

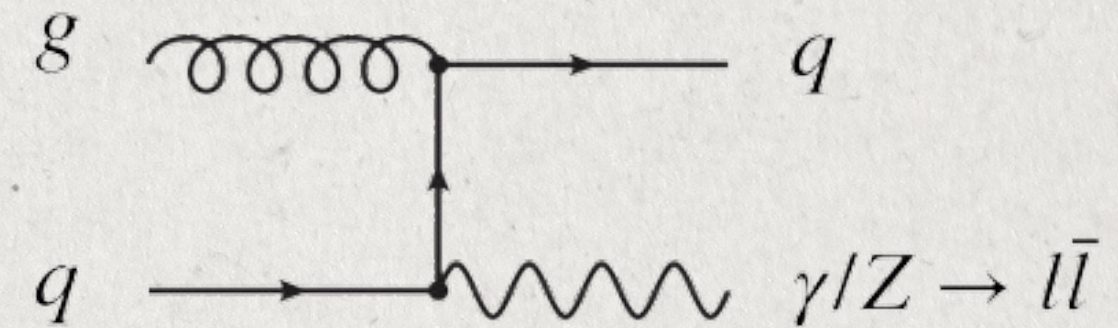
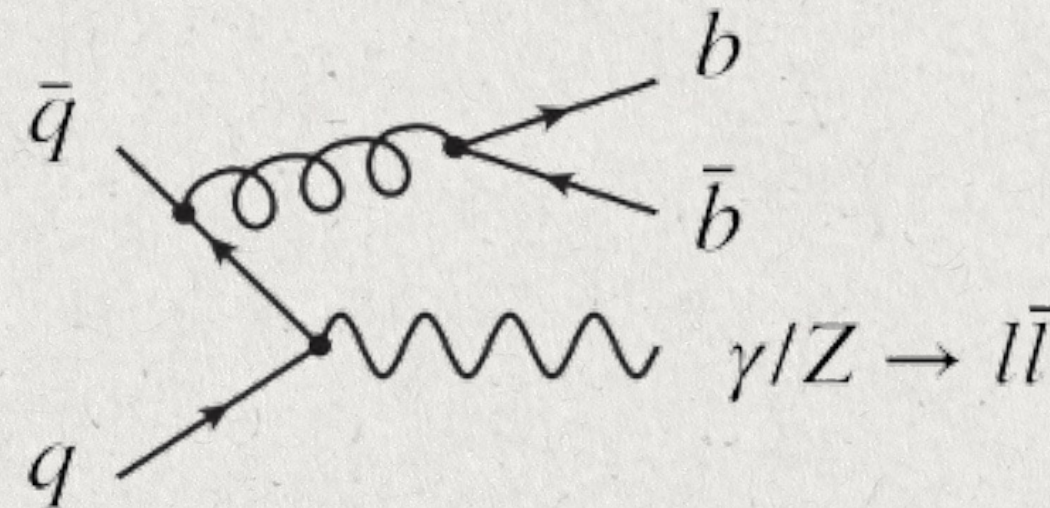
# Misura della sezione d'urto di produzione di un bosone Z in associazione a b- e c-jet

Lucrezia Boccardo  
INFN e Università di Genova  
IFAE 2024, Firenze



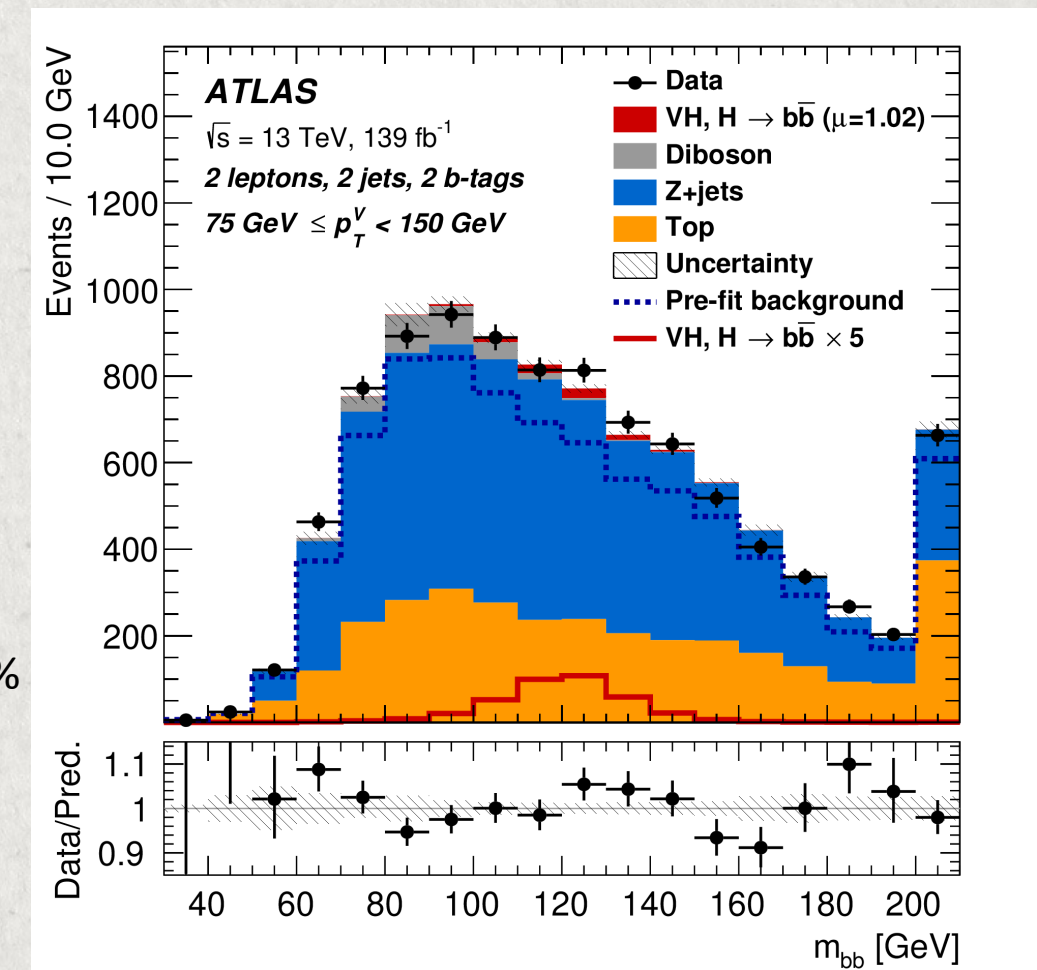
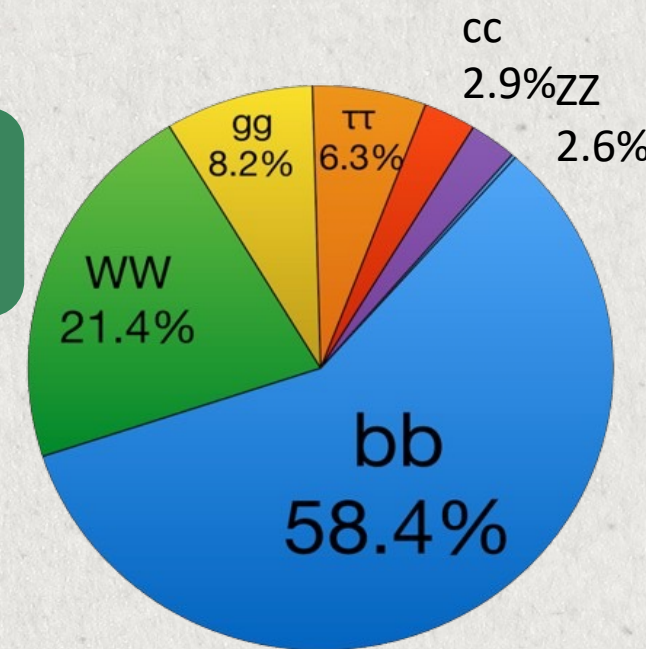


# Motivazioni e obiettivi



- ★ Misura su  $140 \text{ fb}^{-1}$  di dati dal Run 2 di ATLAS
- ★ Prima misura di Z+c-jet in ATLAS!
- ★ Test precisi di QCD perturbative (fino a NNLO)
- ★ Accesso alle PDF dei gluoni e dei quark b e c  
 ➔ possibile sensibilità al charm intrinseco
- ★ Predizioni sensibili a diversi schemi di sapore
- ★ Miglioramento della precisione dei modelli Monte Carlo: fondo per analisi VHbb e BSM
  
- ★ Aggiornamento dei risultati con  $36 \text{ fb}^{-1}$  (JHEP 07 (2020)044) migliorando la statistica e con un nuovo algoritmo di b-tagging

Decadimenti dell'Higgs

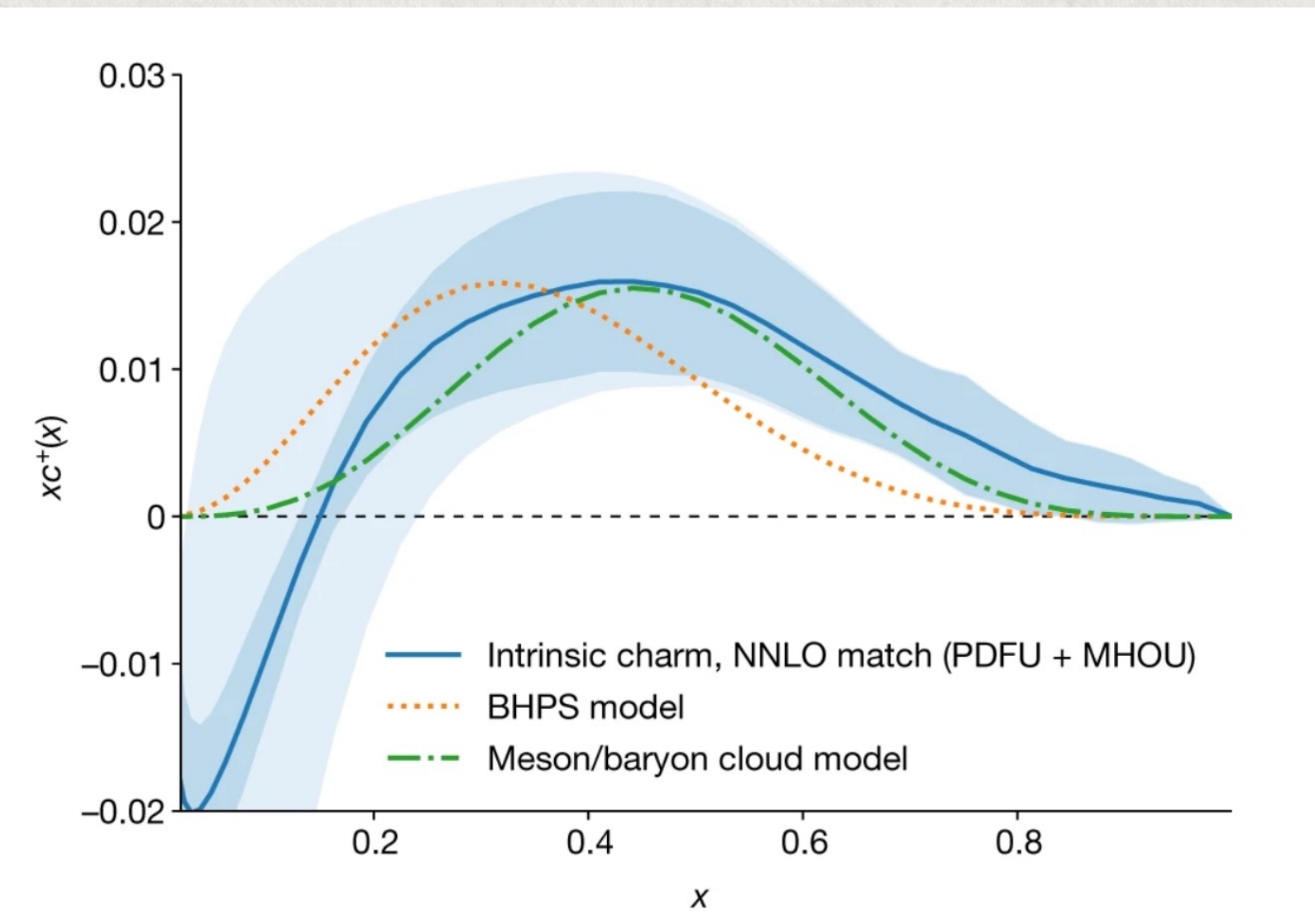




# Un po' di teoria: l'intrinsic charm



Comportamento di simil-valenza del charm → picco della PDF per  $0.4 < x < 0.6$  + compatibilità con 0 a bassi  $x$



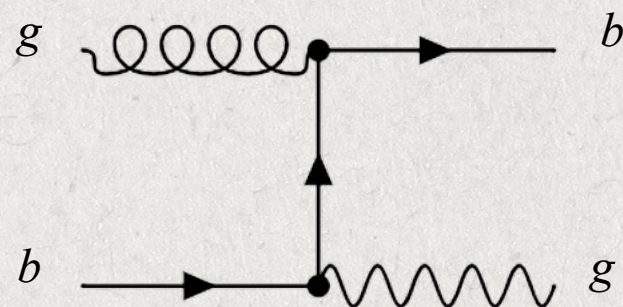
[1] NNPDF Collaboration, Evidence for intrinsic charm quarks in the proton, Nature 608 (2022) 483, arXiv: 2208.08372

Le collaborazioni che producono le PDF usate nelle predizioni MC possono inserire l'IC secondo diversi modelli teorici

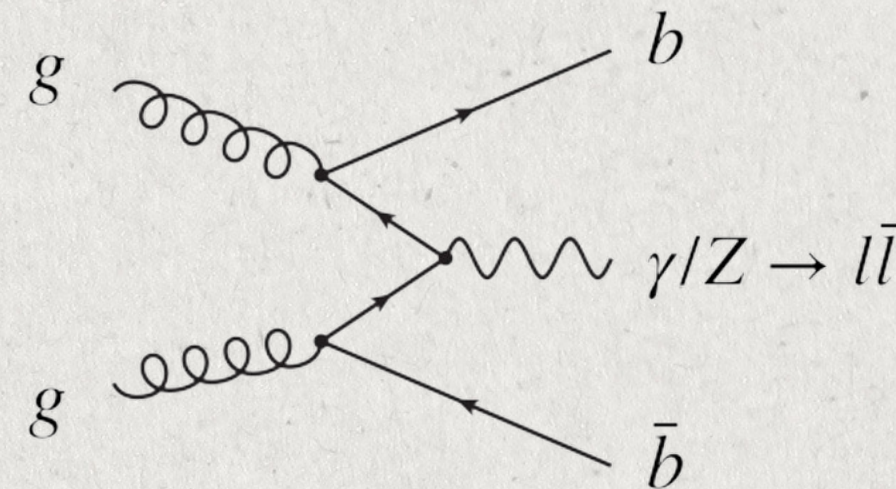


# Un po' di teoria: gli schemi di sapore

5FS: tutti i quark, con l'eccezione del  $t$ , non hanno massa e contribuiscono alla sezione d'urto con una PDF



4FS: il  $b$  è massivo e interviene solo attraverso il gluon splitting, di fatto non è un partone e non ha una PDF





# Strategia dell'analisi

## 2 REGIONI DI SEGNALE:

- ★ 1-TAG:  $Z \rightarrow \mu\mu$  e  $Z \rightarrow ee$  con  $\geq 1$  b-jet o  $\geq 1$  c-jet
- ★ 2-TAG:  $Z \rightarrow \mu\mu$  e  $Z \rightarrow ee$  con  $\geq 2$  b-jet

## Segnale

Selezione della Z attraverso  
il suo decadimento in due  
leptoni

$$Z \rightarrow \mu\mu \text{ e } Z \rightarrow ee$$



1 o 2 b-jet o 1 c-jet,  
identificati con il tagger DL1r  
con un WP dell'85%  $\rightarrow$   
efficienza del 30% per 1 c-jet

L'algoritmo di b-tagging DL1r identifica i jet di sapore pesante grazie a informazioni sulle tracce e sui vertici secondari.

