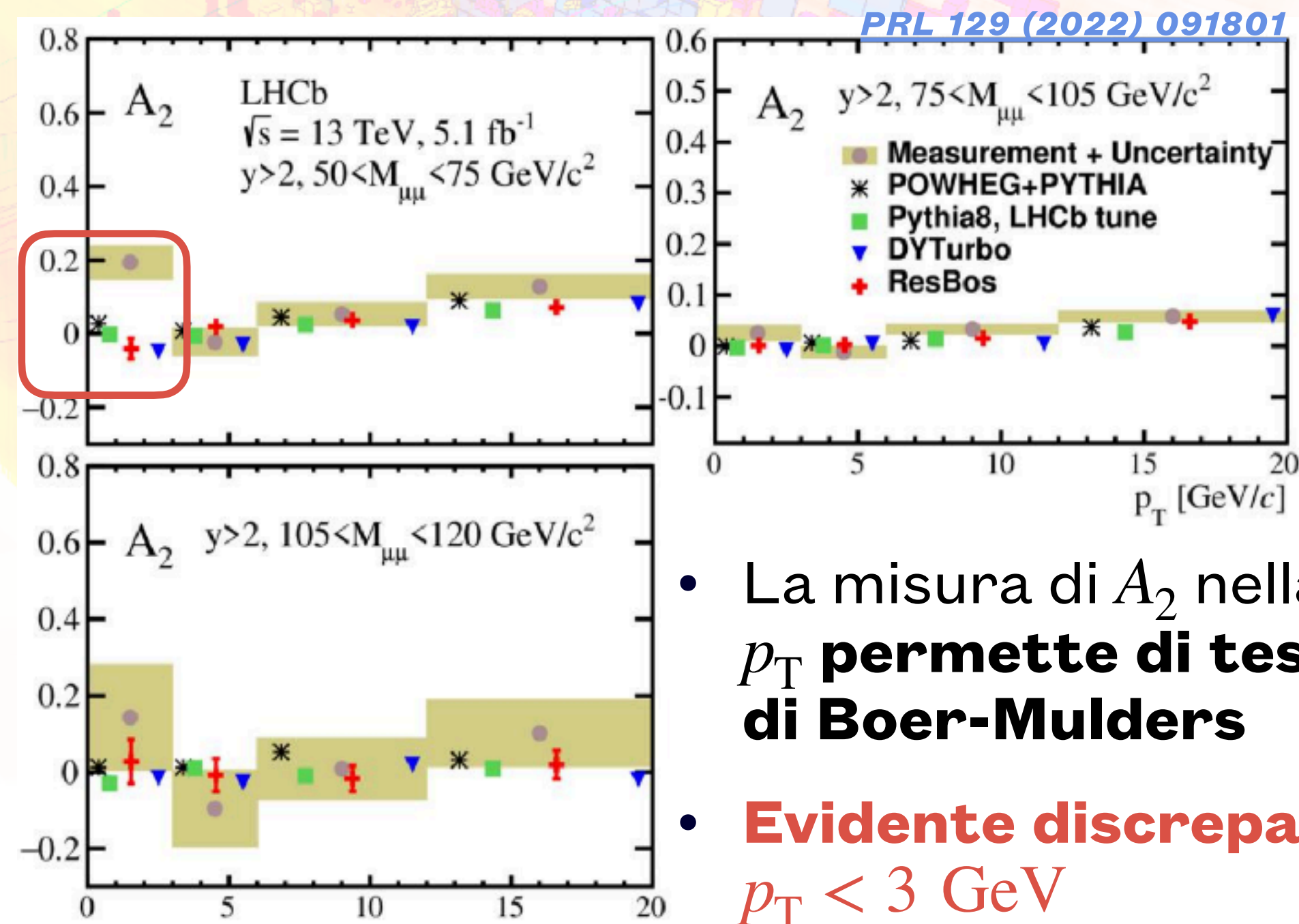
Termine principale (LO), violazione di parità

Termine quasi trascurabile ($\neq 0$ NNLO)

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



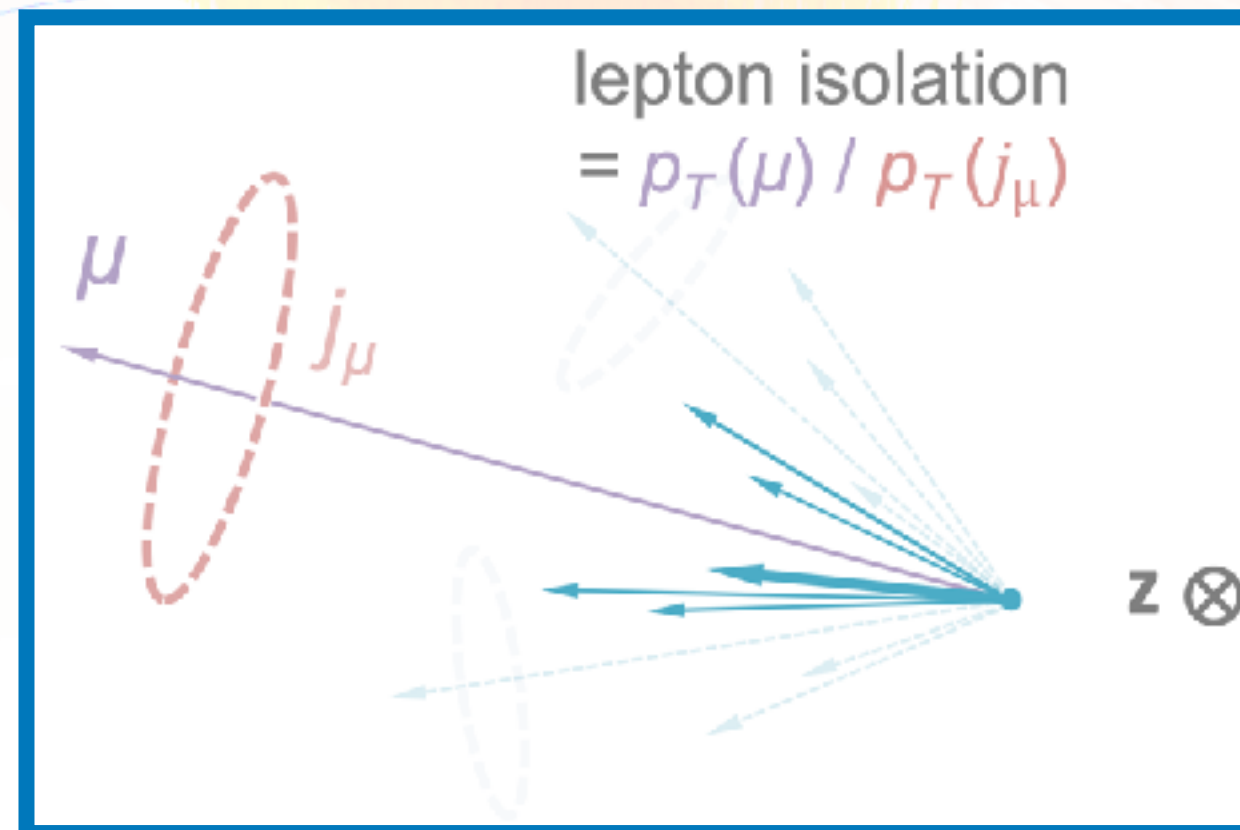
