

ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ УГЛОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ В ПРОЦЕССАХ ЛЕПТОННОГО РАСПАДА W-БОЗОНА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ATLAS

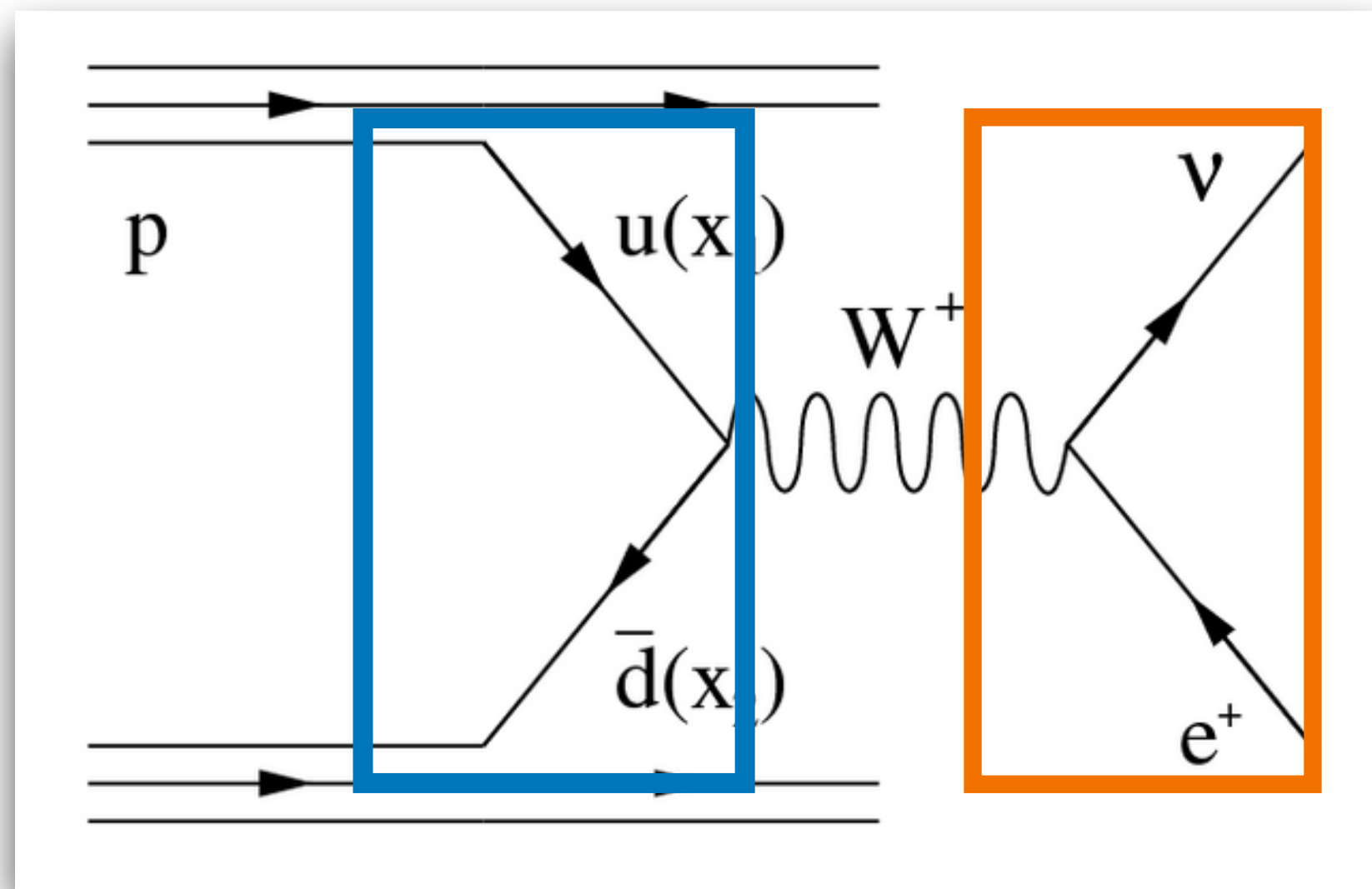
Научный руководитель: Солдатов Е. Ю.

Выполнил: Толкачев Г.А.

29.06.2023

Дифференциальное сечение распада W-бозона

Представление дифференциального сечения в виде разложения по гармоническим полиномам, умноженным на безразмерные угловые коэффициенты A_{0-7}



$$\frac{d\sigma}{dp_T dy d\Omega^*} = \frac{3}{16\pi} \frac{d\sigma^{U+L}}{dp_T dy} \left[(1 + \cos^2 \theta) + \sum_{i=0}^7 P_i(\cos\theta, \phi) A_i(p_T, y) \right]$$

$$P_0(\cos\theta, \phi) = 1 - 3 \cos^2(\theta)$$

$$P_1(\cos\theta, \phi) = 2 \sin^2(\theta) \cos(2\phi)$$

$$P_2(\cos\theta, \phi) = 2\sqrt{2} \sin^2(2\theta) \cos(\phi)$$

$$P_3(\cos\theta, \phi) = 2 \cos(\theta)$$

$$P_4(\cos\theta, \phi) = 4\sqrt{2} \sin(\theta) \cos(\phi)$$

$$P_5(\cos\theta, \phi) = 2 \sin^2(\theta) \cos(2\phi)$$

$$P_6(\cos\theta, \phi) = 2\sqrt{2} \sin^2(2\theta) \cos(\phi)$$

$$P_7(\cos\theta, \phi) = 4\sqrt{2} \sin(\theta) \cos(\phi)$$

A_{0-7} представляют отношение дифференциальных сечений с заданной поляризацией к неполяризованному сечению.

$$A_0 = \frac{2d\sigma^L}{d\sigma^{U+L}} \quad A_1 = \frac{2\sqrt{2}d\sigma^I}{d\sigma^{U+L}} \quad A_2 = \frac{4d\sigma^T}{d\sigma^{U+L}} \quad A_3 = \frac{4\sqrt{2}d\sigma^A}{d\sigma^{U+L}} \quad A_4 = \frac{2d\sigma^P}{d\sigma^{U+L}} \quad A_5 = \frac{2d\sigma^7}{d\sigma^{U+L}} \quad A_6 = \frac{2\sqrt{2}d\sigma^8}{d\sigma^{U+L}} \quad A_7 = \frac{4\sqrt{2}d\sigma^9}{d\sigma^{U+L}}$$

Мотивация и цель работы

Мотивация:

- Полный набор поляризационных угловых коэффициентов A_i для распадов W бозона не измерен
 - Проблемы с полной реконструкцией W бозона из-за нейтрино в конечном состоянии, который не регистрируется напрямую детектором ATLAS
 - В недавних исследованиях [1] предложен способ обойти это ограничение
- Угловые коэффициенты A_4 и A_9 имеют прямое ограничение партонных функций распределения (ПФР)
 - Погрешность от набора ПФР вносит доминирующий вклад в полную погрешность для многих измерений
 - Новые наборы ПФР можно использовать для снижения погрешности ПФР в различных анализах
 - Например: $m_W(\text{ATLAS @ 7 TeV}) = 80370 \pm 7 (\text{stat}) \pm 11 (\text{exp. sys}) \pm 14 (\text{mod. sys}) \text{ МэВ}$

Цель:

- Измерение коэффициентов A_i в процессах с лептонным распадом W -бозона в псевдоданных.
 - Интерпретация измерений углового коэффициента A_4 и сечения A_9 с помощью метода профайлинга
 - Оценка уменьшения ПФР погрешности для кинематических переменных, используемых в независимом анализе по измерению массы W -бозона

В работе использовались данные с низким средним числом взаимодействий при столкновении, набранные на детекторе ATLAS в 2017 и 2018 с интегральной светимостью 335 пб^{-1}

[1] <https://arxiv.org/abs/1609.02536>

Глобальный анализ КХД

Параметризация ПФР: $xf(x, Q_0^2) = A_f x^{a_f} (1-x)^{b_f} I_f(x)$

Экспериментальные данные

Теоретические предсказания

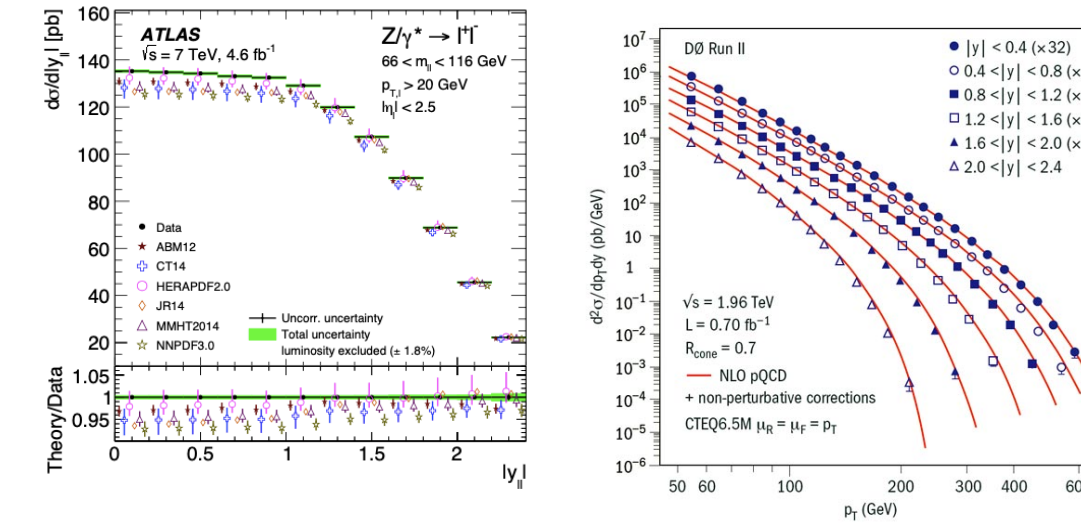
Параметризация ПФР с начальным значением Q_0^2 и набором параметров $a = \{a_1, \dots, a_n\}$

$$\chi^2(a) = \sum \frac{1}{\sigma_k^2} (D_k - T_k(a))^2$$

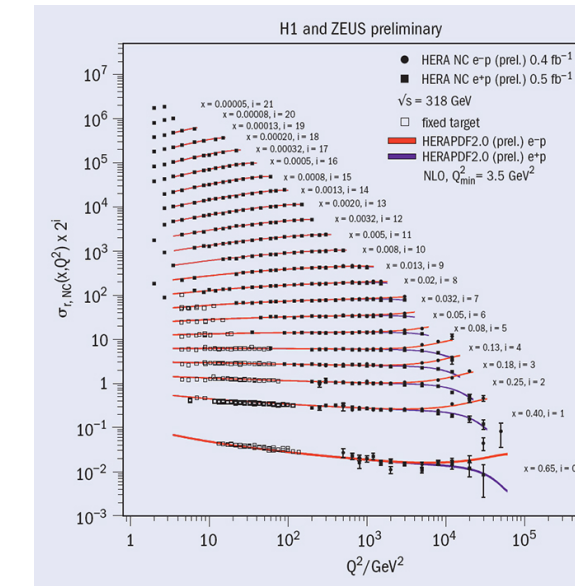
Получение набора параметров $a^0 = \{a_1^0, \dots, a_n^0\}$, которые минимизируют функцию χ^2

Результат: $f(x, Q^2)$

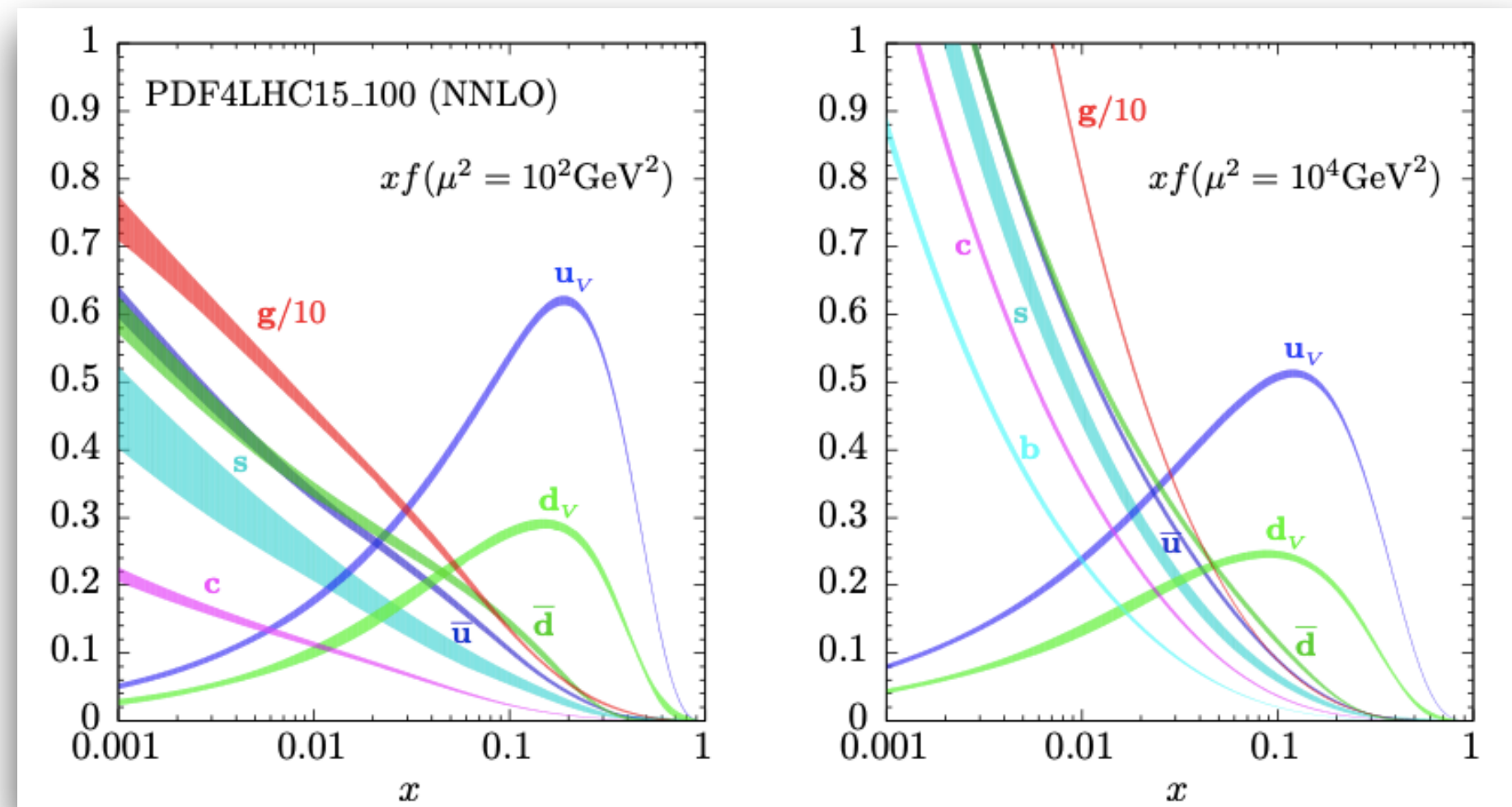
Экспериментальные измерения



Эксперименты:
HERA, Tevatron,
LHC, fixed target



Процессы:
NC, CC DIS, jet,
heavy quarks (c, b, t)
Drell-Yan, W production



Метод Гессе

$$\chi^2(\alpha) \approx \chi^2(a^0) + \sum_{ij} H_{ij} (a_i - a_i^0)(a_j - a_j^0) \quad H_{ij} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \chi^2}{\partial a_i \partial a_j}$$

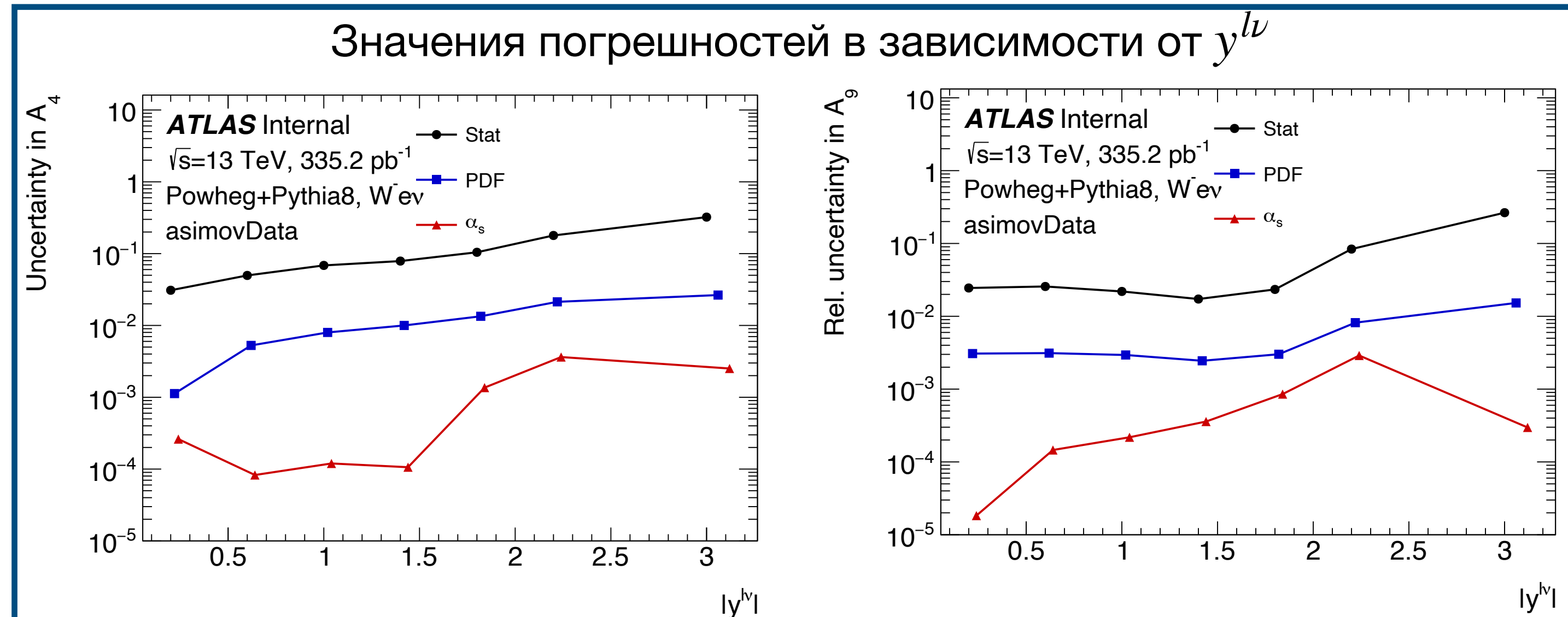
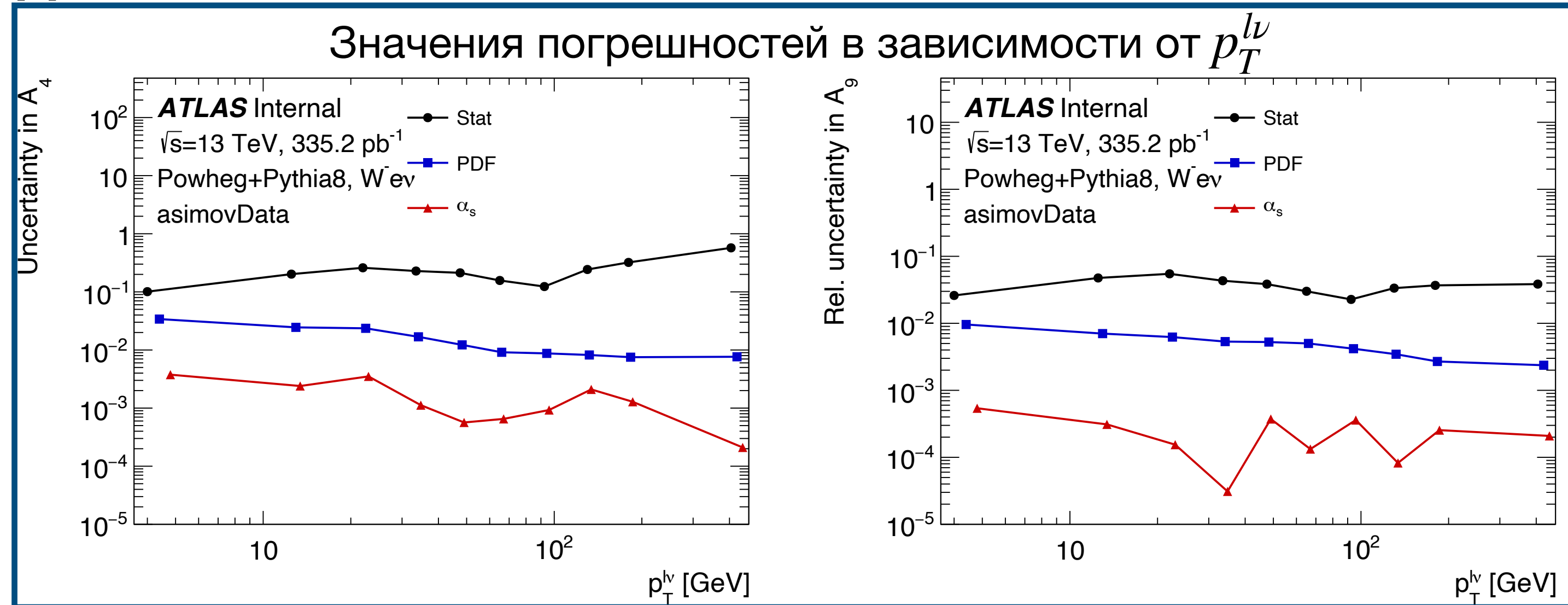
Перевзвешивание набора ПФР

$$W = \frac{x_1 g_i / B_1(x_1; Q^2)}{x_1 f_i / B_1(x_1; Q^2)} \cdot \frac{x_2 g_i / B_2(x_2; Q^2)}{x_2 f_i / B_2(x_2; Q^2)}$$

Коэффициент перевзвешивания из старого ПФР $xf(x, Q^2)$ в новый ПФР $xg(x, Q^2)$.

Оценка погрешности от набора ПФР СТ10

Для канала $W^- \rightarrow e^- \nu$ с использованием псевдоданных

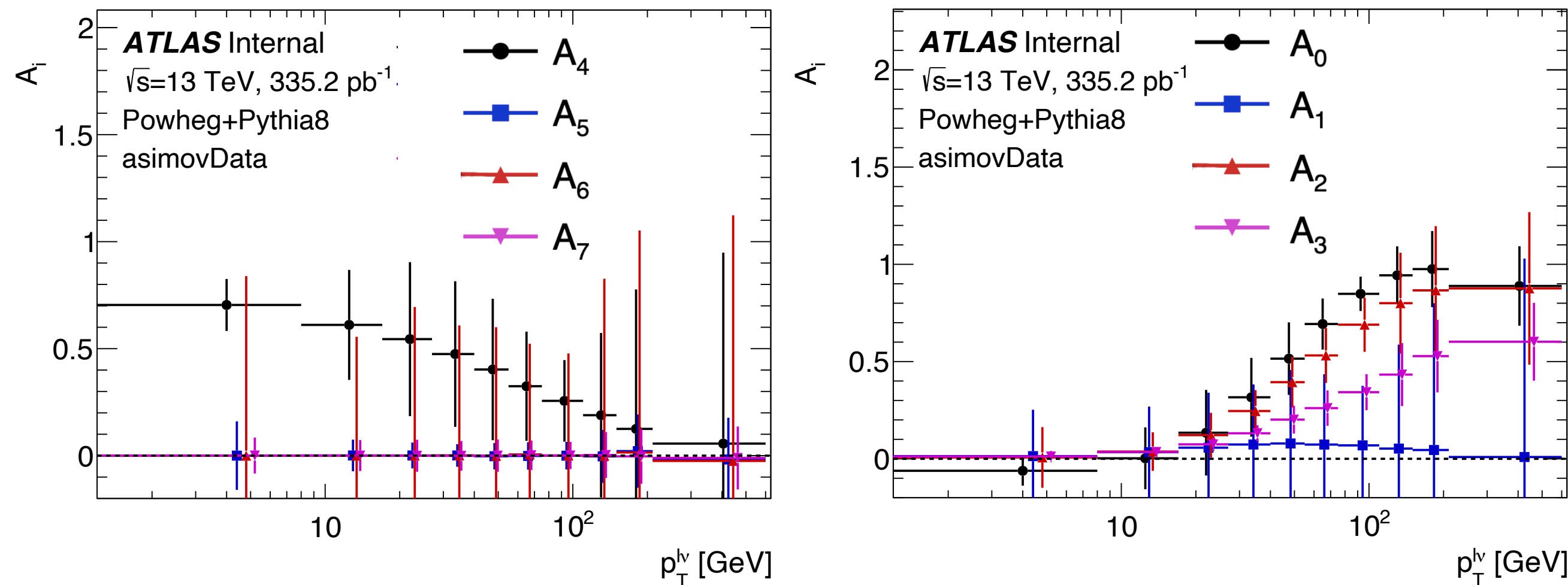


- Для всех коэффициентов A_i погрешность ПФР на порядок ниже статистической погрешности измерения
 - Погрешность от собственных векторов меньше на 1–2 порядка
 - Погрешность от α_s меньше на 2–3 порядка
- Результат напрямую связан с методикой измерения поляризационных угловых коэффициентов A_i и является ожидаемым

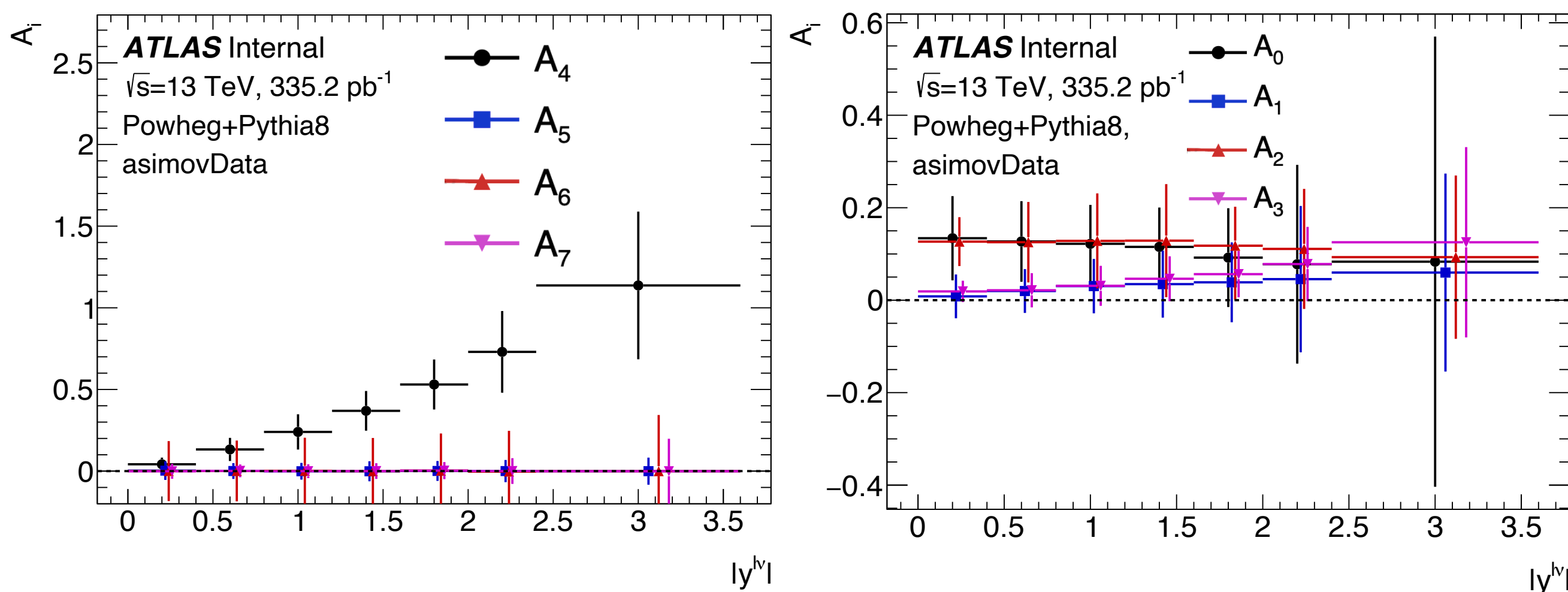
Результат измерения угловых коэффициентов

Для канала $W^- \rightarrow e^- \nu$ с использованием псевдоданных

Значения погрешностей в зависимости от $p_T^{l\nu}$



Значения погрешностей в зависимости от $y^{l\nu}$



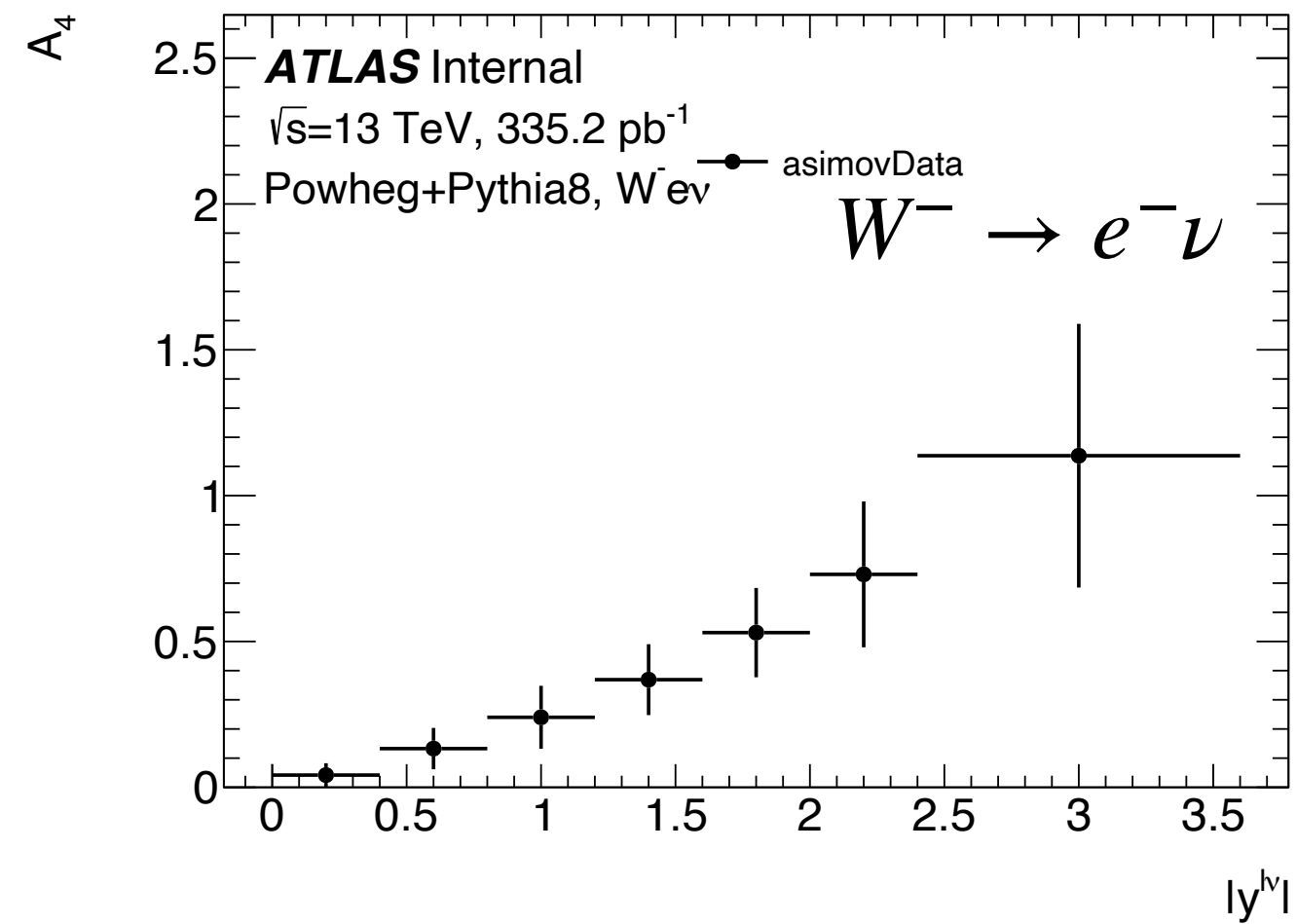
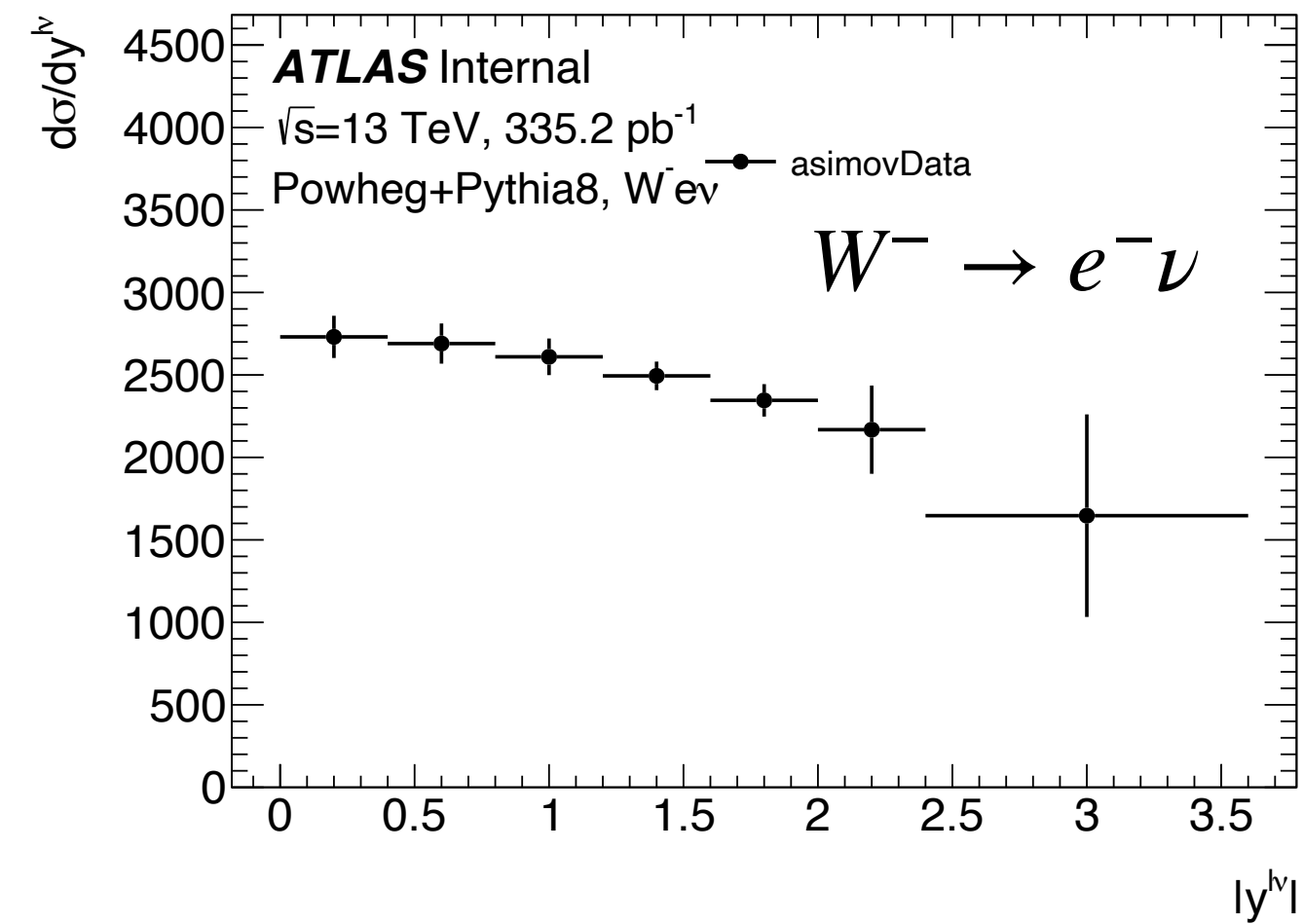
- Результат получен с учетом всех систематических погрешностей, в т.ч. погрешностей на энергию отдачи адрона и погрешности на оценку КХД фона (предоставленных командой)
- Поведение A_i в сравнении с аналогичными измерениями A_i в распада Z^0 бозона выглядит схожим образом
- A_0, A_1, A_2 чувствительны к поляризации W -бозона
- $A_0 - A_2 = 0$ сохраняется в LO, но нарушается в более высоких порядках
 - Одно из объяснений — существование скалярных глюонов
- A_1 и A_4 чувствительны к значениям векторных и аксиально-векторных констант связи
 - A_4 отвечает за асимметрию вылета вперед-назад $A_{FB} = 3/8 A_4$
- $A_5 - A_7$ и A_1 должны иметь центральные значения отличные от нуля в NNLO
 - Недостаточная статистическая сила анализа