Event selection	
Leptons	Exactly 2, same-flavour, opposite-charge
$m_{\ell\ell}$	$76 \text{ GeV} < m_{\ell\ell} < 106 \text{ GeV}$
$E_T^{\text{miss}}$	$E_T^{\text{miss}} < 60 \text{ GeV}$ if $p_T^{\ell\ell} < 150 \text{ GeV}$
flavour-tagged jets	$\geq 1$ or $\geq 2$ jets, DL1r@85%
Signal regions	
1-tag	$\geq 1$ flavour-tagged jets
2-tag	$\geq 2$ flavour-tagged jets
Rapidity regions	
Central rapidity	Z-boson rapidity $ Y(Z)  < 1.2$
Forward rapidity	Z-boson rapidity $ Y(Z)  \geq 1.2$



# Strategia dell'analisi

## 2 REGIONI DI SEGNALE:

- ★ 1-TAG:  $Z+\geq 1$  b-jet o  $Z+\geq 1$  c-jet
- ★ 2-TAG:  $Z+\geq 2$  b-jet

## Fondo

$Z+\text{jet}$  con la tecnica del  
*flavour fit* di variabili  
sensibili al sapore

+

ttbar e multijet stimati dai  
dati

+

Fondo elettrodebole e di  
singolo top con campioni MC

Nella regione 1-TAG i c-jet o i b-jet  
vengono selezionati come segnale  
modificando all'occorrenza ciò che  
in  $Z+\text{jet}$  costituisce il background

Necessaria una modellizzazione  
corretta della forma delle  
distribuzioni del fondo nelle regioni  
di segnale!





Modellizzazione corretta della forma delle distribuzioni di Z+jet

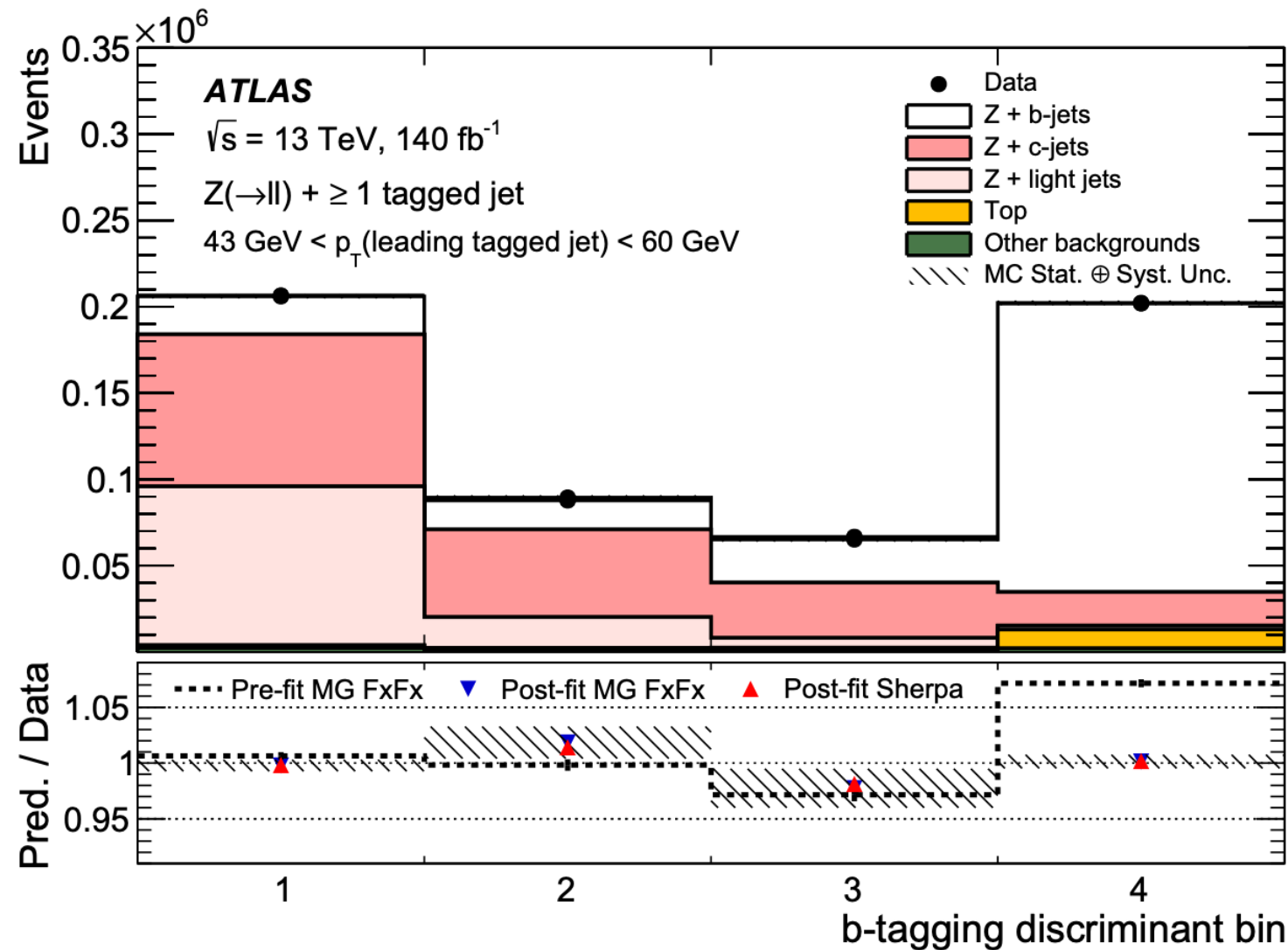


Z+jets = (Z+b-jet)+(Z+c-jet)+(Z+light-jet) → estrazione del loro contributo relativo nelle regioni di interesse per l'analisi



fit di maximum likelihood su variabili sensibili al sapore

Distribuzioni per il discriminante dell'algorithmo di b-tagging: correzione bin a bin



$$D_{DL1r} = \ln \left( \frac{p_b}{f_c \cdot p_c + (1 - f_c) \cdot p_{light}} \right)$$





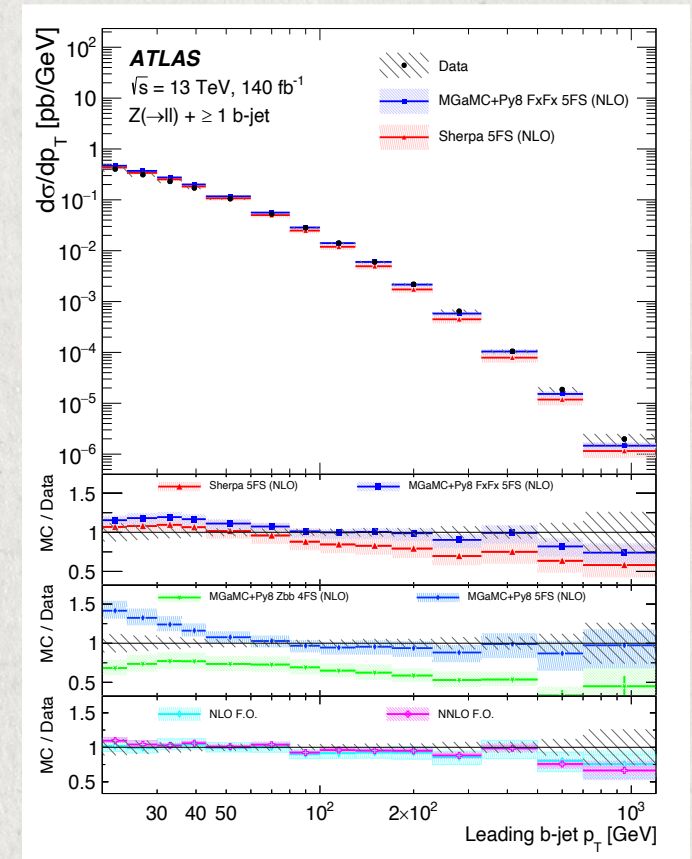
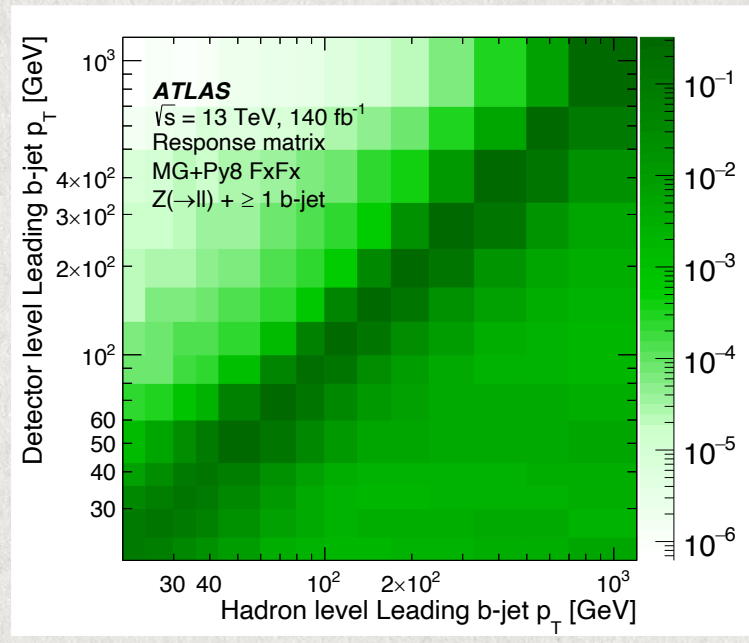
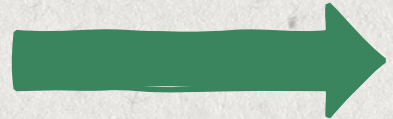
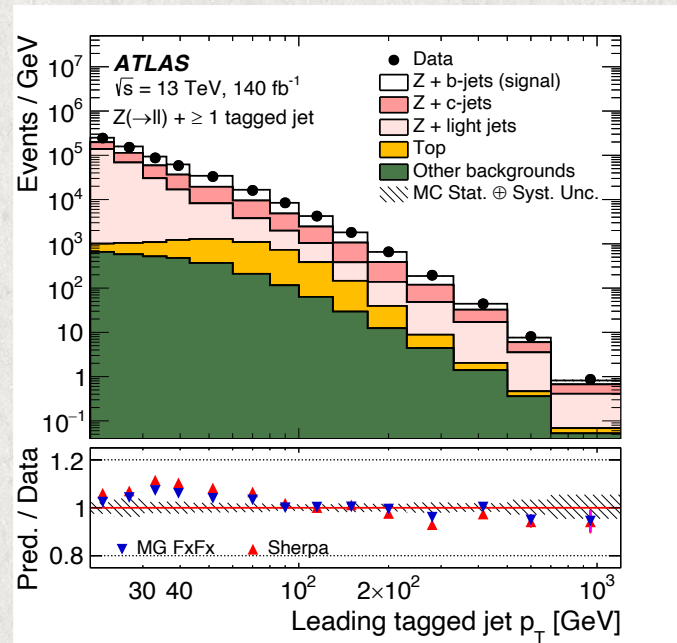
# Dal rivelatore al confronto con le simulazioni



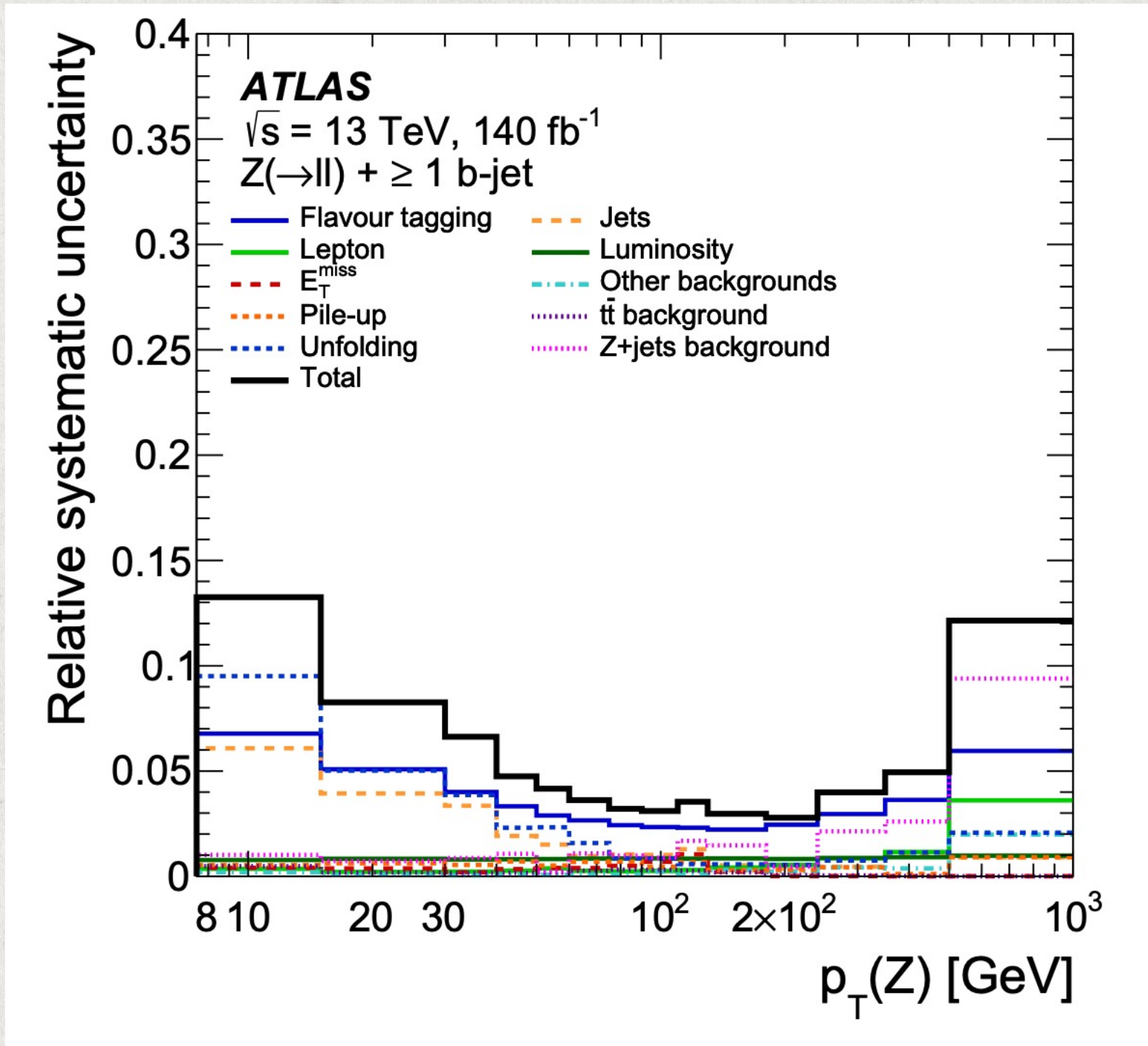
Final state	Observable	Notation
$Z + \geq 1$ $b$ -jet	$p_T$ of the leading $b$ -jet	$p_{T,b}^0$
	$p_T$ of the $Z$ boson	$p_T(Z)$
	$\Delta\tilde{R} = \sqrt{(\Delta\phi)^2 + (\Delta y)^2}$ between the $Z$ boson and leading $b$ -jet where $\Delta\phi$ ( $\Delta y$ ) is the azimuthal angle (rapidity) difference	$\Delta\tilde{R}_{Zb}$
$Z + \geq 1$ $c$ -jet	$p_T$ of the leading $c$ -jet	$p_{T,c}^0$
	$p_T$ of the $Z$ boson	$p_T(Z)$
	Feynman- $x$ variable $x_F = 2 p_z(c) /\sqrt{s}$ [25]	$x_F(c)$
	Cross-section ratio of $p_T(Z)$ in $ y(Z)  < 1.2$ and $ y(Z)  > 1.2$	$R(p_T(Z))$
$Z + \geq 2$ $b$ -jets	Invariant mass of the two leading $b$ -jets	$m_{bb}$
	Azimuthal angle difference between the two leading $b$ -jets	$\Delta\phi_{bb}$