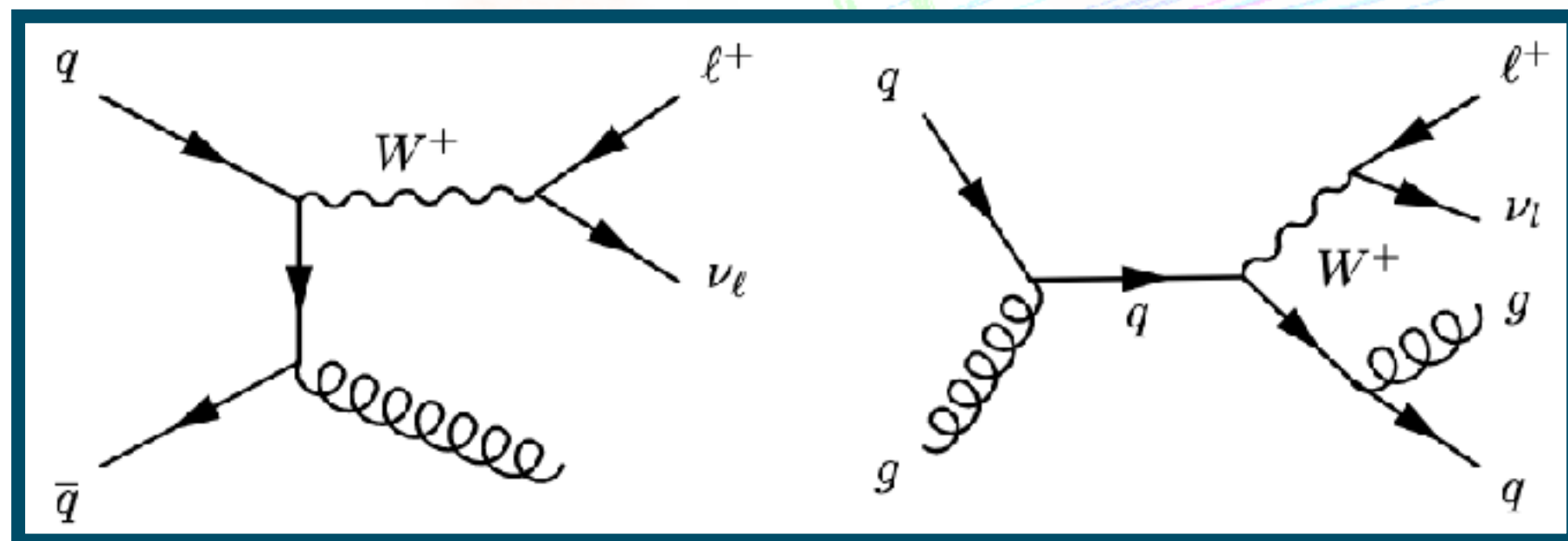
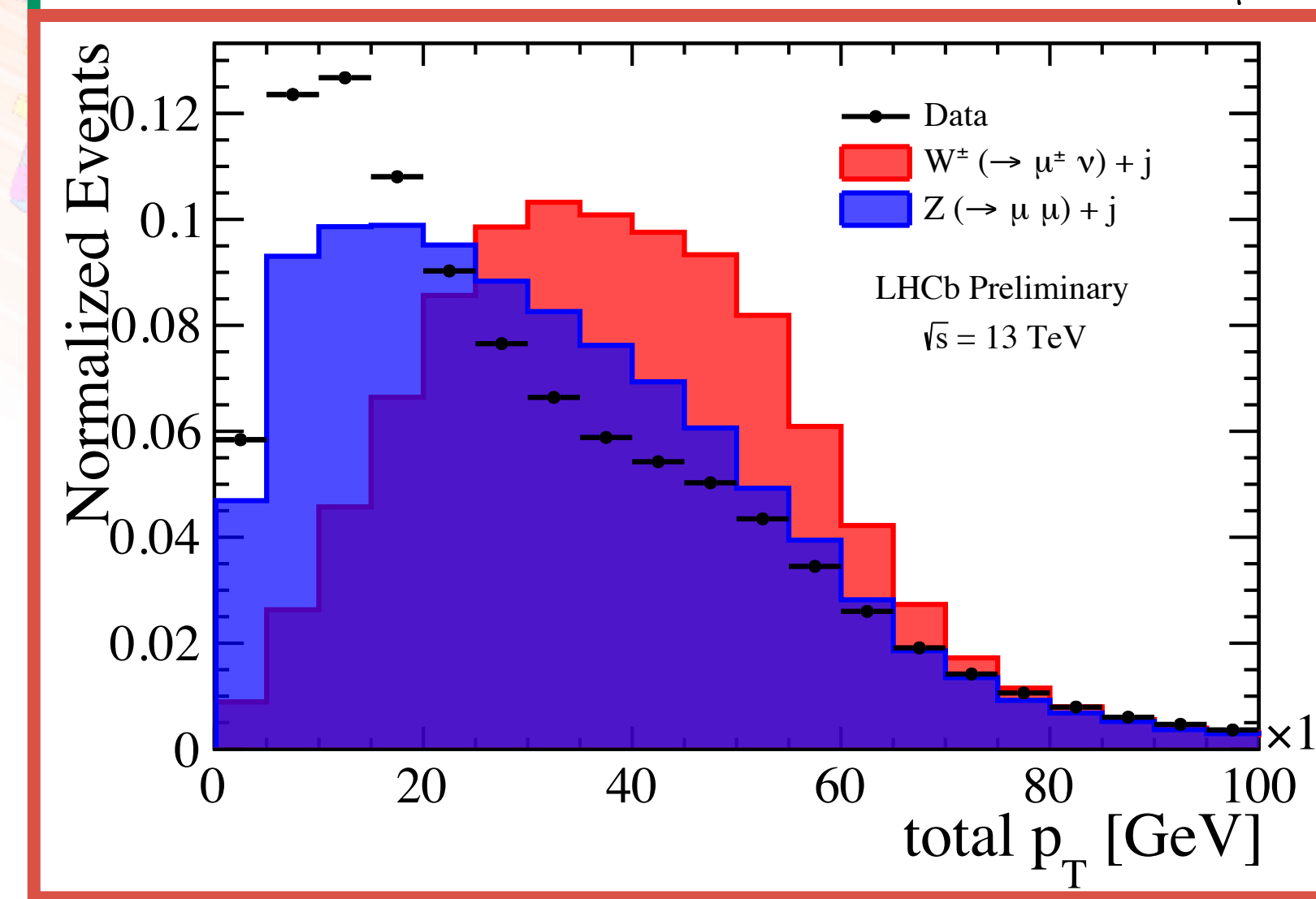
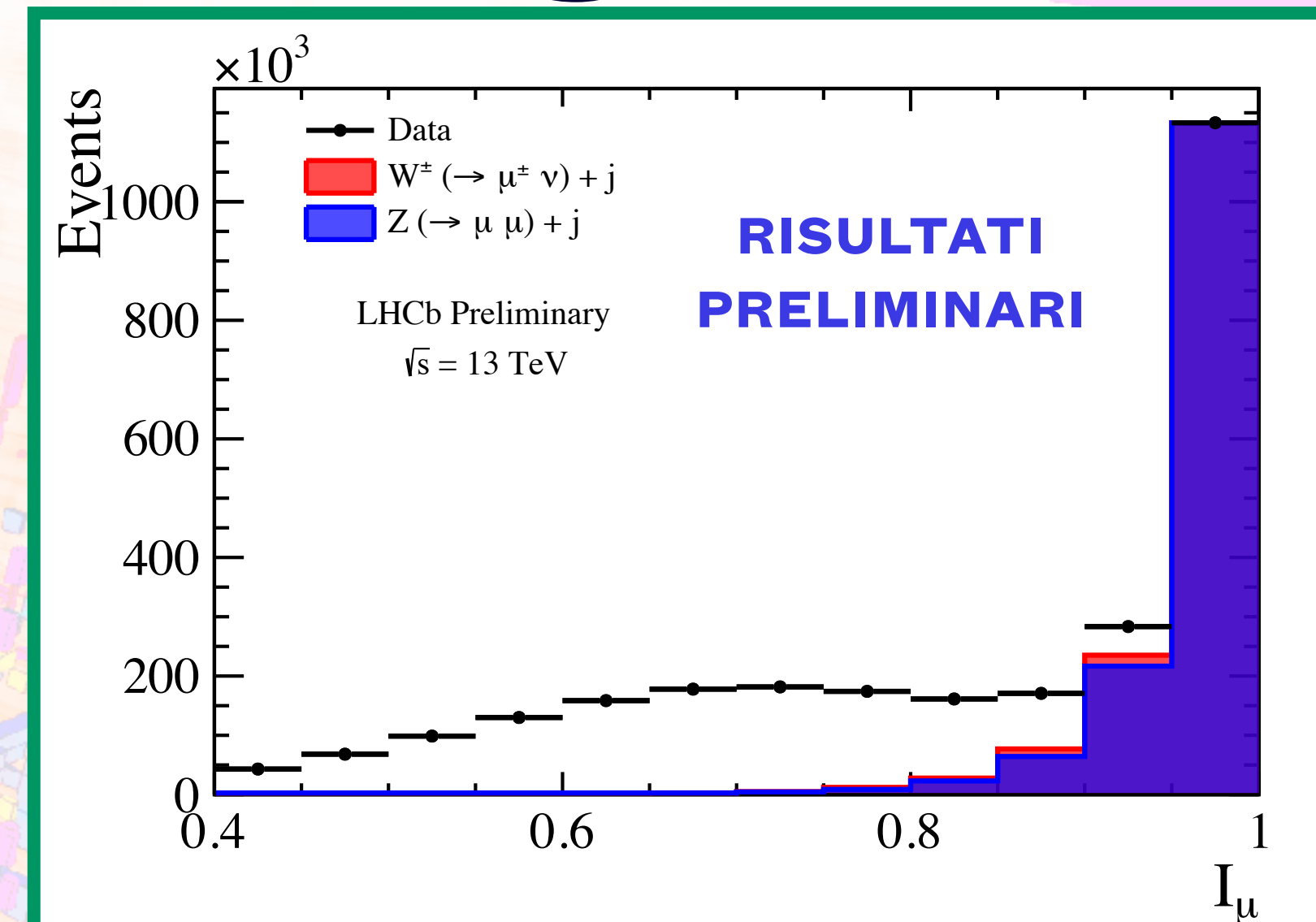
- Risultati per A_i in funzione del p_T del bosone Z
- **La distribuzione di A_1 non viene correttamente predetta da Pythia**