Интерпретация измерений угловых коэффициентов

Профайлинг набора ПФР

Метод профайлинга используется для оценки влияния новых экспериментальных измерений на набор ПФР

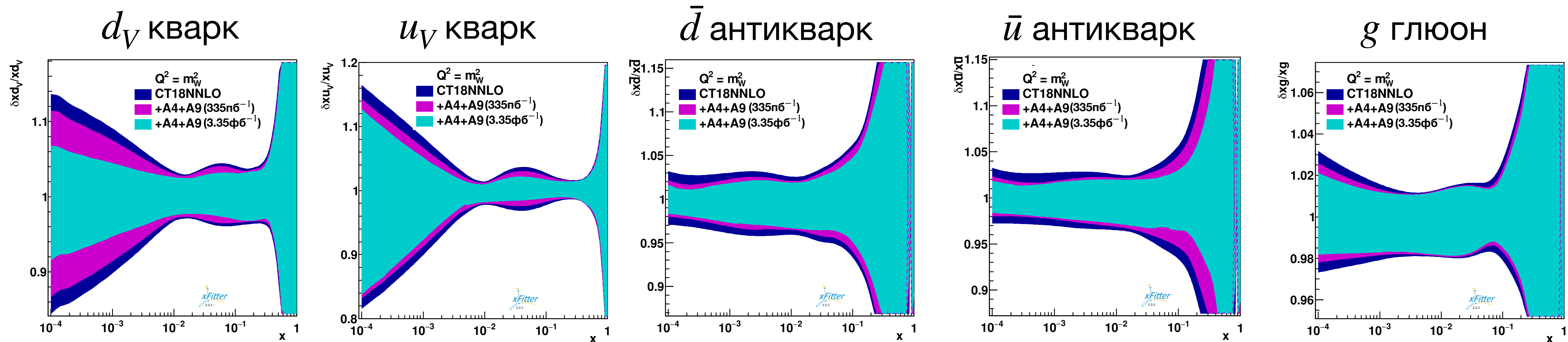
$$\chi^2(\beta_{exp}, \beta_{th}) = \sum_{i=1}^{N_{data}} \frac{(\sigma_i^{exp} + \sum_j \Gamma_{ij}^{exp} \beta_{j,exp} - \sigma_i^{th} - \sum_k \Gamma_{ik}^{th} \beta_{k,th})^2}{\Delta_i^2} \quad (1)$$



- Выполнен профайлинг с угловым коэффициентом A_4 и сечением A_9 ,
 - Коэффициенты получены на псевдоданных с $\mathcal{L} = 335 \text{ pb}^{-1}$
 - A_4 и A_9 измерены отдельно в каналах $W^+ \rightarrow e^+ \nu$ и $W^- \rightarrow e^- \nu$
 - Для оценки возможного вклада в статистическую погрешность от мюонных каналов был применен масштабный коэффициент
 - В профайлинге были использованы наборы ПФР CT18, HERAPDF2.0, MSHT20 и NNPDF4.0
 - По аналогии выполнен профайлинг с A_4 и A_9 полученным с погрешностью соответствующей $\mathcal{L} = 3.35 \text{ fb}^{-1}$
- Для профайлинга использовалось программное обеспечение xFitter. Для него подготовлены входные данные:
 - Набор центральных значений и их полной погрешности
 - Матрицы корреляции между систематическими погрешностями для A_4 и сечения A_9 , используемые в Уравнении №1

Профайлинг с A_4 и A_9 для набора ПФР СТ18

Относительная погрешность ПФР:



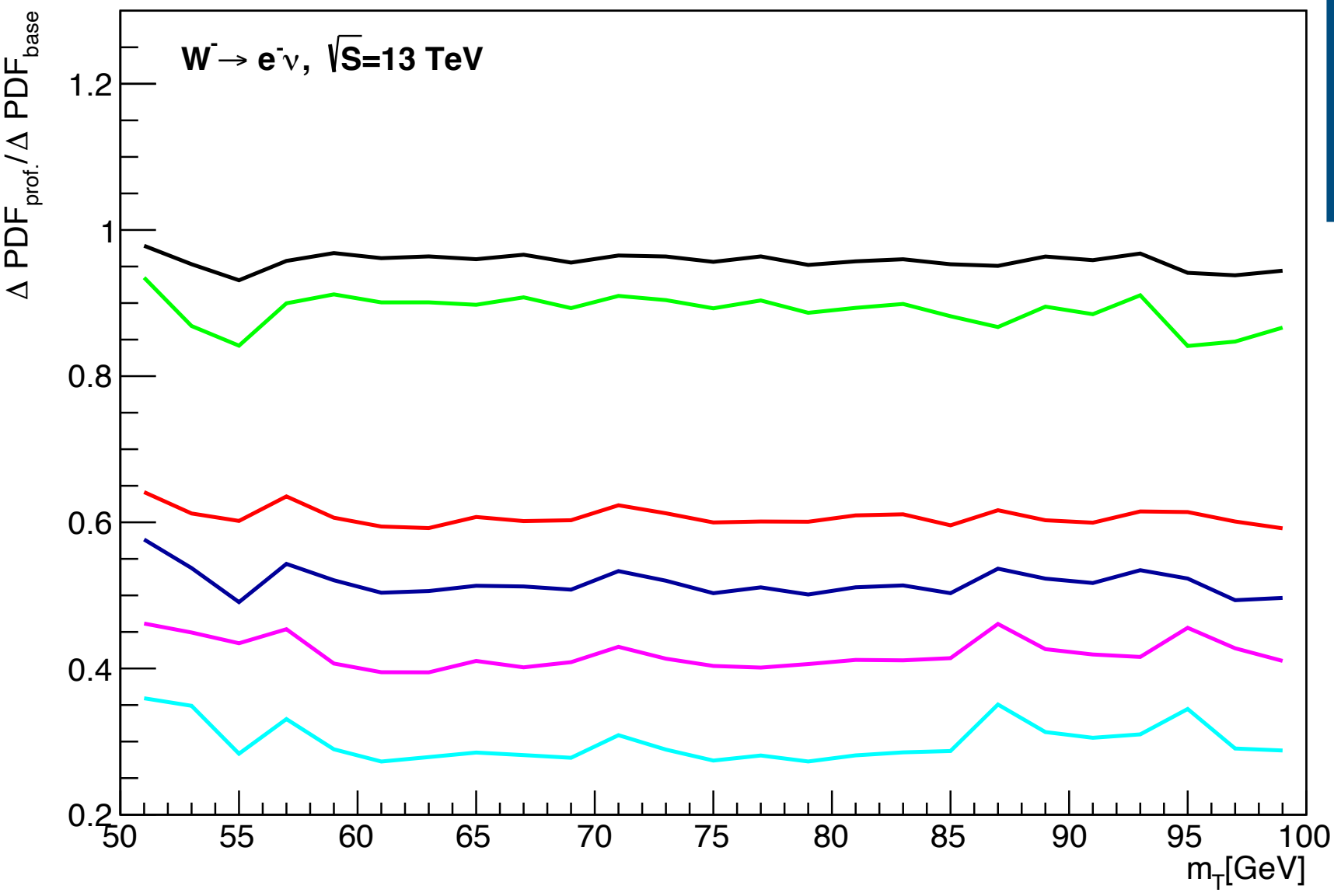
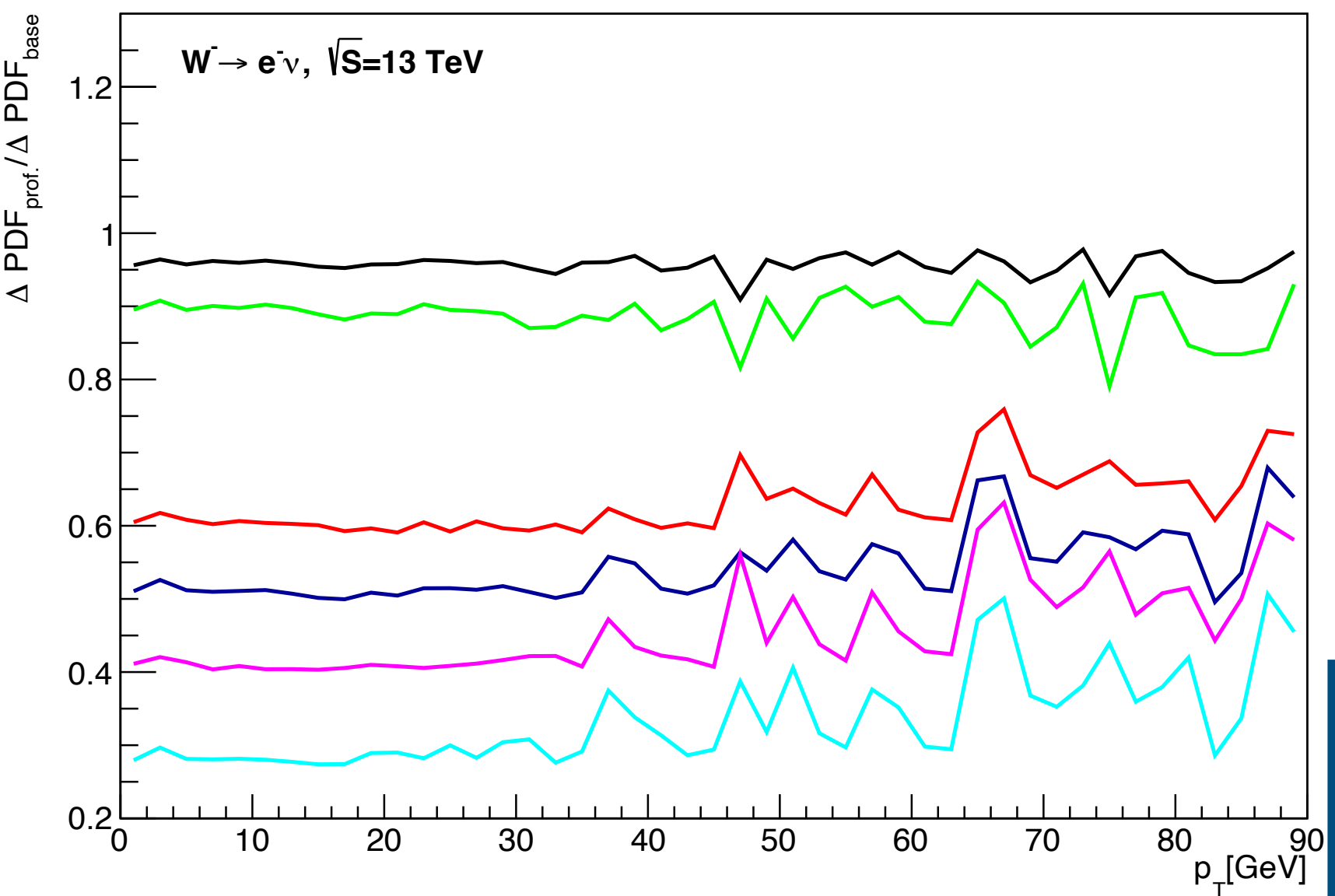
- Измерение коэффициентов A_i позволяет уточнять партонные функции при значениях доли импульса $x \approx 10^{-4} - 10^{-1}$
- Уменьшение погрешности при использовании обоих A_4 и A_9 коэффициентов при $\mathcal{L} = 335 \text{ pb}^{-1}$ составляет
 - для u_V и d_V до 2%, для \bar{u} и \bar{d} до 1%, для g до 0.5% в интервале $[10^{-4}, 10^{-1}]$
- Комбинирование A_4 и A_9 при 3.35 fb^{-1} показывает улучшения относительной погрешности:
 - для d_V до 7%, для u_V до 4%, для \bar{d} и \bar{u} до 1.5%, для g до 1% в интервале $[10^{-4}, 10^{-1}]$
- По аналогии проводился профайлинг отдельно с A_4 и A_9
 - результат уступает полученному при комбинировании A_4 и A_9
- Также, аналогичные исследования проведены для наборов ПФР:
 - MSHT20, HERAPDF2.0, NNPDF4.0

Оценка уменьшения погрешности ПФР для распределений

- Процесс измерения m_W является отдельной задачей
 - новые ПФР наборы предоставлены коллегам по коллаборации
- Для предварительной оценки использовался сигнальный регион аналогичный используемому в анализе по измерению массы W-бозона в данных $\mathcal{L} = 335\text{пб}^{-1}$
- В анализе измерения массы W-бозона используются переменные p_T и m_T
 - предварительная оценка вклада погрешности ПФР не учитывает корреляции

— CT18 $A_4(335\text{пб}^{-1})$
 — CT18 $A_4(3.35\text{фб}^{-1})$
 — CT18 $A_9(335\text{пб}^{-1})$
 — CT18 $A_9(3.35\text{фб}^{-1})$
 — CT18 $A_4 + A_9(335\text{пб}^{-1})$
 — CT18 $A_4 + A_9(3.35\text{фб}^{-1})$

	CT18 (2019)	HERAPDF2.0 (2015)	MSHT20 (2020)	NNPDF4.0 (2022)
$A_4(335\text{пб}^{-1})$	4 %	1.6 %	1 %	0.1%
$A_9(335\text{пб}^{-1})$	39 %	18 %	16 %	3 %
$A_4 + A_9(335\text{пб}^{-1})$	48 %	28 %	23 %	5 %
$A_4(3.35\text{фб}^{-1})$	11 %	8 %	3%	1 %
$A_9(3.35\text{фб}^{-1})$	58 %	54 %	48 %	19 %
$A_4 + A_9(3.35\text{фб}^{-1})$	70 %	65 %	56 %	27 %



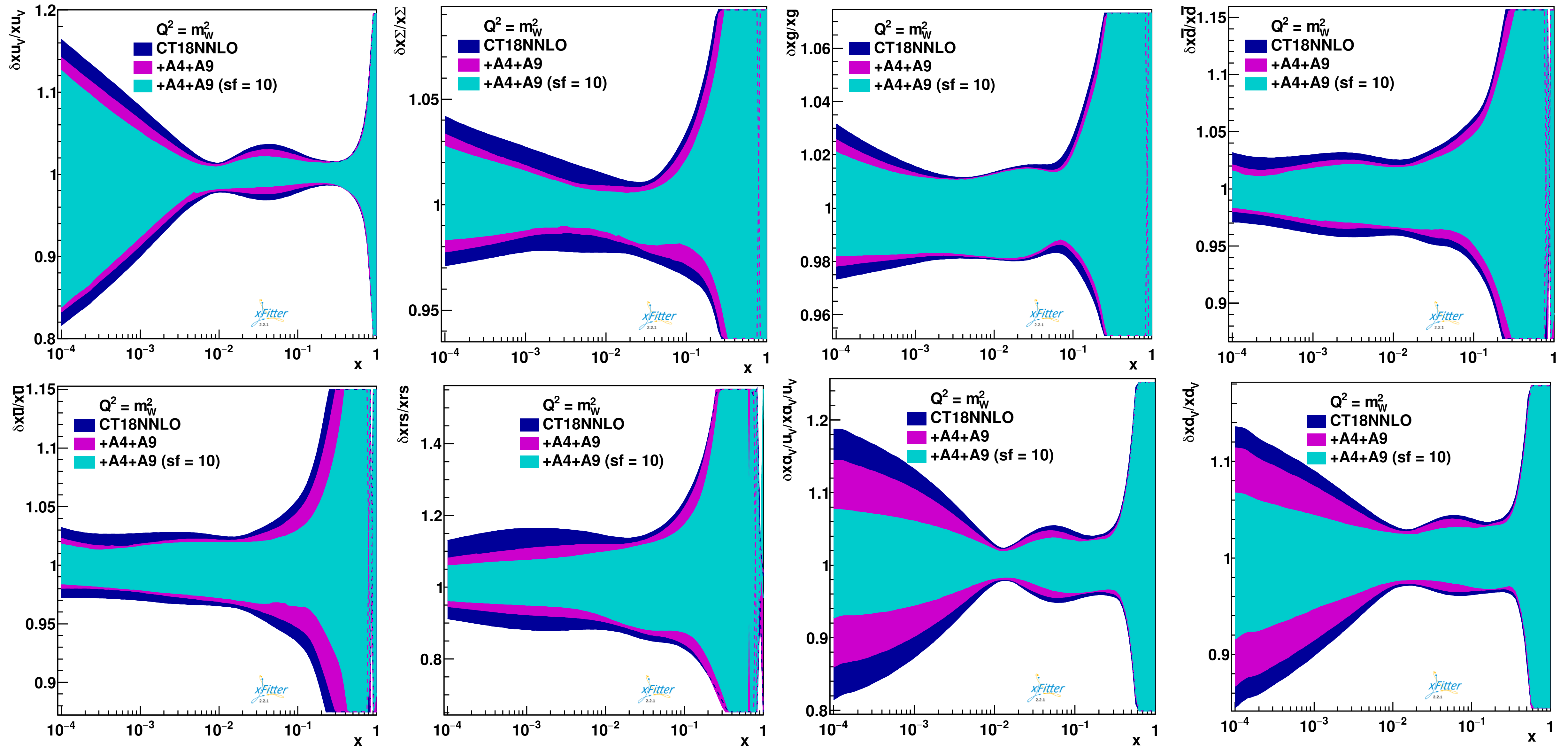
Заключение

- Проведено измерение поляризационных угловых коэффициентов A_i W -бозона с использованием псевдоданных в электронном канале распада
 - Проанализирован вклад погрешности от набора ПФР СТ10 в измерение коэффициентов A_i
 - Выполнена оценка вклада систематических погрешностей в контрольные распределения, связанных с эффективностью триггера, идентификацией, реконструкцией и изоляцией в эксперименте ATLAS
- Проведена интерпретация измерений углового коэффициента A_4 и сечения A_9 с помощью метода профайлинга
 - Для профайлинга были подготовлены входные файлы для программы xFitter
 - Выполнен профайлинг с коэффициентом A_4 и сечением A_9 для наборов ПФР СТ18, MSHT20, HERAPDF2.0, NNPDF4.0
- Полученные новые наборы ПФР использованы для оценки уменьшения погрешности ПФР в независимом анализе измерения массы W -бозона
- В ходе работы были получены сведения о глобальном анализе КХД и методике профайлинга