Dati al livello del rivelatore → matrice di unfolding → sezione d'urto differenziale

Lista delle variabili di interesse







Le principali fonti di incertezza sono:

- ★ B-TAGGING: l'assegnazione dei sapori ai jet
- ★ UNFOLDING
- ★ JET: la modellizzazione e l'identificazione dei jet



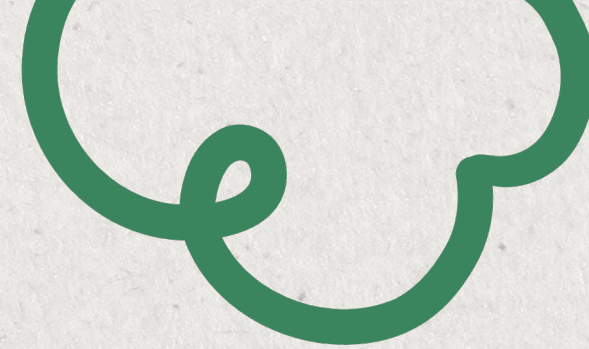


# Focus: predizioni teoriche

- ★ Schemi di sapore: predizioni in 4FNS e 3FNS, rispettivamente con quark b e quark c trattati come massivi nel calcolo al livello matriciale;

Generator/settings	Flav. scheme	PDF	LHAPDF ID
Main MC samples			
MGAMC+Py8 FxFx	5FS	NNPDF3.1 (NNLO) LuxQED	325100
SHERPA 2.2.11	5FS	NNPDF3.0 (NNLO)	303200
Predictions to test various flavour schemes			
MGAMC+Py8	5FS	NNPDF2.3 (NLO)	229800
MGAMC+Py8 Zbb	4FS	NNPDF3.1 (NLO) PCH	321500
MGAMC+Py8 Zcc	3FS	NNPDF3.1 (NLO) PCH	321300
Intrinsic charm (IC) predictions			
		NNPDF4.0 (NNLO) PCH (no IC)	332100
		NNPDF4.0 (NNLO)	331100
		NNPDF4.0 (NNLO) EMC+LHCbZc	– [24]
MGAMC+Py8 FxFx	5FS	CT18 (NNLO) (no IC)	14000
		CT18FC – CT18 BHPS3	14087
		CT18FC – CT18 MCM-E	14093
		CT14 (NNLO) (no IC)	13000
		CT14 (NNLO)IC – BHPS1	13082
		CT14 (NNLO)IC – BHPS2	13083
Fixed-order predictions [3]			
NLO	5FS	PDF4LHC21	93000
NNLO	5FS	PDF4LHC21	93000





# Focus: predizioni teoriche

- ★ Schemi di sapore: predizioni in 4FNS e 3FNS, rispettivamente con quark b e quark c trattati come massivi nel calcolo al livello matriciale;
- ★ Charm intrinseco: predizioni prodotte testando diversi modelli contenenti charm intrinseco;

Generator/settings	Flav. scheme	PDF	LHAPDF ID
Main MC samples			
MGAMC+Py8 FxFx	5FS	NNPDF3.1 (NNLO) LuxQED	325100
SHERPA 2.2.11	5FS	NNPDF3.0 (NNLO)	303200
Predictions to test various flavour schemes			
MGAMC+Py8	5FS	NNPDF2.3 (NLO)	229800
MGAMC+Py8 Zbb	4FS	NNPDF3.1 (NLO) PCH	321500
MGAMC+Py8 Zcc	3FS	NNPDF3.1 (NLO) PCH	321300
Intrinsic charm (IC) predictions			
MGAMC+Py8 FxFx	5FS	NNPDF4.0 (NNLO) PCH (no IC)	332100
		NNPDF4.0 (NNLO)	331100
		NNPDF4.0 (NNLO) EMC+LHCbZc	- [24]
		CT18 (NNLO) (no IC)	14000
		CT18FC – CT18 BHPS3	14087
		CT18FC – CT18 MCM-E	14093
		CT14 (NNLO) (no IC)	13000
		CT14 (NNLO)IC – BHPS1	13082
		CT14 (NNLO)IC – BHPS2	13083
Fixed-order predictions [3]			
NLO	5FS	PDF4LHC21	93000
NNLO	5FS	PDF4LHC21	93000





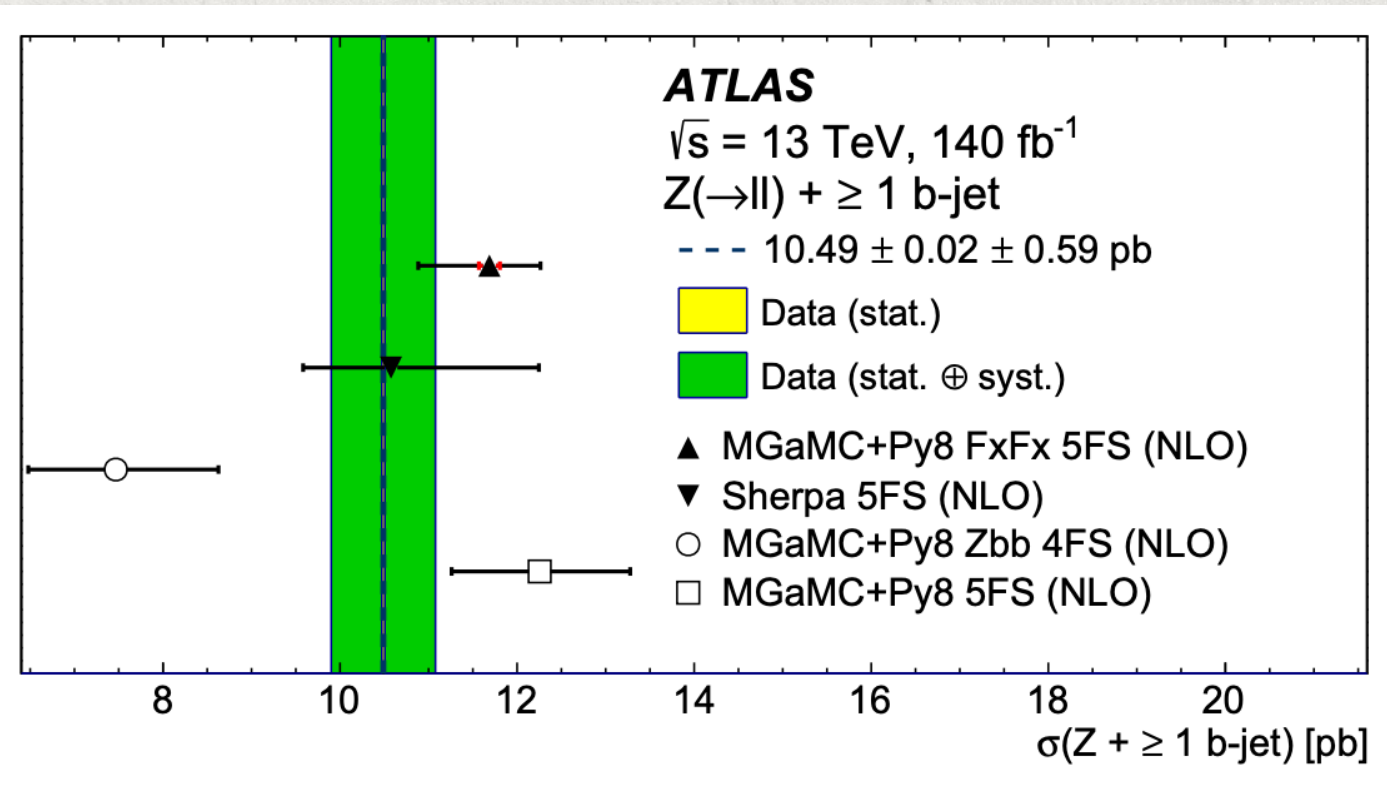
# Focus: predizioni teoriche

Generator/settings	Flav. scheme	PDF	LHAPDF ID
Main MC samples			
MGAMC+Py8 FxFx	5FS	NNPDF3.1 (NNLO) LuxQED	325100
SHERPA 2.2.11	5FS	NNPDF3.0 (NNLO)	303200
Predictions to test various flavour schemes			
MGAMC+Py8	5FS	NNPDF2.3 (NLO)	229800
MGAMC+Py8 Zbb	4FS	NNPDF3.1 (NLO) PCH	321500
MGAMC+Py8 Zcc	3FS	NNPDF3.1 (NLO) PCH	321300
Intrinsic charm (IC) predictions			
MGAMC+Py8 FxFx	5FS	NNPDF4.0 (NNLO) PCH (no IC)	332100
		NNPDF4.0 (NNLO)	331100
		NNPDF4.0 (NNLO) EMC+LHCbZc	- [24]
		CT18 (NNLO) (no IC)	14000
		CT18FC – CT18 BHPS3	14087
		CT18FC – CT18 MCM-E	14093
		CT14 (NNLO) (no IC)	13000
		CT14 (NNLO)IC – BHPS1	13082
		CT14 (NNLO)IC – BHPS2	13083
Fixed-order predictions [3]			
NLO	5FS	PDF4LHC21	93000
NNLO	5FS	PDF4LHC21	93000

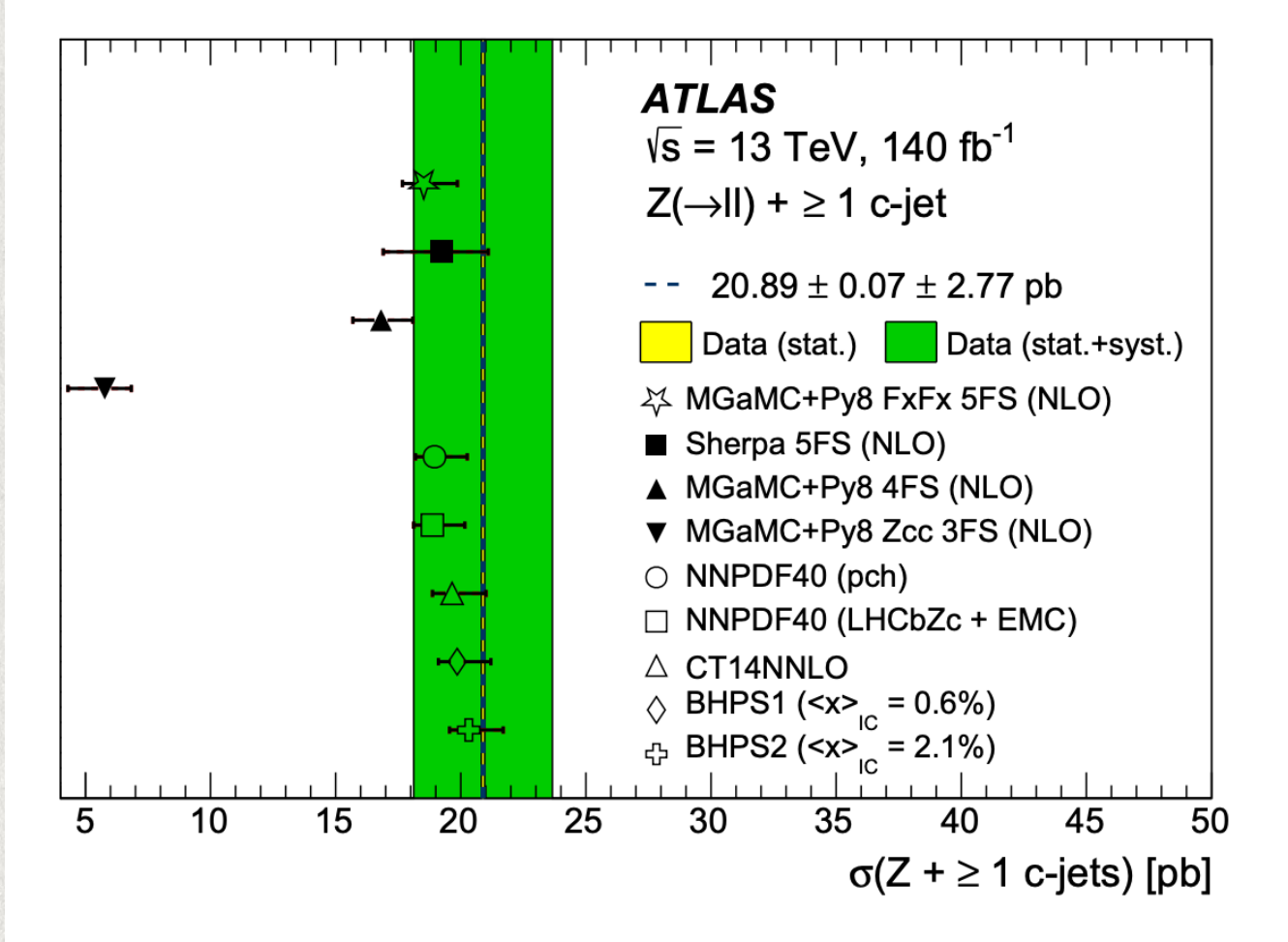
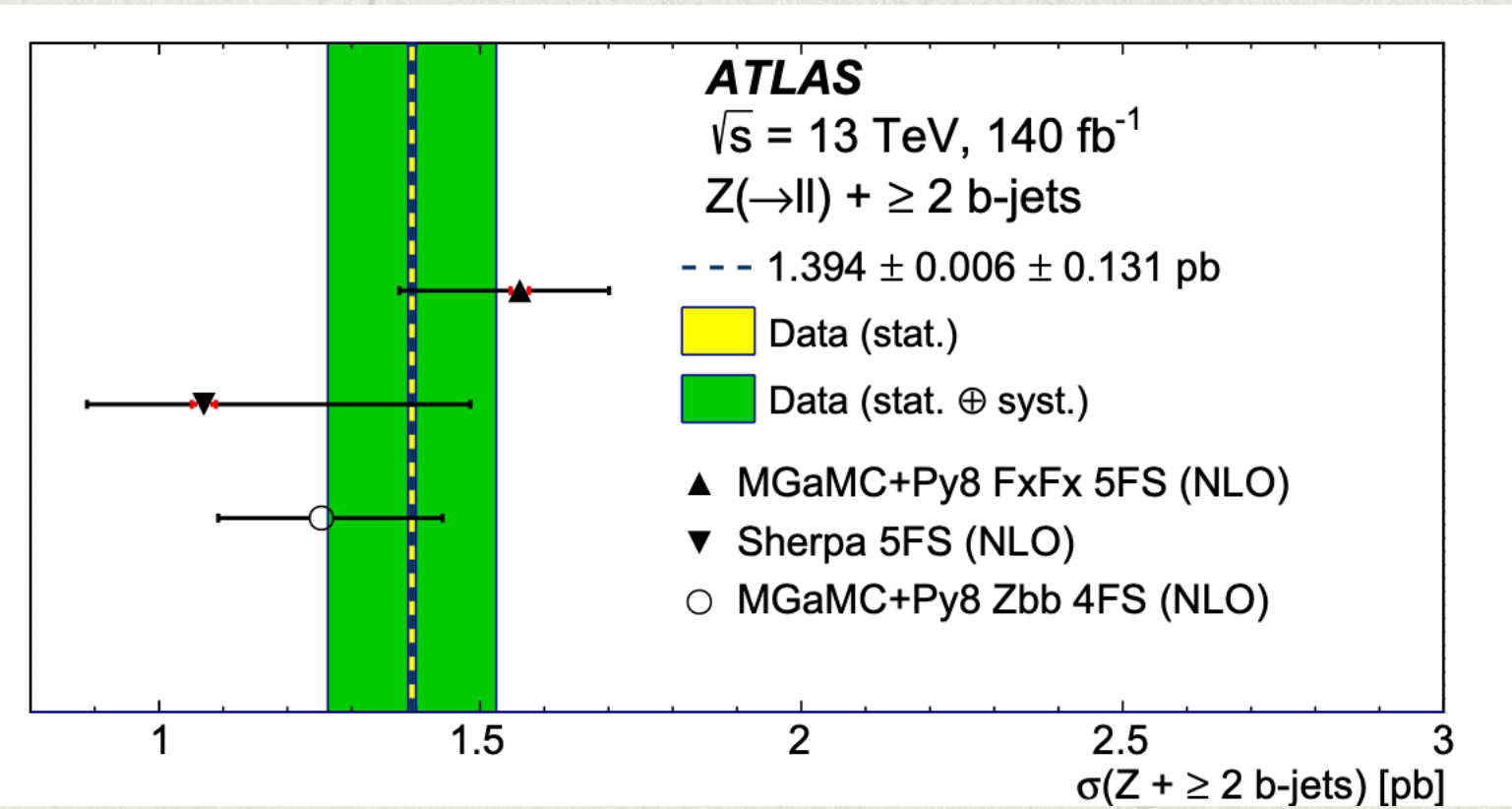
- ★ Schemi di sapore: predizioni in 4FNS e 3FNS, rispettivamente con quark b e quark c trattati come massivi nel calcolo al livello matriciale;
- ★ Charm intrinseco: predizioni prodotte testando diversi modelli contenenti charm intrinseco;
- ★ Predizioni ad ordine fissato NLO: in particolare, con l'assegnazione del sapore dei jet attraverso un algoritmo IRC-safe, cioè che non risente di divergenze infrarosse e collineari