- La **relazione $A_0 = A_2$ non viene rispettata**, confermando risultati precedentemente ottenuti da ATLAS e CMS
- Il valore di A_4 è direttamente collegato al valore di $\sin^2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



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

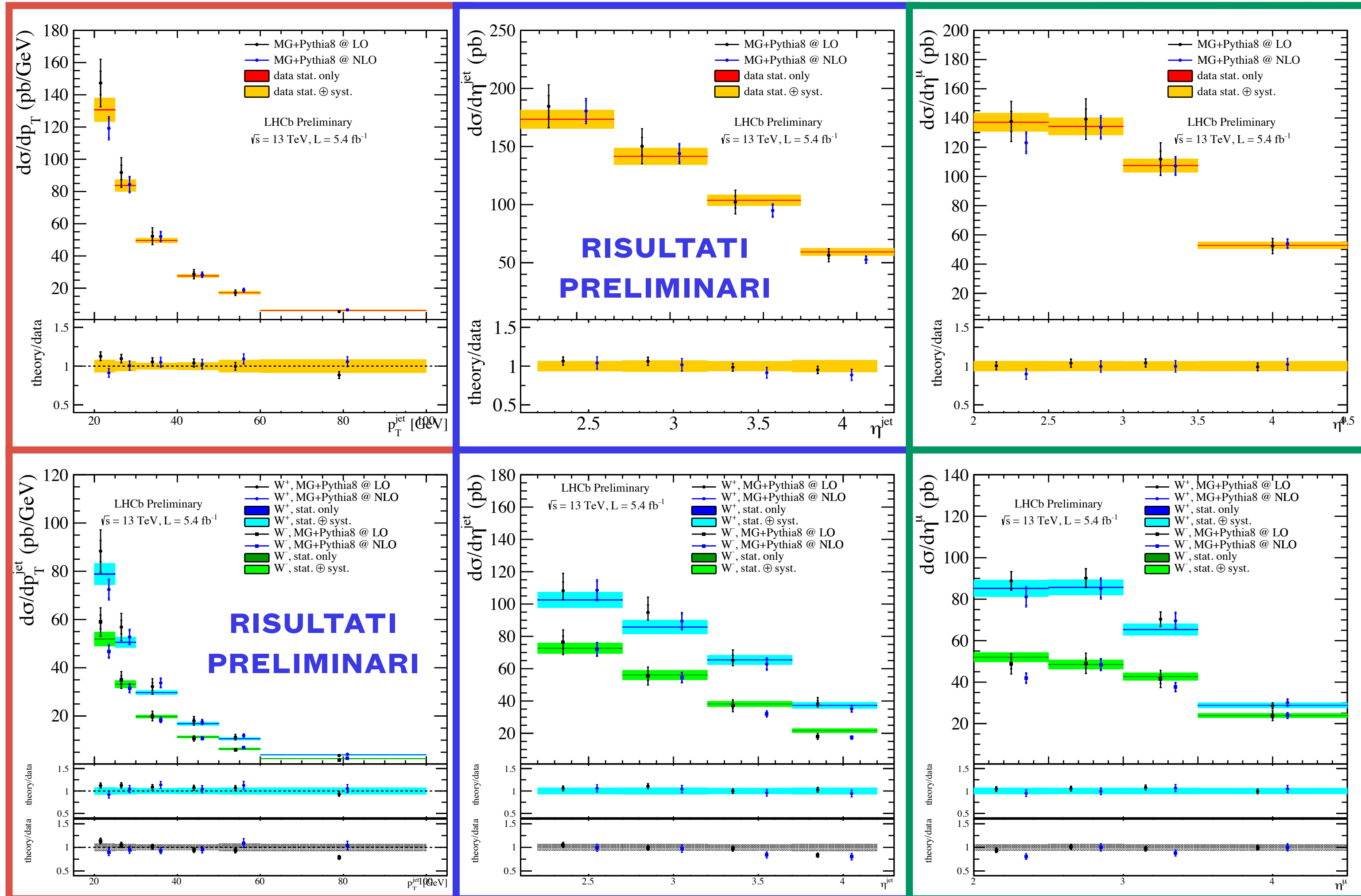
Produzione di W in associazione con getti

- **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_μ** 