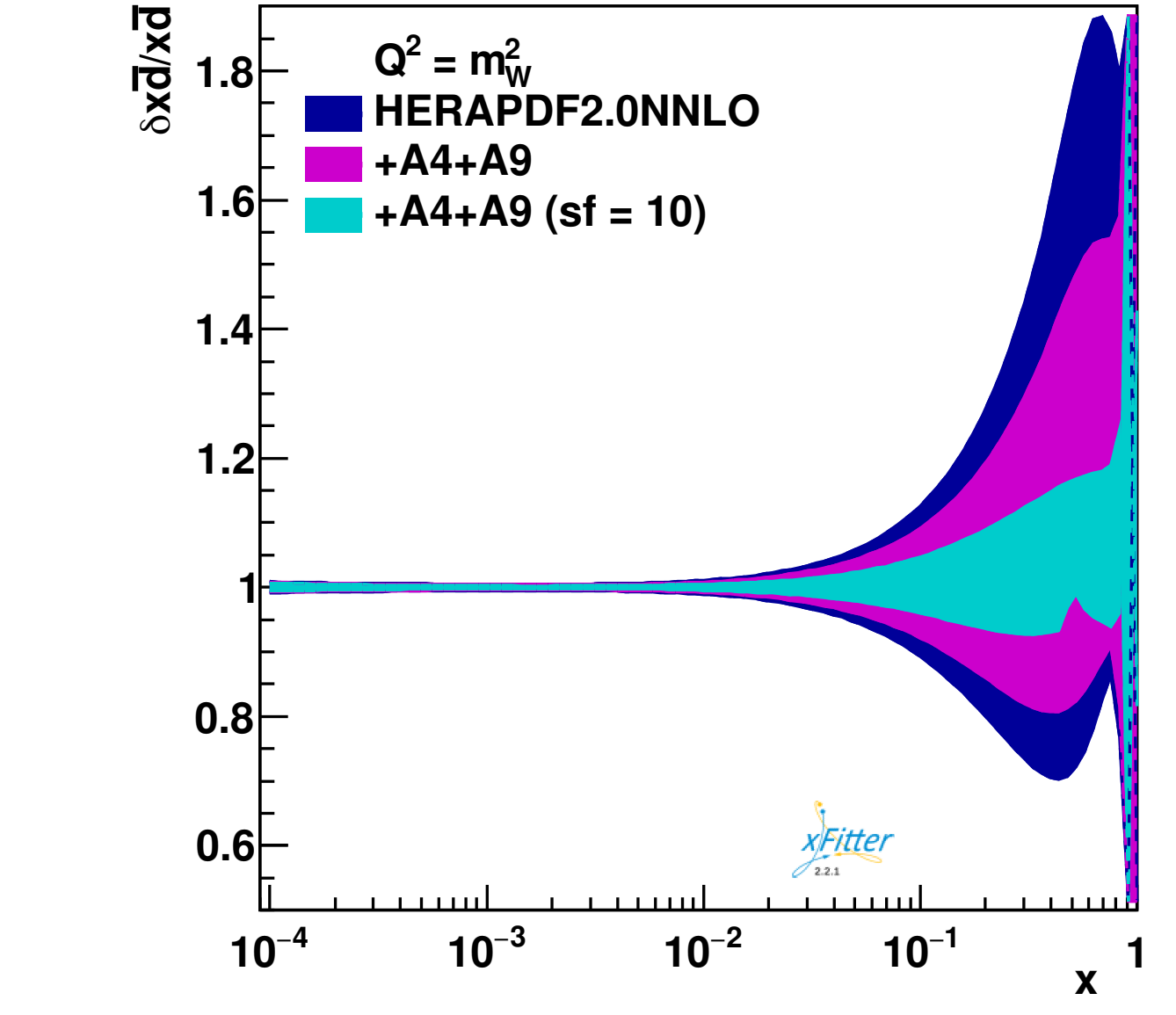
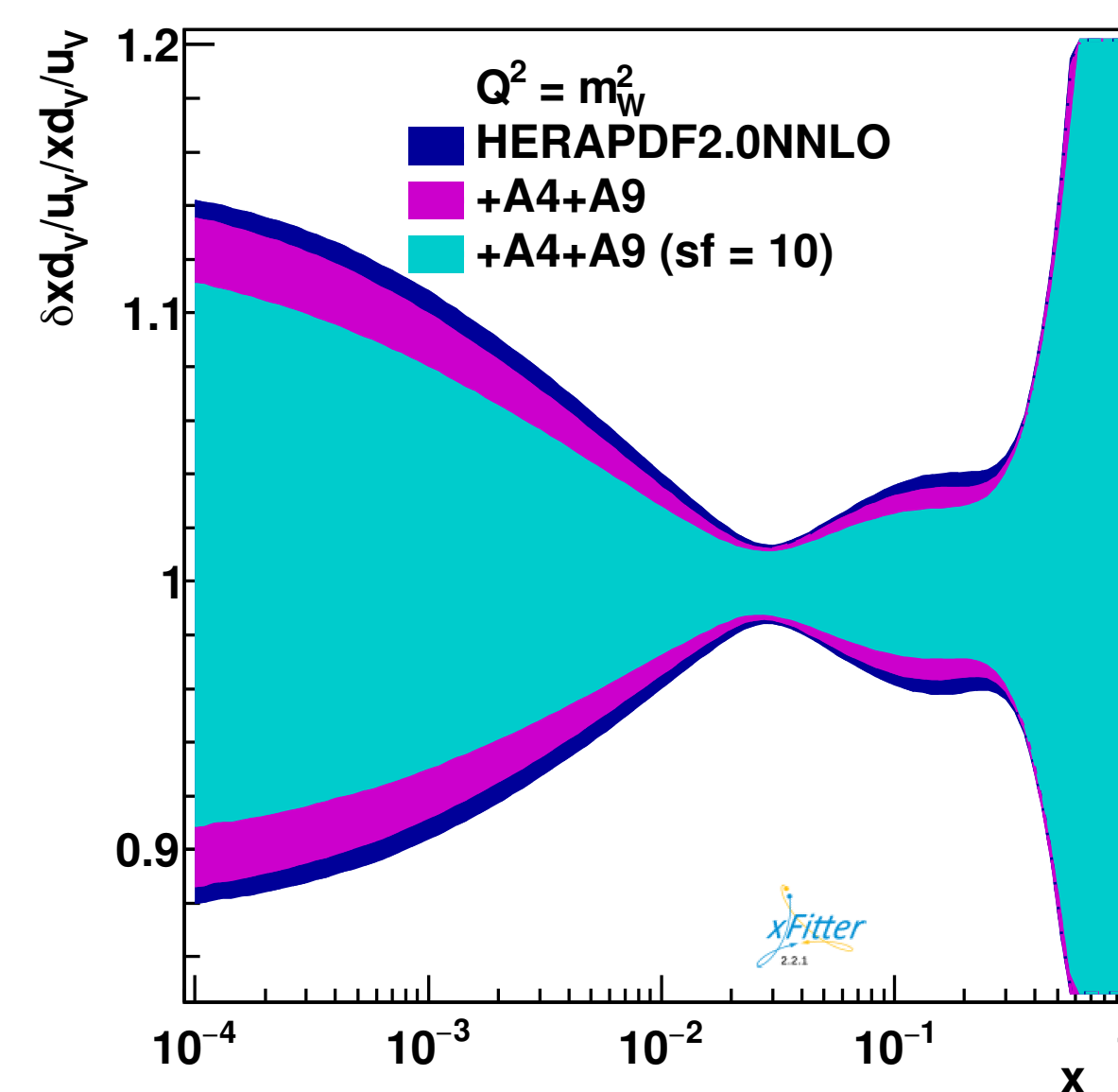
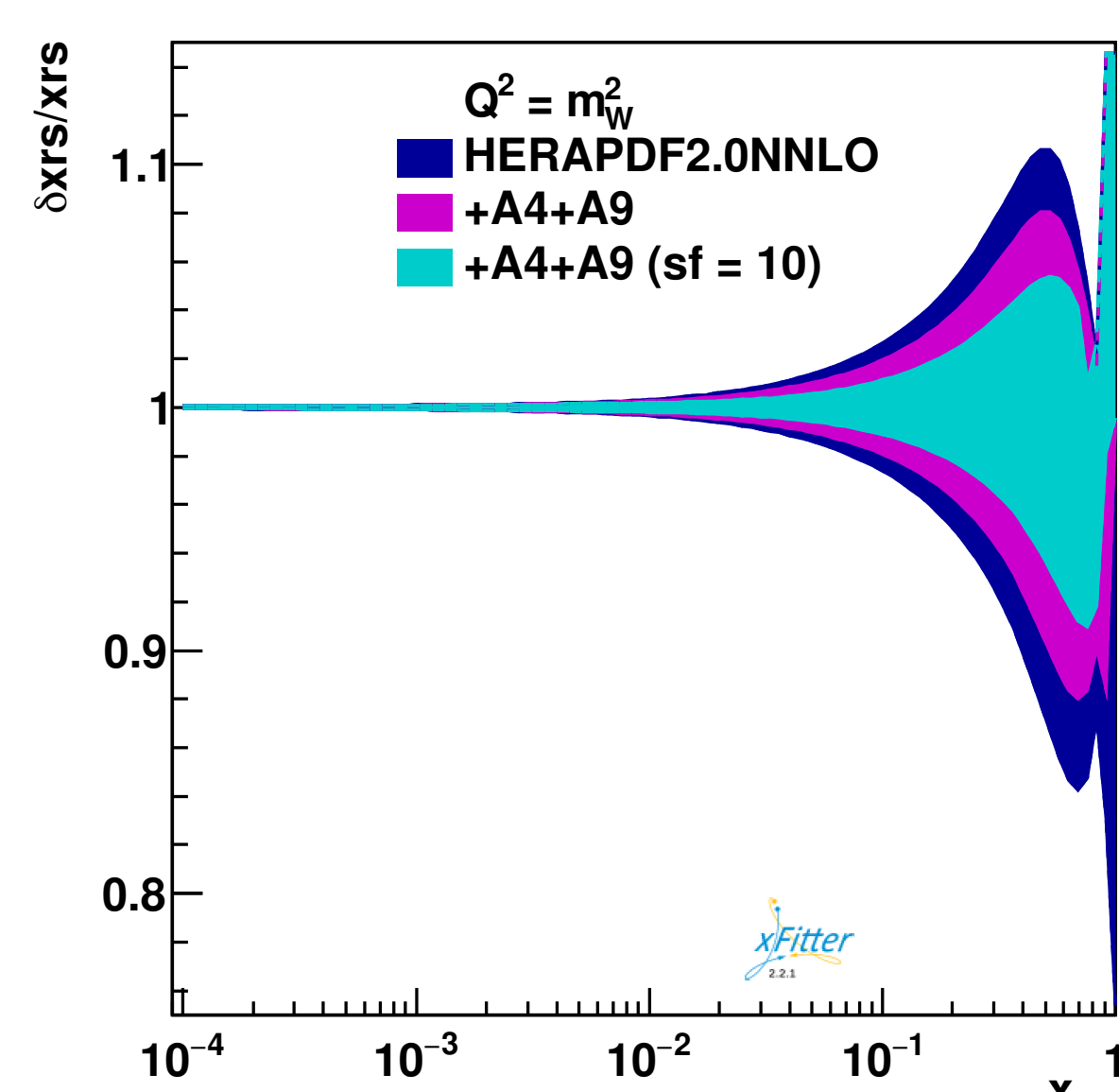
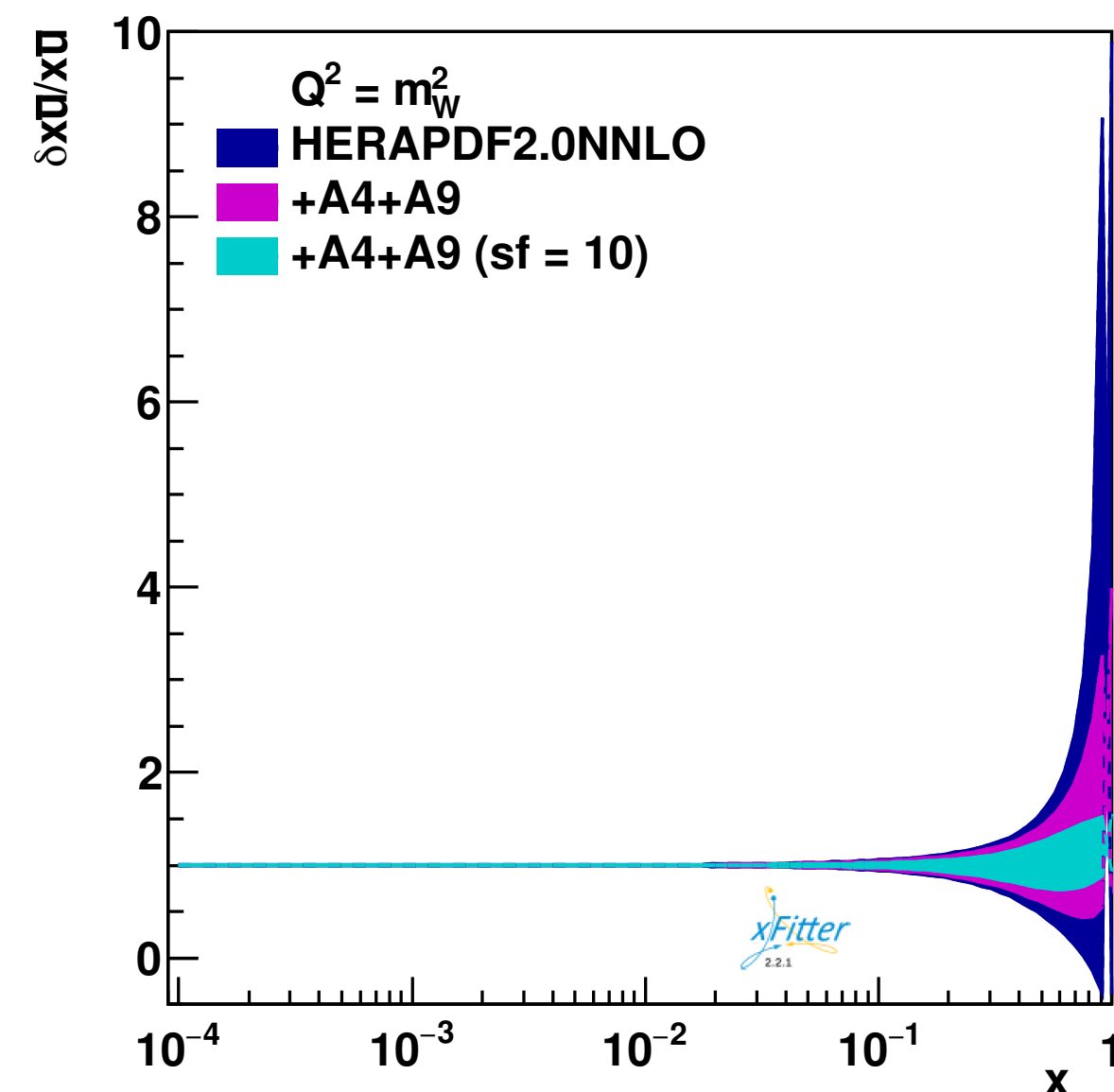
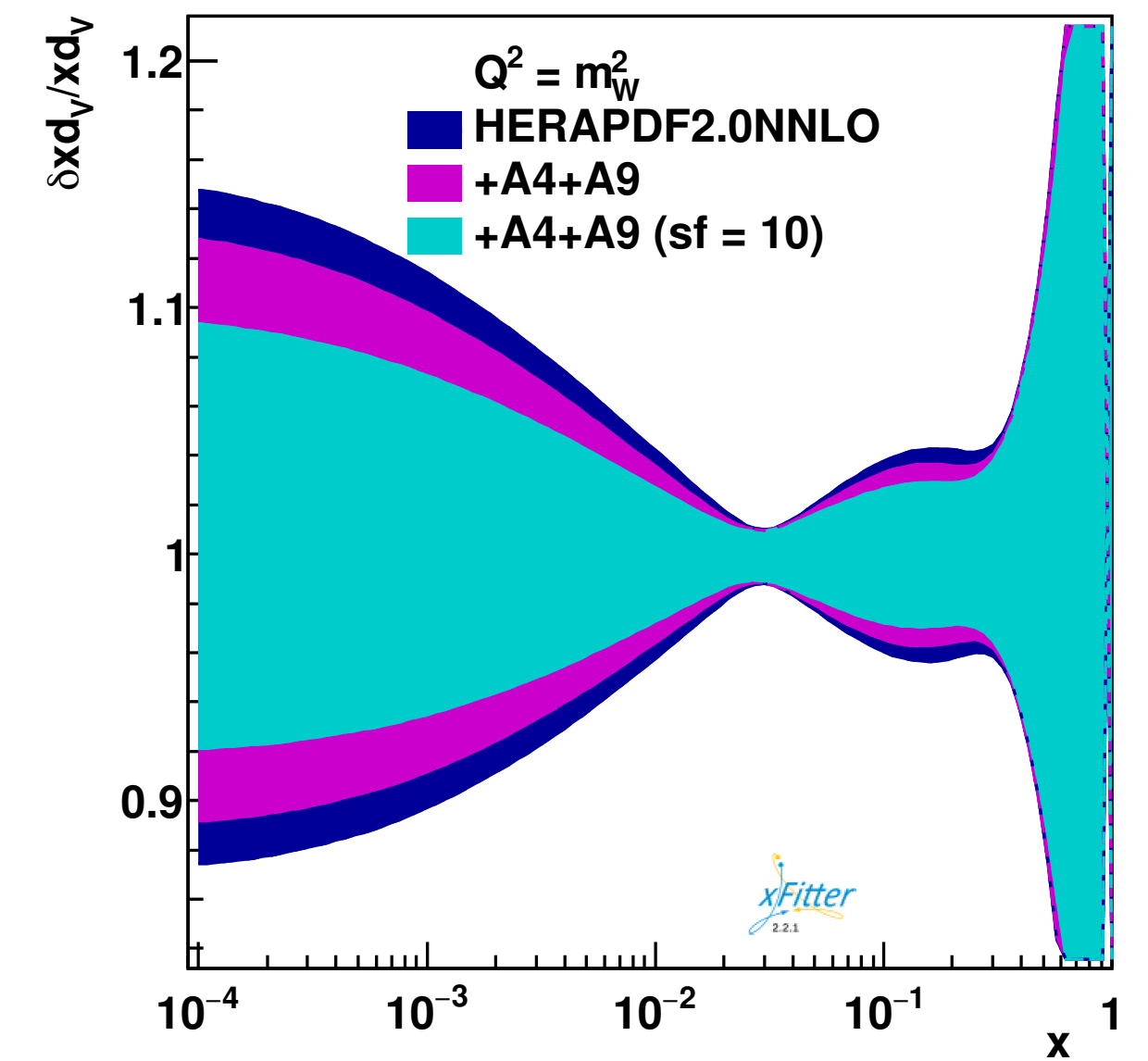
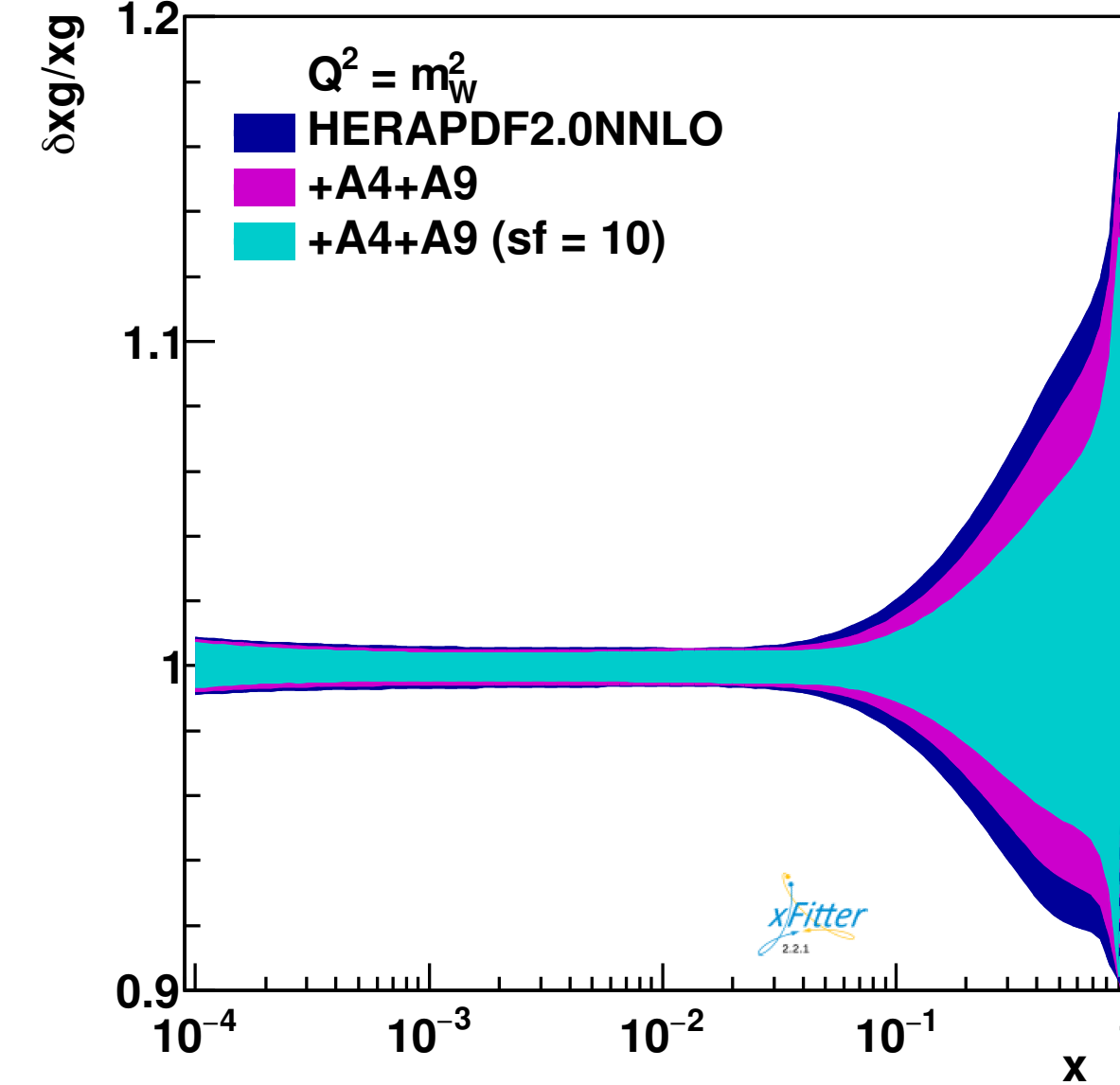
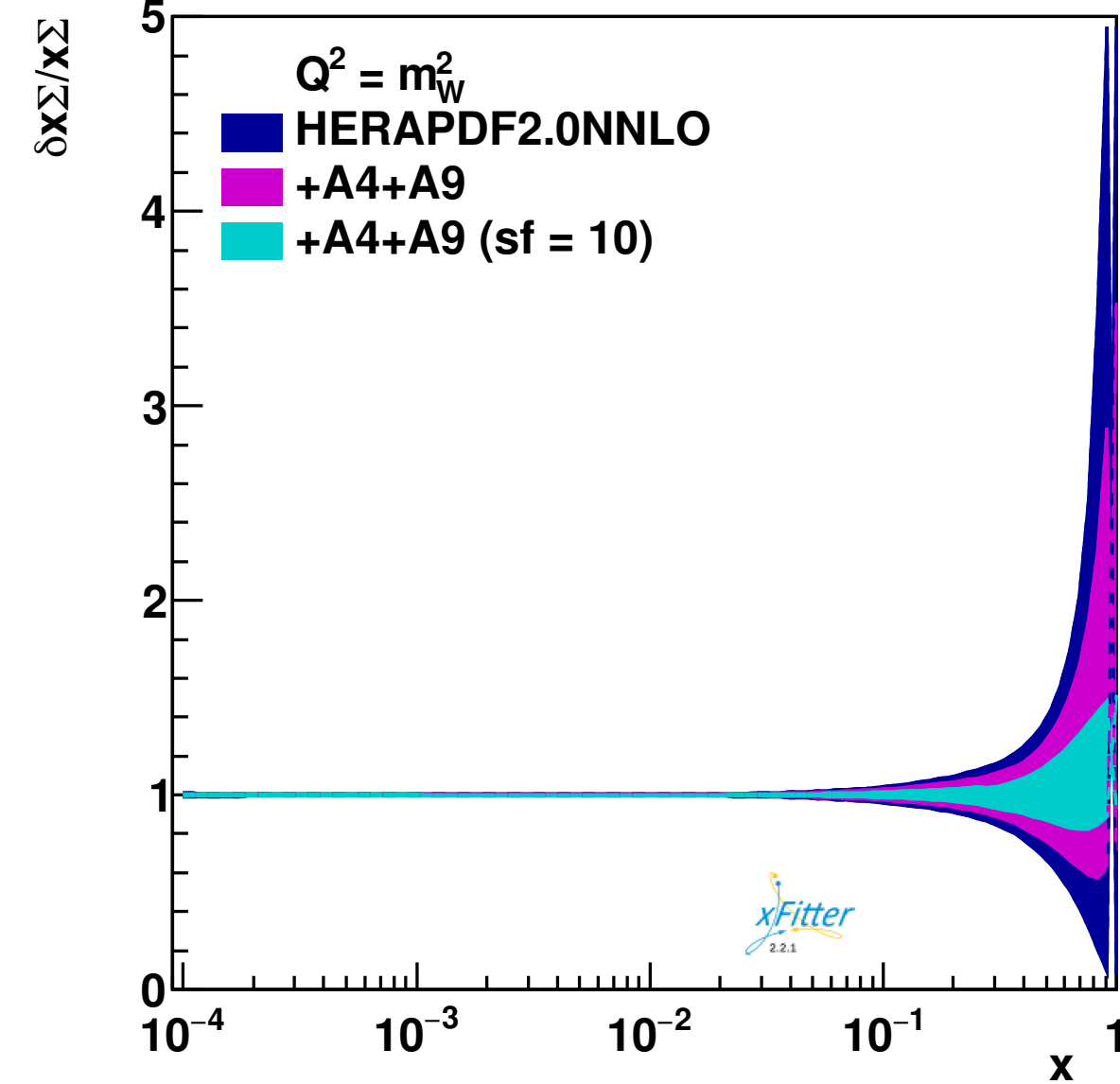
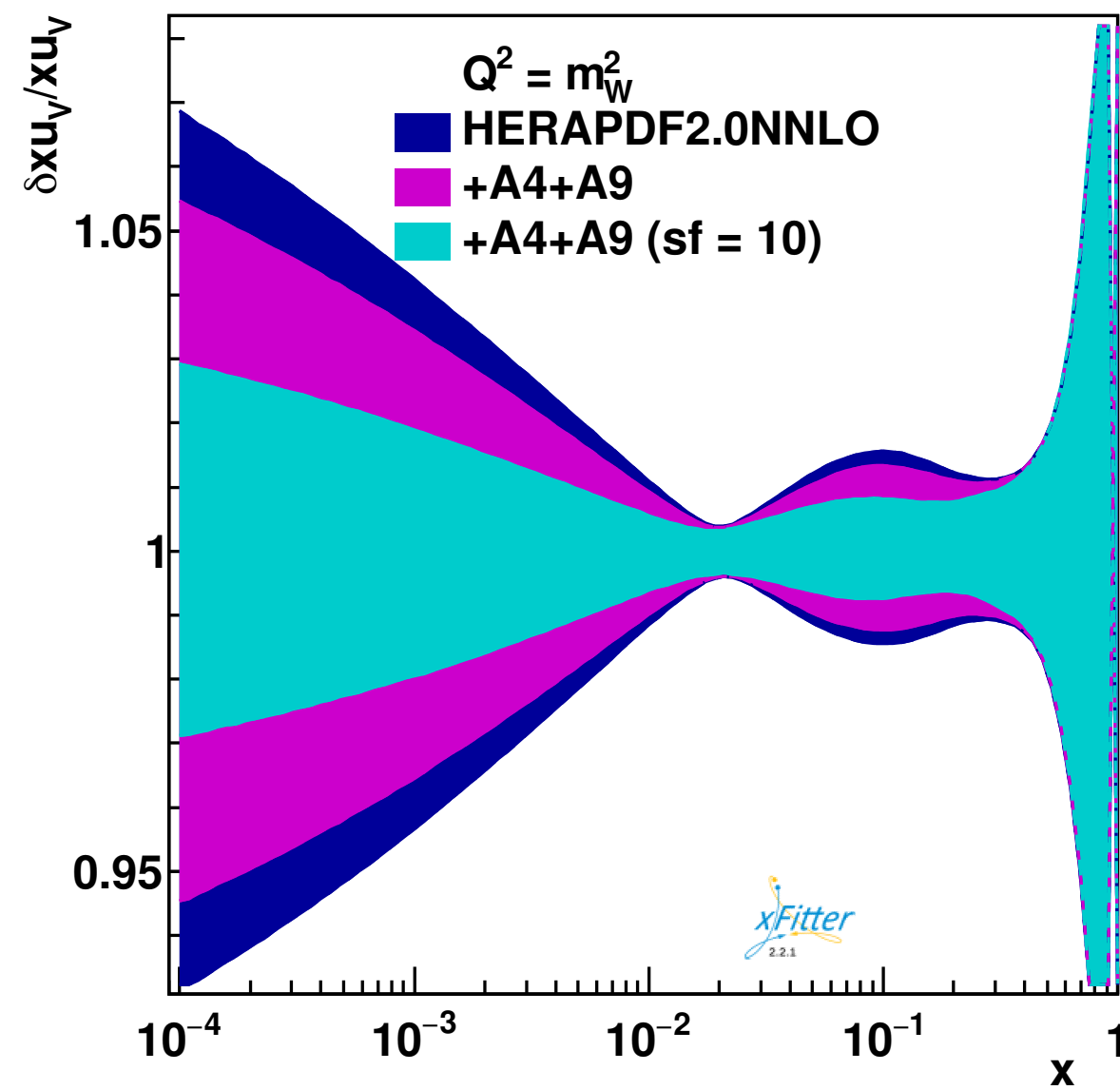
Спасибо за внимание!

Дополнительные слайды

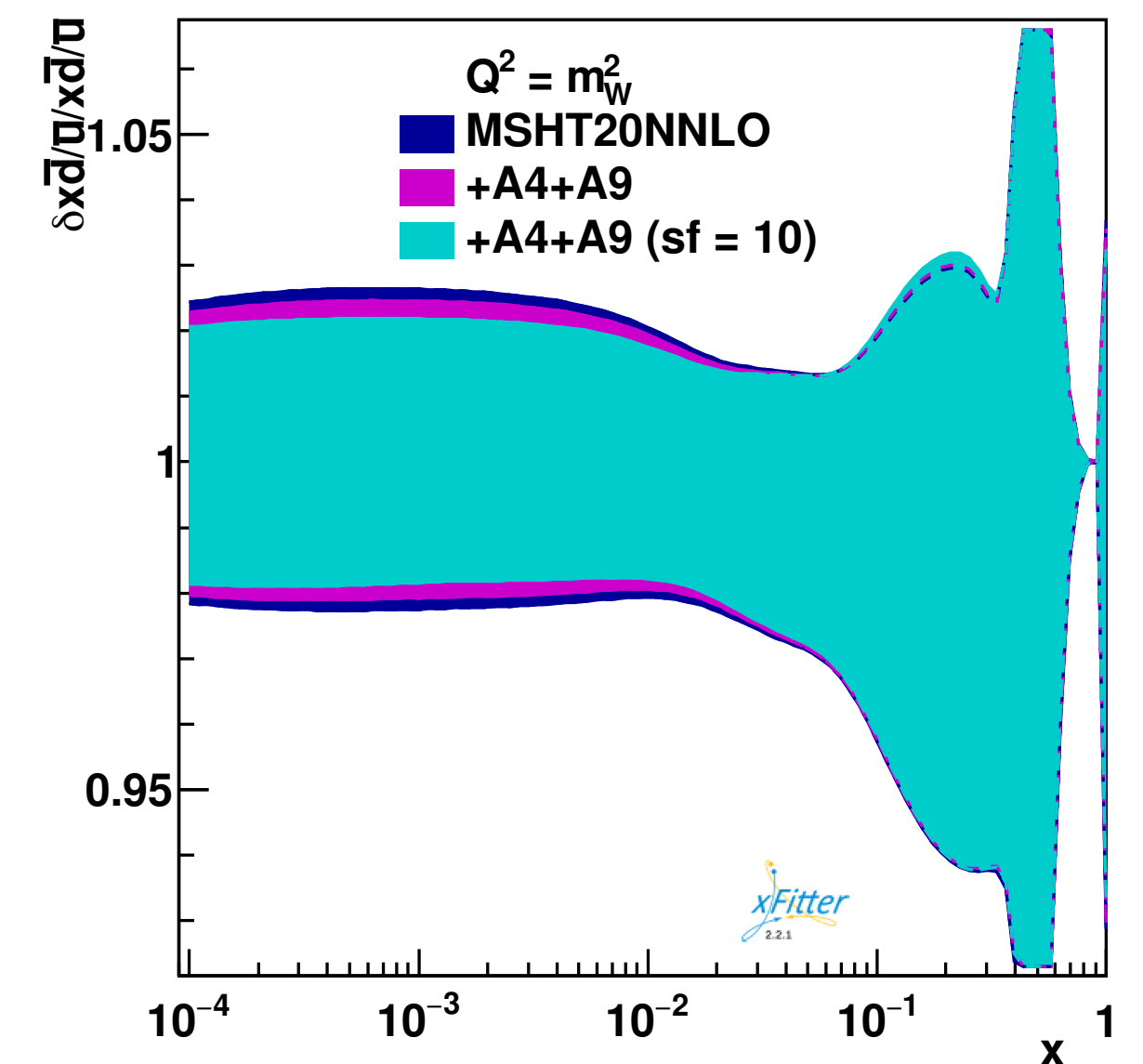
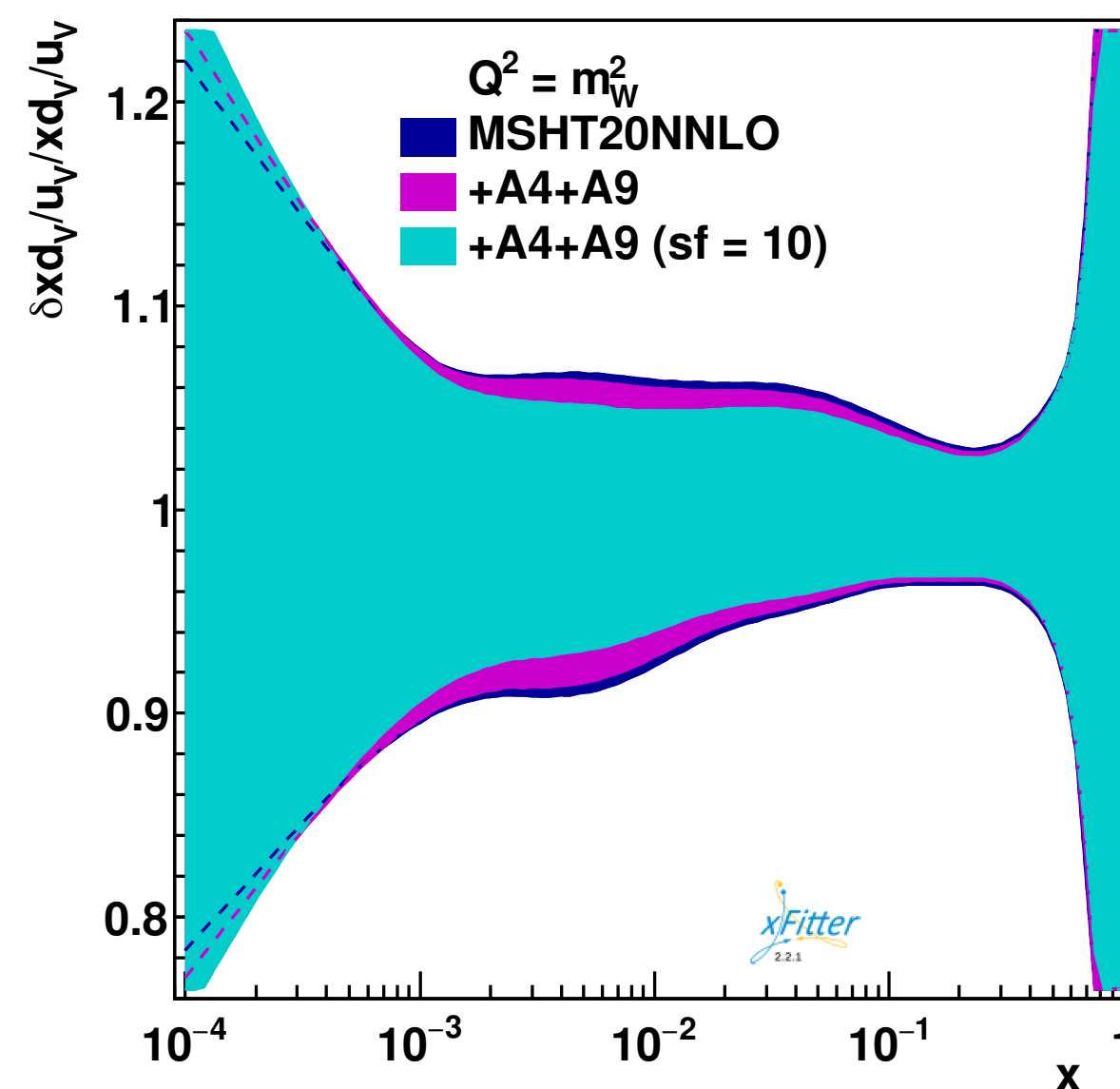
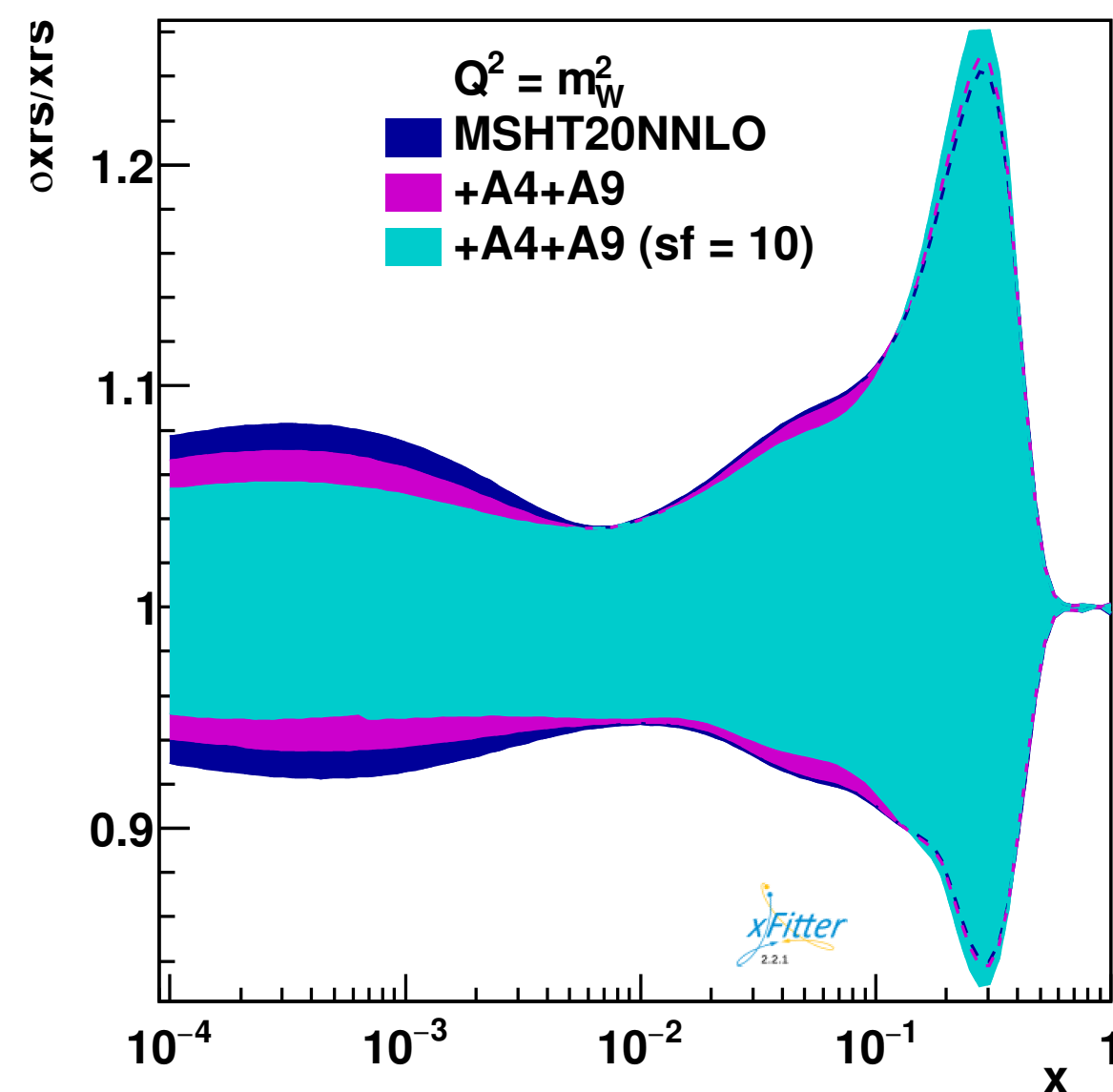
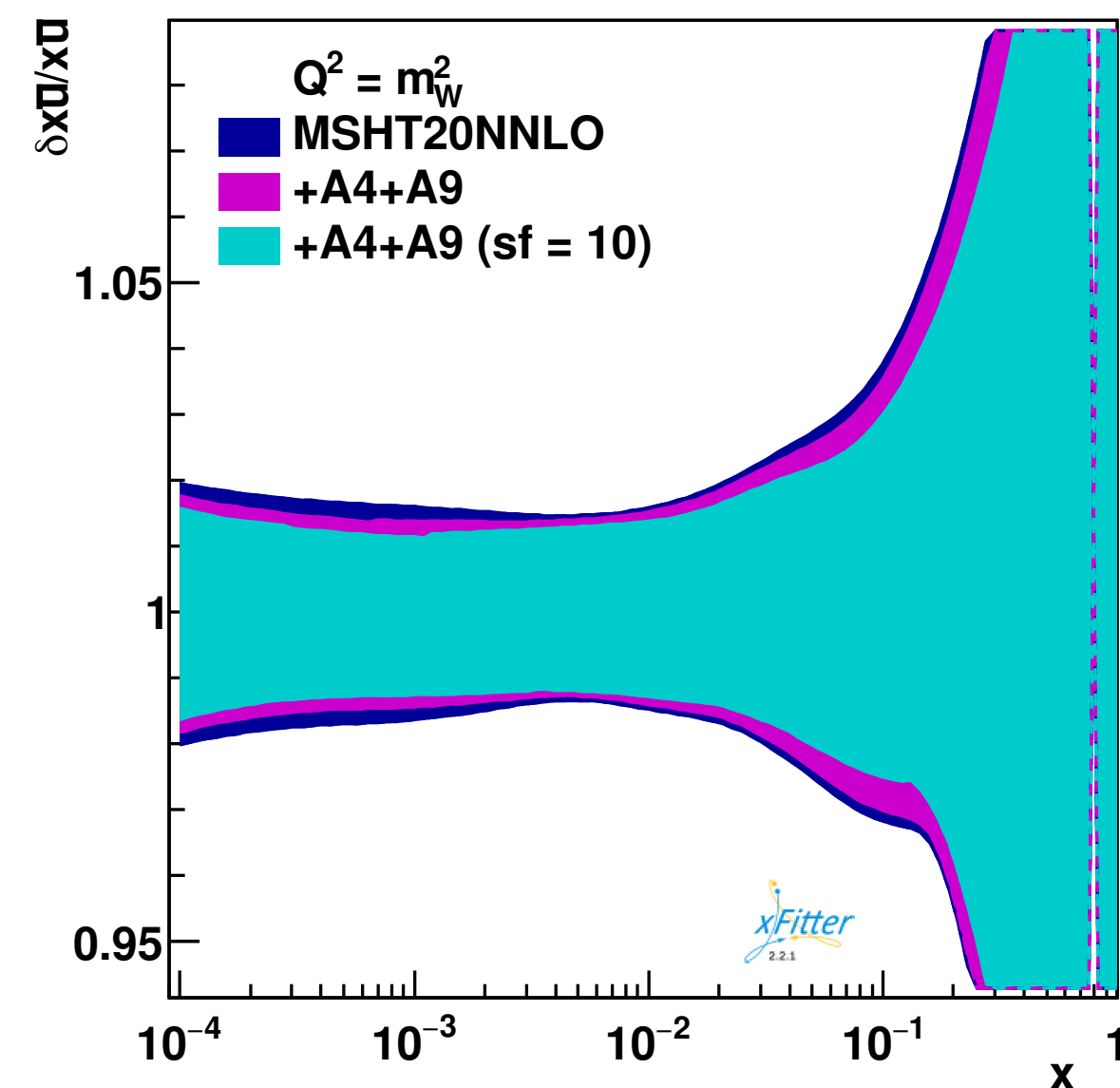
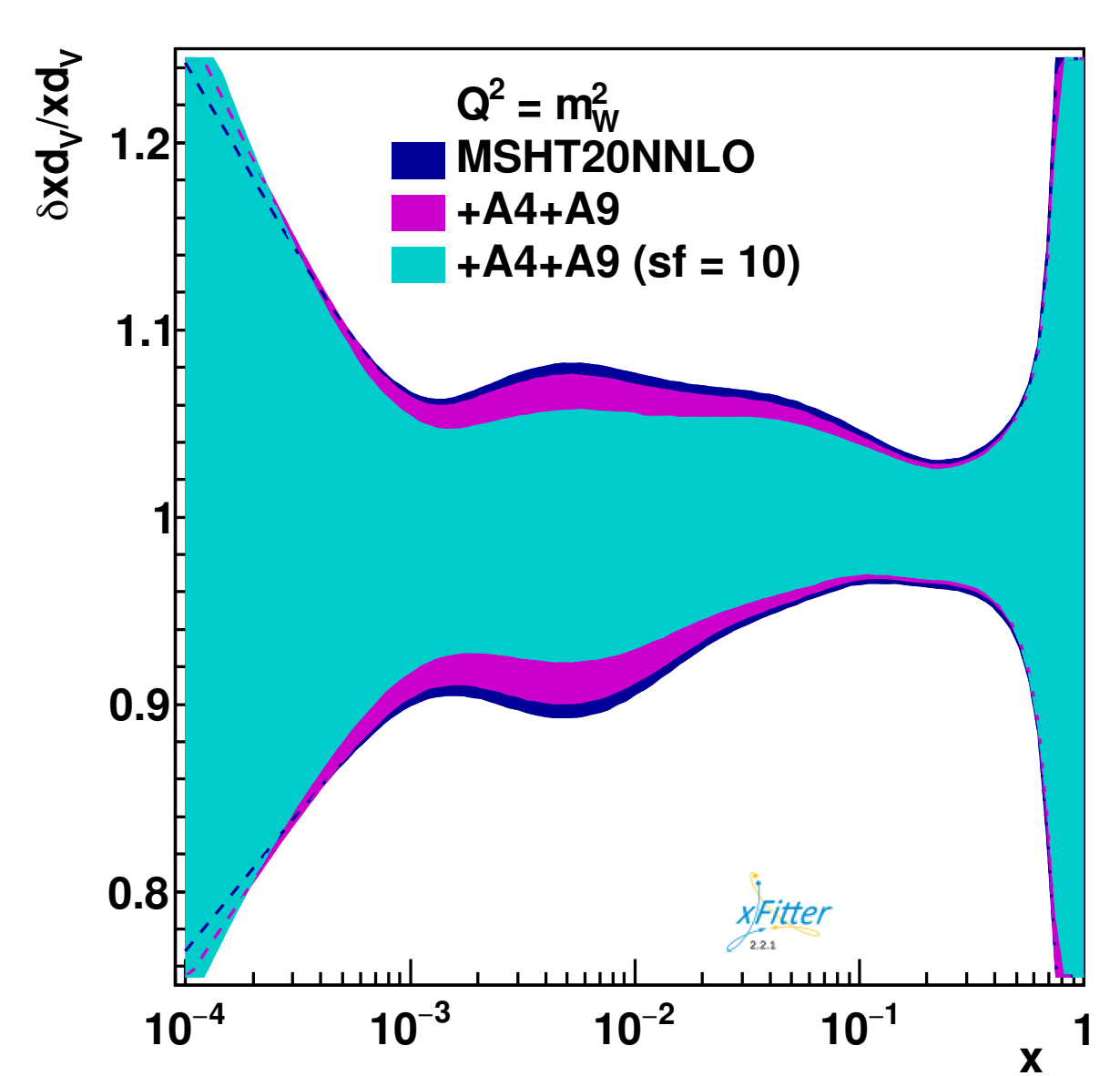
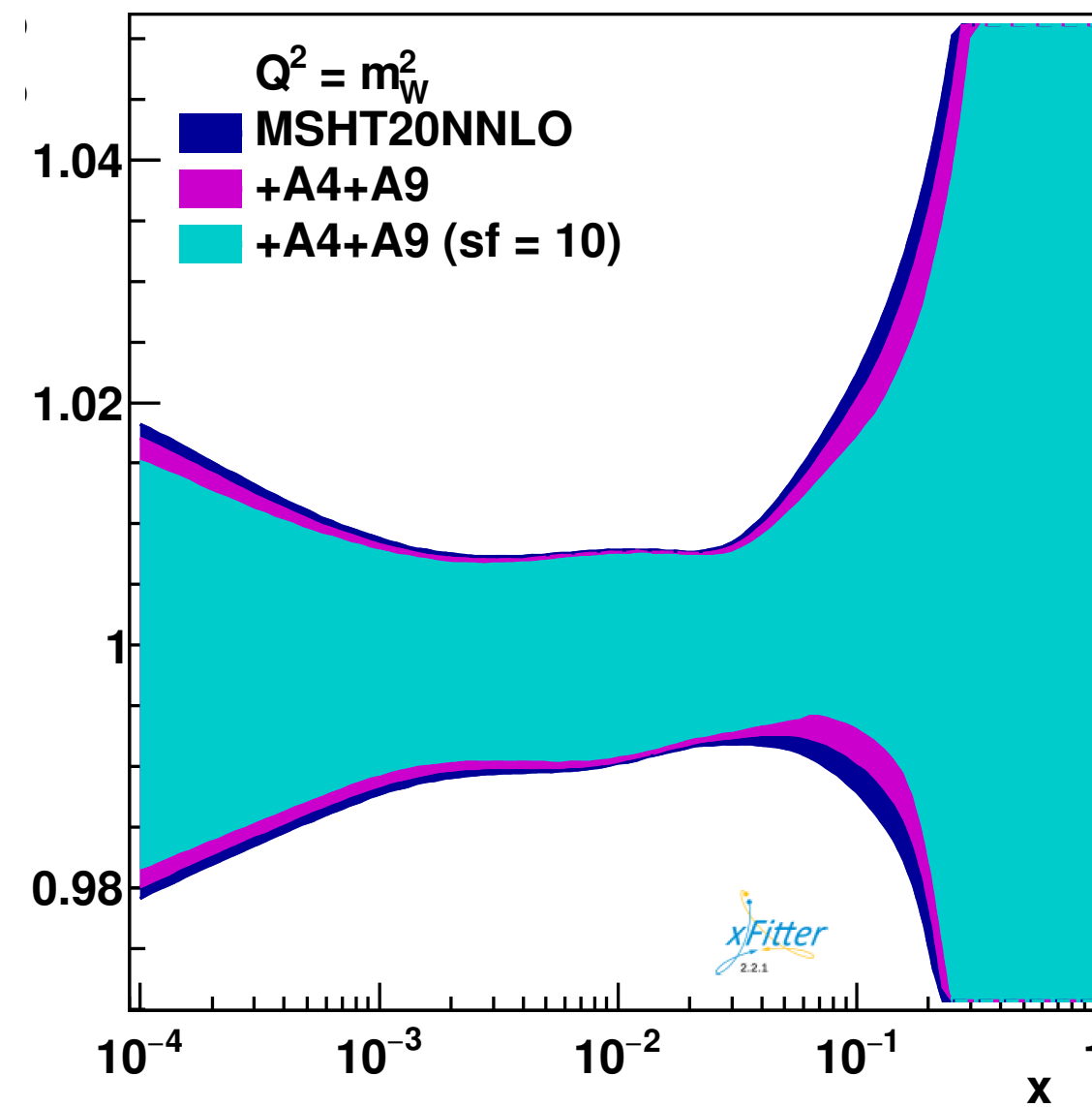
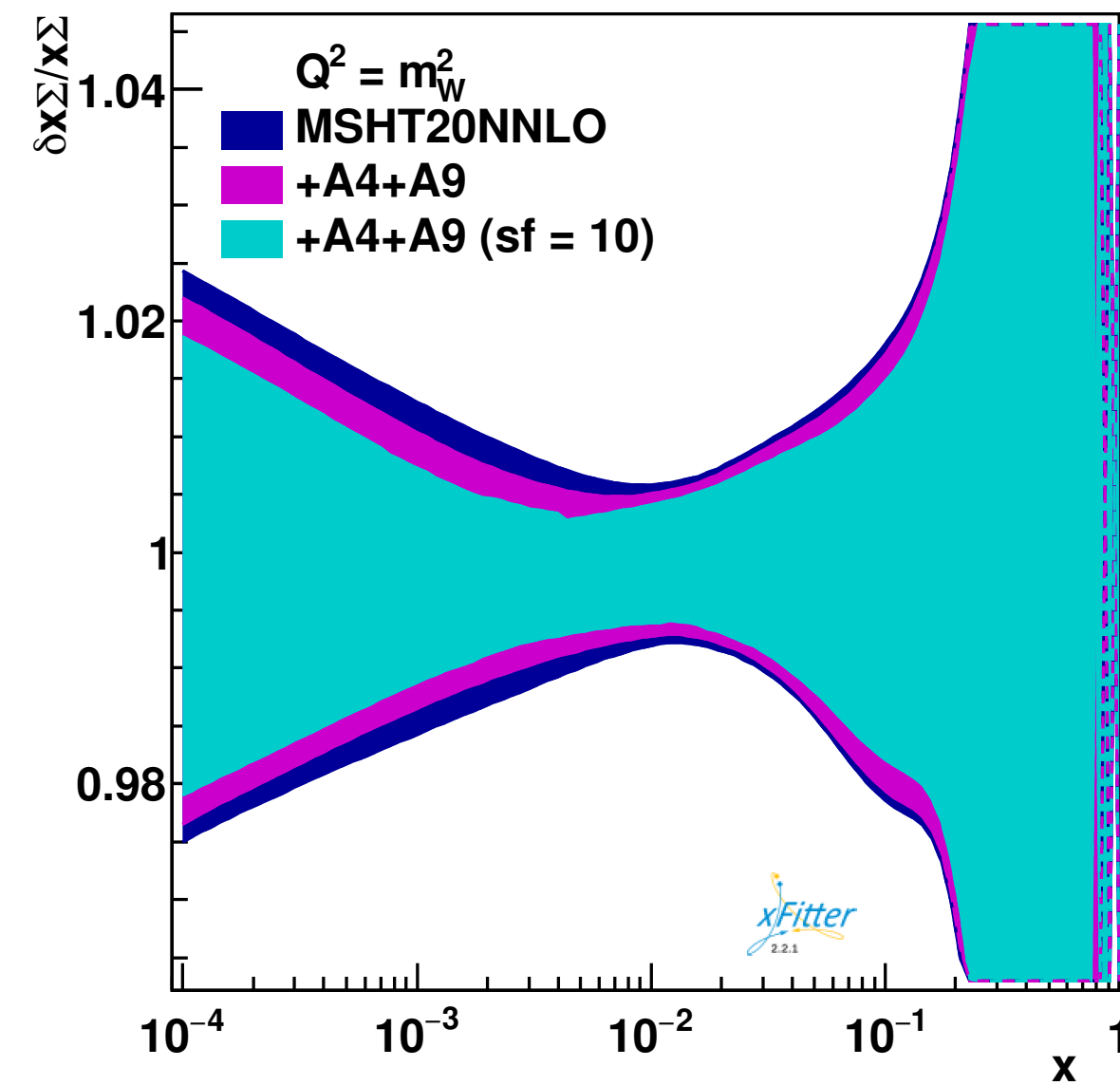
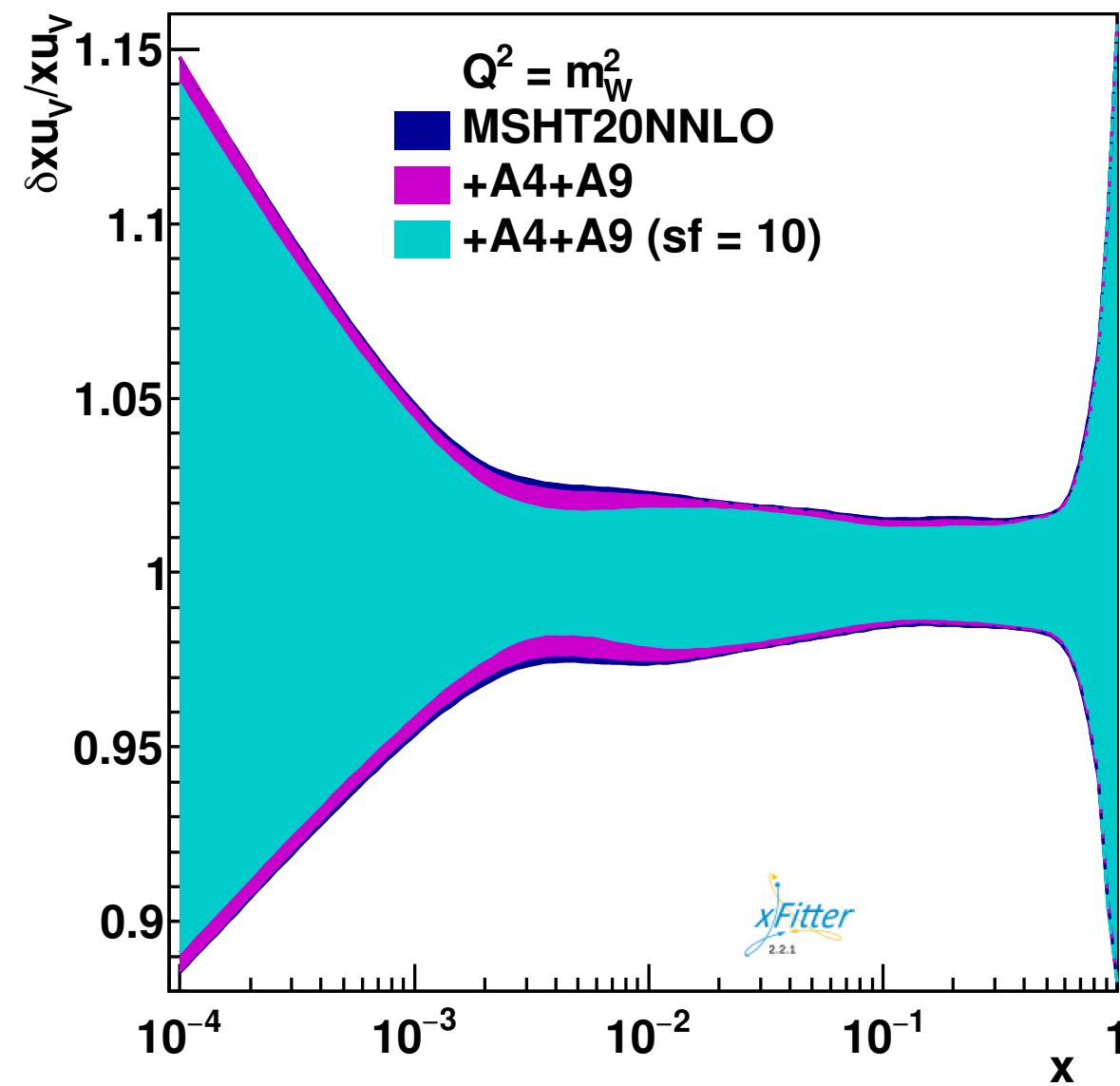
Профайлинг с A_{Δ} и A_0 для набора ПФР СТ18