# Sezioni d'urto inclusive

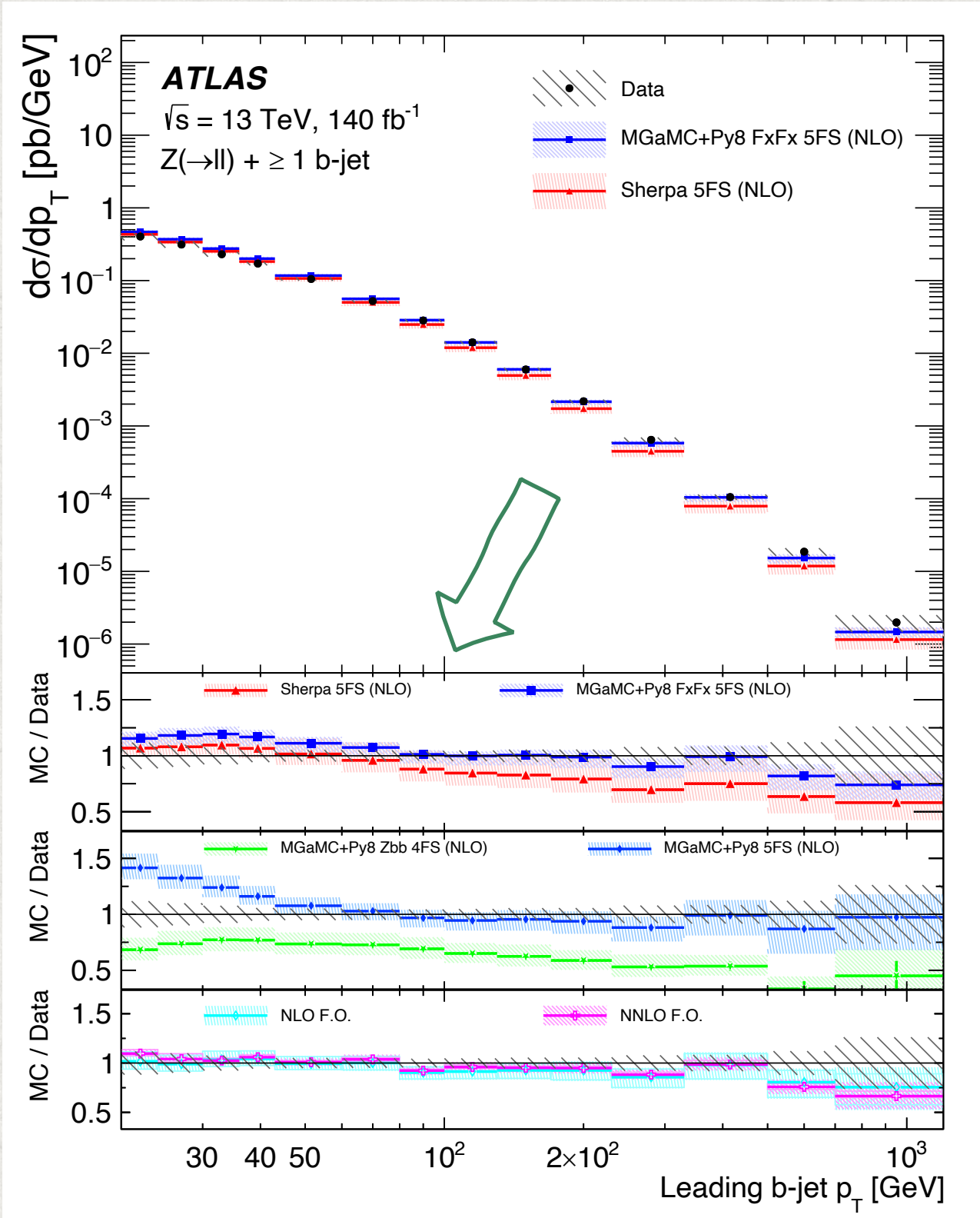


★  $\sigma(Z + \geq 1 \text{ b-jet}) = 10.49 \pm 0.02 \text{ (stat.)} \pm 0.59 \text{ (syst) pb}$   
 ★  $\sigma(Z + \geq 2 \text{ b-jet}) = 1.39 \pm 0.01 \text{ (stat.)} \pm 0.13 \text{ (syst) pb}$   
 ★  $\sigma(Z + \geq 1 \text{ c-jet}) = 20.89 \pm 0.07 \text{ (stat.)} \pm 2.77 \text{ (syst) pb}$





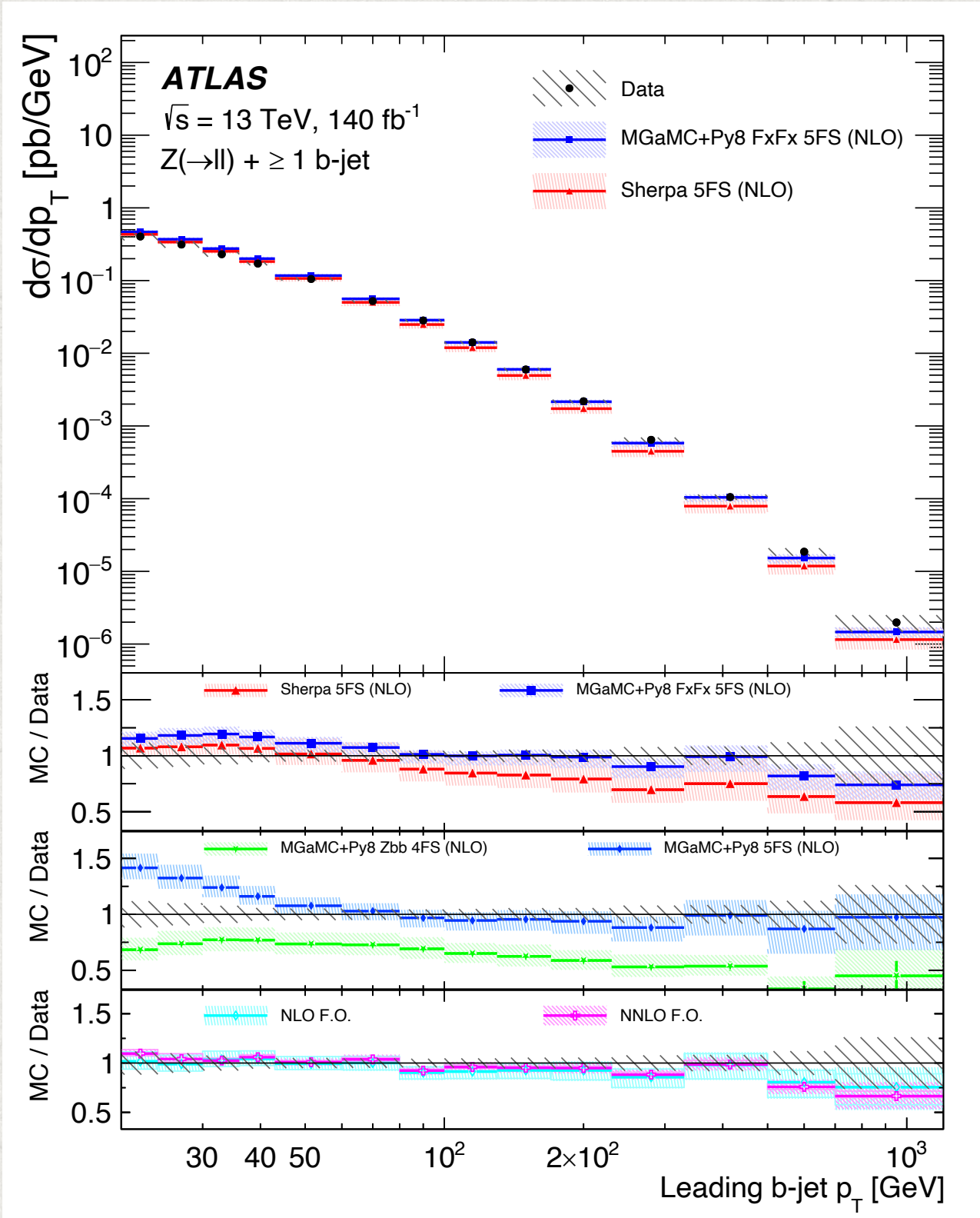
# Sezioni d'urto differenziali: 1 e 2 b-jet



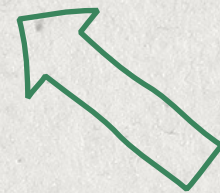
★ 5FS fornisce una buona descrizione dei dati per 1 b-jet sia in Madgraph che in Sherpa



# Sezioni d'urto differenziali: 1 e 2 b-jet

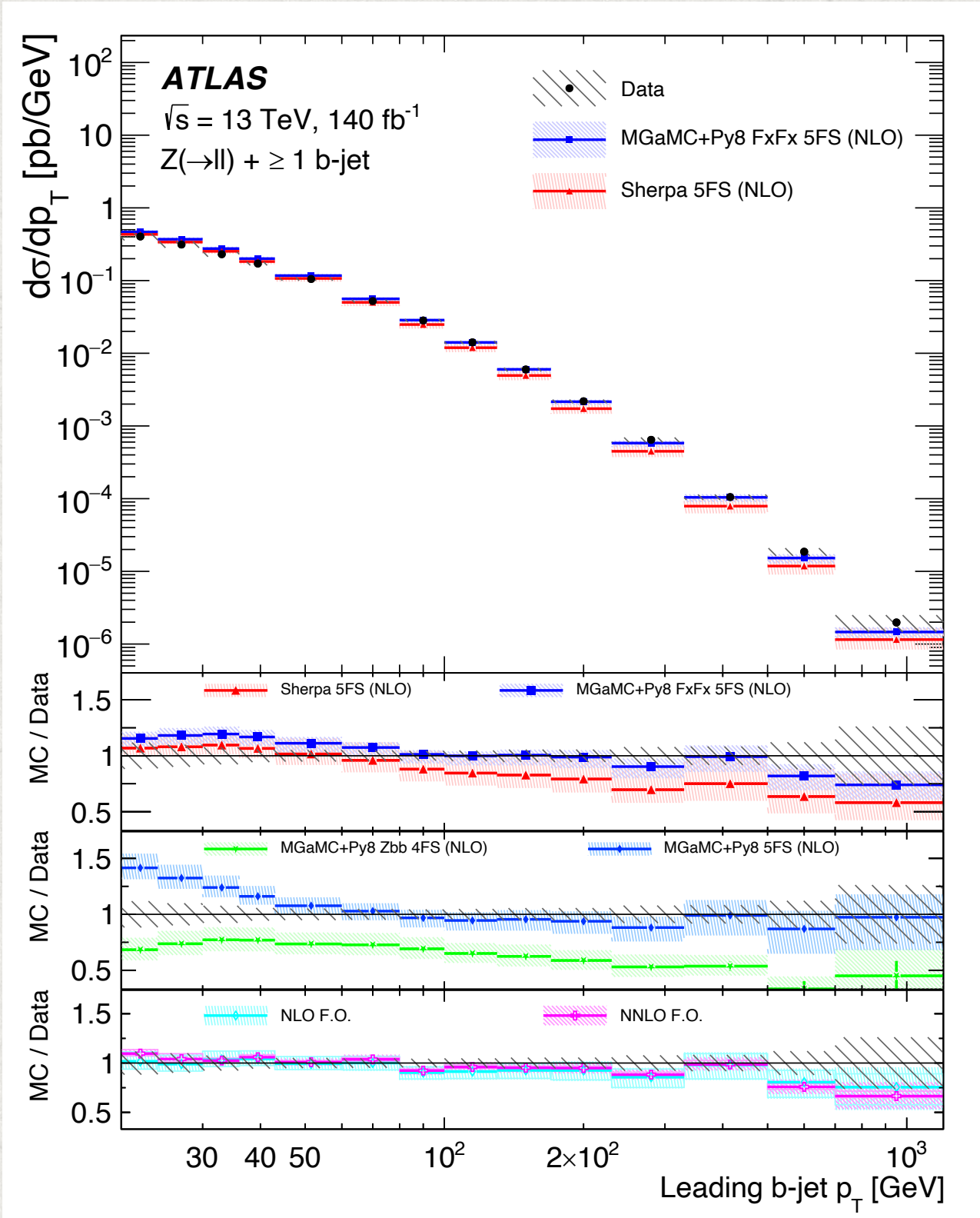


- ★ 5FS fornisce una buona descrizione dei dati per 1 b-jet sia in Madgraph che in Sherpa
- ★ 4FS sottostima i dati in tutto lo spettro





# Sezioni d'urto differenziali: 1 e 2 b-jet

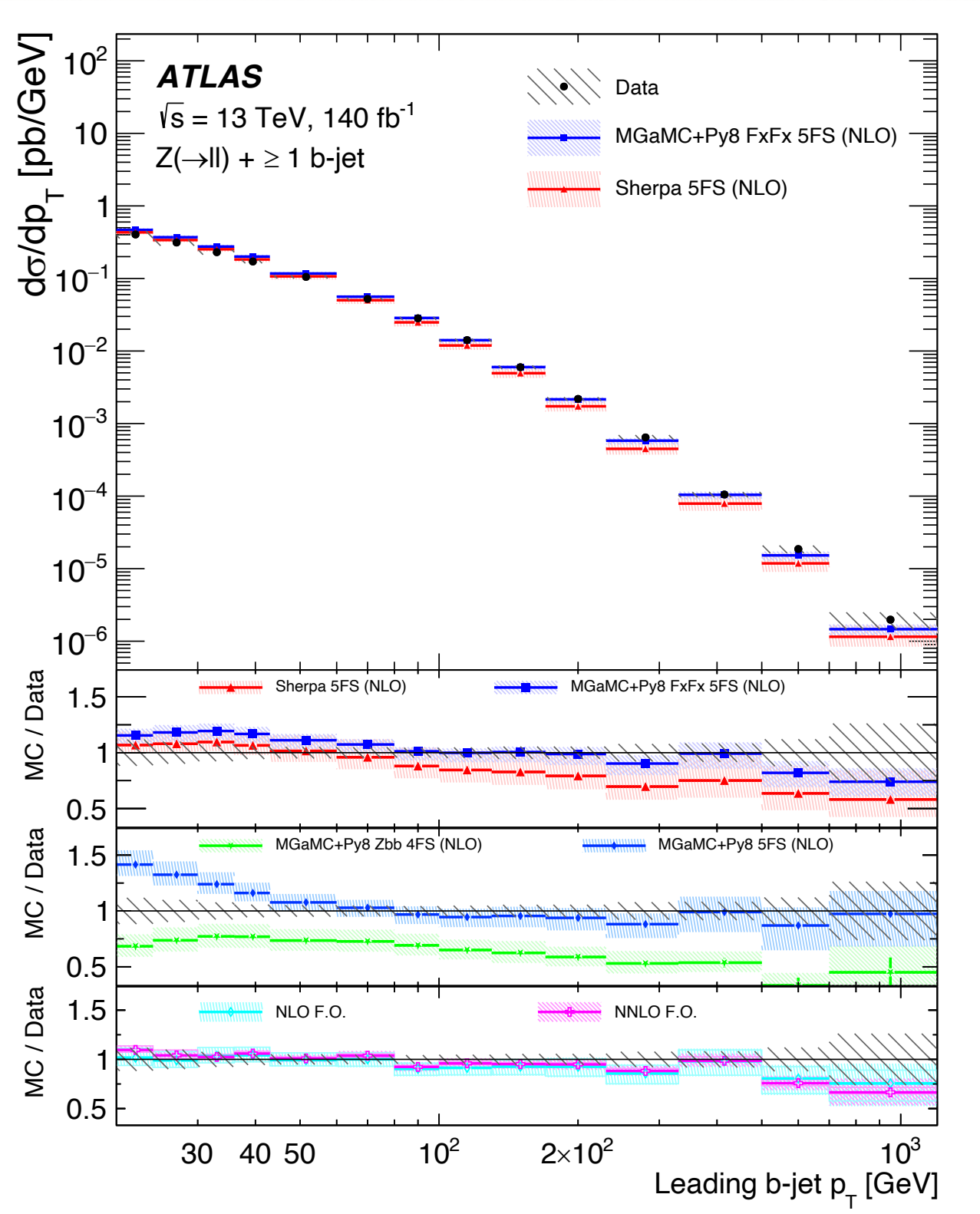


- ★ 5FS fornisce una buona descrizione dei dati per 1 b-jet sia in Madgraph che in Sherpa
- ★ 4FS sottostima i dati in tutto lo spettro
- ★ Le predizioni NNLO forniscono una stima migliore di quelle NLO