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

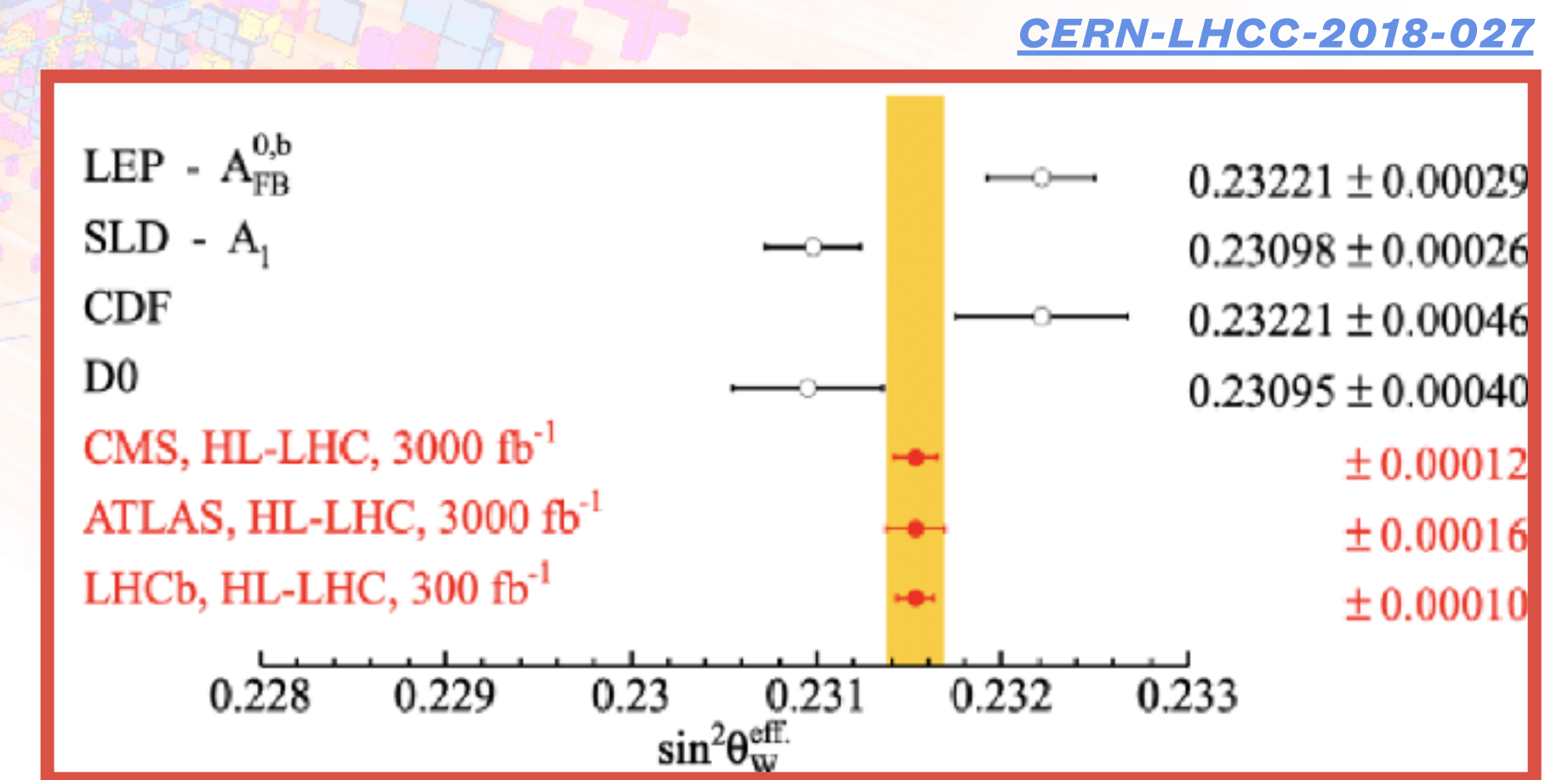
- Misura **differenziale** in funzione del p_T ed η del getto principale, η del muone e carica del muone



- I risultati sperimentali sono stati confrontati con previsione teoriche ottenute con MadGraph+Pythia, al LO e al NLO
- La misura è dominata dall'incertezza sistemica**
- 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 :)