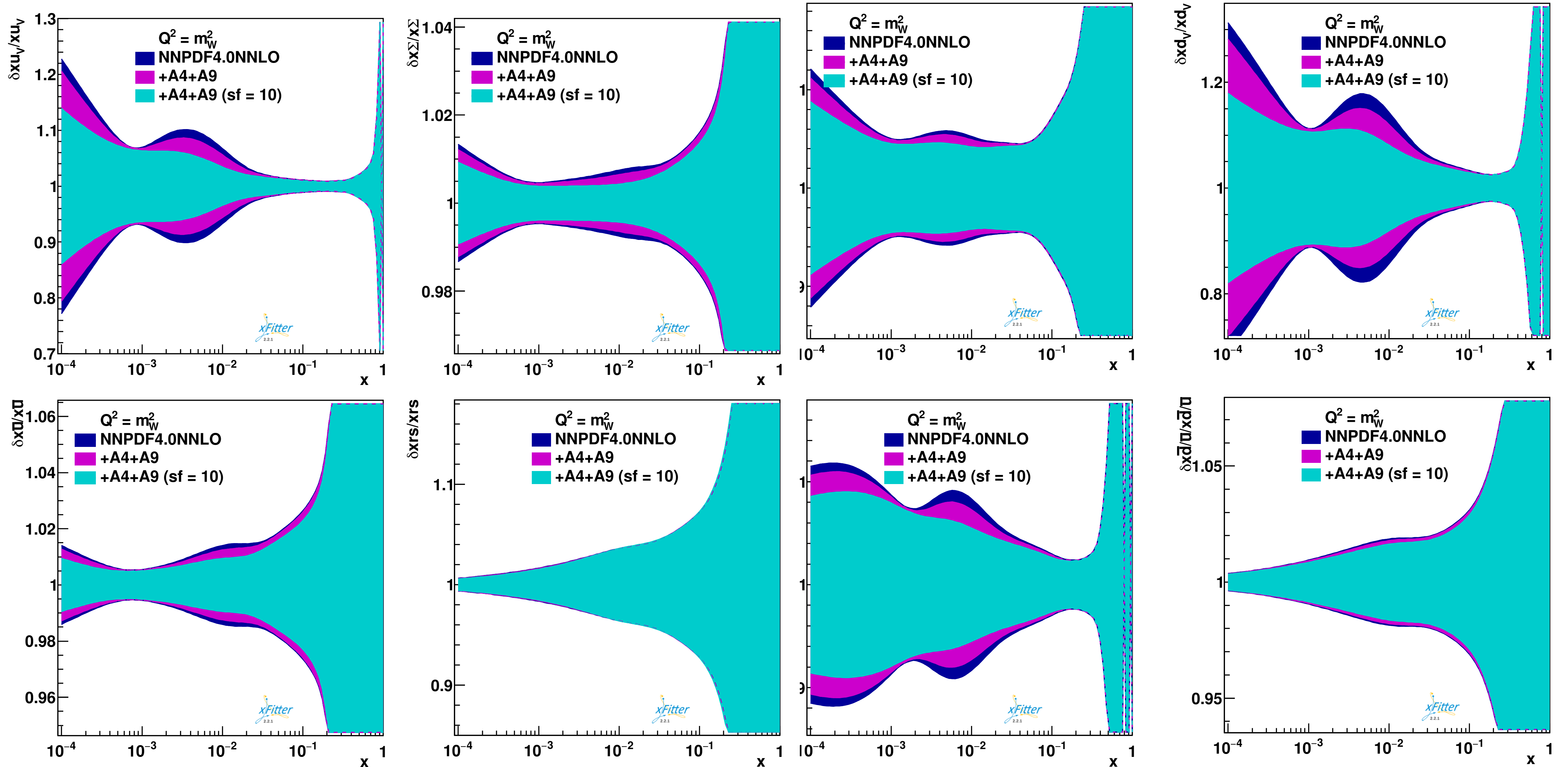
Профайлинг с A_1 и A_0 для набора ПФР HERAPDF2.0



Профайлинг с A_1 и A_0 для набора ПФР MSHT20

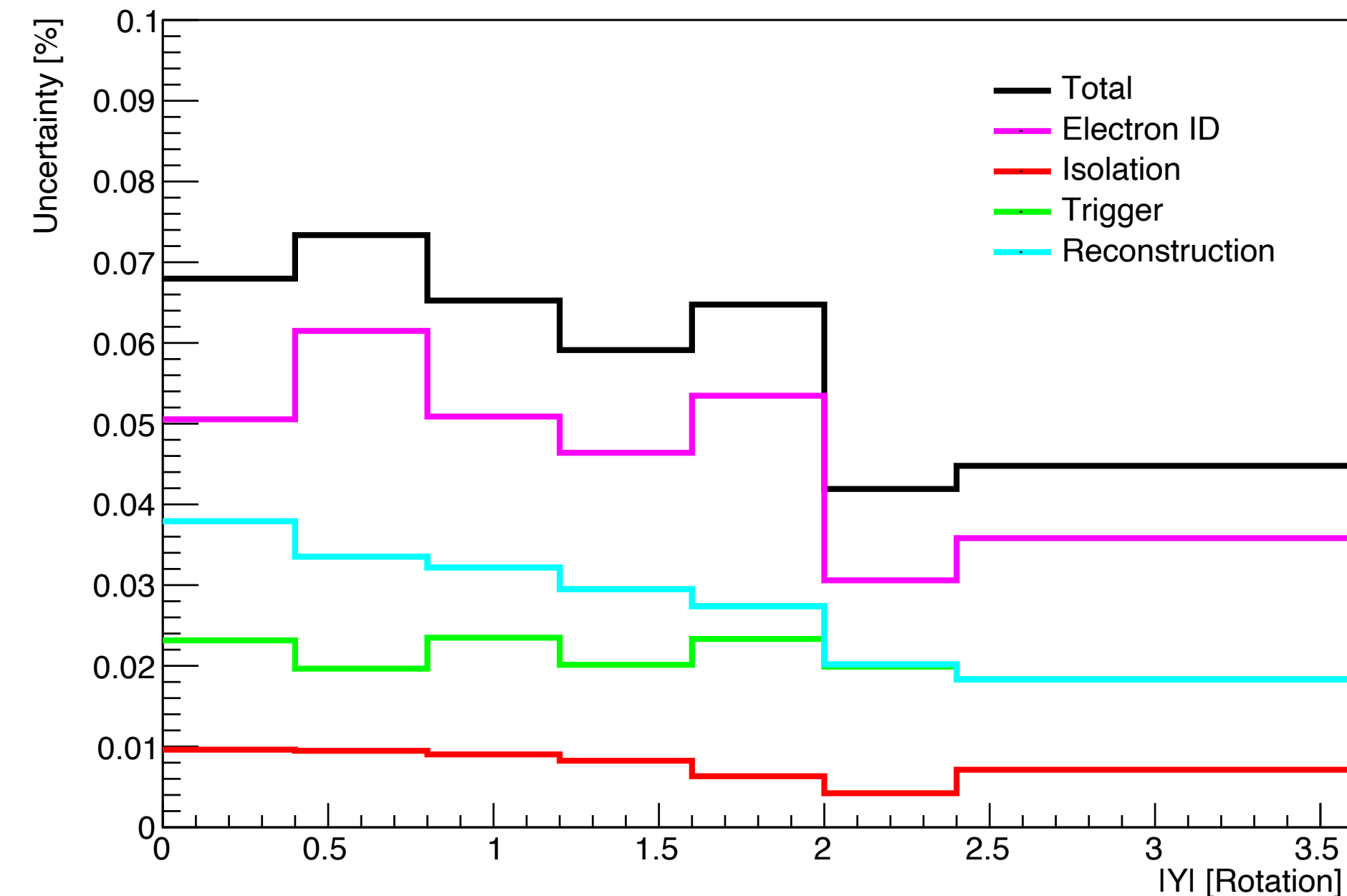
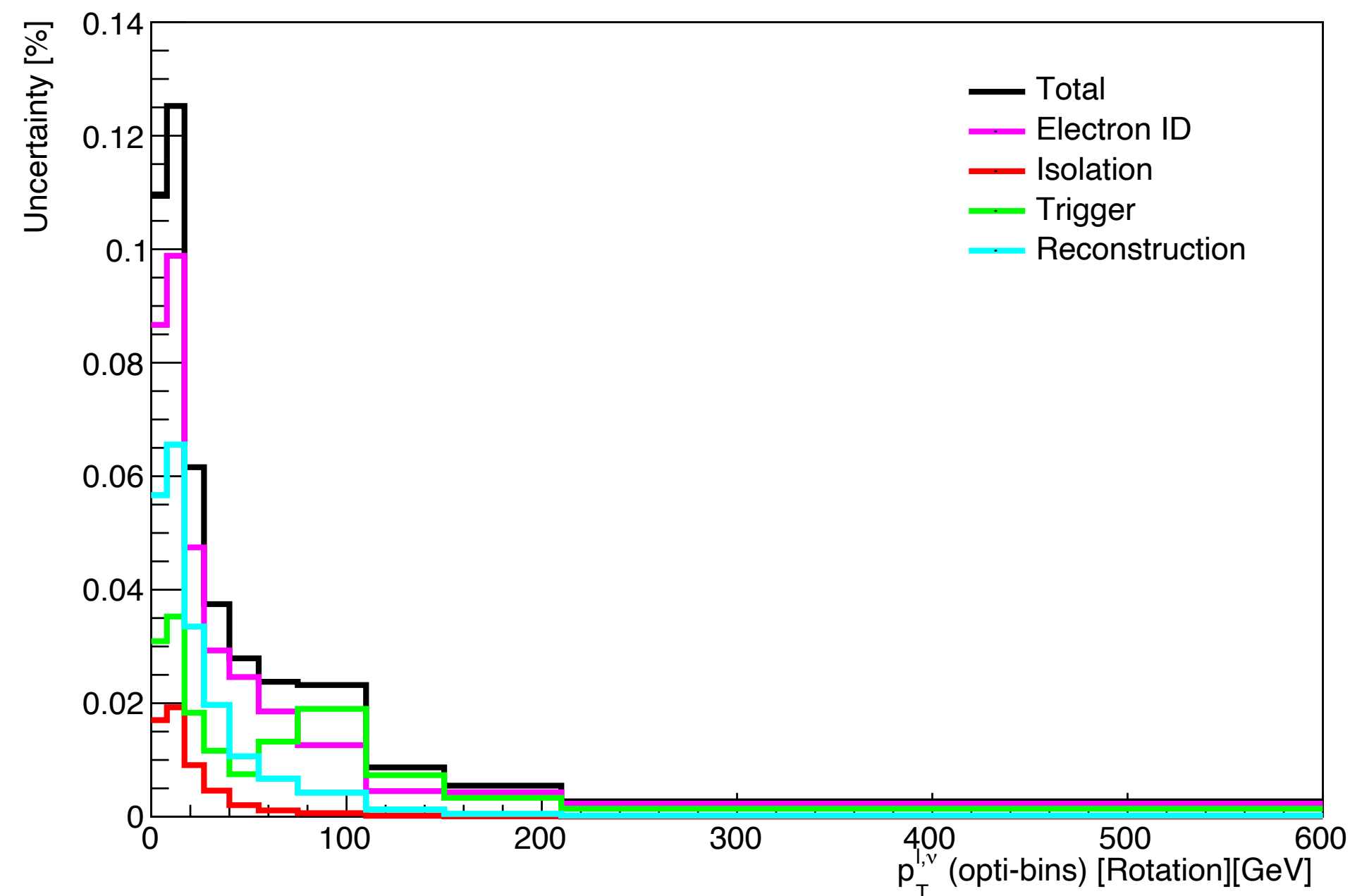


Профайлинг с A_4 и A_9 для набора ПФР NNPDF4.0



Оценка систематических погрешностей

Значение систематических погрешностей в зависимости от поперечного импульса $p_T^{l\nu}$ и быстроты $y^{l\nu}$



- ▶ Величина всех погрешностей уменьшается с ростом поперечного импульса $p_T^{l\nu}$ и быстроты $y^{l\nu}$
- ▶ Наибольший вклад в полную погрешность вносит погрешность, связанная с эффективностью идентификации электронов
- ▶ Полная систематическая погрешность для $p_T^{l\nu}$ составляет 0.19%, а для $y^{l\nu}$ составляет 0.16%.

Группа погрешности	$p_T^{l\nu}$, %	$ y^{l\nu} $, %
ElIDSys	0.15	0.12
ElIsoSys	0.03	0.02
ElTrigSys	0.06	0.06
ElRecoSys	0.1	0.08
Total	0.19	0.16

Отбор событий

Electron	Muon
Tight ID	Medium ID
$p_T > 25 \text{ GeV}$	
$ \eta < 2.4$	
$1.37 < \eta < 1.52$	
$ptvarcone20/p_T < 0.1$	
$topoetcone20/p_T < 0.05$	
$ d_0 \text{ sig} < 5$	$ d_0 \text{ sig} < 3$
$\Delta z_0 \sin\theta < 0.5$	

Факторизация

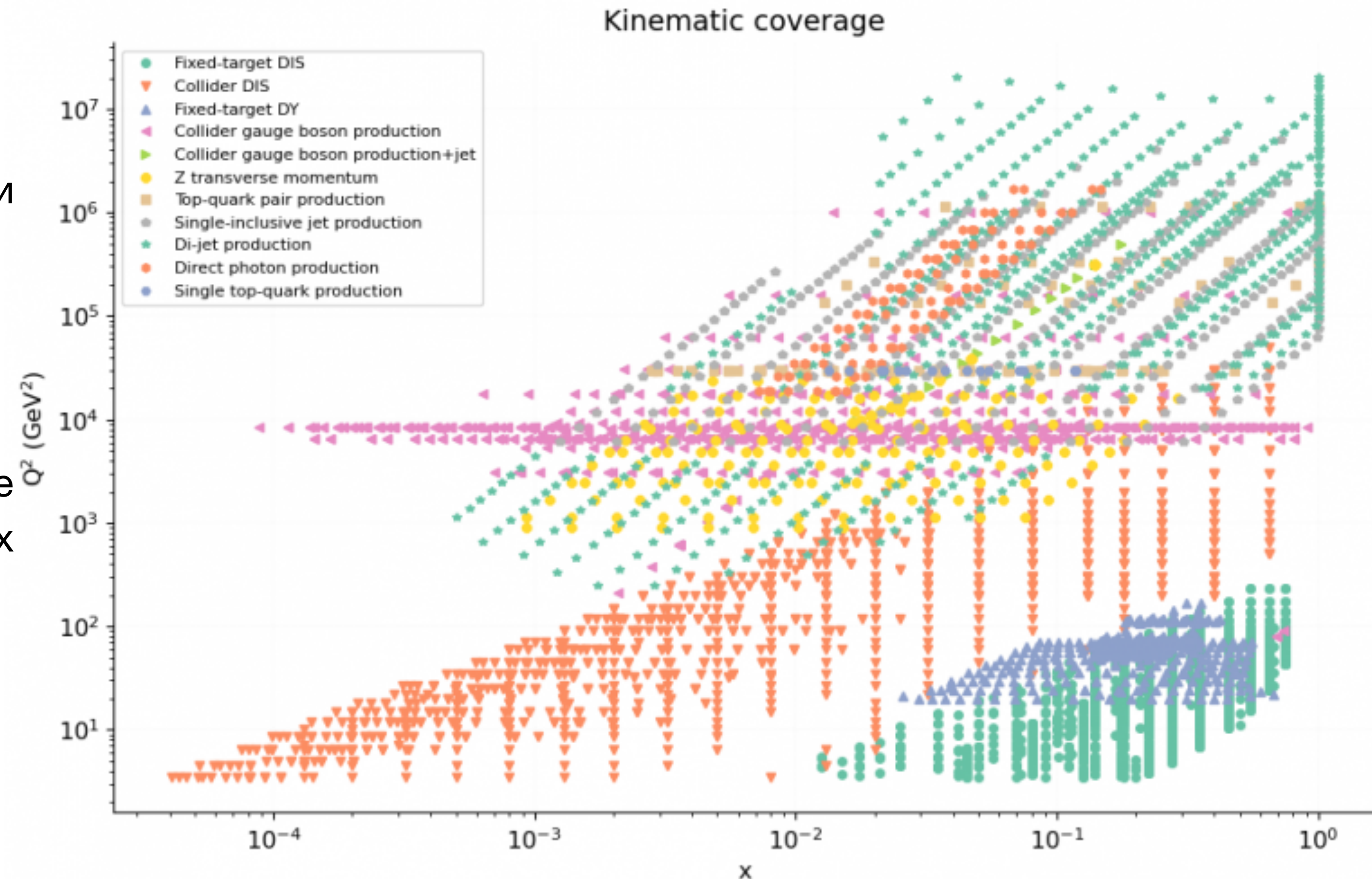
$$\sigma_{pp \rightarrow X} = \sum_{i,j} \int dx_1 dx_2 f_i^p(x, Q^2) f_j^p(x, Q^2) \sigma_{i,j}$$

ПФР Сечение жесткого процесса

- ▶ Сечение процесса представляется свёрткой функций распределений партонов в протоне (ПФР) и вычисляемого в КХД сечения жесткого процесса.

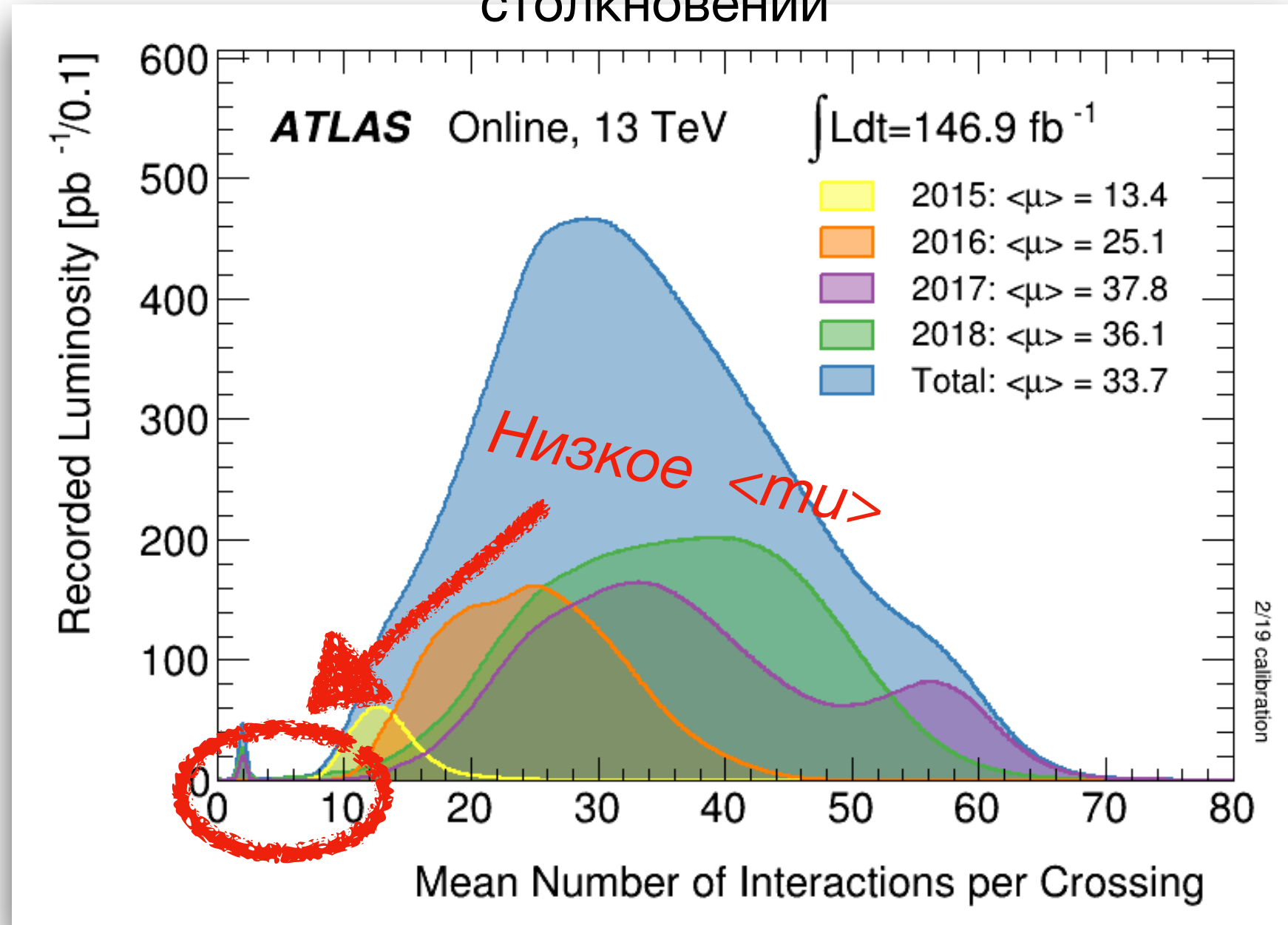
- ▶ $x_1 = \frac{M_W}{\sqrt{s}} e^{+y_W}, \quad x_2 = \frac{M_W}{\sqrt{s}} e^{-y_W}$

- ▶ Использование экспериментальных измерений в эксперименте ATLAS, позволяет уточнять партонные функции при больших значениях $Q^2 = m_{W/Z}^2$ и малых значениях доли импульса $x \approx 10^{-4} - 10^{-1}$