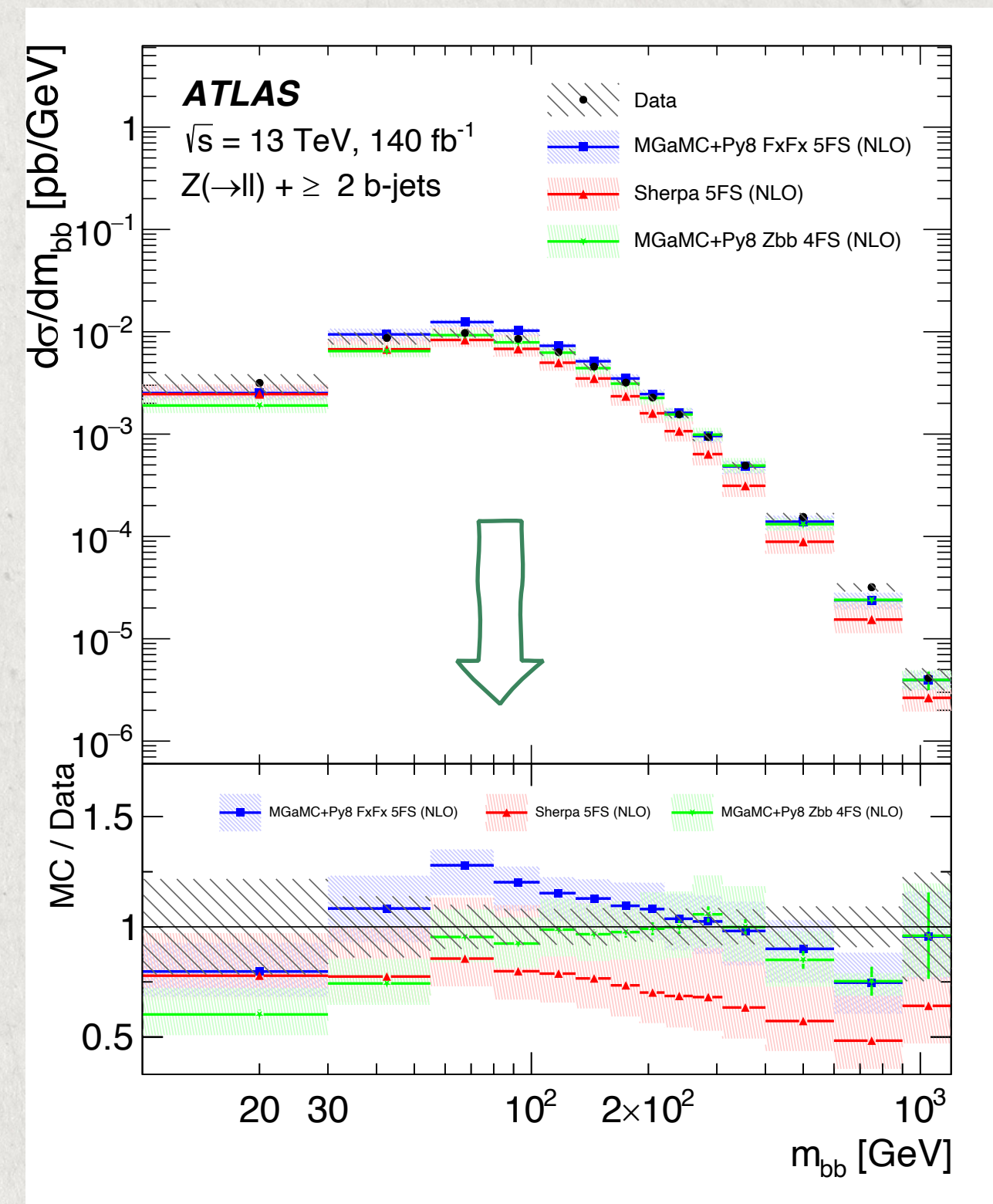




# Sezioni d'urto differenziali: 1 e 2 b-jet

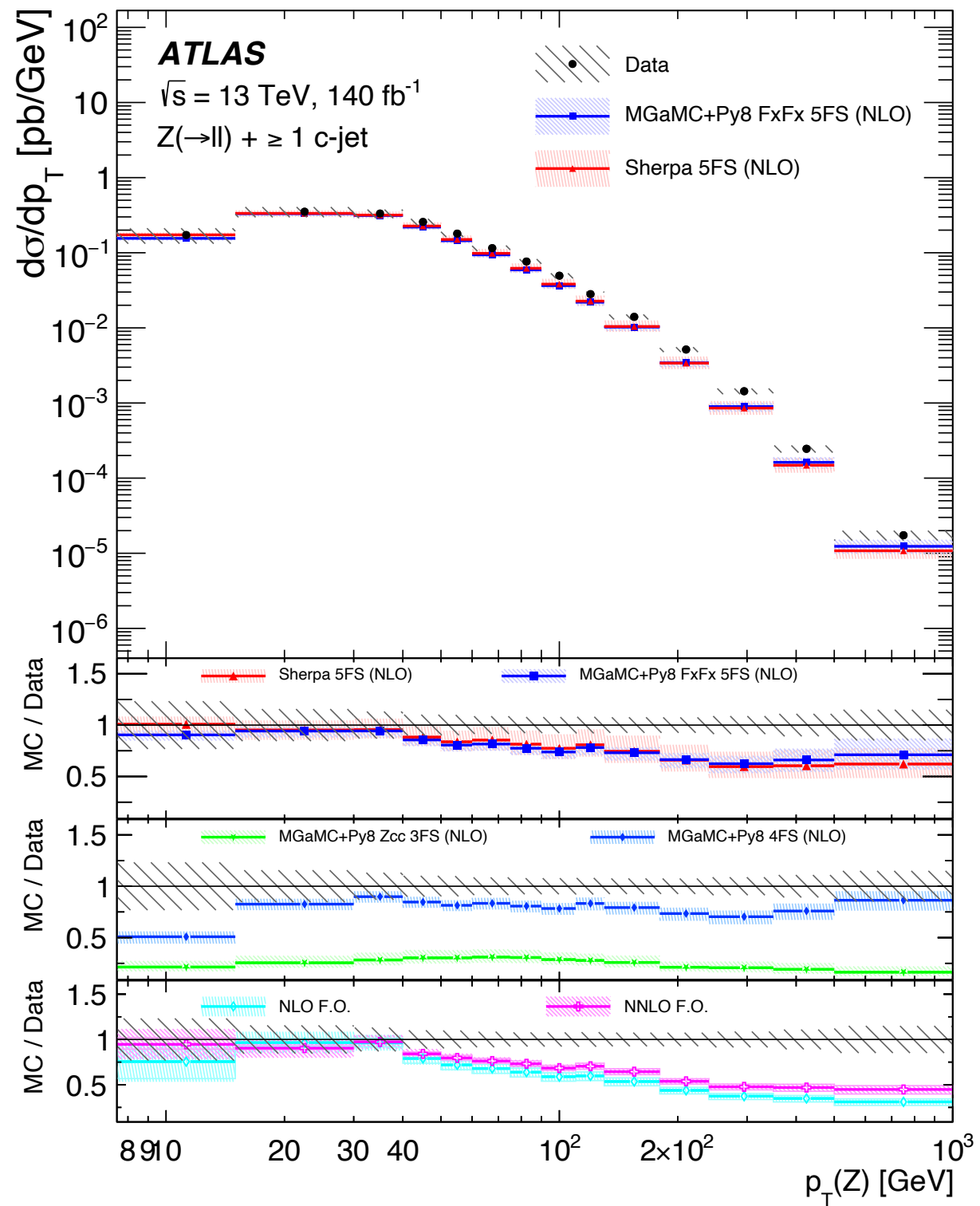


- ★ 5FS fornisce una buona descrizione dei dati per 1 b-jet sia in Madgraph che in Sherpa
- ★ 4FS sottostima i dati in tutto lo spettro
- ★ Le predizioni NNLO forniscono una stima migliore di quelle NLO
- ★ Nessuna predizione è in accordo con i dati per tutto lo spettro di  $m_{bb}$ , in particolare a masse maggiori di 80 GeV