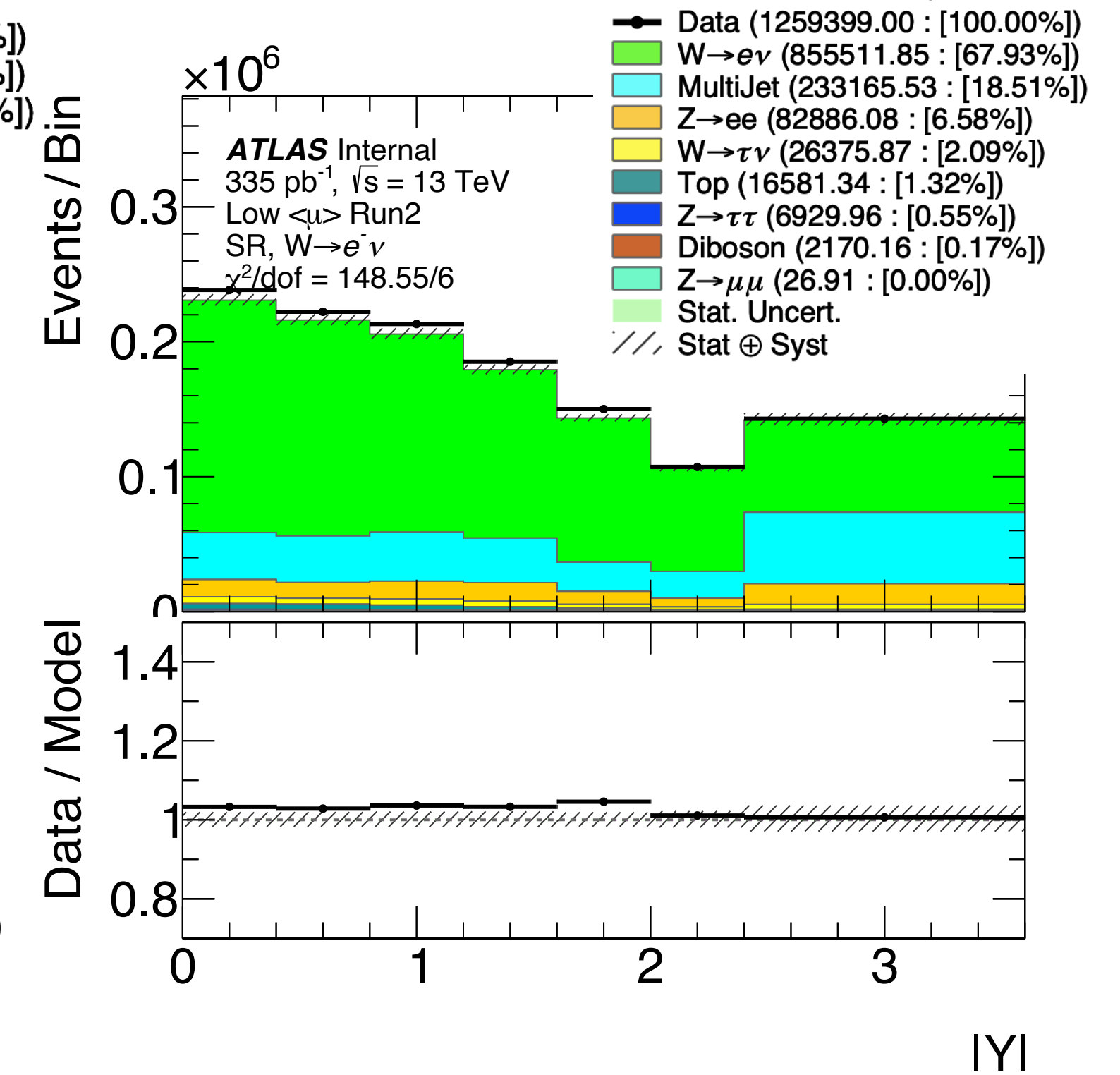
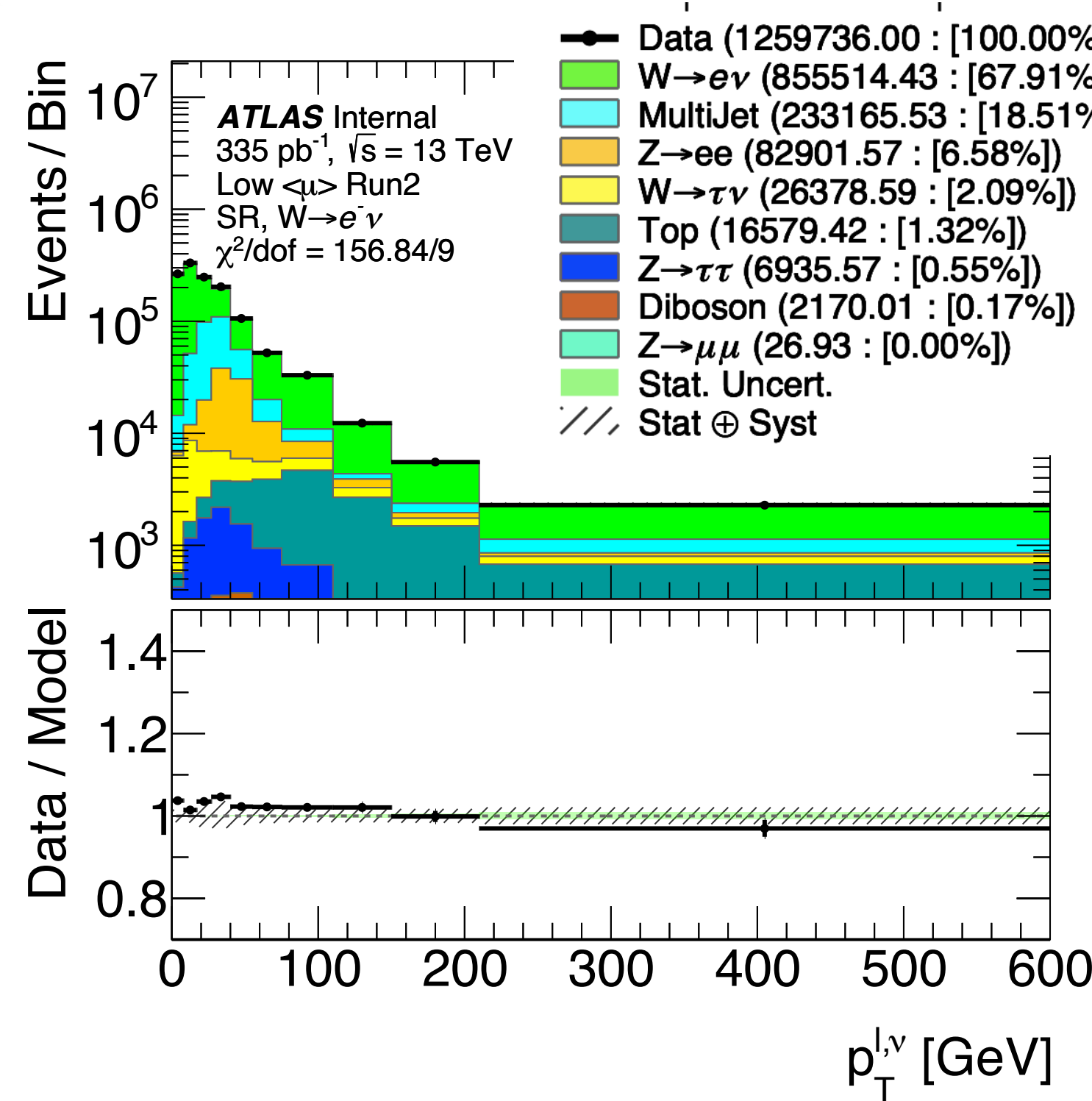


Использованные данные

$\langle \mu \rangle$ - среднее число взаимодействий при столкновении



Сравнение кинематических распределений для экспериментальных и Монте-Карло данных



► Экспериментальные данные, набранные на детектора ATLAS в 2017 и 2018 году с полной интегральной светимостью 335 pb^{-1} и низким $\langle \mu \rangle$. При столкновении протон-протонных пучков с энергией 13 ТэВ.

► Монте-Карло данные, соответствующие условиям реальных протон-протонных столкновений эксперимента ATLAS во втором сеансе набора данных в 2017 и 2018 году.

Методика измерения

$$L(A, \sigma) = \prod_n^{N_{bins}} \{ Poiss(N_{obs}^n | N_{exp}^n(A, \sigma)) \}$$

$$N_{exp}^n(A, \sigma) = \left\{ \sum_{j=0}^{10} \sigma_j \left[T_{8j}^n + \sum_{i=0}^7 A_{ij} T_{ij}^n + T_B^n \right] \right\}$$

$$n = (k, l, m), k = 0, \dots, 7, l = 0, \dots, 7, m = 0, \dots, 9$$

$$T_{ij}^{mkl} = \sum_{evt \in \Delta_{jmkl}} P_i(\cos\theta_{CS}^{Truth}, \phi_{CS}^{Truth}) \frac{w^{evt}(r, t)}{f_j(\cos\theta_{CS}^{Truth}, \phi_{CS}^{Truth})}$$

$$\Delta_{jmkl} = (\Delta p_T^{Truth, W})_j, (\Delta \cos\theta_{CS}^{Reco})_m, (\Delta \phi_{CS}^{Reco})_k, (\Delta p_T^{Reco, W})_l$$

$$f_j(\cos\theta_{CS}^{Truth}, \phi_{CS}^{Truth}) = \sigma_j \left\{ P_8(\cos\theta_{CS}^{Truth}, \phi_{CS}^{Truth}) + \sum_{i=0}^8 A_{ij}^{ref} P_i(\cos\theta_{CS}^{Truth}, \phi_{CS}^{Truth}) \right\}$$

- ▶ $L(A, \sigma)$ - функция правдоподобия
- ▶ $N_{exp}^n(A, \sigma)$ - число ожидаемых событий в измеряемом интервале трех кинематических переменных $(\cos\theta_{CS}^{Reco}, \phi_{CS}^{Reco}, p_T^{Reco, W})$
- ▶ A - набор параметров для угловых коэффициентов A_{ij}
- ▶ A_{ij} - параметр, определяющий i угловой коэффициент для j интервала по переменной $p_T^{Truth, W}$
- ▶ T_{ij}^n - набор шаблонных распределений, измеряемых в каждом интервале (m, k, l) переменных $(\cos\theta_{CS}^{Reco}, \phi_{CS}^{Reco}, p_T^{Reco, W})$
- ▶ T_{8j}^n - шаблонное распределение, соответствующее полиному P_8
- ▶ T_B - шаблонное распределение для фоновых процессов
- ▶ σ - набор параметров для σ_j
- ▶ σ_j - параметр, определяющий неполяризационное сечение для j интервала переменной $p_T^{Truth, W}$
- ▶ A_{ij}^{Ref} - набор референсных угловых коэффициентов

Количество бинов, в которых производится измерение: $8 \times 8 \times 8 \times 10 = 5120$

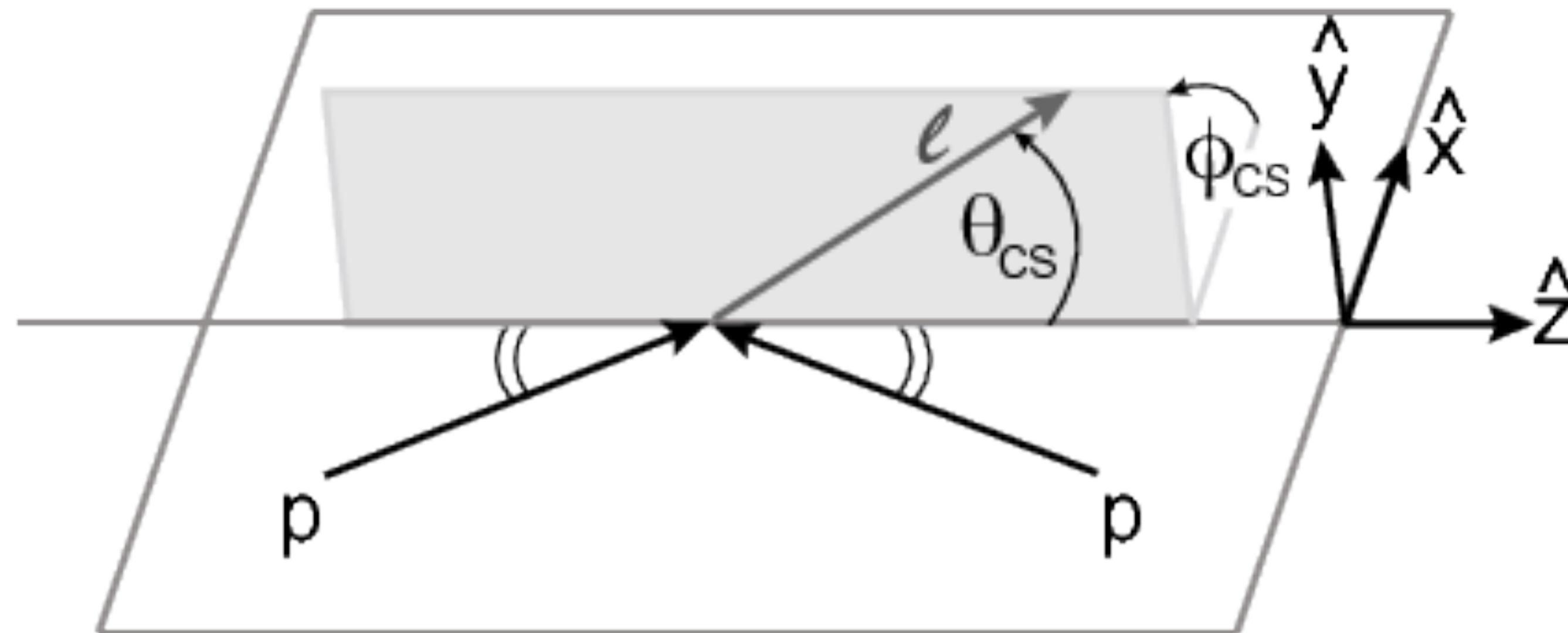
Метод моментов

Метод моментов используется для оценки неизвестных параметров распределения, основанный на предполагаемых свойствах его моментов. Суть метода заключается в нахождении числовых параметров теоретического распределения через моменты, оценённые по выборке.

$$\langle P_i(\cos\theta, \phi) \rangle = \frac{\int P_i(\cos\theta, \phi) d\sigma(\cos\theta, \phi) d\cos\theta d\phi}{\int d\sigma(\cos\theta, \phi) d\cos\theta d\phi}$$

$$\begin{aligned} \langle \frac{1}{2}(1 - 3\cos^2\theta) \rangle &= \frac{3}{20}(A_0 - \frac{2}{3}), & \langle \sin 2\theta \cos\phi \rangle &= \frac{1}{5}A_1, \\ \langle \sin^2\theta \cos 2\phi \rangle &= \frac{1}{10}A_2, & \langle \sin\theta \cos\phi \rangle &= \frac{1}{4}A_3, \\ \langle \cos\theta \rangle &= \frac{1}{4}A_4, & \langle \sin^2\theta \sin 2\phi \rangle &= \frac{1}{5}A_5, \\ \langle \sin 2\theta \sin\phi \rangle &= \frac{1}{5}A_6, & \langle \sin\theta \sin\phi \rangle &= \frac{1}{4}A_7. \end{aligned}$$

Система покоя Коллинза-Сопера



- *Направление оси z выбирается так, чтобы она делила угол между направлением трехмерных импульсов протонов в системе покоя пополам*
- *Положительное направление оси z выбирается в сторону вылета W -бозона в лабораторной системе.*

Мотивация: измерение массы W бозона

2017 [2]

$$M_W = 80369.5 \pm 6.8 \text{ (stat)} \pm 10.6 \text{ (exp.syst.)} \pm 13.6 \text{ (model.syst.) MeV}$$

Limited by data

Experimental: modelling of lepton momentum measurement and hadronic recoil

Theoretical: understanding of vector boson production and decay

Combined categories	Value [MeV]	Stat. Unc.	Muon Unc.	Elec. Unc.	Recoil Unc.	Bckg. Unc.	QCD Unc.	EW Unc.	PDF Unc.	Total Unc.	χ^2/dof of Comb.
$m_T - p_T^\ell, W^\pm, e-\mu$	80369.5	6.8	6.6	6.4	2.9	4.5	8.3	5.5	9.2	18.5	29/27

2023 [3]

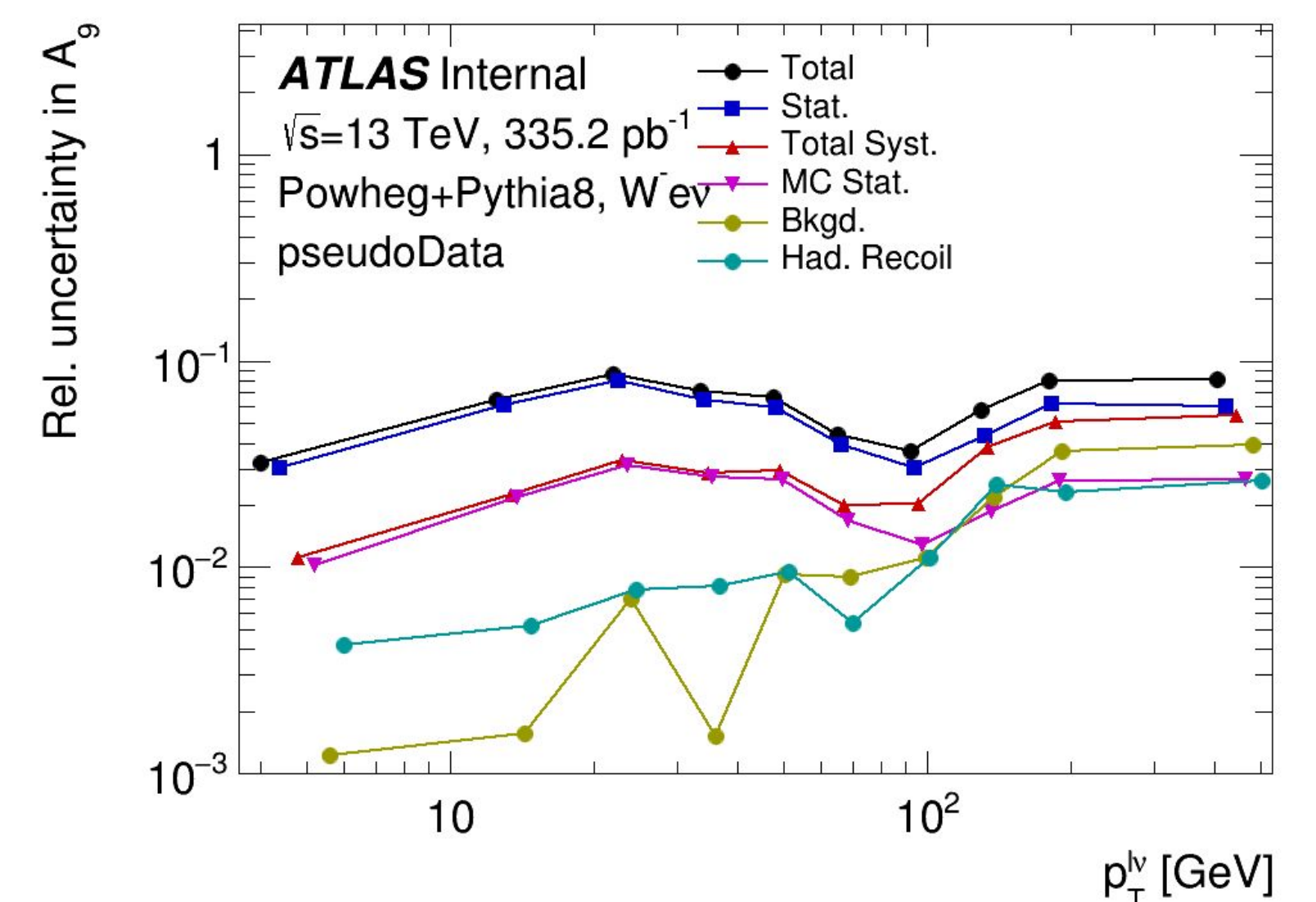
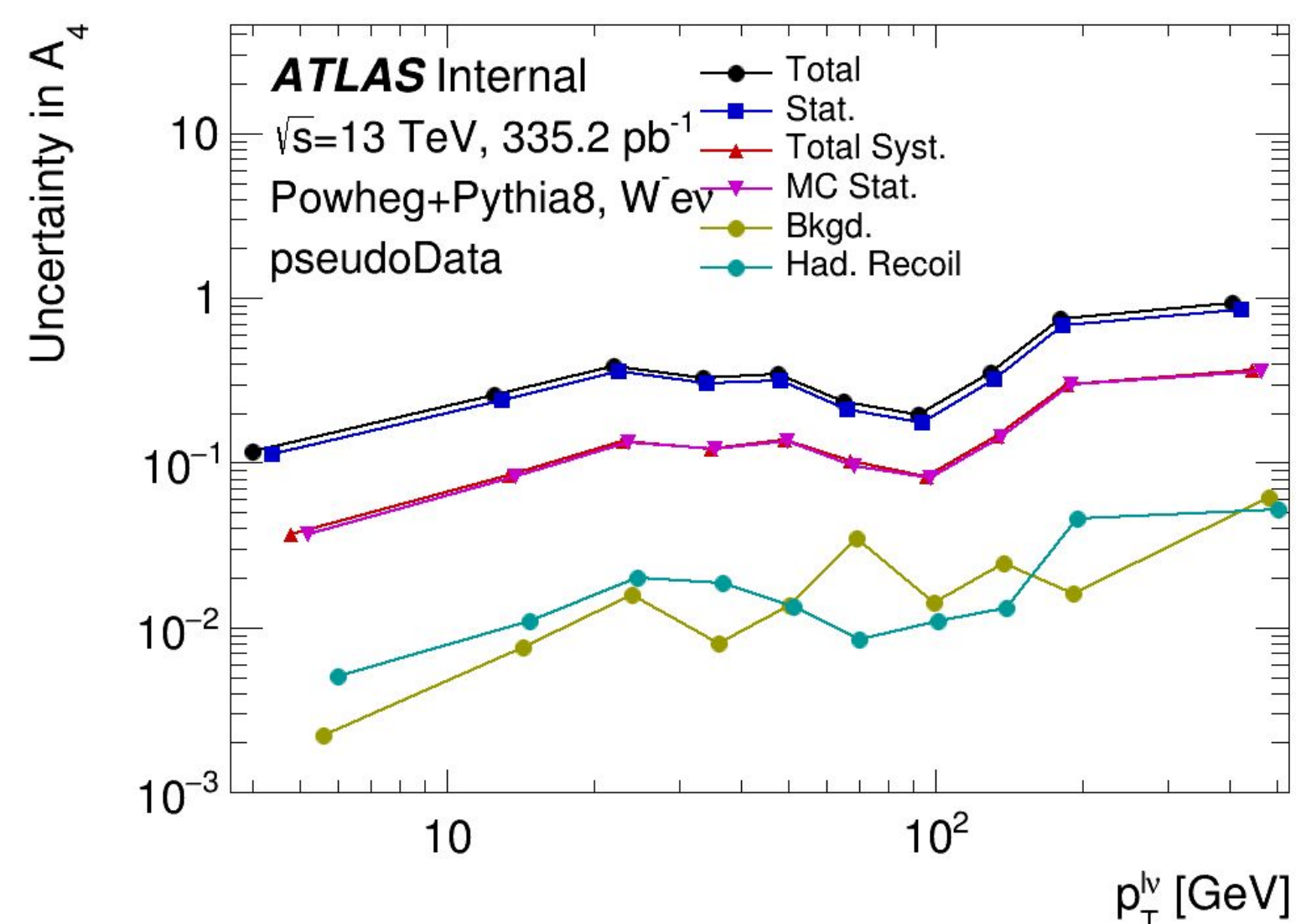
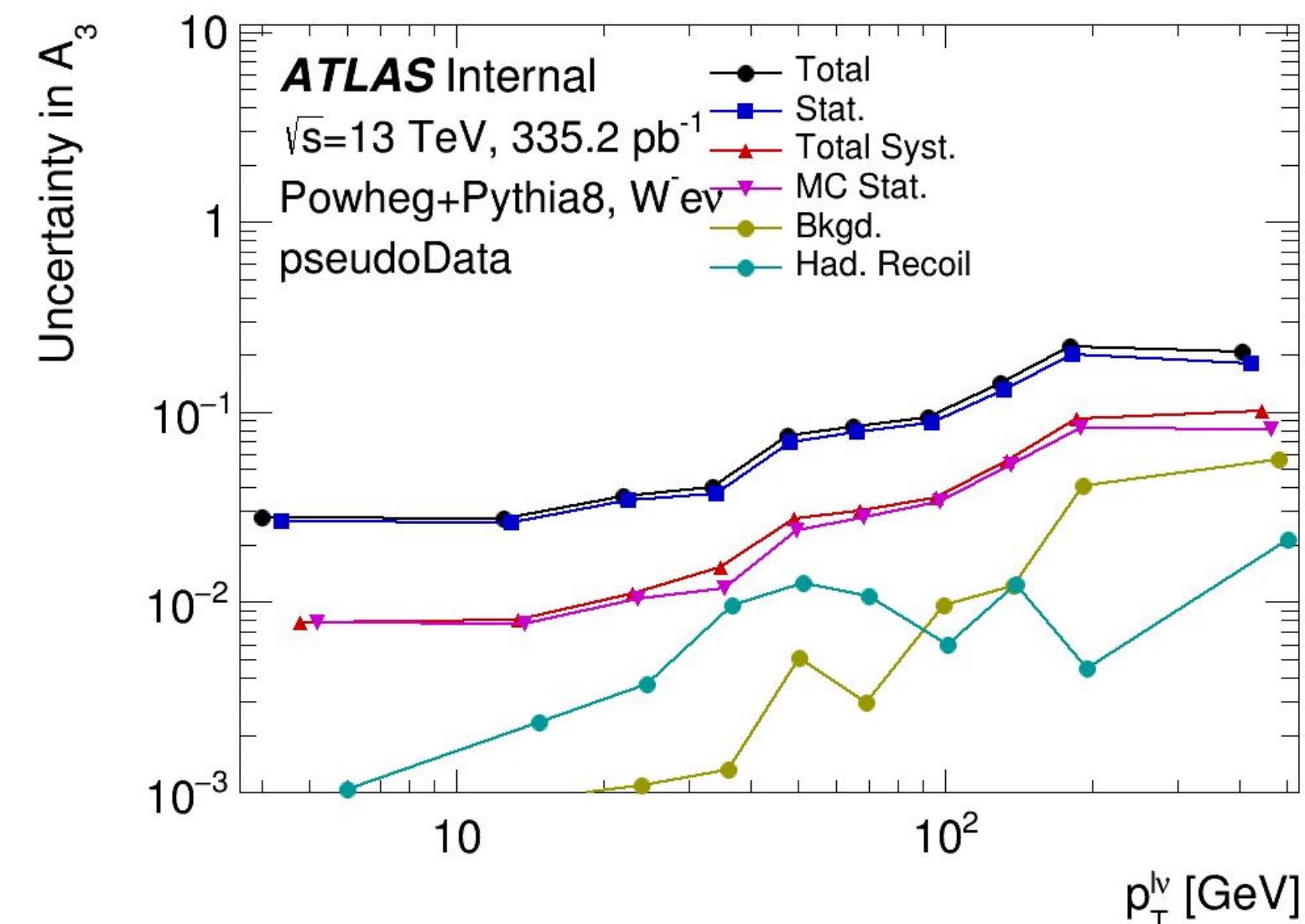
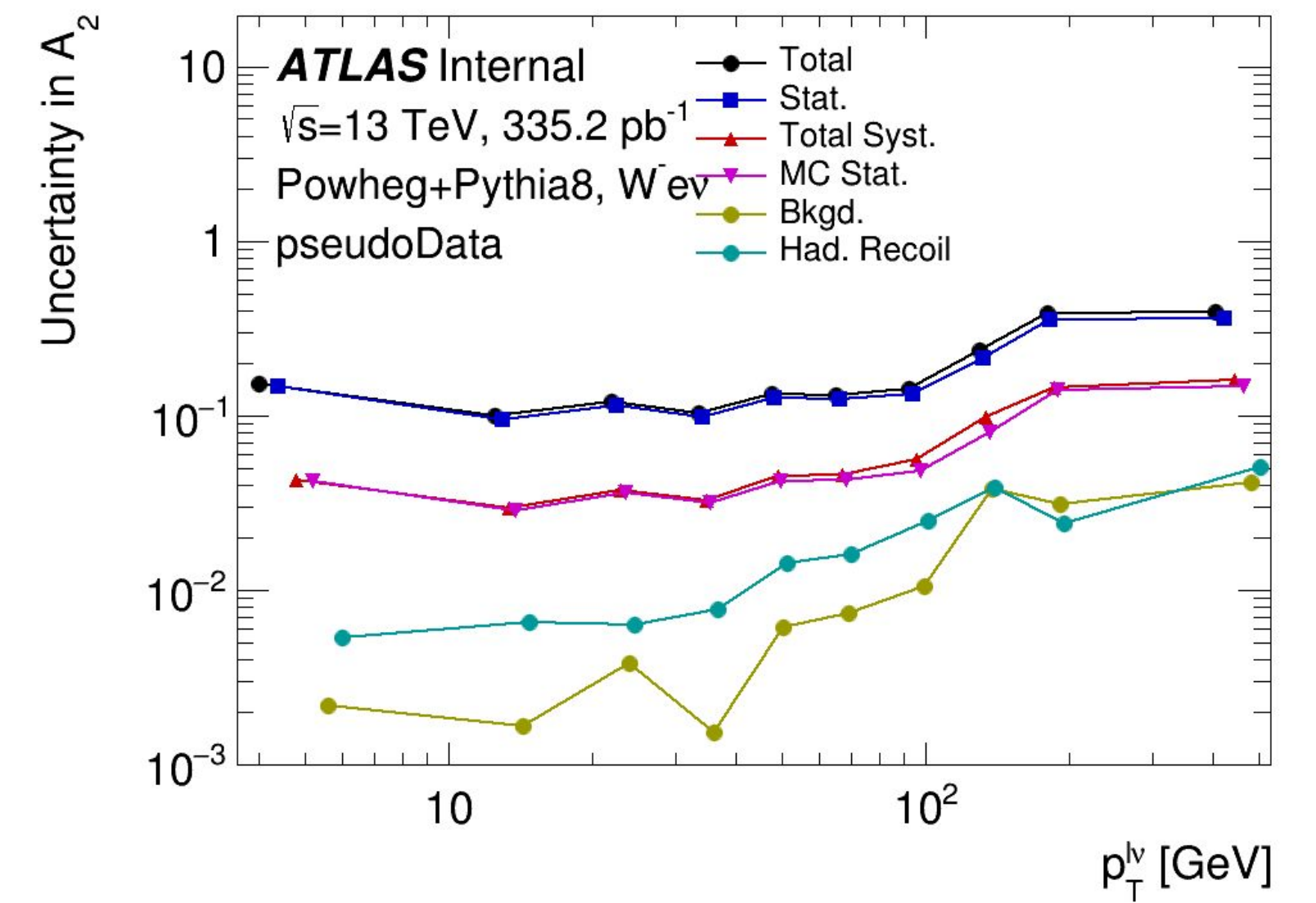
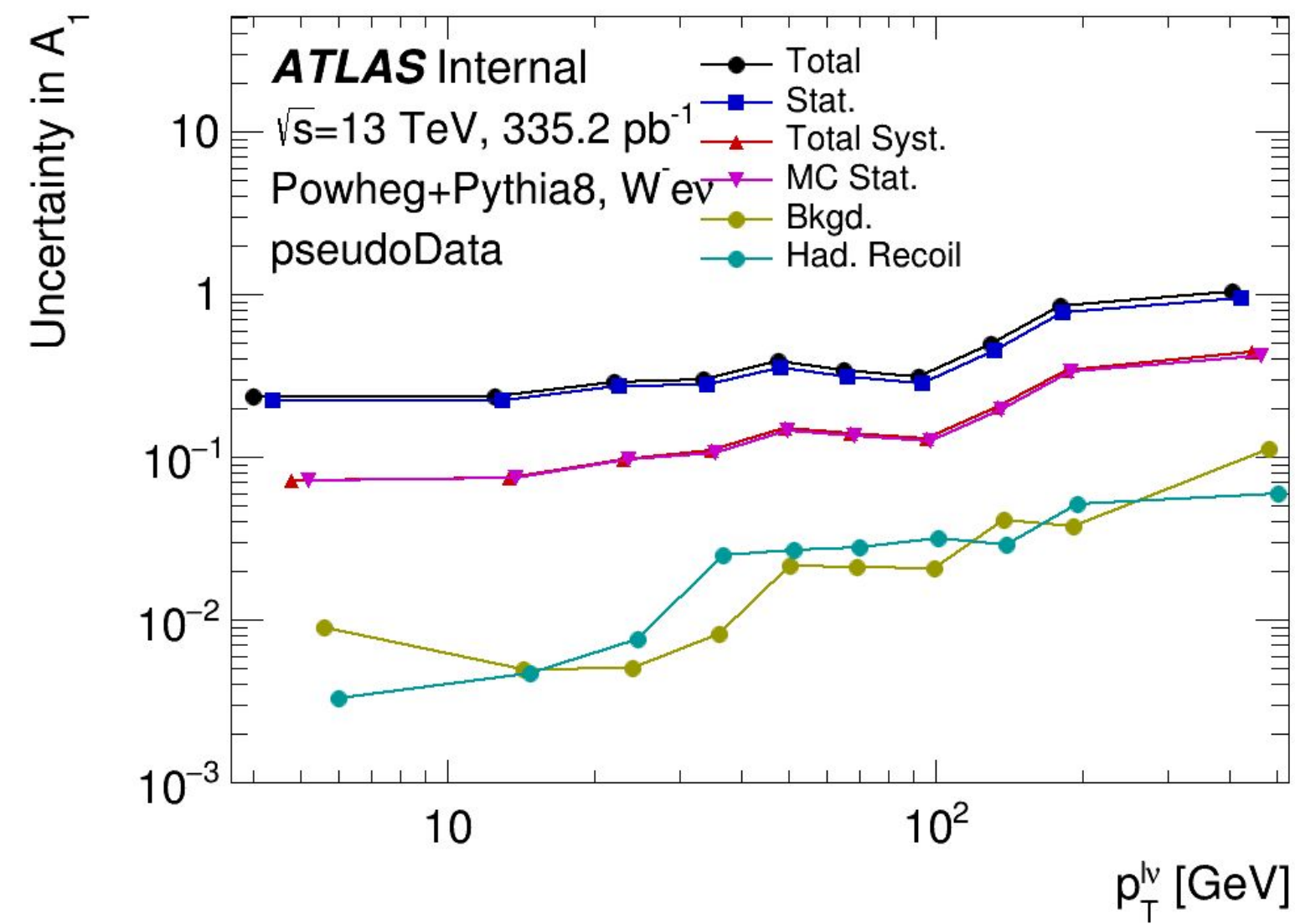
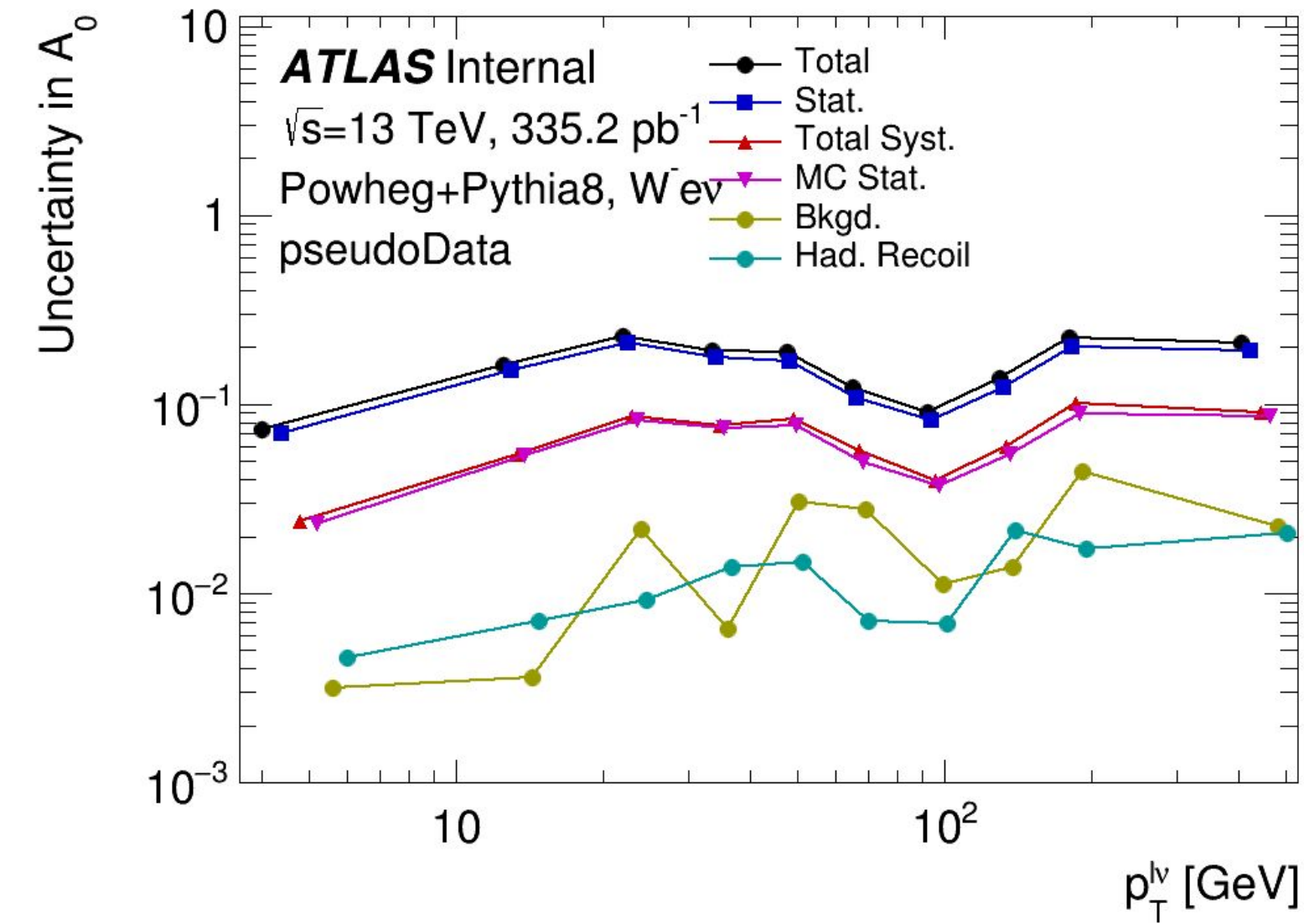
$$m_W = 80360 \pm 5 \text{ (stat.)} \pm 15 \text{ (syst.)} = 80360 \pm 16 \text{ MeV}$$

Obs.	Mean [MeV]	Elec. Unc.	PDF Unc.	Muon Unc.	EW Unc.	PS & A_i Unc.	Bkg. Unc.	Γ_W Unc.	MC stat. Unc.	Lumi Unc.	Recoil Unc.	Total sys.	Data stat.	Total Unc.
p_T^ℓ	80360.1	8.0	7.7	7.0	6.0	4.7	2.4	2.0	1.9	1.2	0.6	15.5	4.9	16.3
m_T	80382.2	9.2	14.6	9.8	5.9	10.3	6.0	7.0	2.4	1.8	11.7	24.4	6.7	25.3

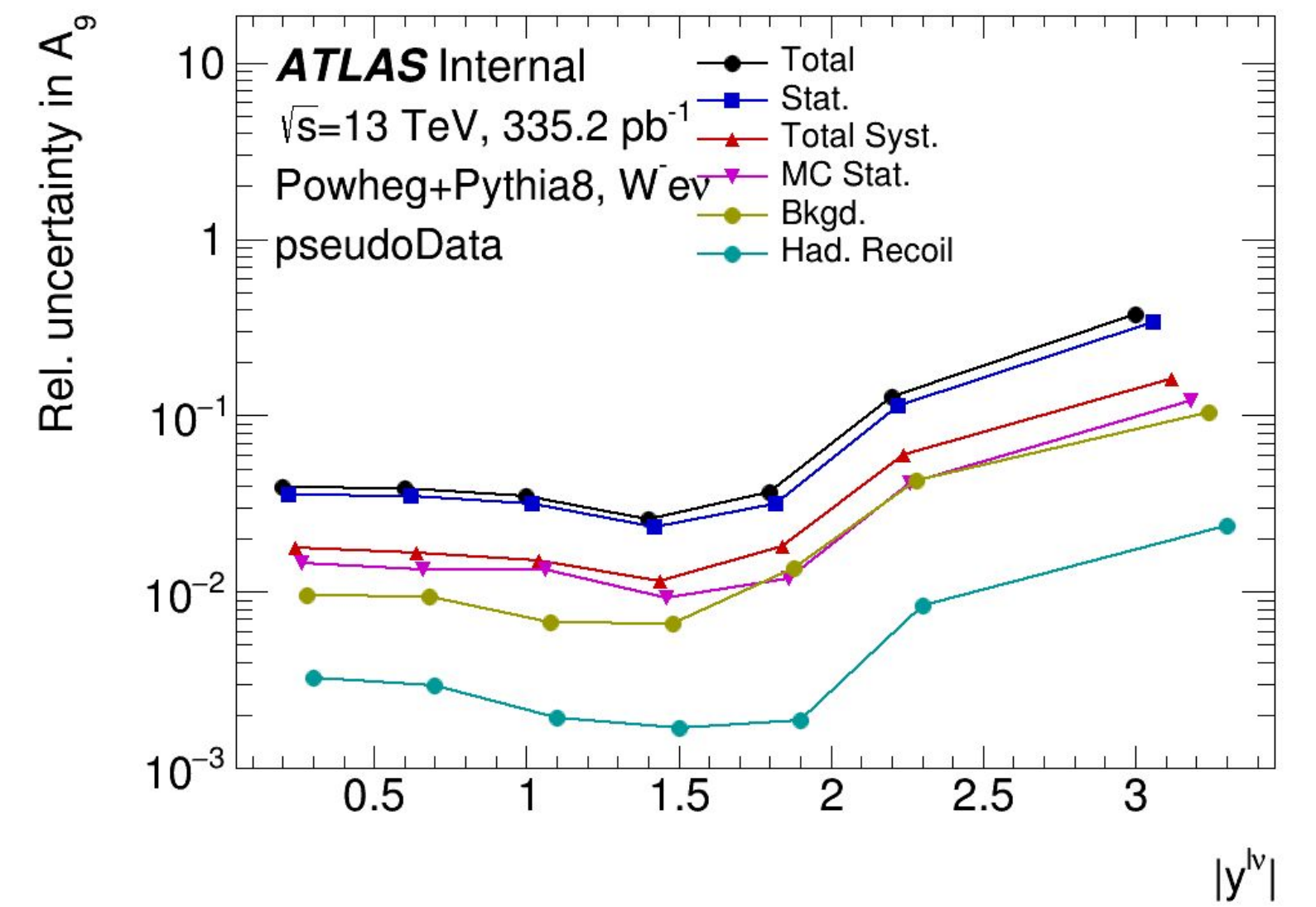
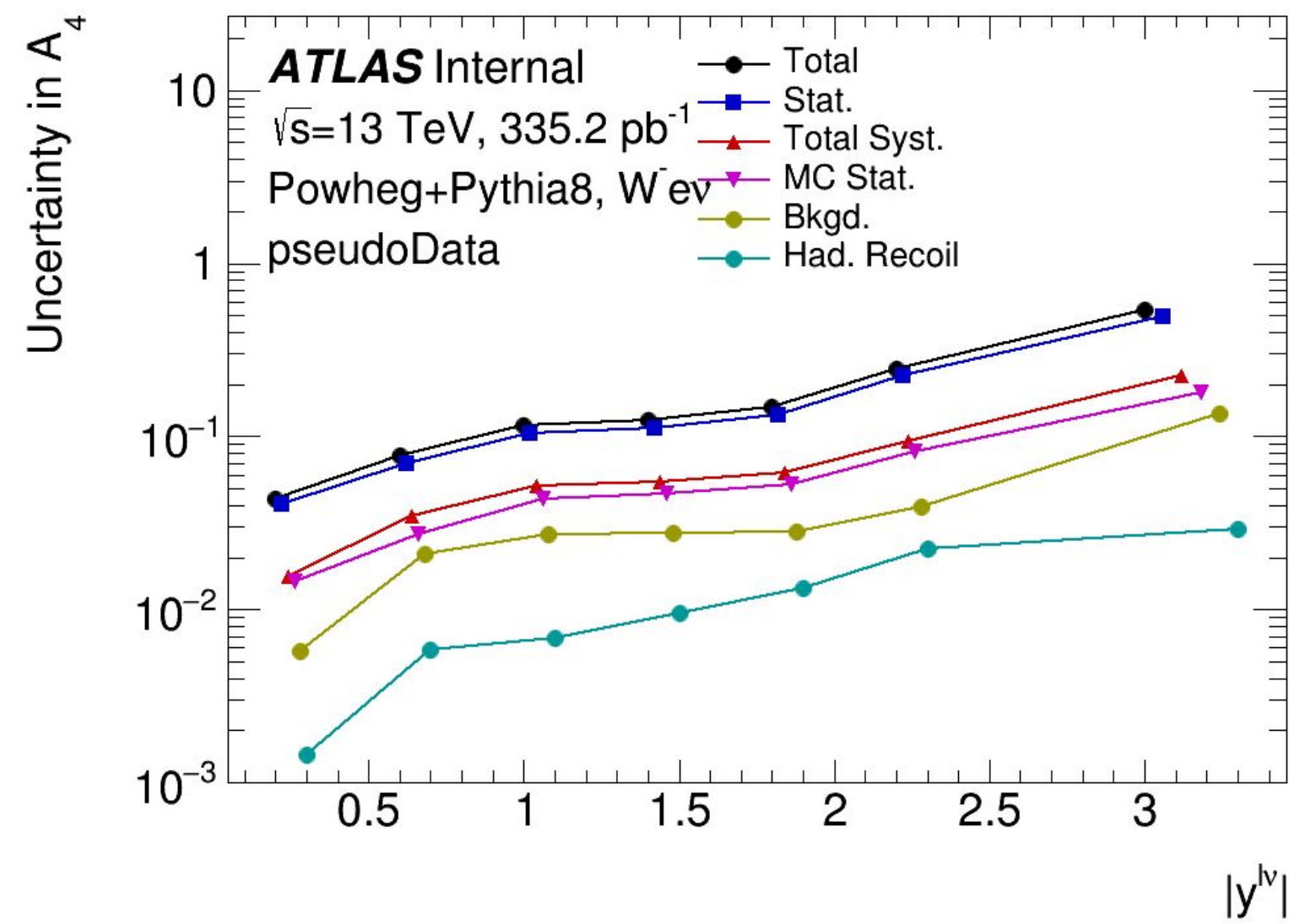
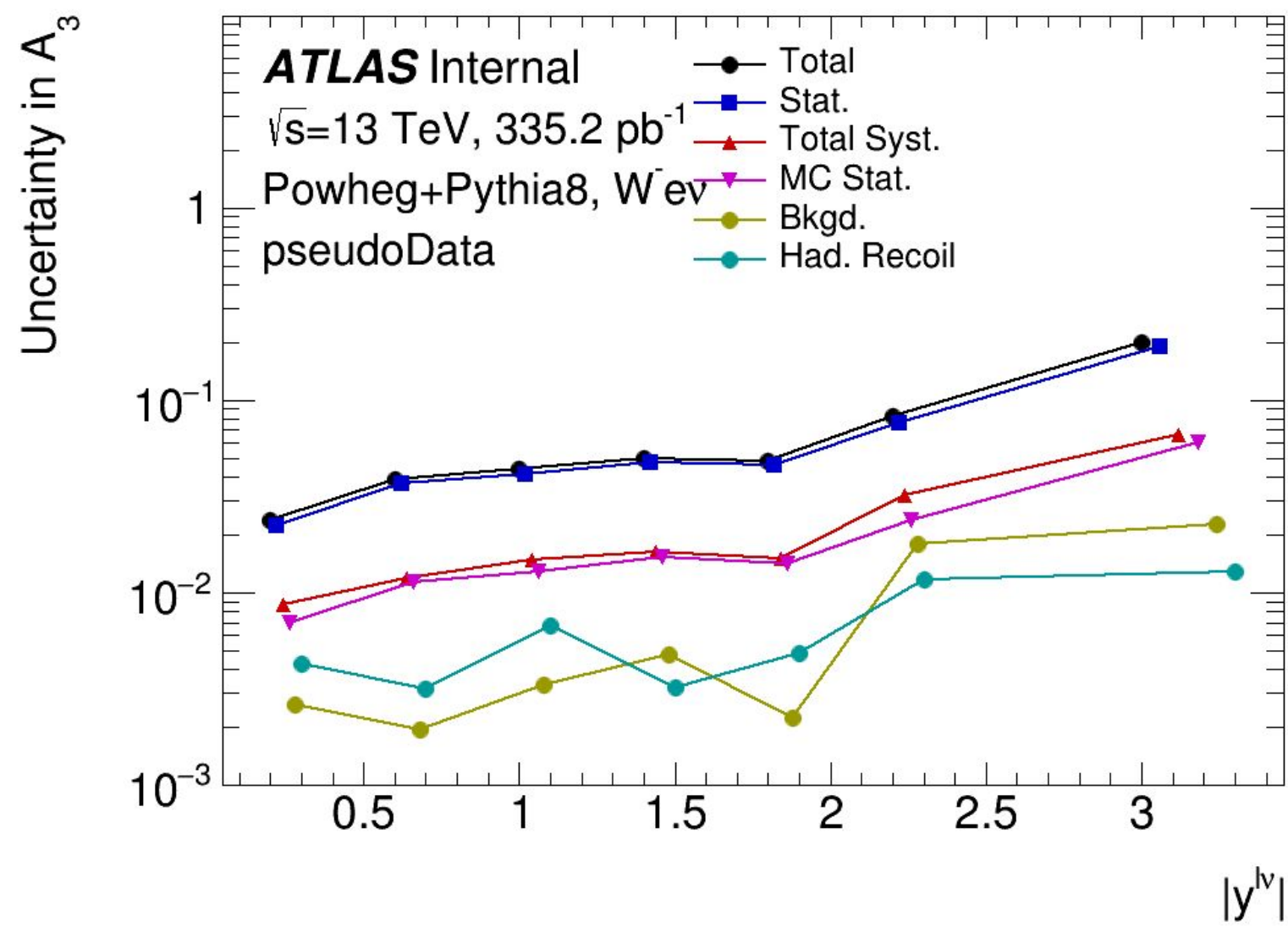
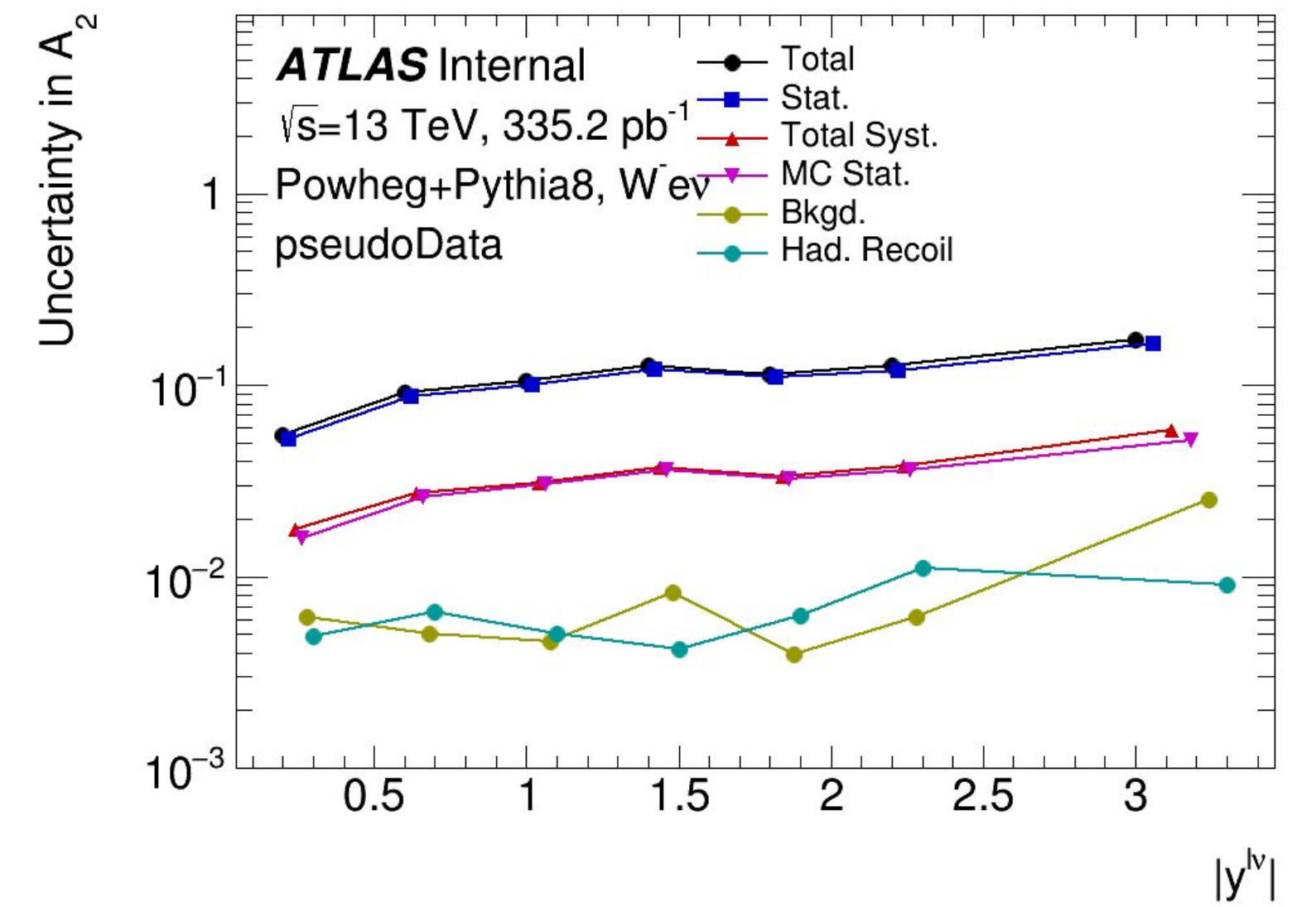
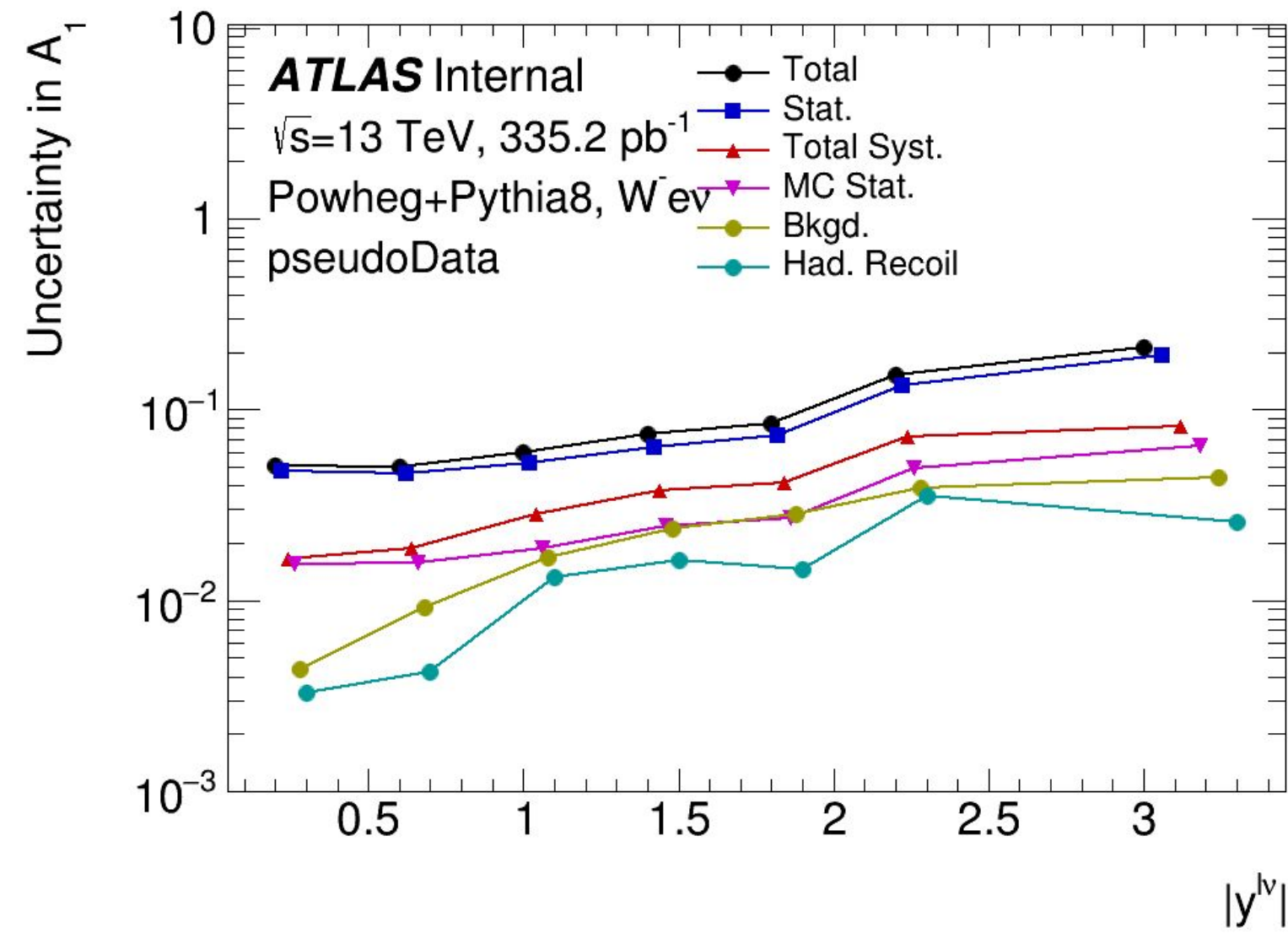
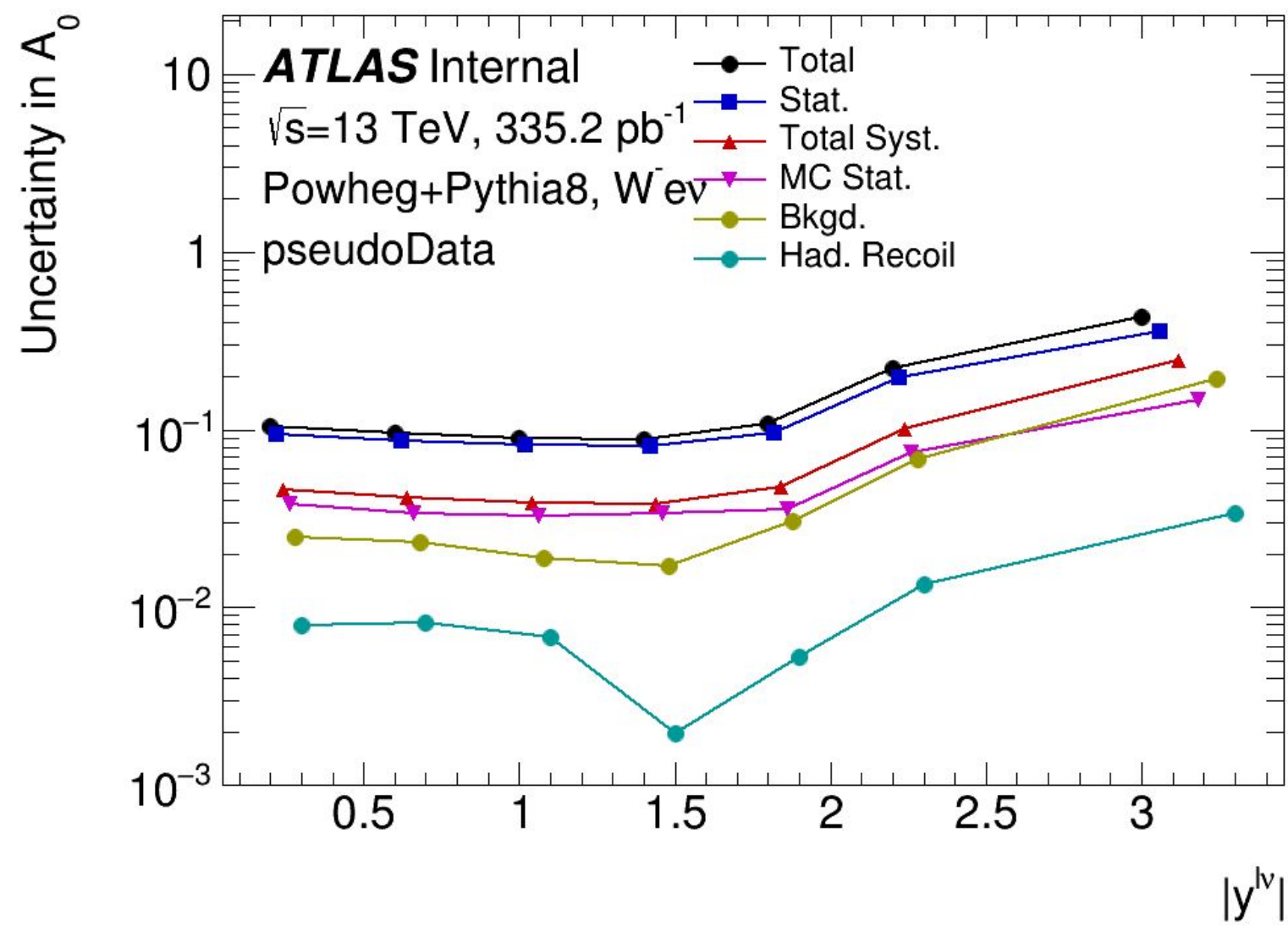
[2] <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-017-5475-4>