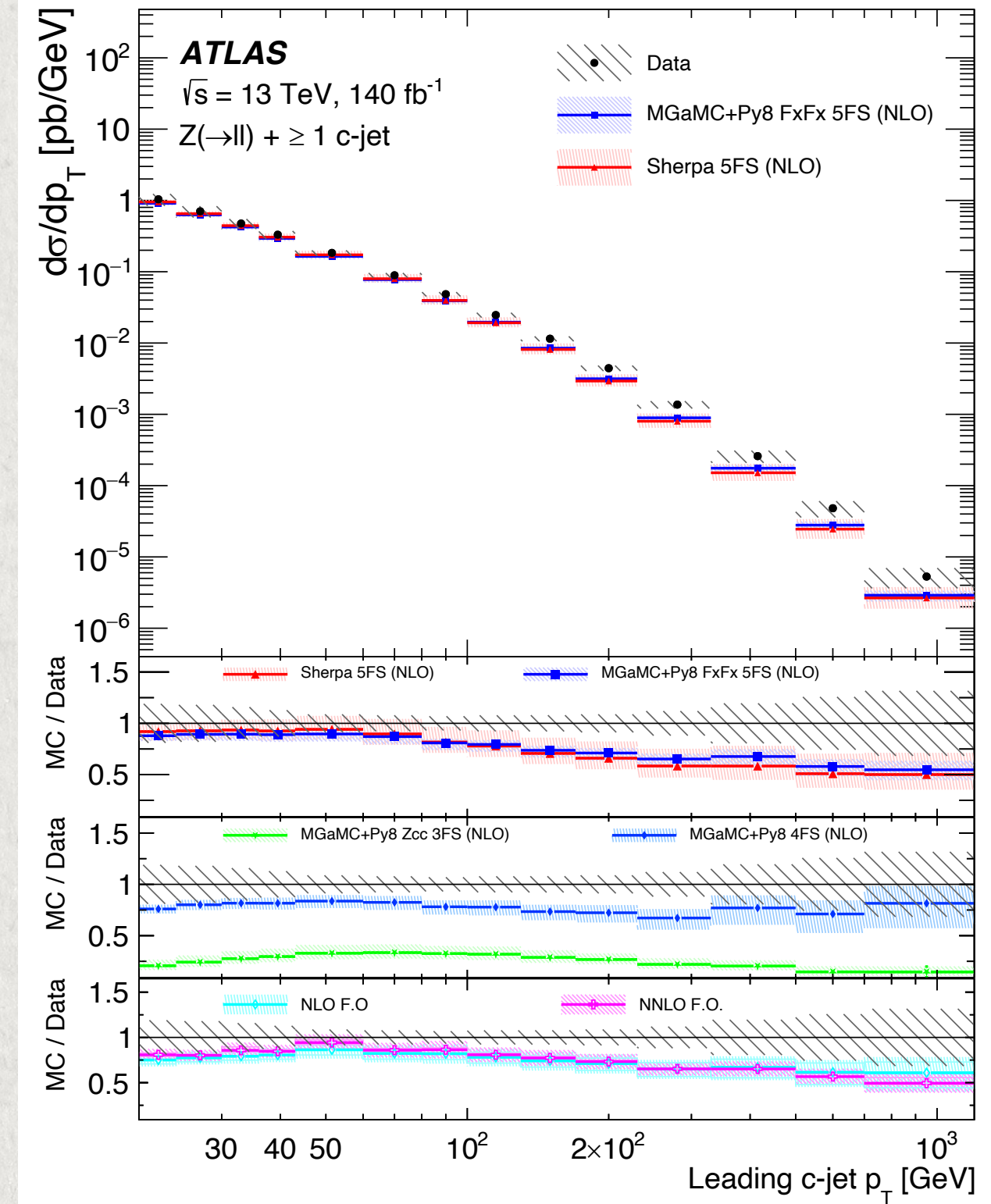




# Sezioni d'urto differenziali: 1 c-jet

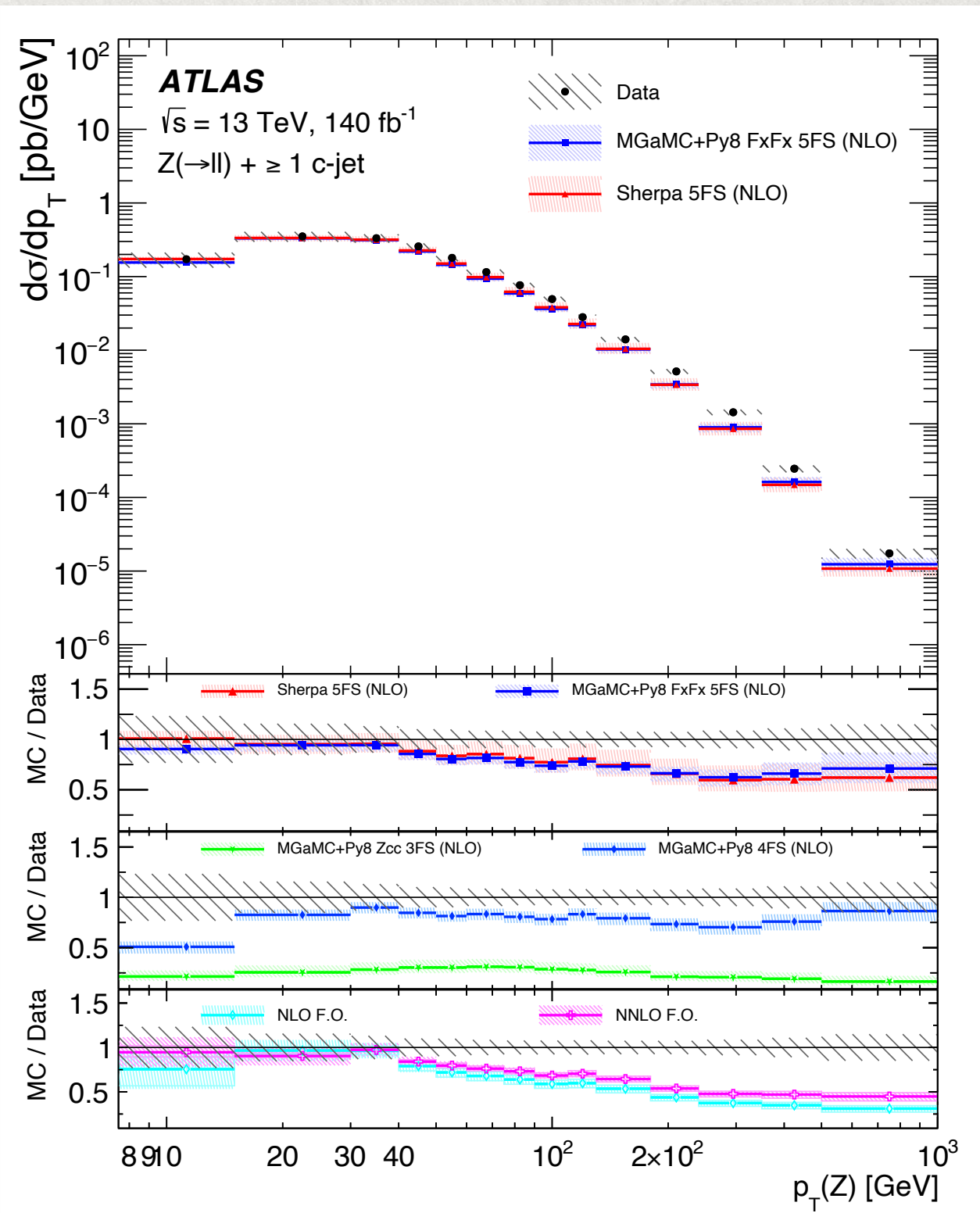


★ 5FS fornisce leggera sottostima ad alti impulsi



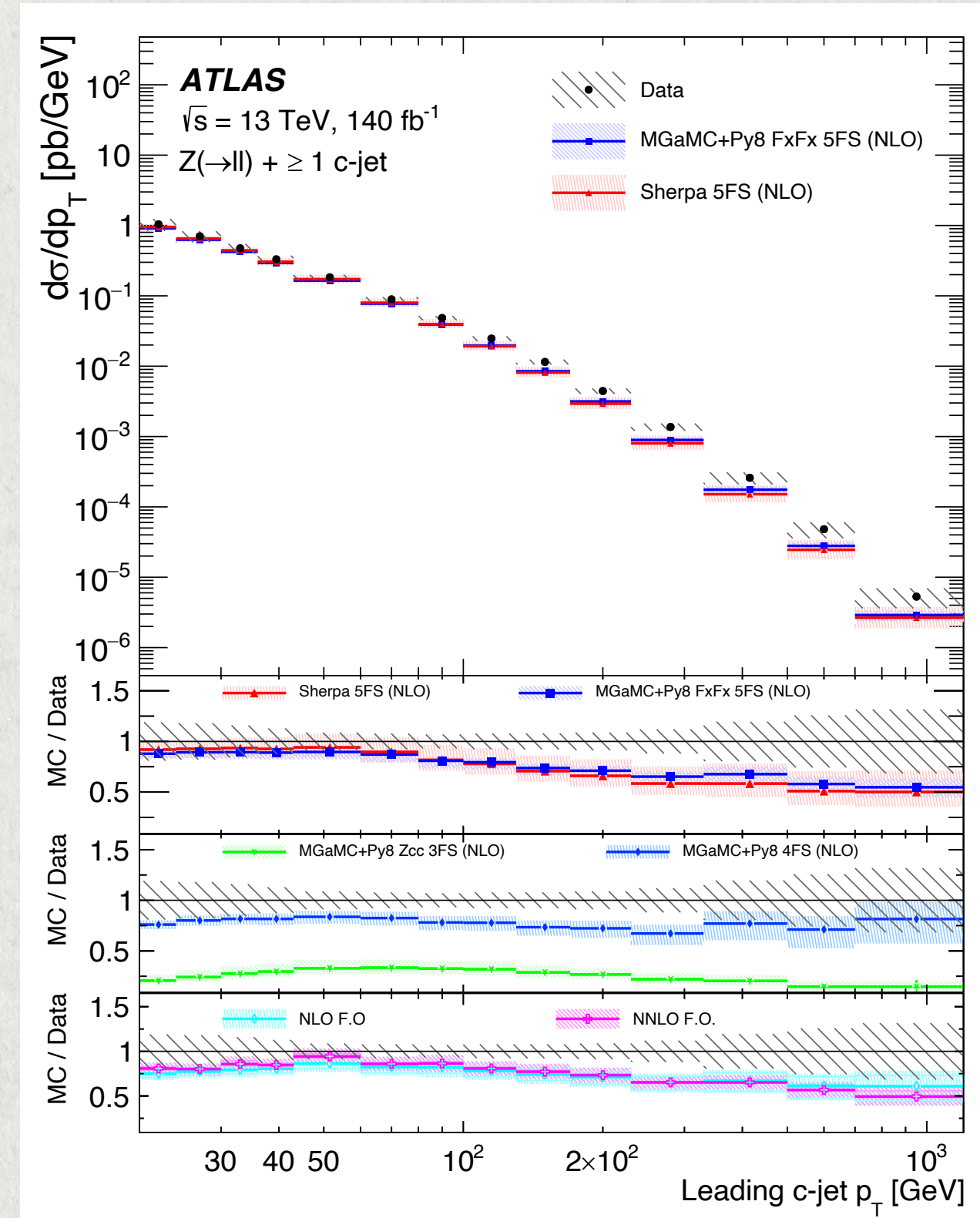


# Sezioni d'urto differenziali: 1 c-jet



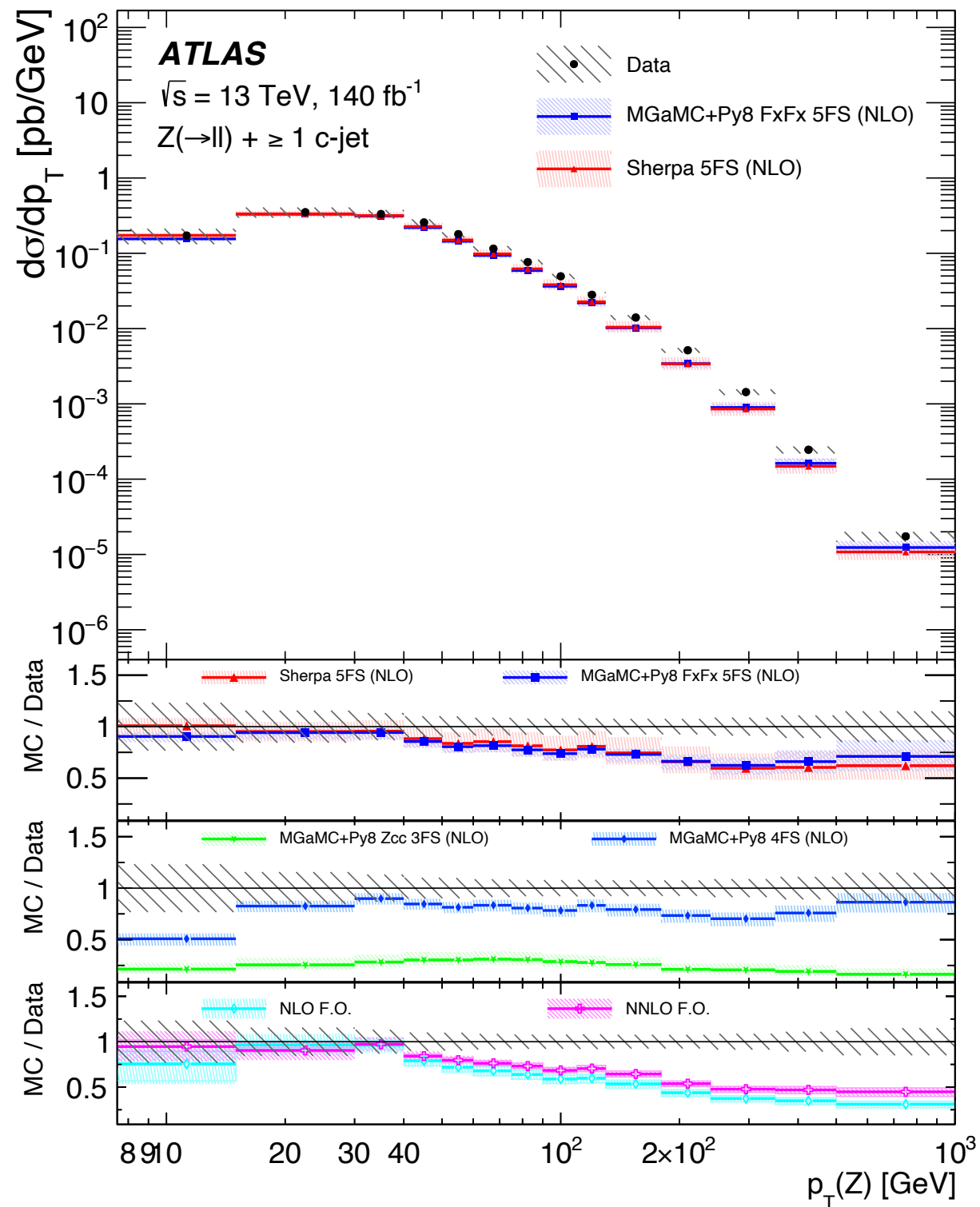
★ 5FS fornisce leggera sottostima ad alti impulsi

★ 4FS fornisce una stima ragionevole, 3FS sottostima i dati di un fattore 3





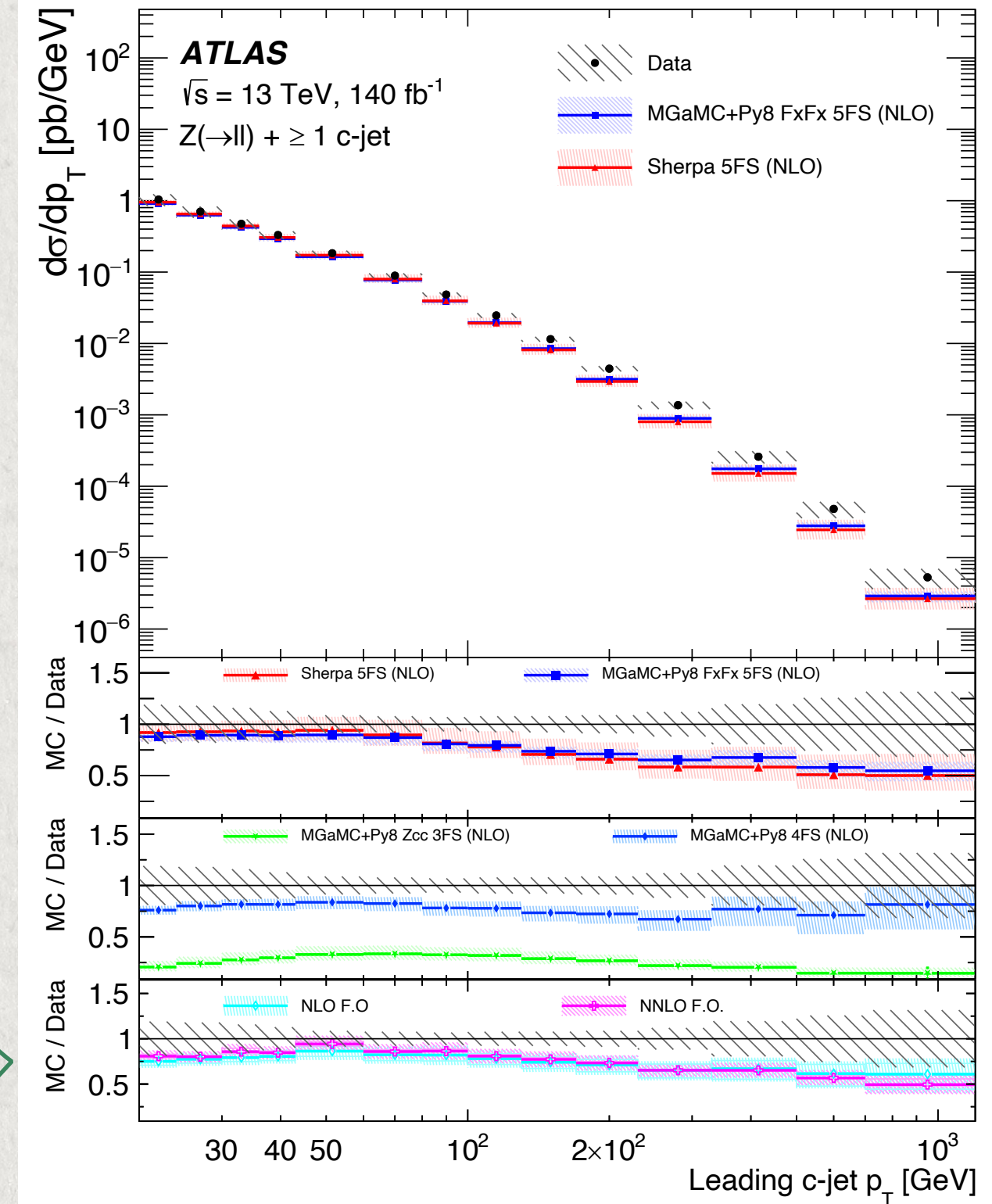
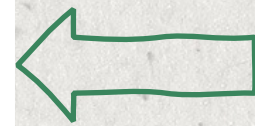
# Sezioni d'urto differenziali: 1 c-jet



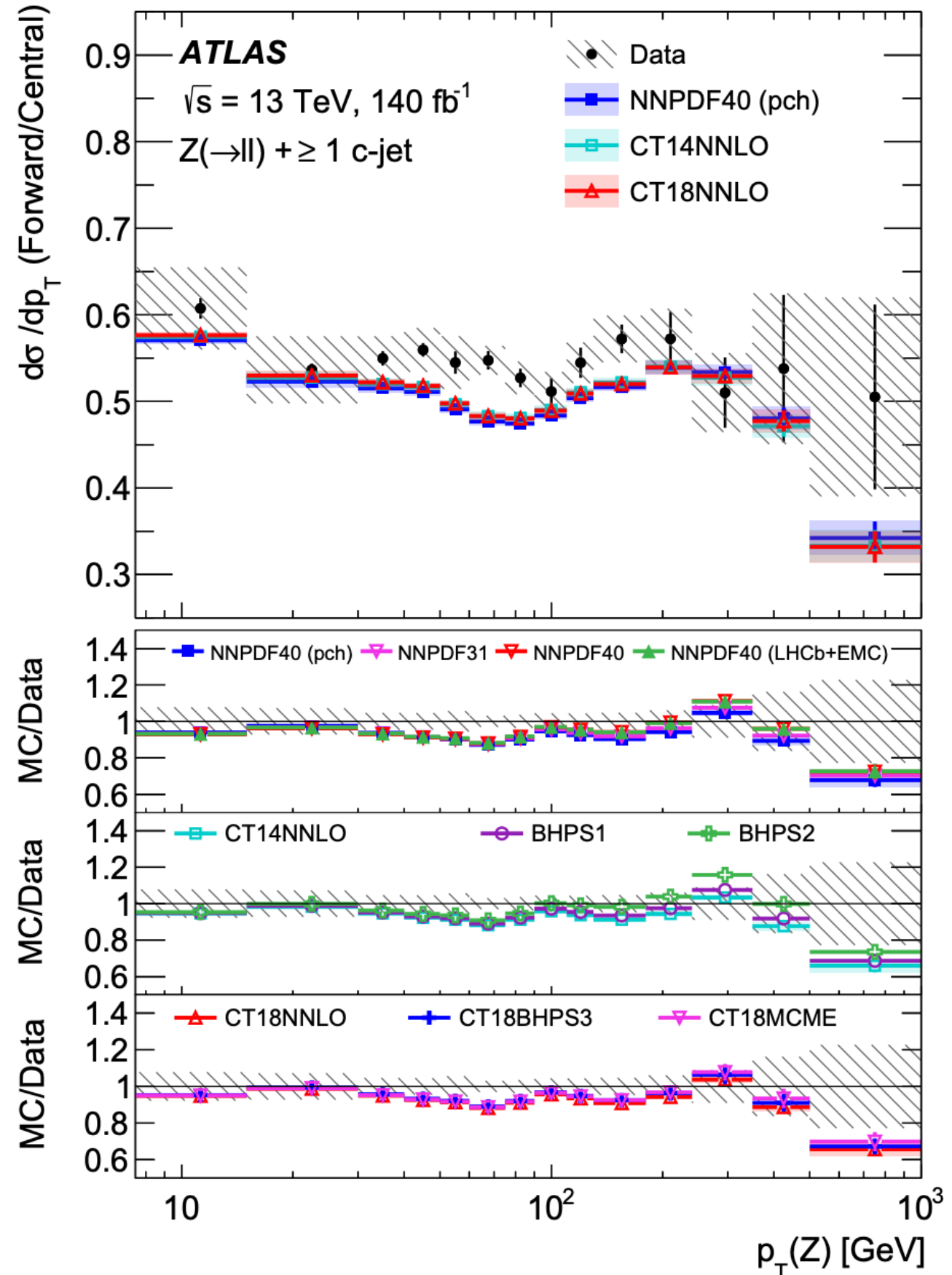
★ 5FS fornisce leggera sottostima ad alti impulsi