[3] <https://cds.cern.ch/record/2853290>

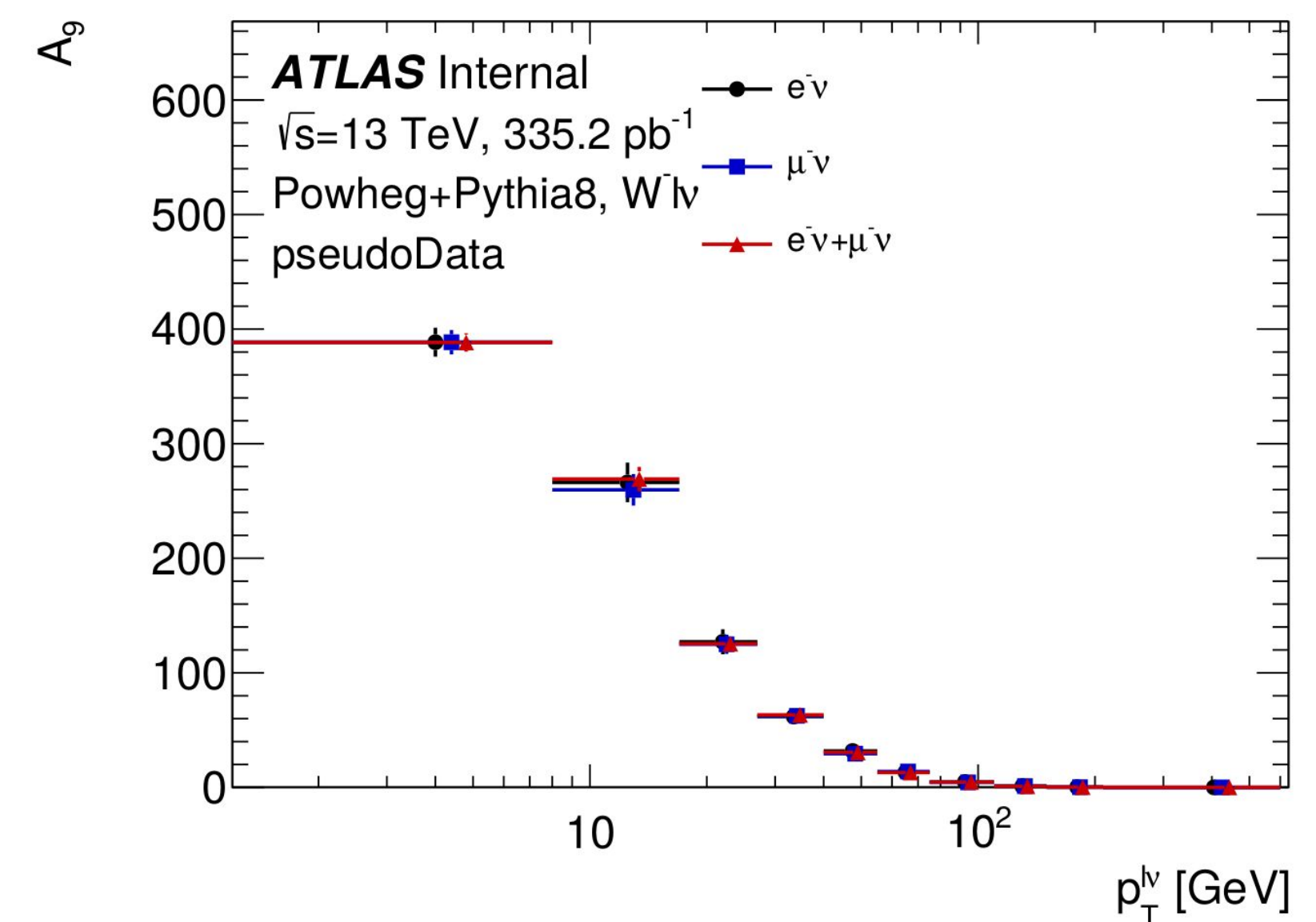
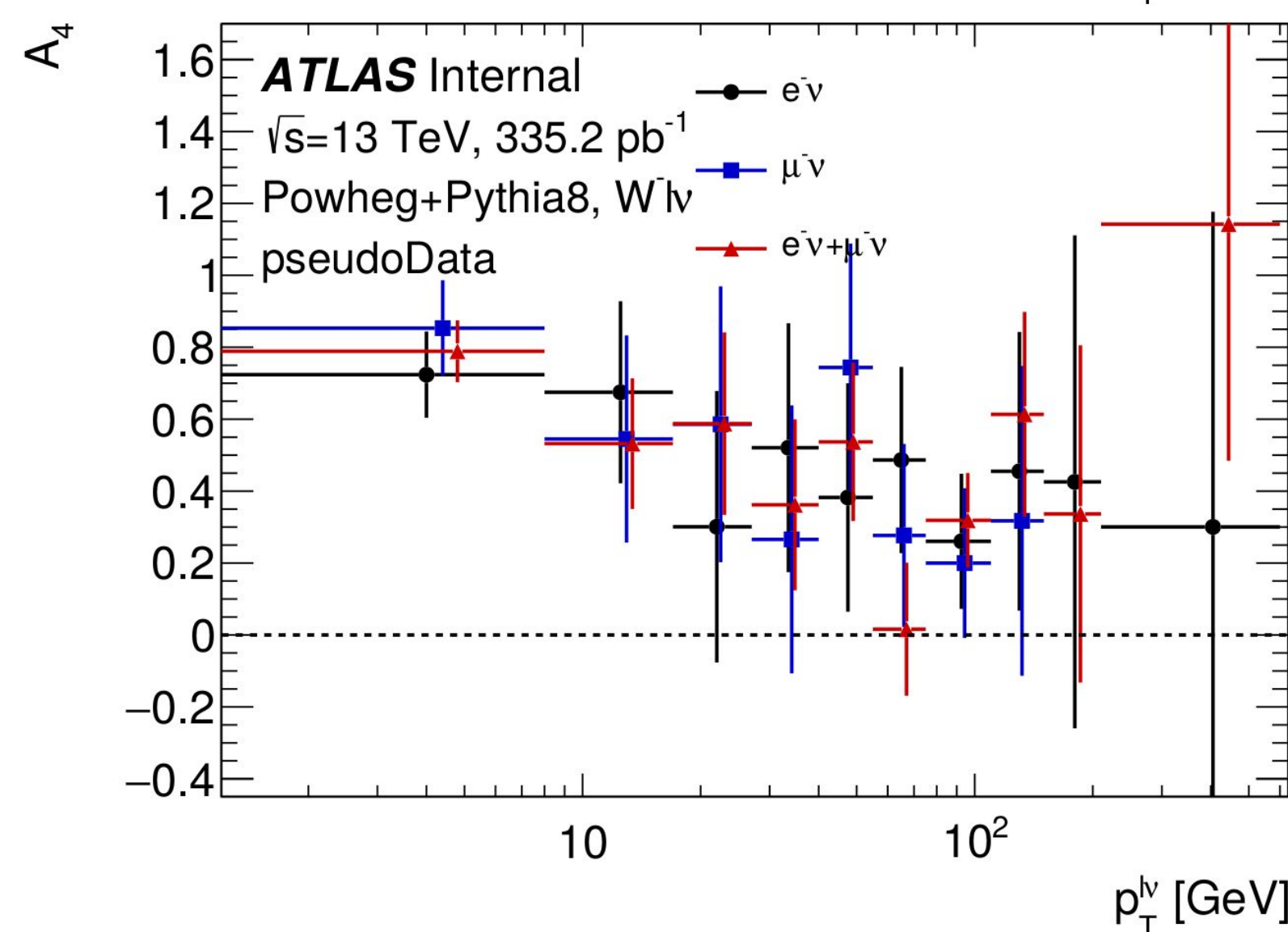
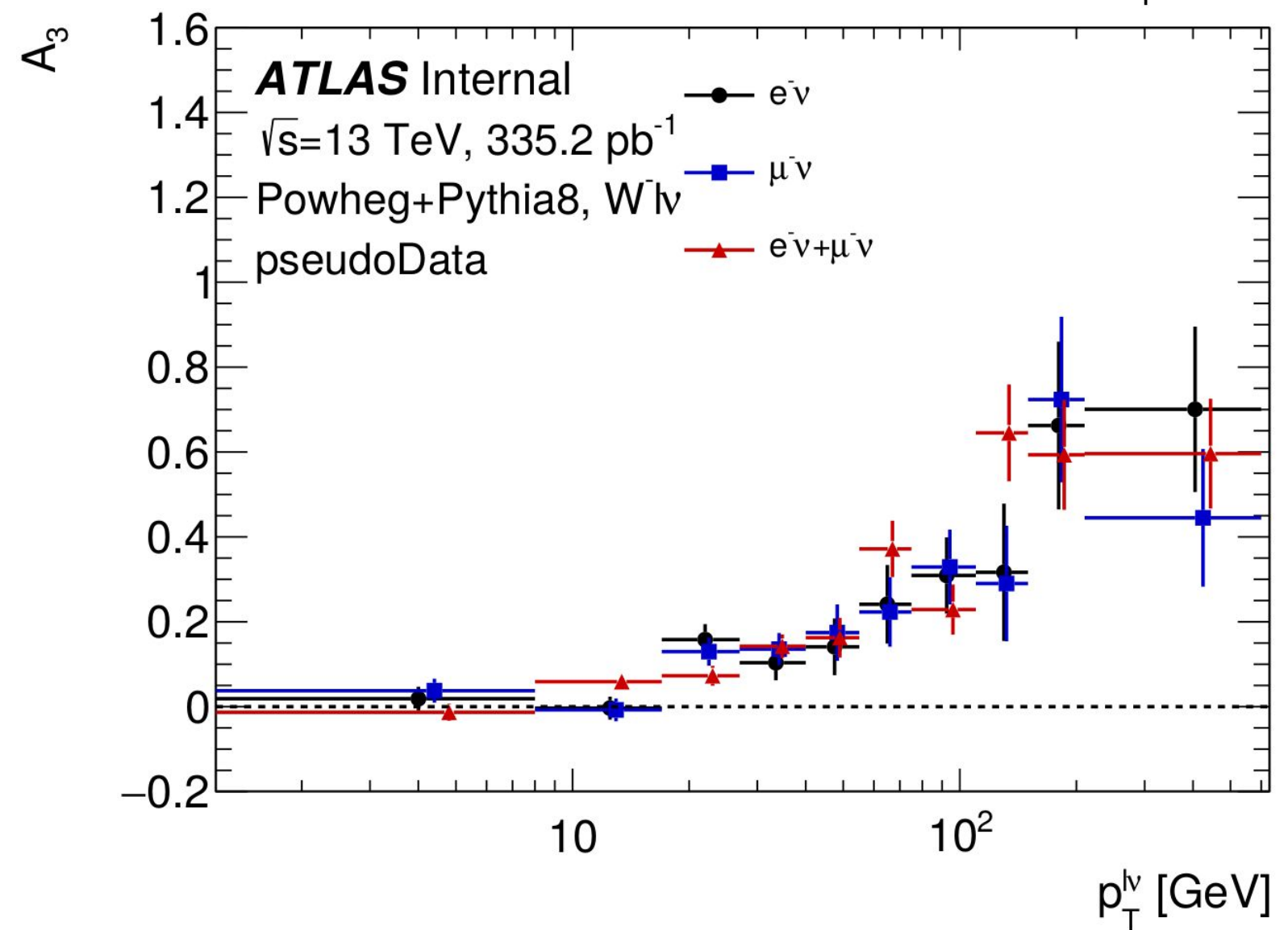
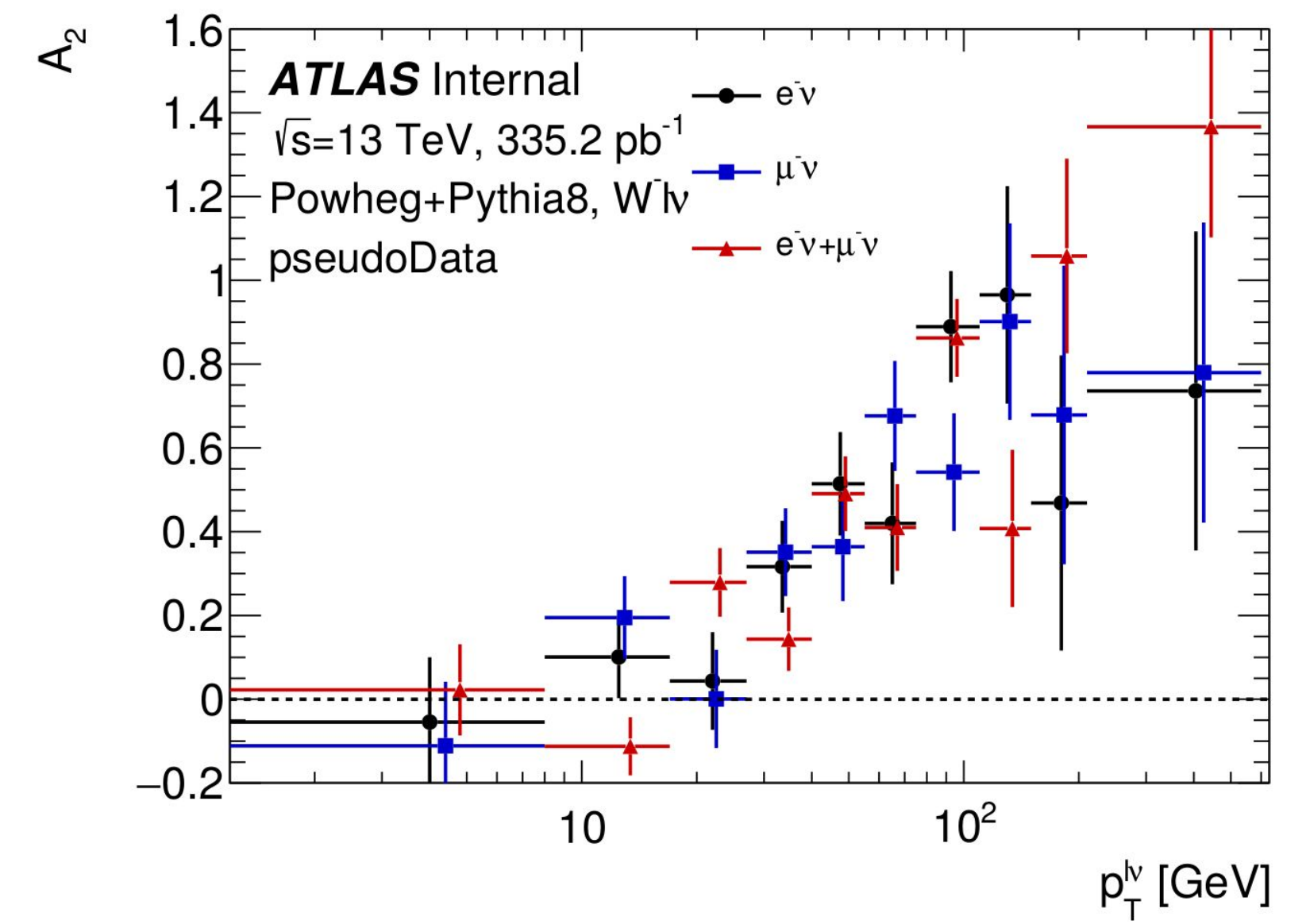
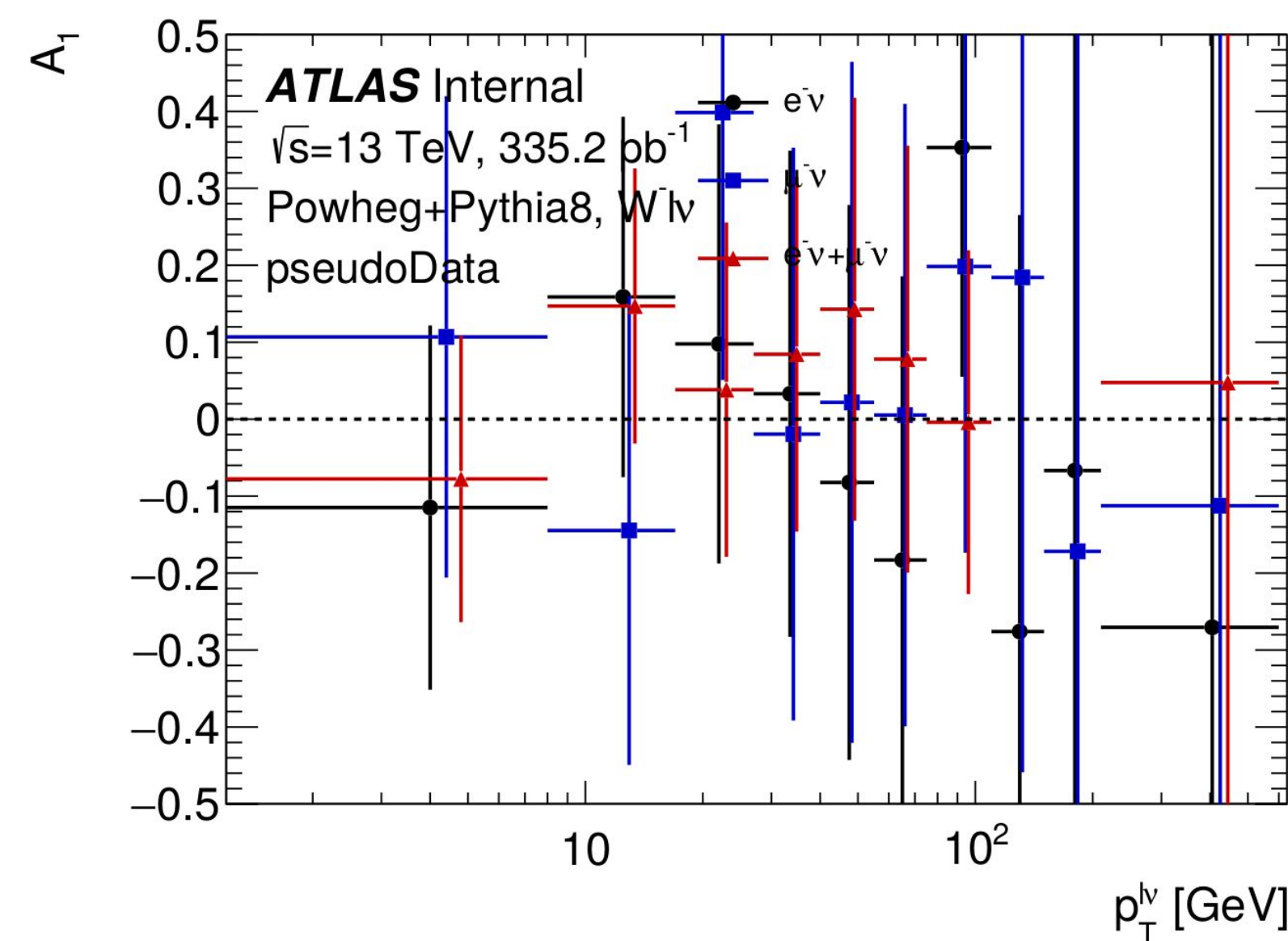
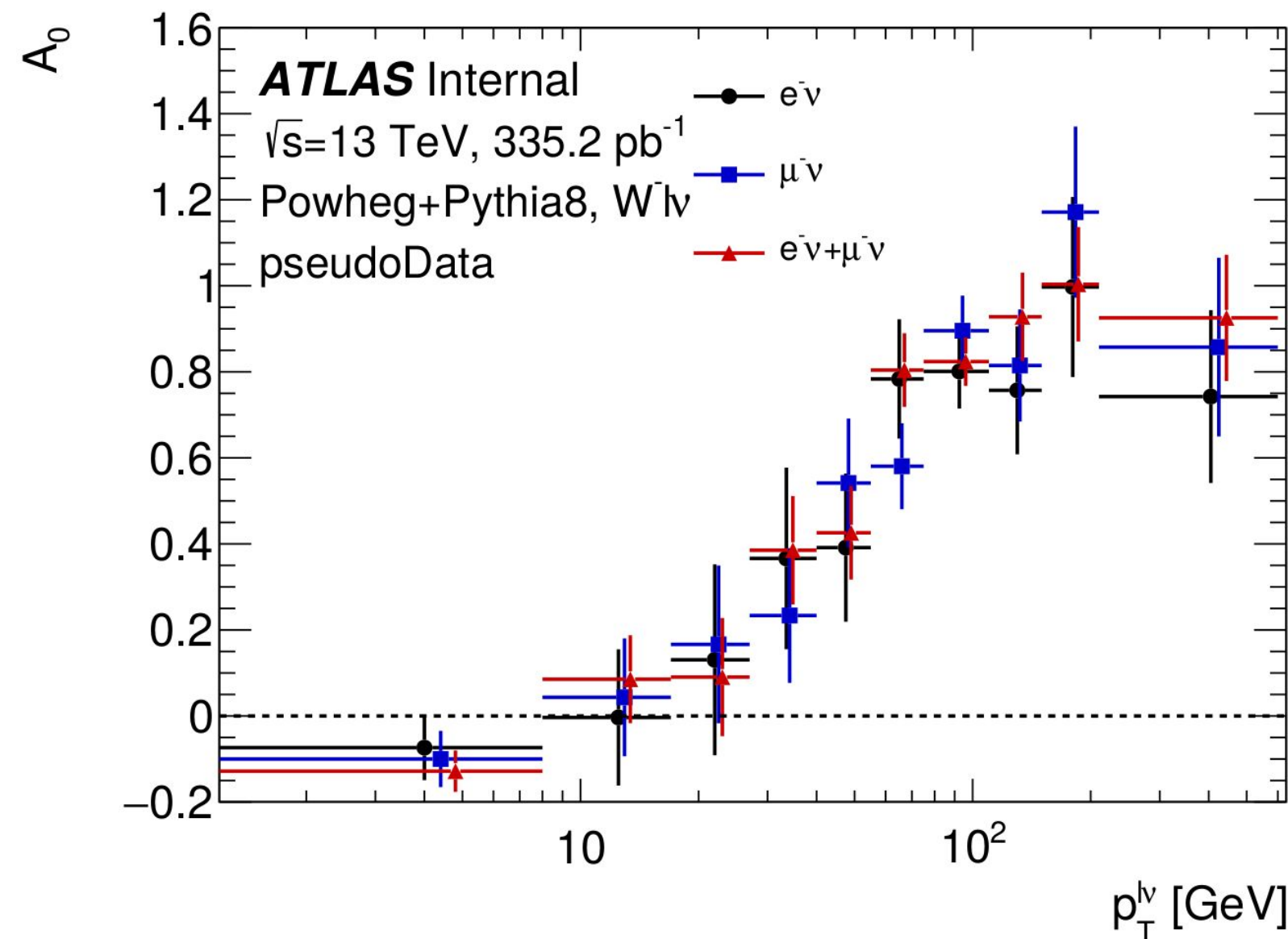
Погрешности



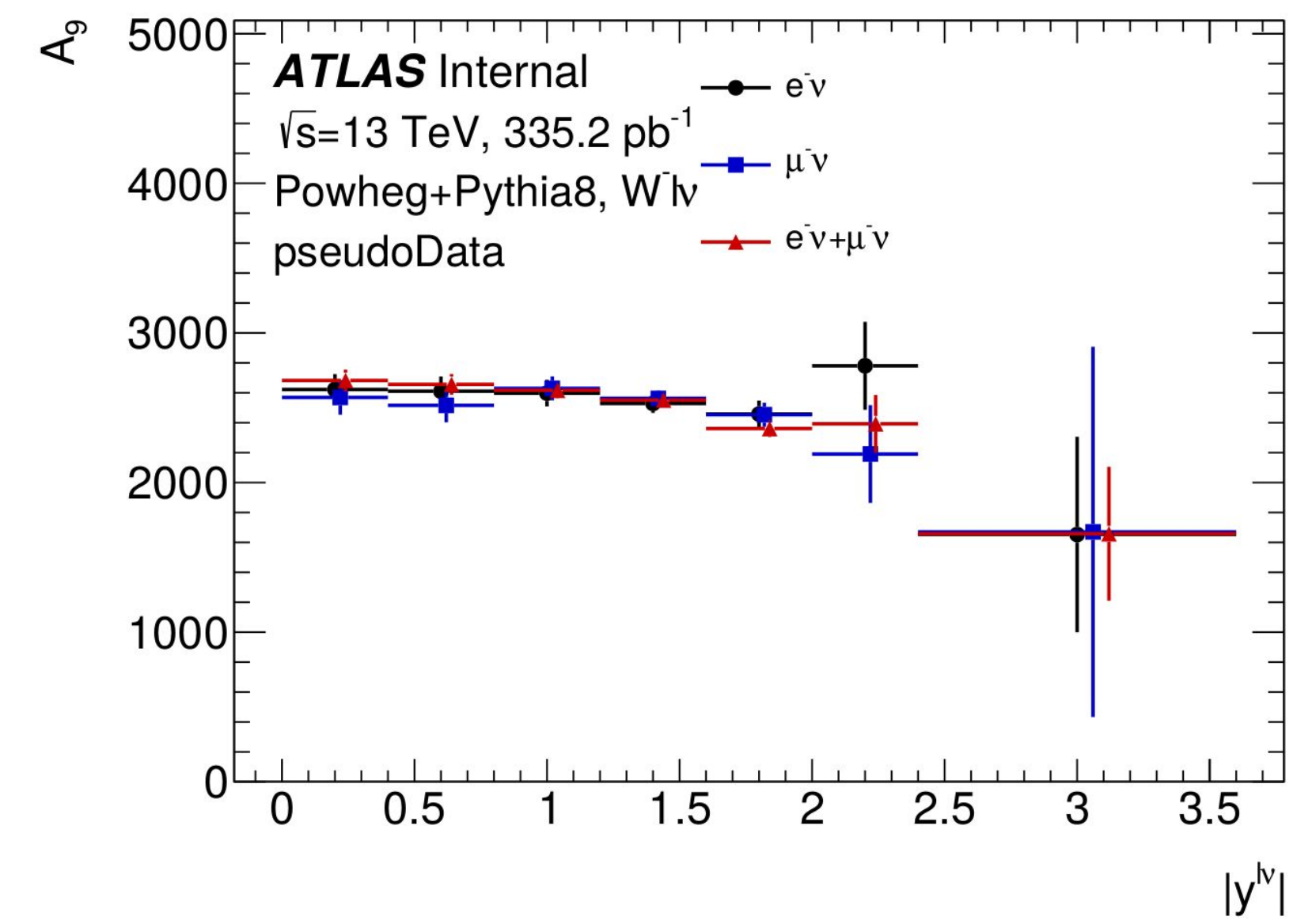
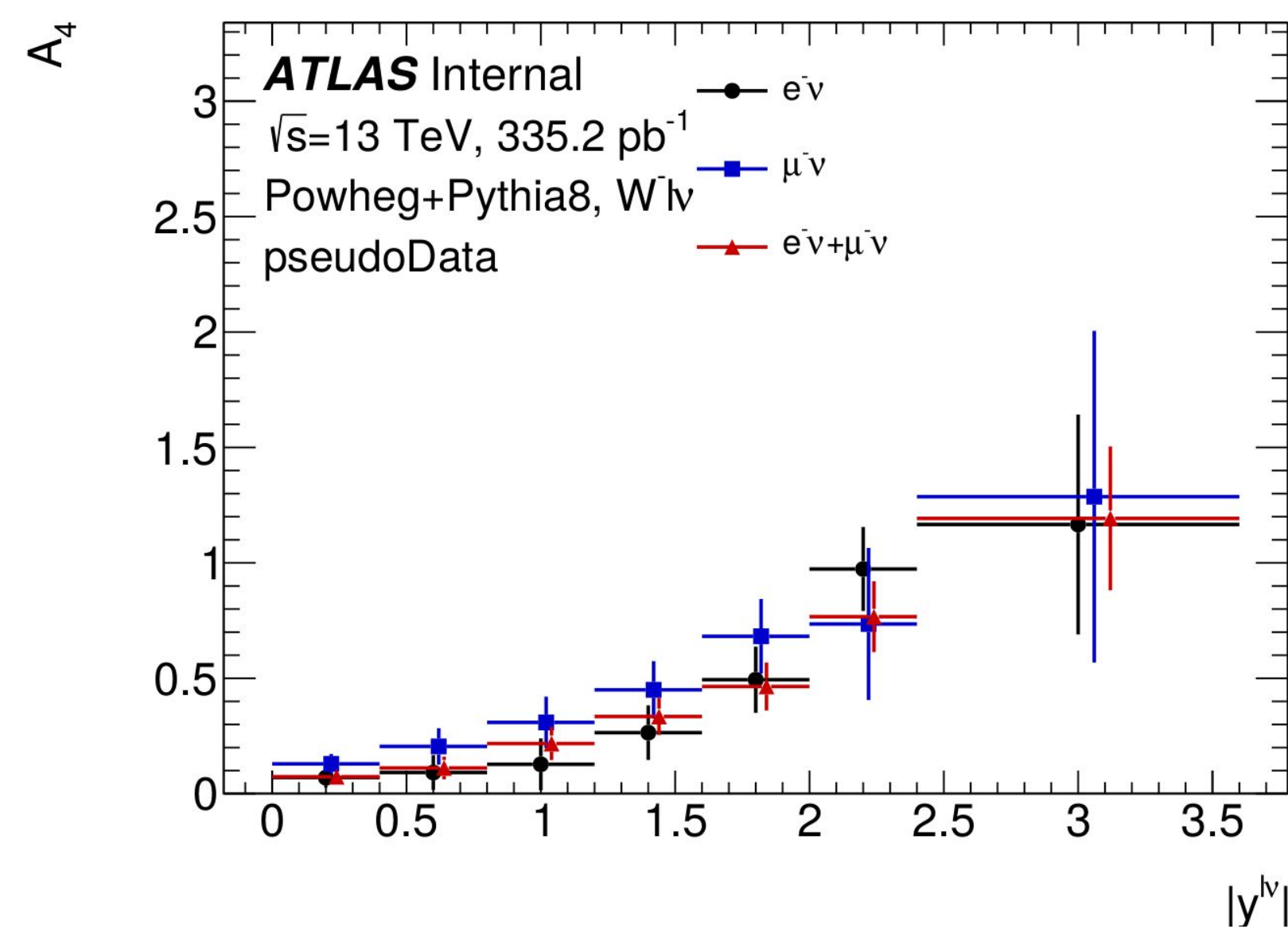
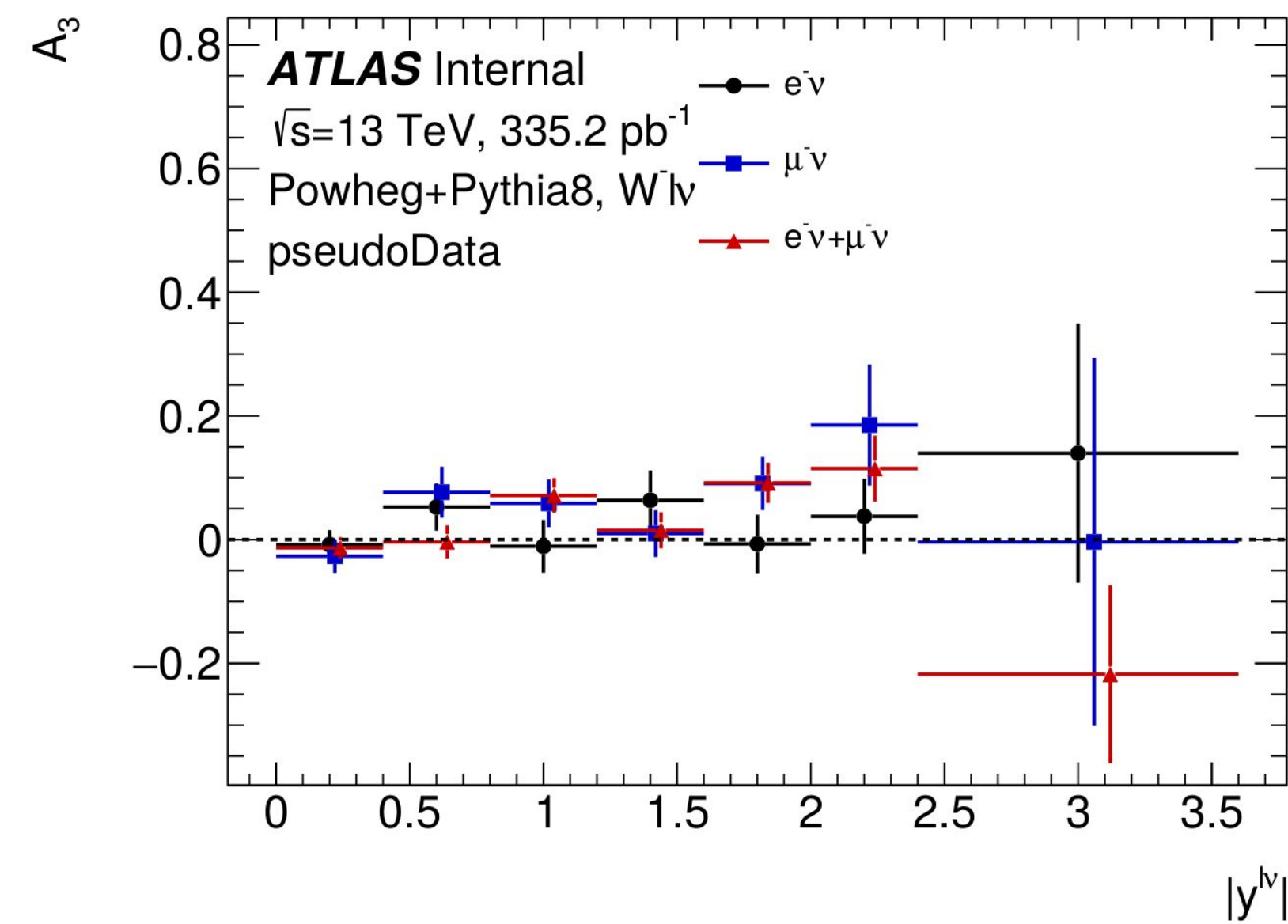
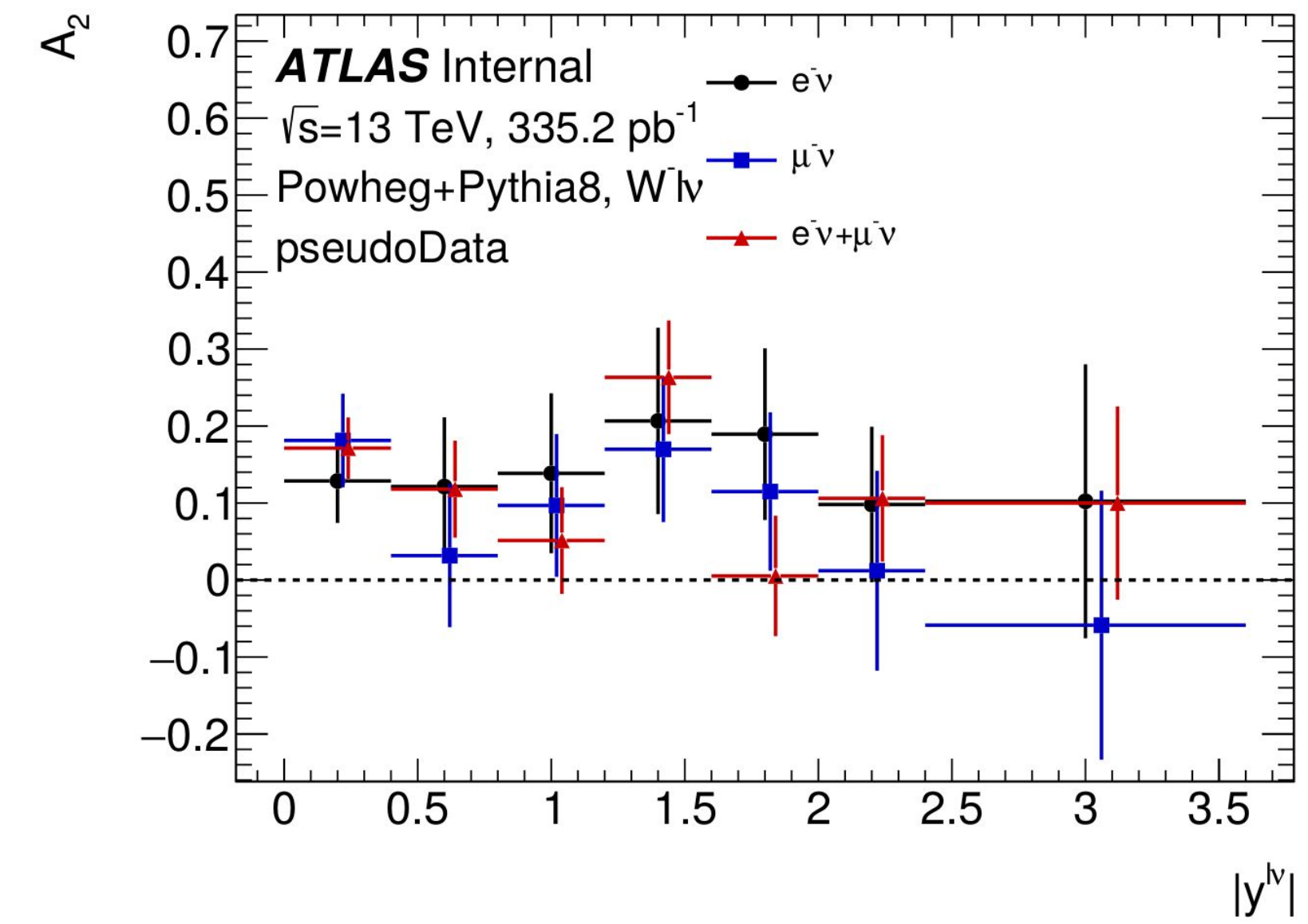
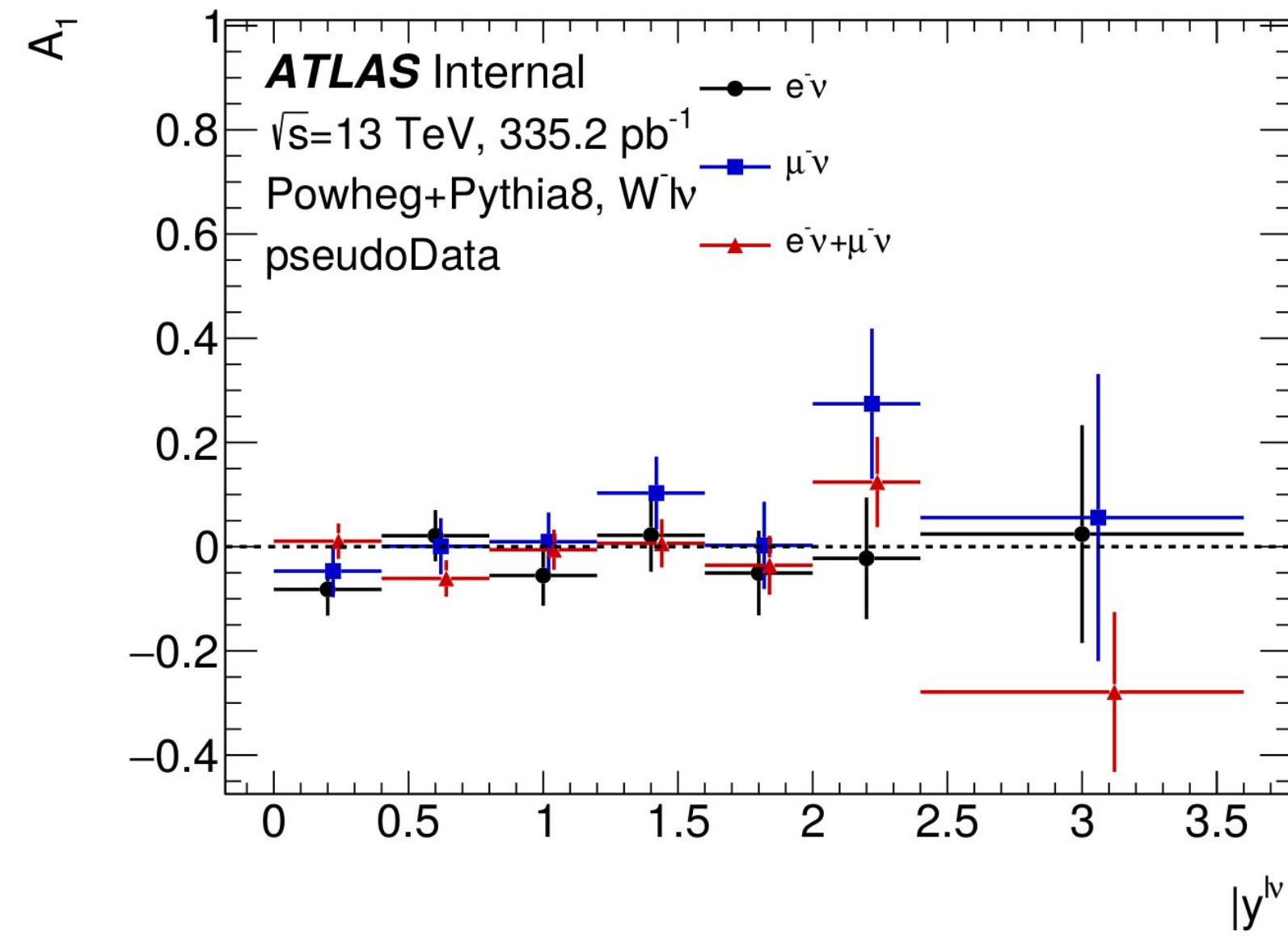
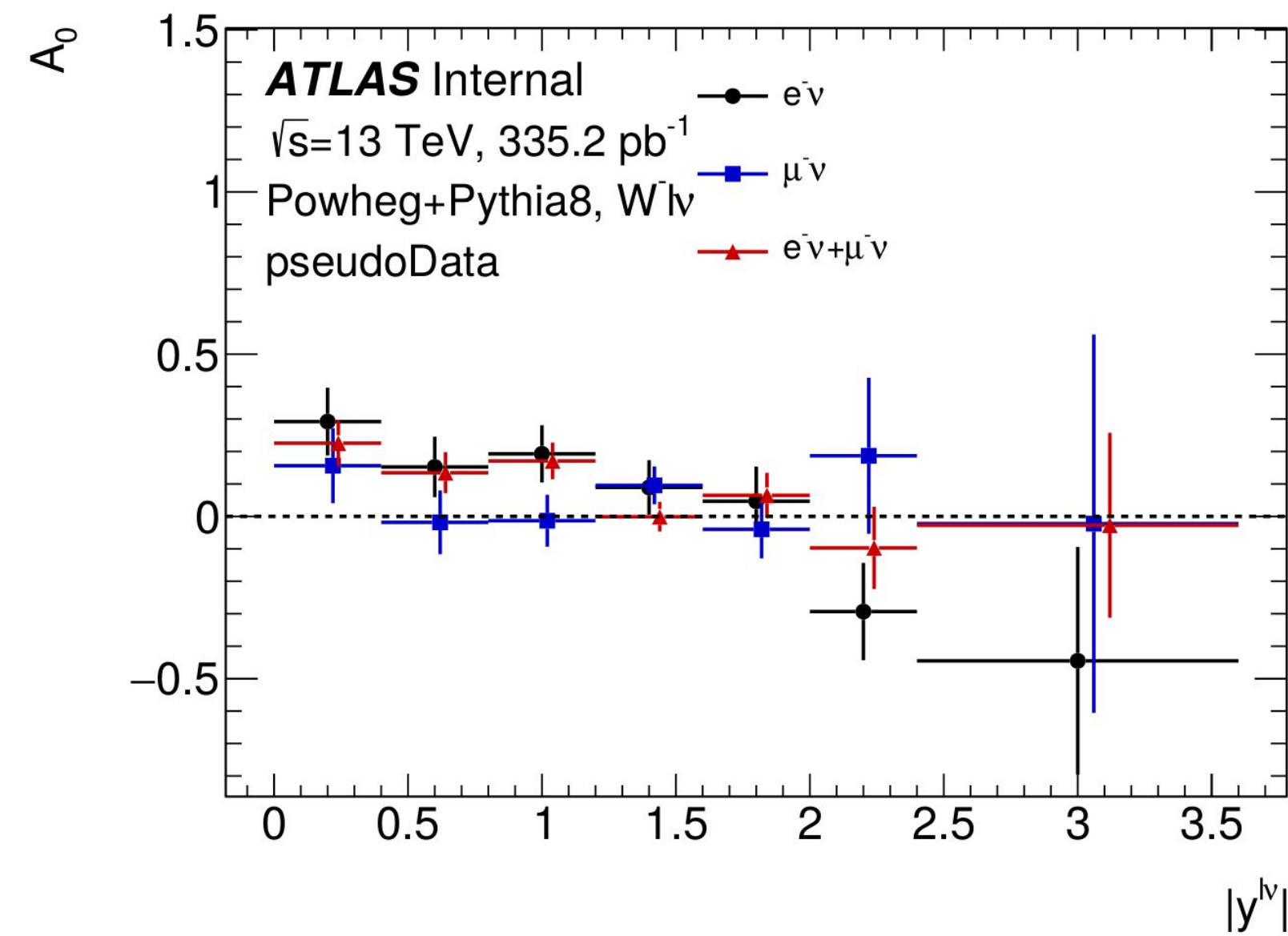
Погрешности