★ 4FS fornisce una stima ragionevole, 3FS sottostima i dati di un fattore 3

★ Predizioni ad ordine fissato NLO e NNLO predicono uno spettro di impulso minore

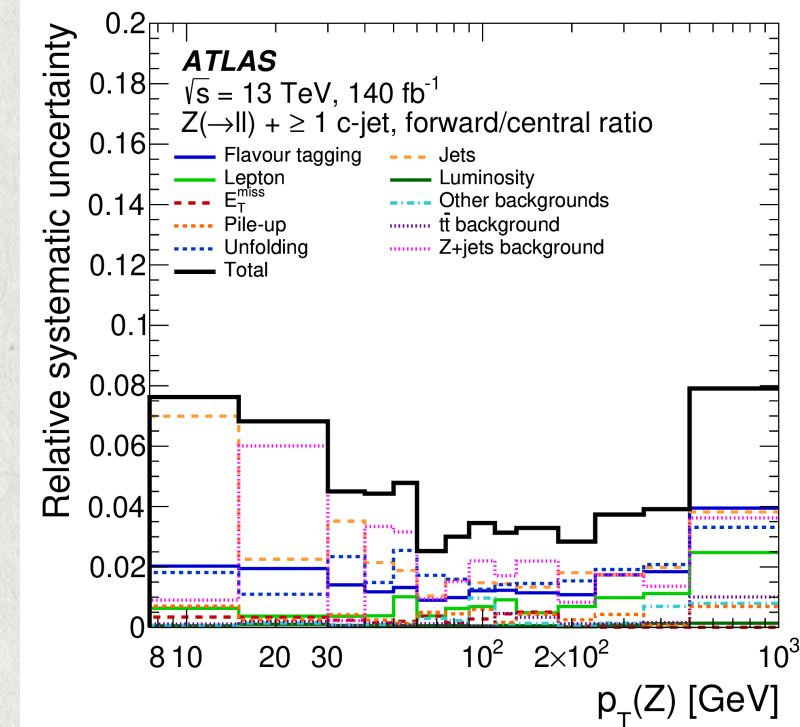




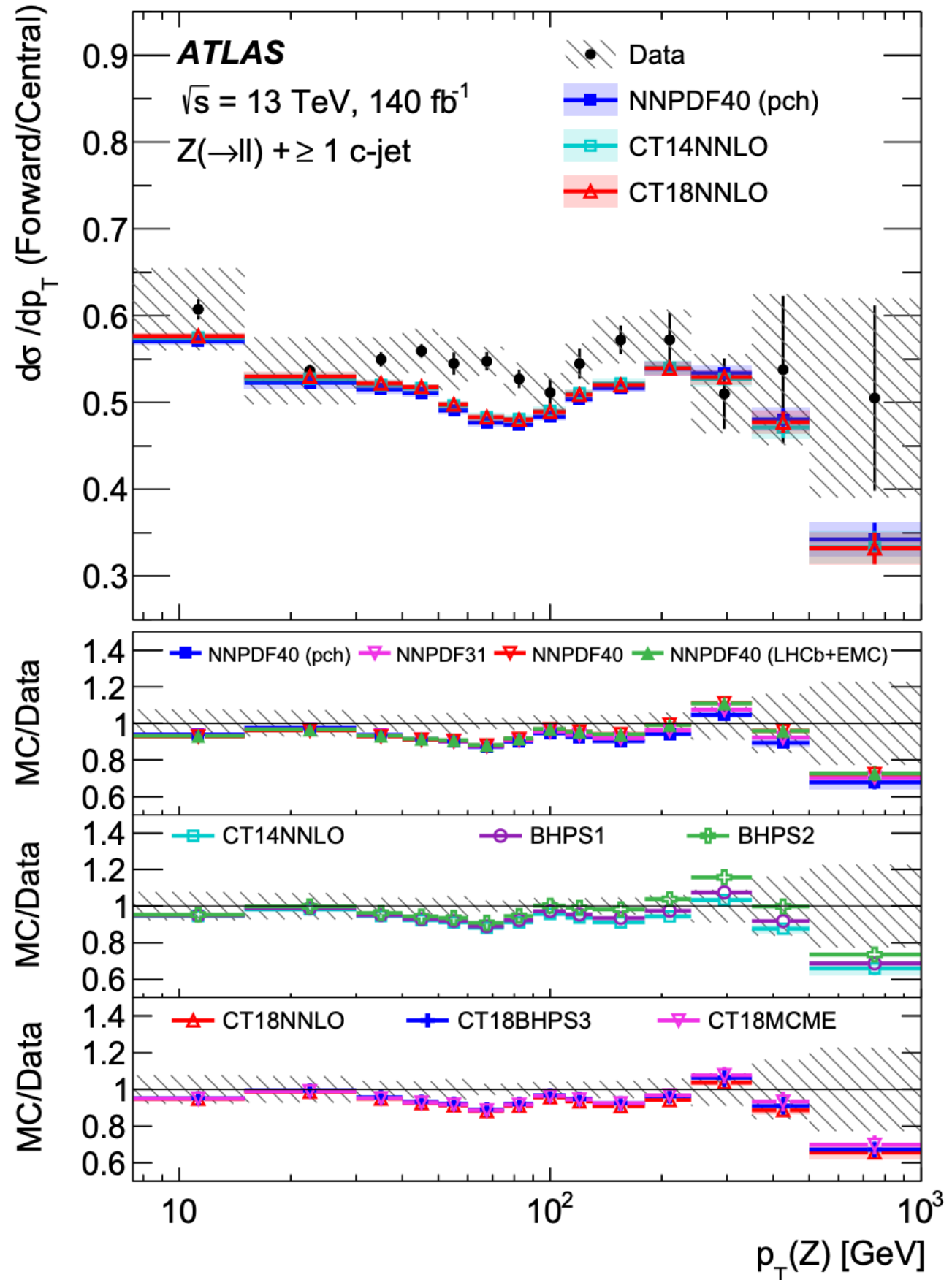


# Focus: charm intrinseco

- ★ Regioni Forward e Central definite da un taglio in  $\eta = 1.2$  a partire da uno studio di ripesamento degli eventi con PDF con differenti frazioni di IC
- ★ Il rapporto tra le due regioni permette la cancellazione di diversi errori sistematici

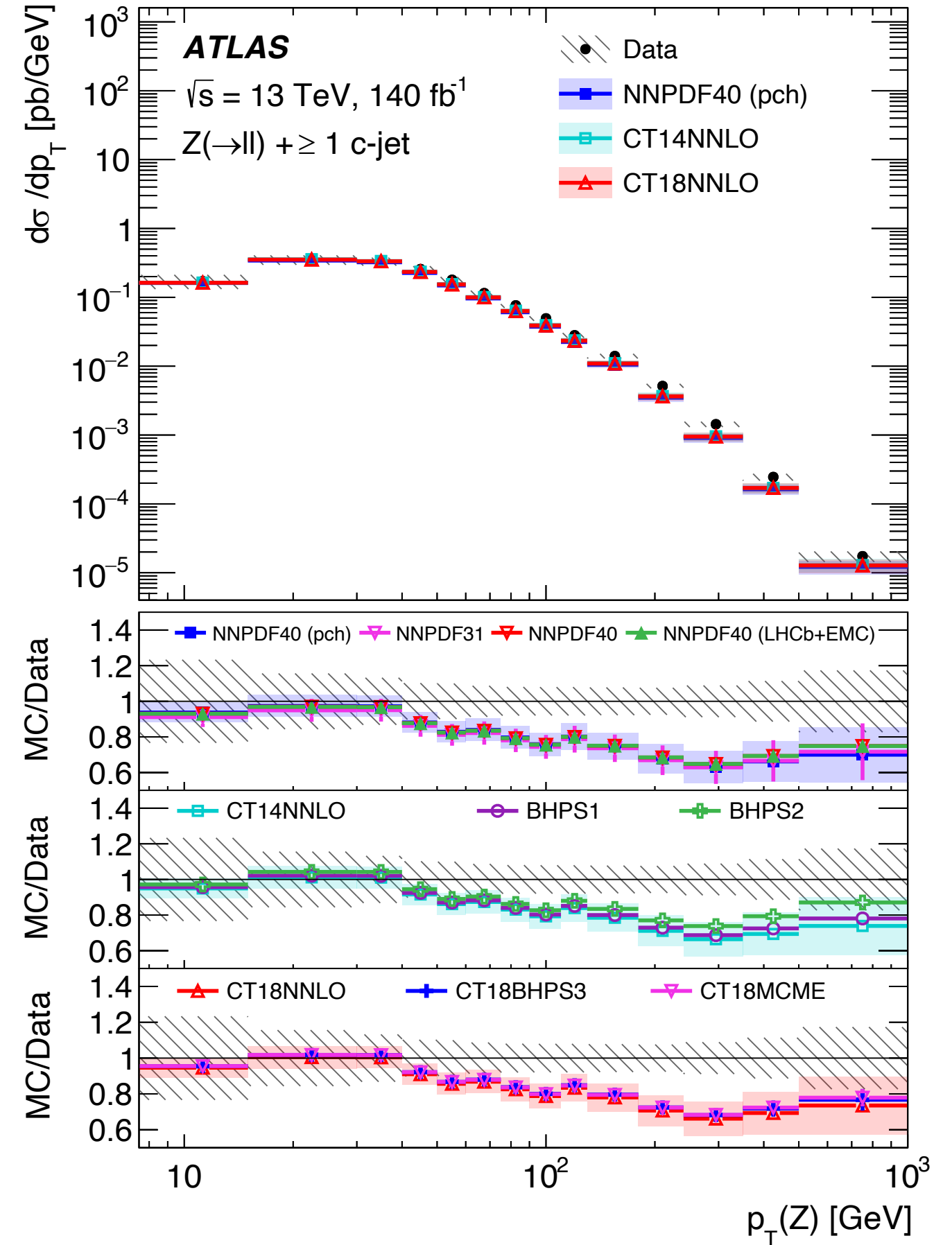






Riduzione e cancellazione di alcune incertezze grazie al rapporto forward/central

Lucrezia Boccardo





# Focus: charm intrinseco

OTTIMIZZAZIONE DEL TAGLIO IN  $\eta$  [2] → compromesso tra statistica e significanza

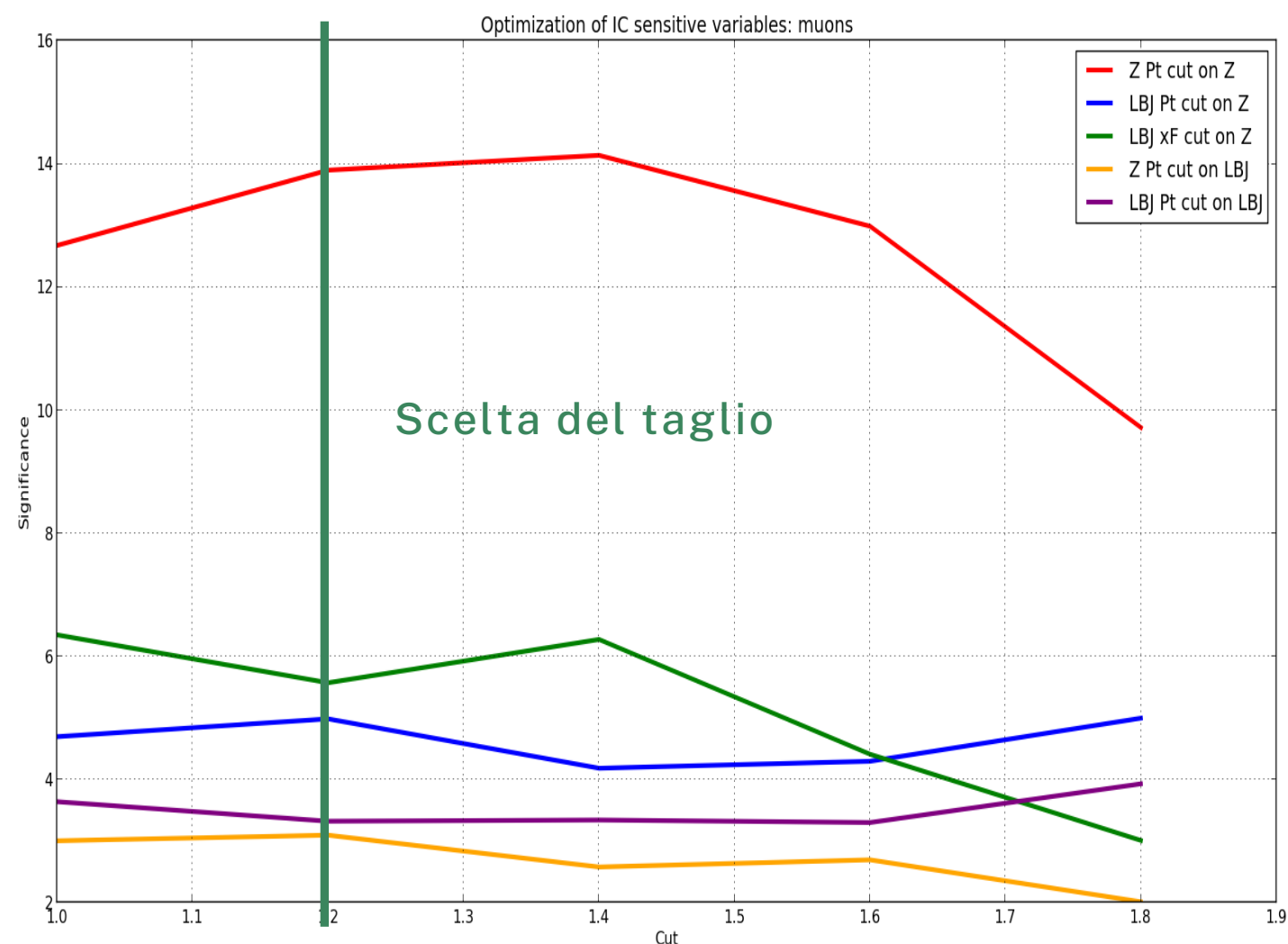
I. Utilizzo di predizioni generate da Madgraph FxFx NNLO con una PDF standard

II. Ripesamento con PDF contenenti diverse frazioni di IC

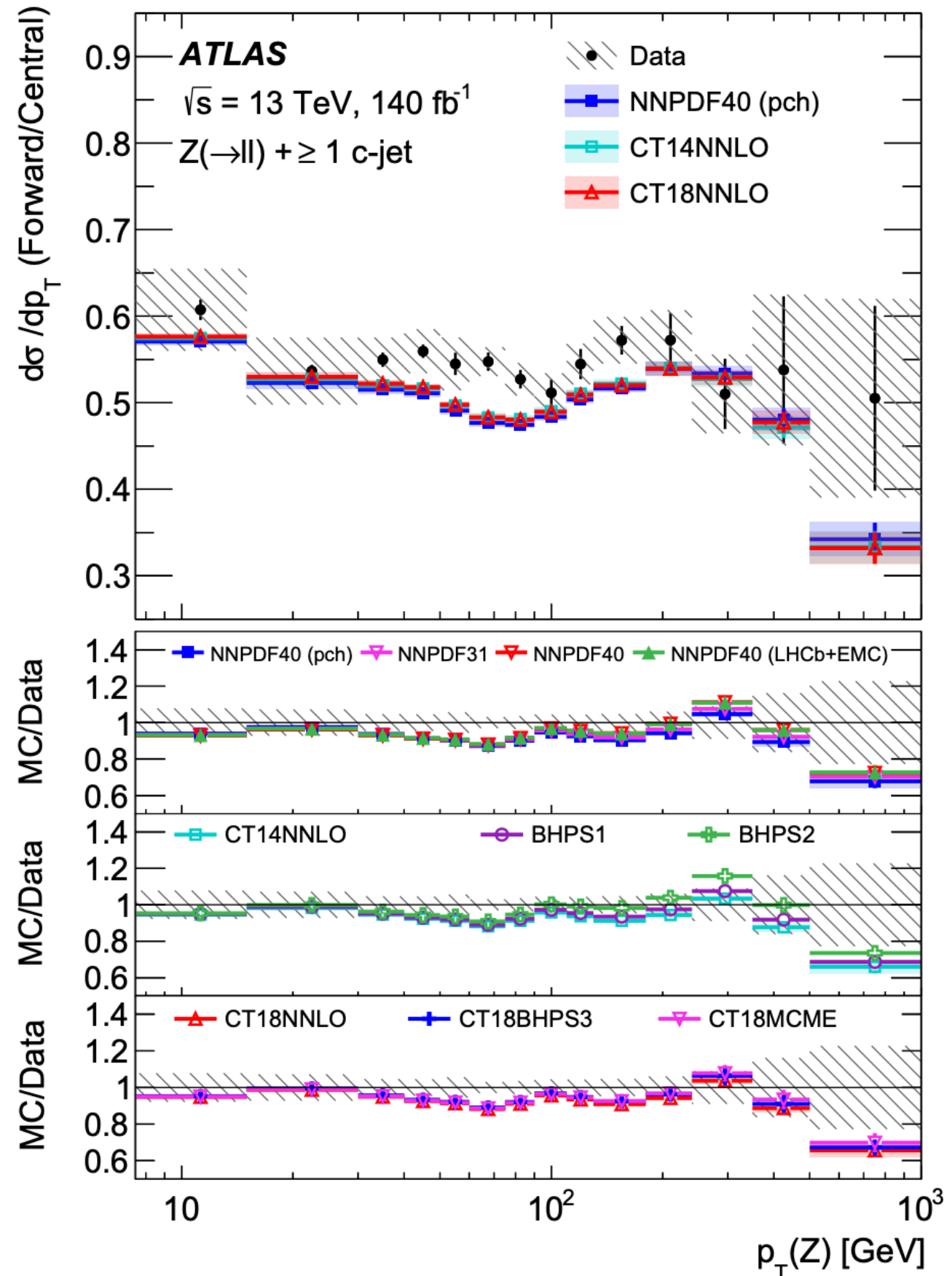
$$w(x_1, x_2, Q^2) = \frac{f_i^{new}(x_1, Q^2) f_j^{new}(x_2, Q^2)}{f_i^{old}(x_1, Q^2) f_j^{old}(x_2, Q^2)}$$

III. Calcolo della significanza per il rapporto forward/central

$$\sum_{i=1}^N \frac{(v_{no\ IC}^i - v_{IC}^i)^2}{\sigma_{no\ IC_i}^2}$$







# Focus: charm intrinseco

- ★ Quasi tutti i modelli di IC presentano un andamento simile rispetto ai dati, e non è riscontrabile una differenza apprezzabile con i modelli senza IC
- ★ Tuttavia, il modello meno realistico BHPS2 con  $\langle x_C \rangle \cong 2\%$  sembra migliorare la distribuzione dei dati



- ★ Misura della produzione del bosone Z in associazione a b- e c-jet con 140 fb<sup>-1</sup> di dati
- ★ Prima misura di Z+≥ 1 c-jet in ATLAS
- ★ Precisione aumenta di 1.5-2x rispetto alla pubblicazione precedente
- ★ Misure confrontata con molteplici predizioni teoriche:
  - ★ 5FS forniscono la migliore descrizione dei dati, ma nessun modello ha accuratezza sufficiente per Z+≥ 1 c-jet
  - ★ 4FS e 3FS sottostimano rispettivamente Z+≥ 1 b-jet e Z+≥ 1 c-jet
  - ★ Test di diverse PDF con contenuto di charm intrinseco, nessuna differenza apprezzabile in scenari realistici di contenuto di IC
  - ★ Predizioni NNLO ad ordine fissato performano meglio di NLO, ma non sull'intero spazio delle fasi → importanza di algoritmi IRC safe

I risultati appena esposti provengono dal paper della collaborazione ATLAS

<https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PAPERS/STDM-2018-43/> disponibile su [ArXiv](#)



# Grazie!





# Backup

6





# Definizione degli oggetti fisici e selezione degli eventi

## 2 REGIONI DI SEGNALE:

- ★ 1-TAG:  $Z \geq 1$  b-jet o  $Z \geq 1$  c-jet
- ★ 2-TAG:  $Z \geq 2$  b-jet

L'algoritmo di b-tagging DL1r identifica i jet di sapore pesante grazie a informazioni sulle tracce e sui vertici secondari.

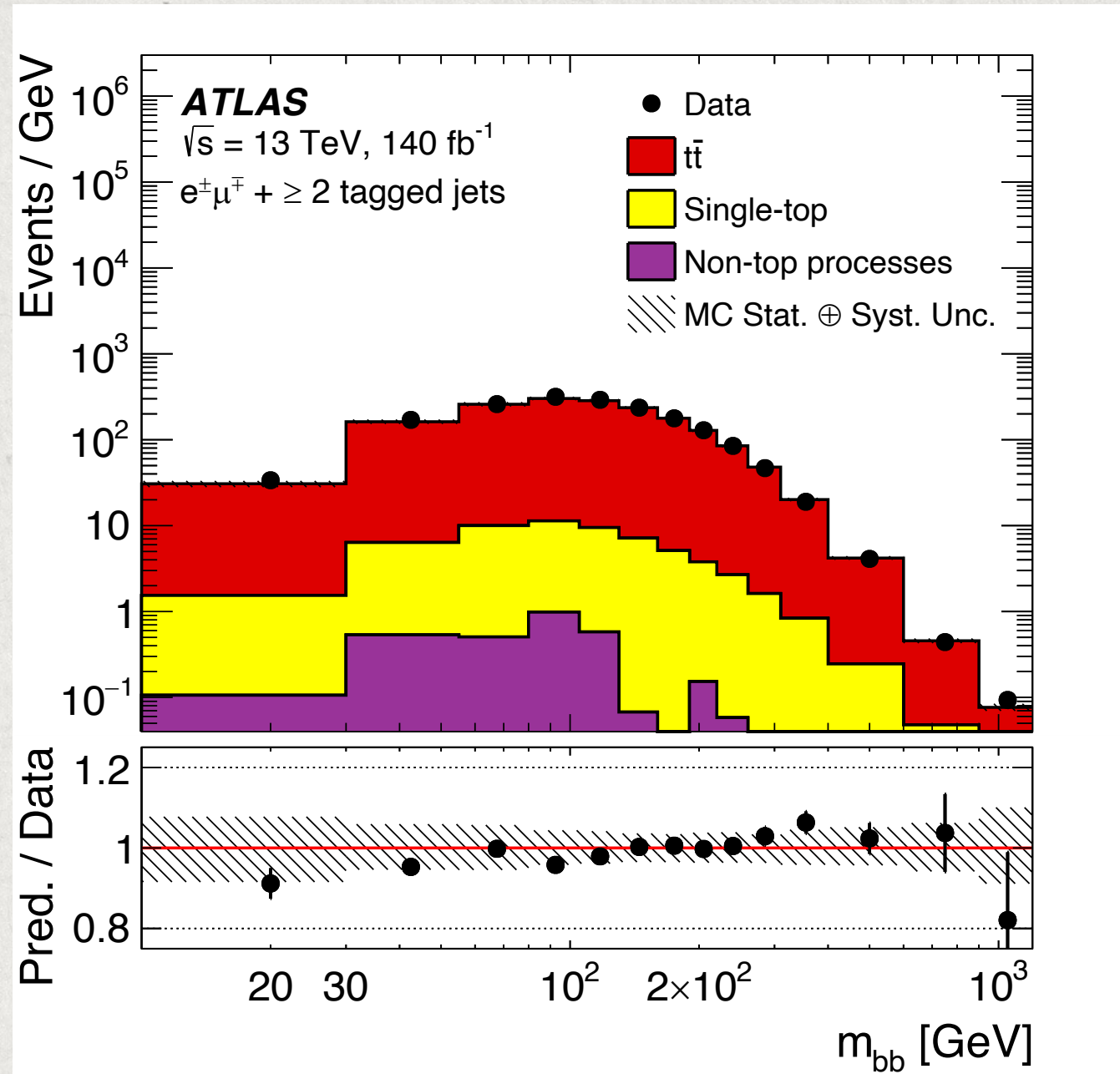
- ✓ 85% efficienza per jet contenenti adroni da b-quark;
- ✓ 30% efficienza per jet contenenti adroni da c-quark;
- ✓ 2.5% efficienza per jet contenenti solo adroni leggeri.



Object definition		
	Electron channel	Muon channel
Leptons	Single electron trigger Tight Isolated $d_0/\sigma_{d_0} < 5$ , $ z_0 \sin(\theta)  < 0.5$ mm $p_T > 27$ GeV $ \eta  < 1.37$ or $1.52 <  \eta  < 2.47$	Single muon trigger Medium Isolated $d_0/\sigma_{d_0} < 3$ , $ z_0 \sin(\theta)  < 0.5$ mm $p_T > 27$ GeV $ \eta  < 2.5$
Jets	$p_T > 20$ GeV and $ y  < 2.5$ $\Delta R(\text{jet}, \ell) > 0.4$	
Flavour-tagged jets	$p_T > 20$ GeV and $ y  < 2.5$ DL1r@85%	
Event selection		
Leptons	Exactly 2, same-flavour, opposite-charge	
$m_{\ell\ell}$	$76 \text{ GeV} < m_{\ell\ell} < 106 \text{ GeV}$	
$E_T^{\text{miss}}$	$E_T^{\text{miss}} < 60 \text{ GeV}$ if $p_T^{\ell\ell} < 150 \text{ GeV}$	
flavour-tagged jets	$\geq 1$ or $\geq 2$ jets, DL1r@85%	
Signal regions		
1-tag	$\geq 1$ flavour-tagged jets	
2-tag	$\geq 2$ flavour-tagged jets	
Rapidity regions		
Central rapidity	Z-boson rapidity $ Y(Z)  < 1.2$	
Forward rapidity	Z-boson rapidity $ Y(Z)  \geq 1.2$	



# Fondo $t\bar{t}$



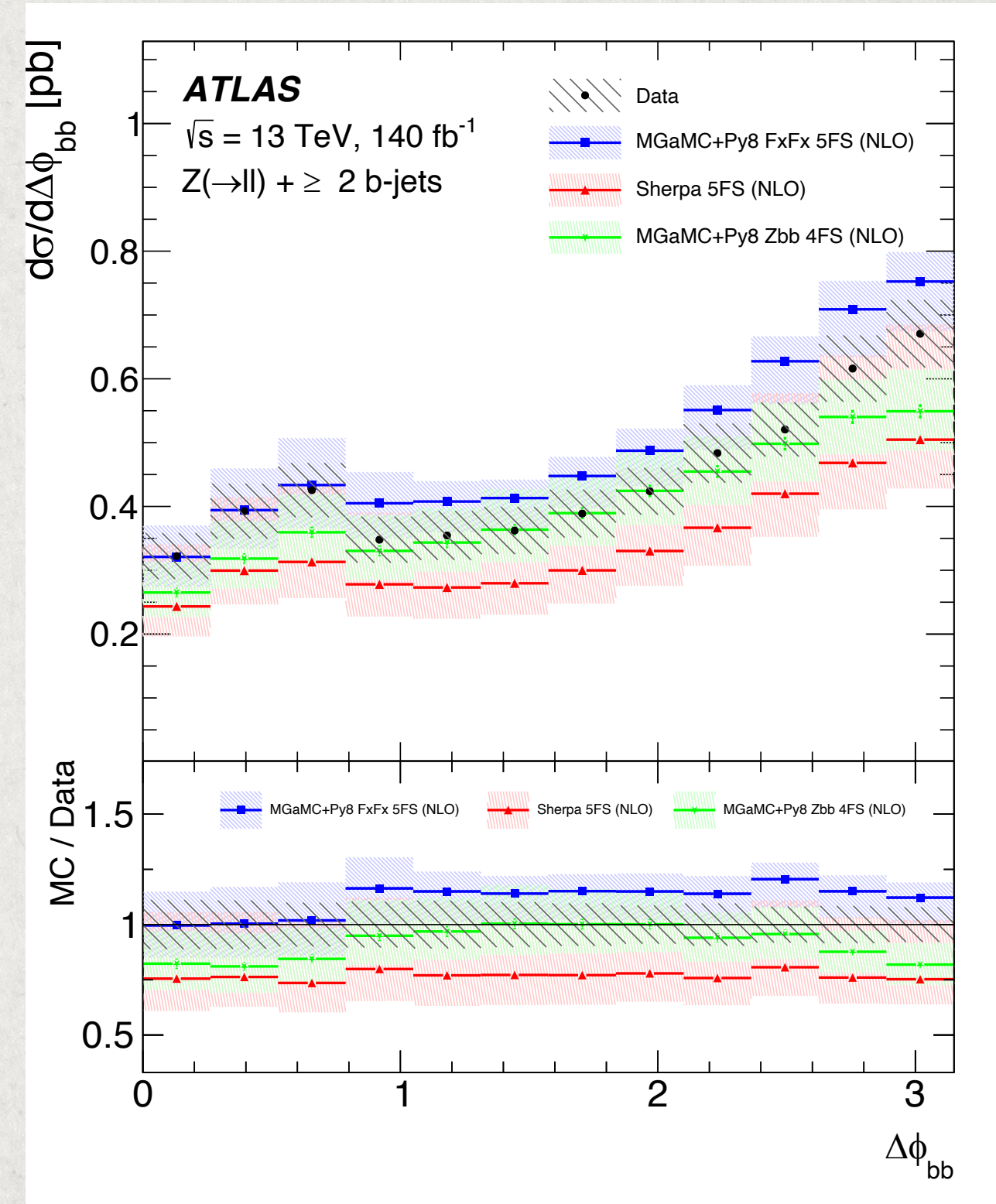
Definizione di una regione di controllo con la stessa selezione del segnale ma con coppie di leptoni di sapore opposto nello stato finale  $e^{\pm}\mu^{\mp}$  e con una massa invariante dei dileptoni maggiore.

$$t\bar{t}_{\text{Data}}^{SR} = t\bar{t}_{\text{Data}}^{CR} \cdot TF^{CR \rightarrow SR}$$

$$TF^{CR \rightarrow SR} = \frac{t\bar{t}_{MC}^{SR(ee,\mu\mu)}}{t\bar{t}_{MC}^{CR(ee,\mu\mu)}}$$



# Sezioni d'urto differenziali: 2 b-jet



- ★ 4FS sottostima  $\Delta\phi_{bb}$  per jet collineari e opposti
- ★ Nessuna predizione è in accordo con i dati per tutto lo spettro di  $m_{bb}$ , in particolare a masse maggiori di 80 GeV