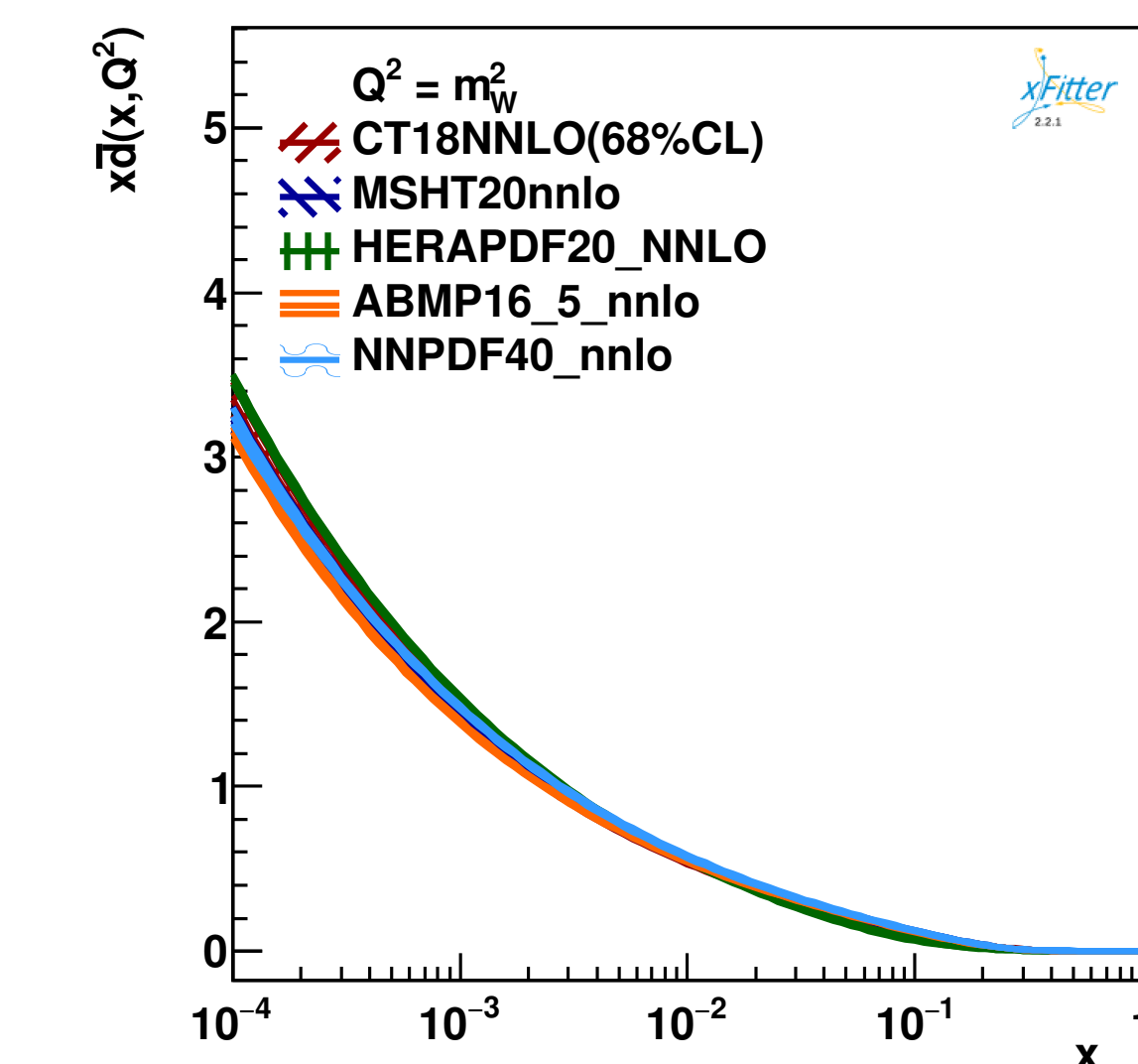
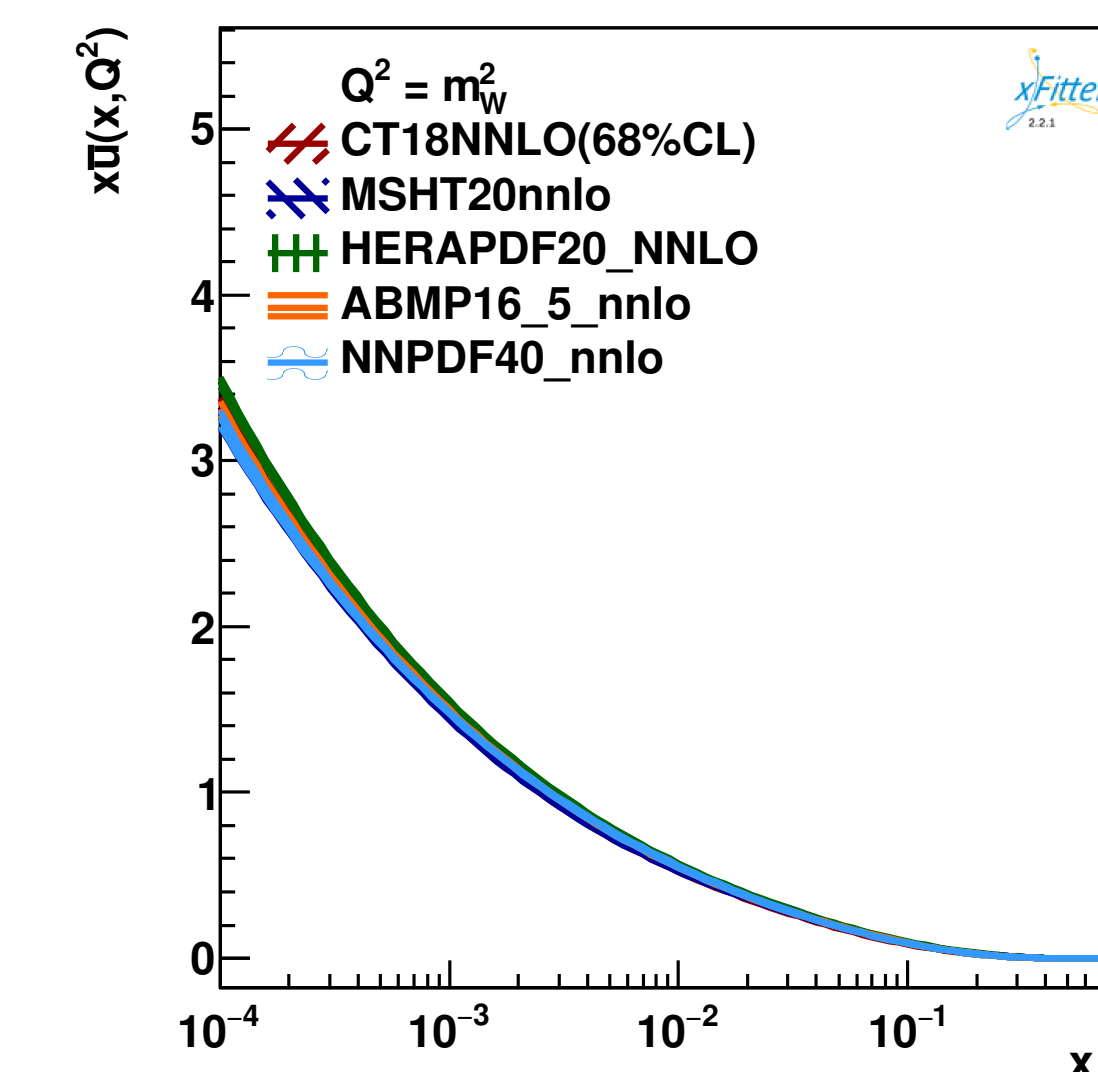
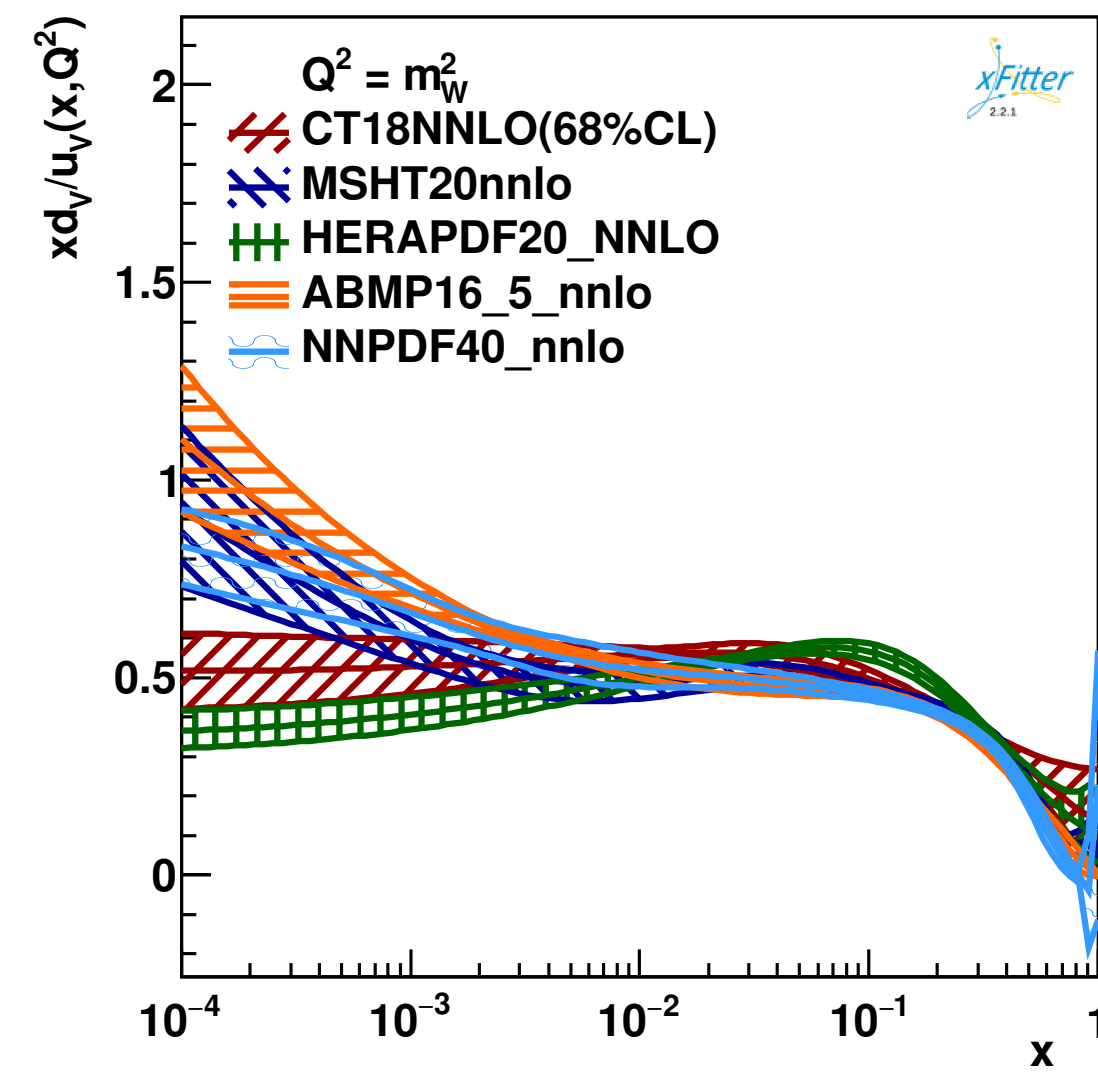
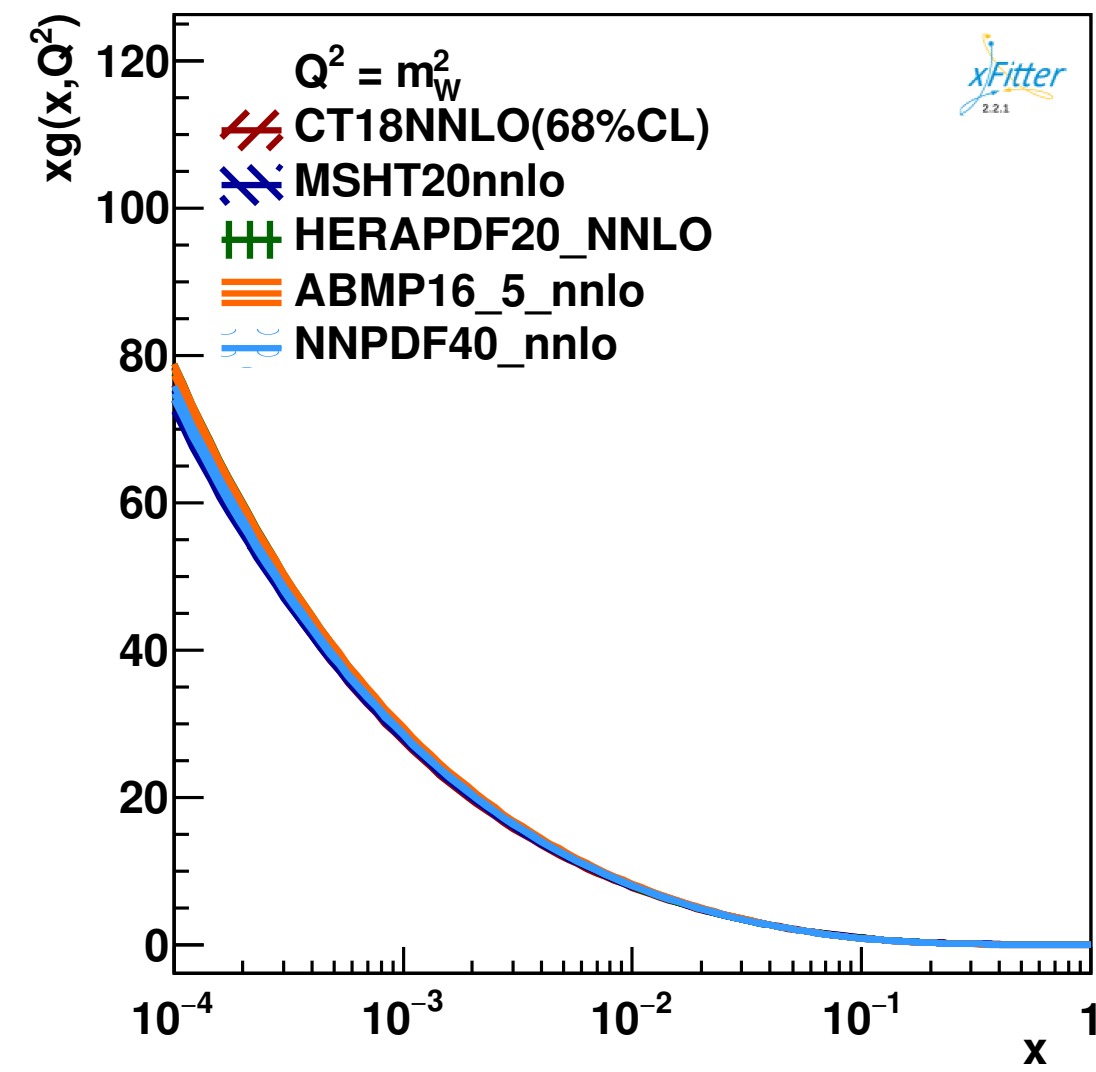
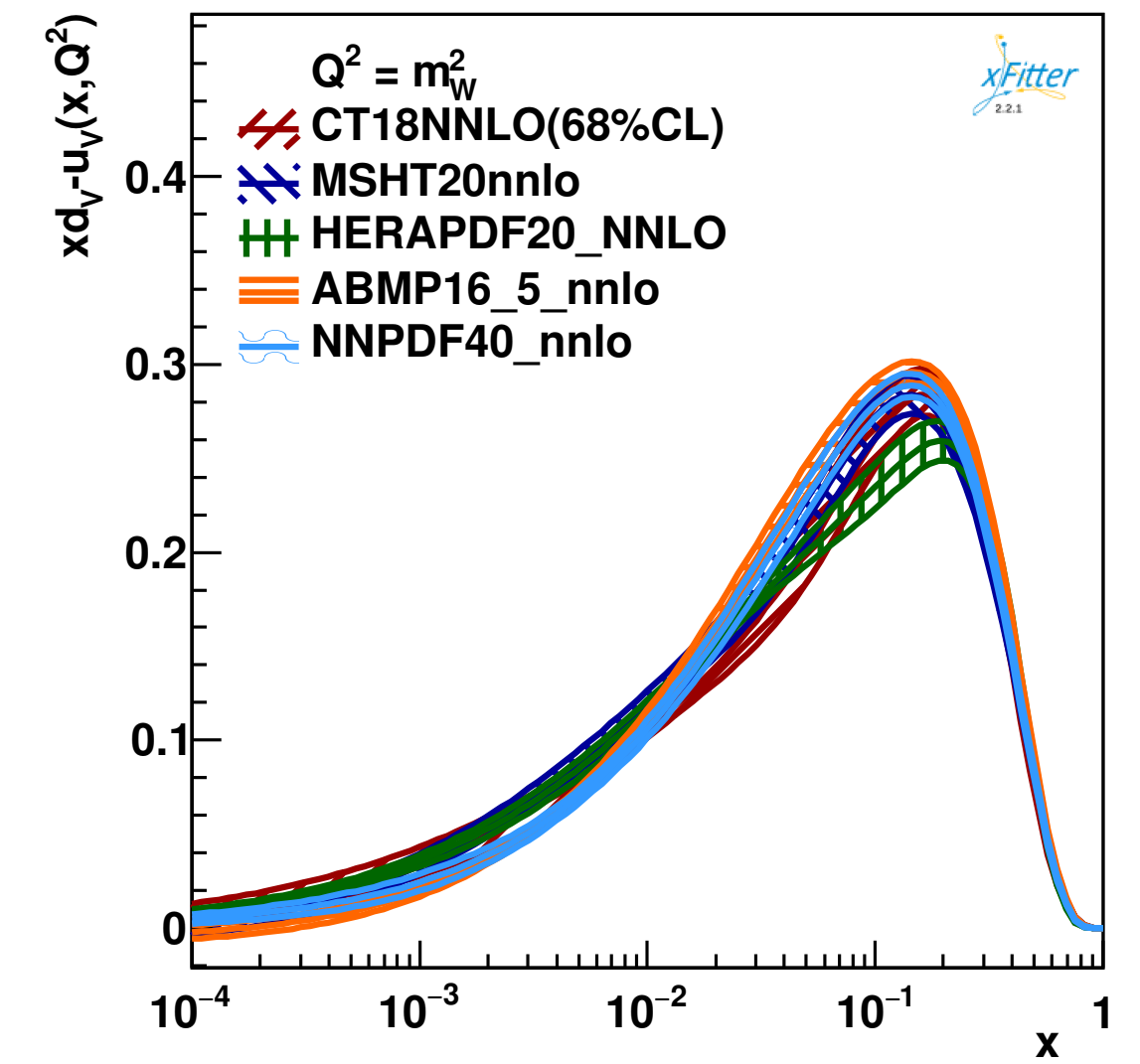
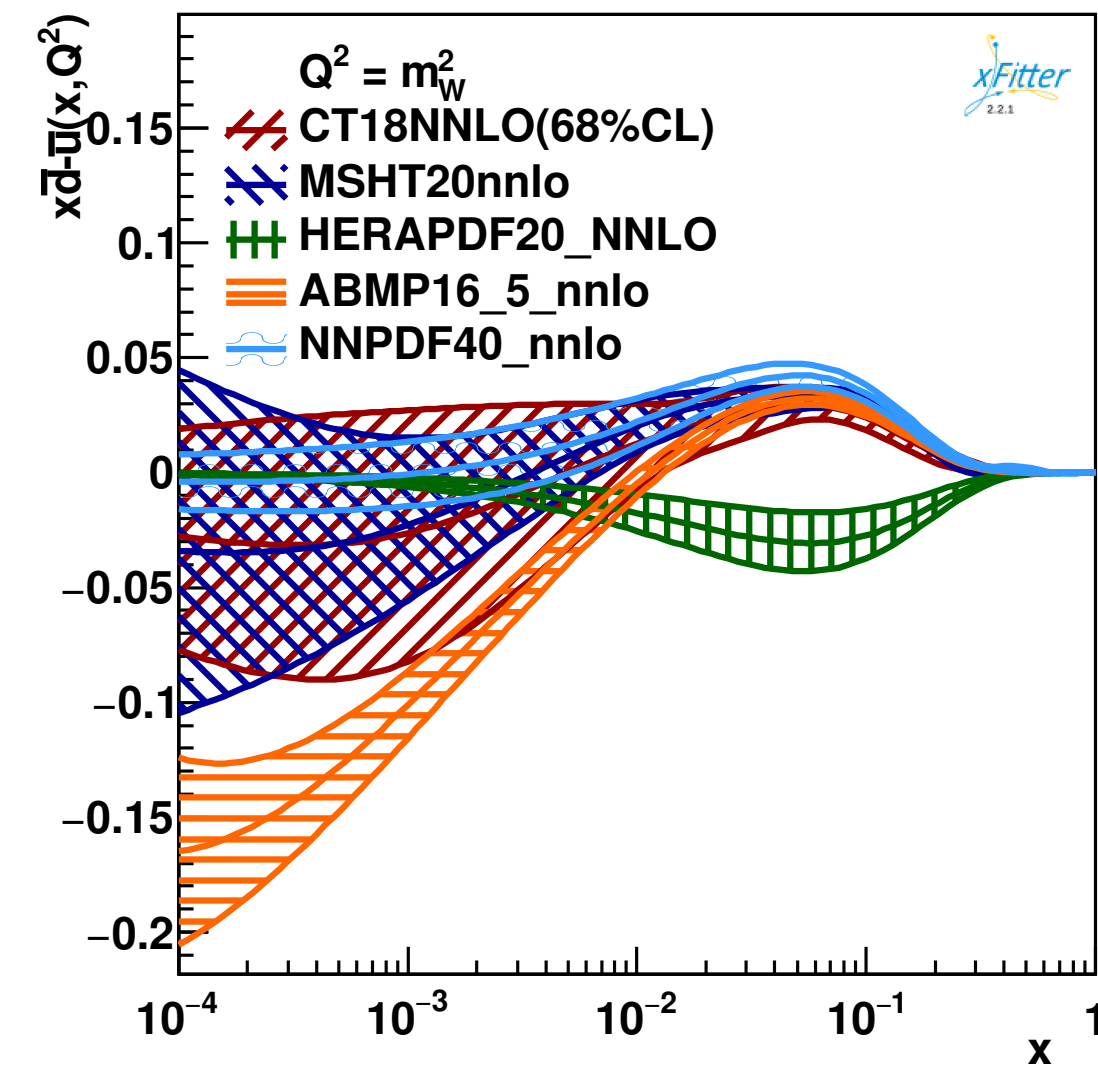
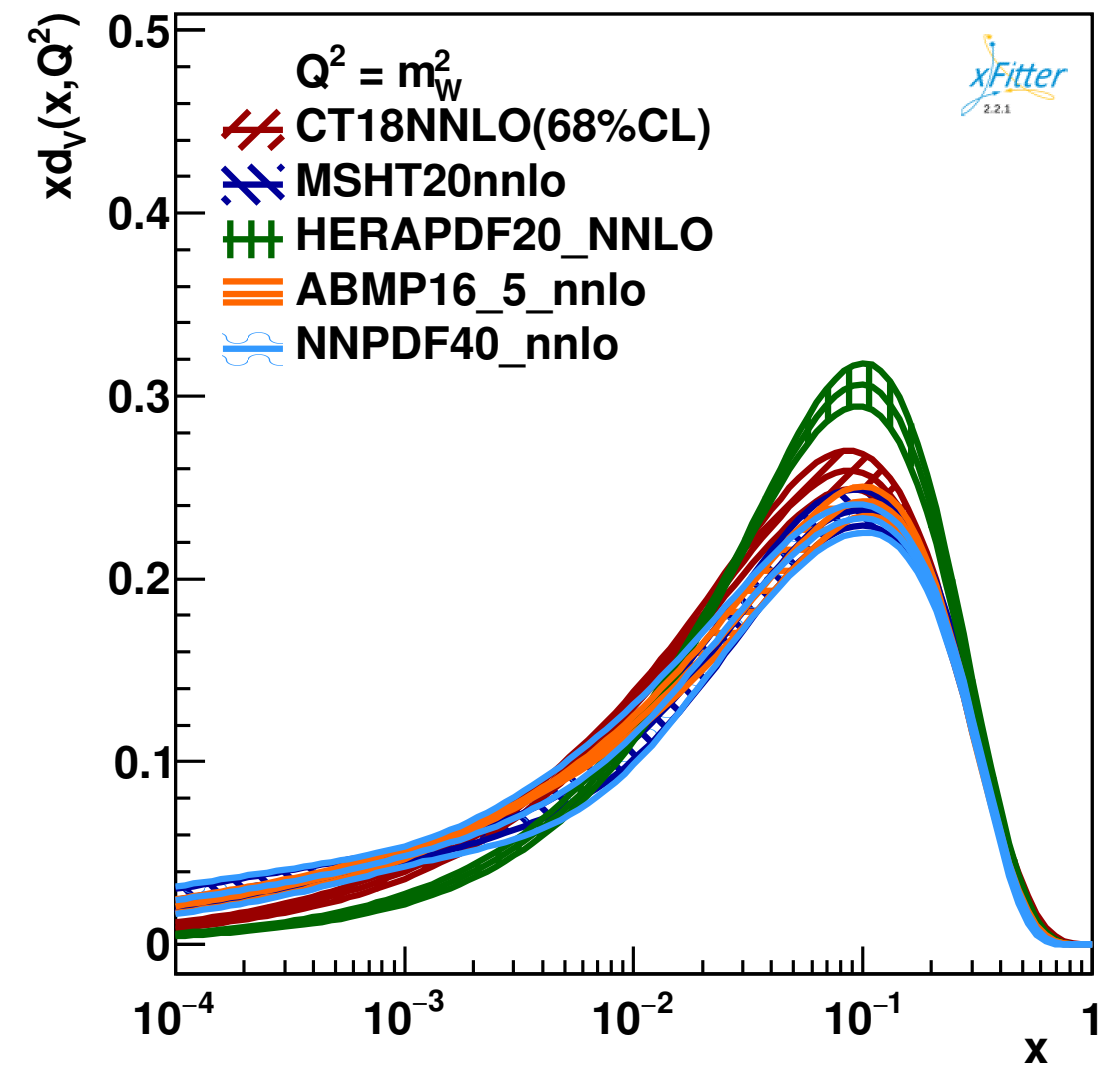
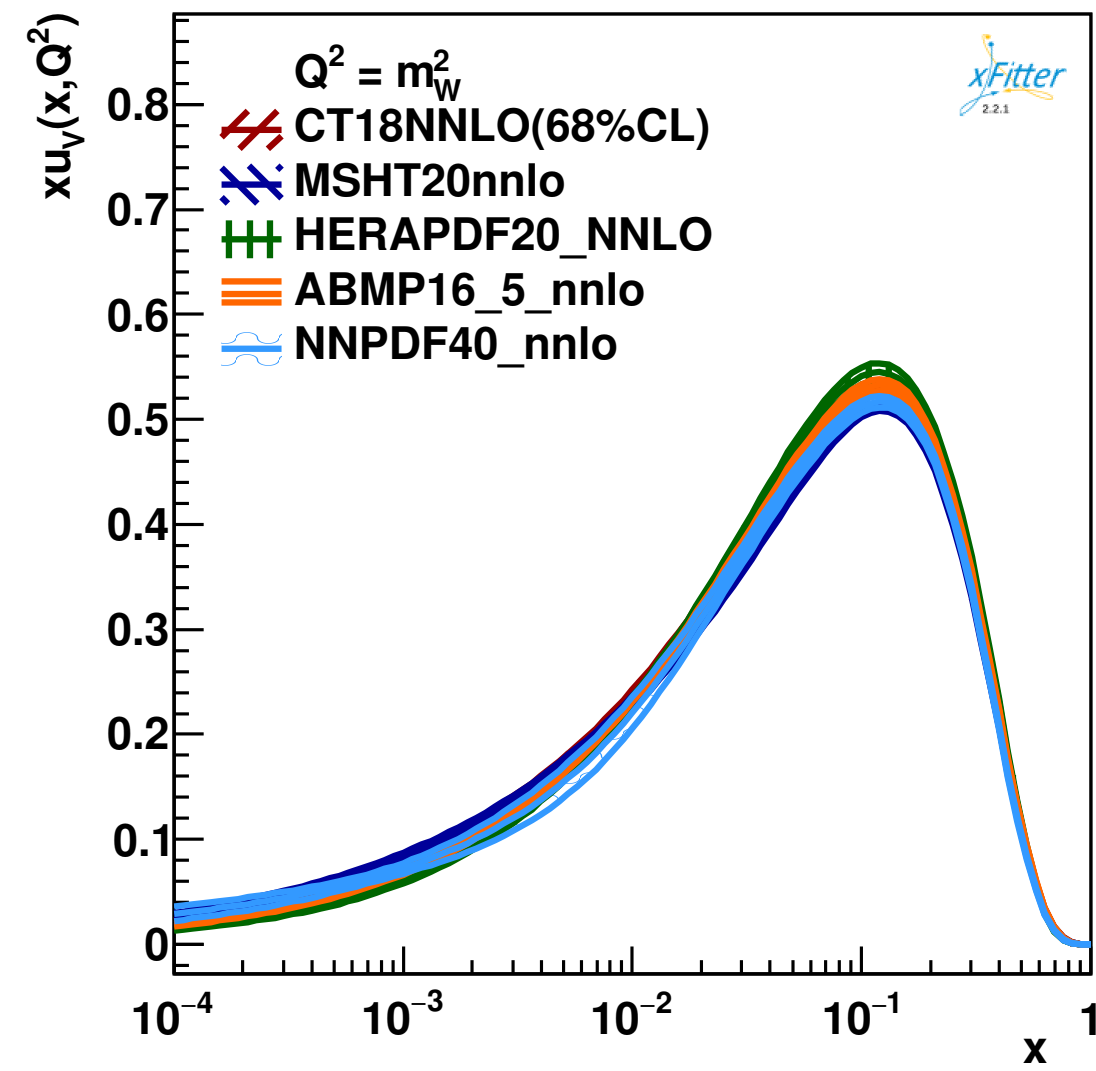
Результат измерения коэффициентов A_i для комбинации каналов



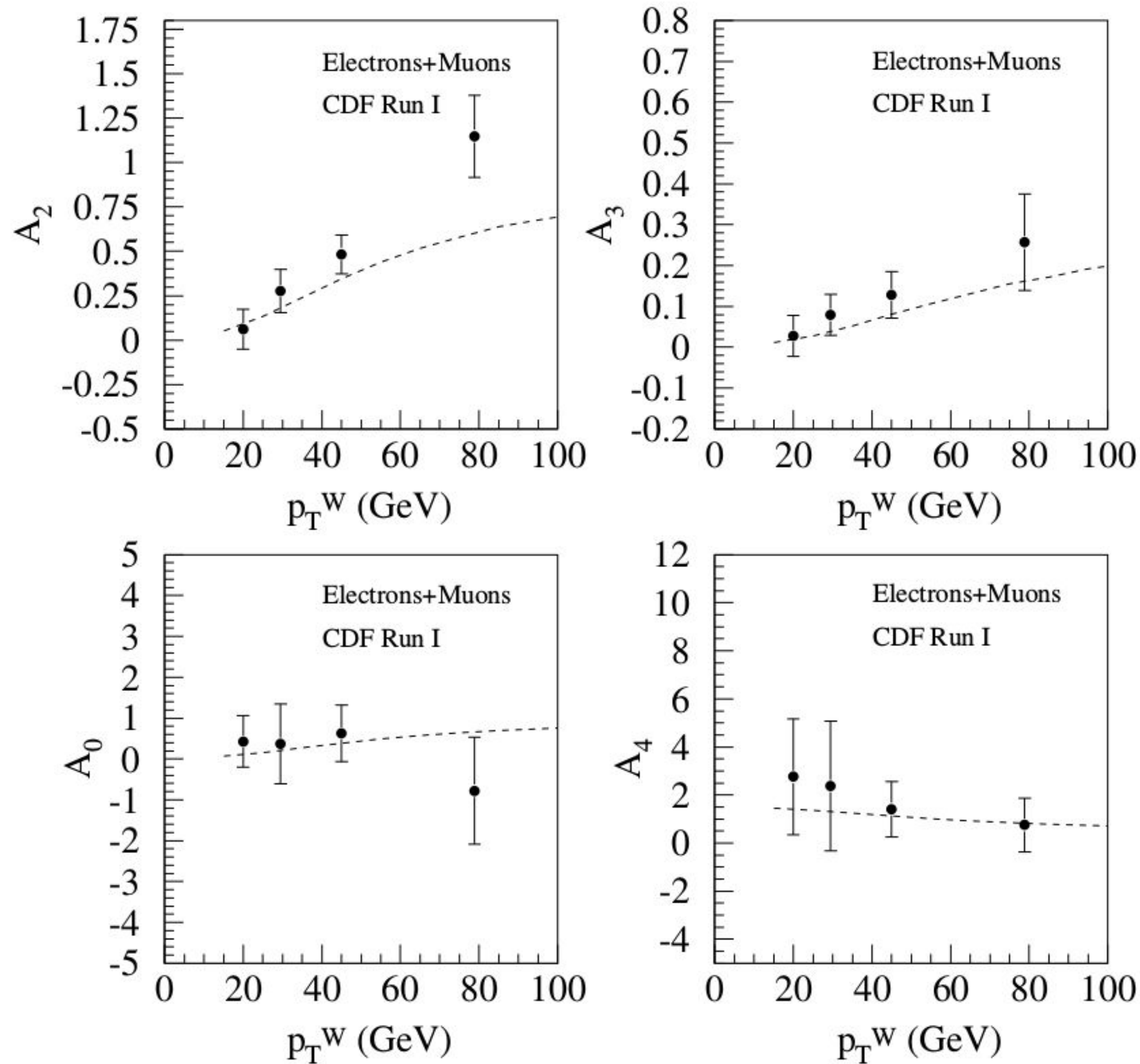
Результат измерения коэффициентов A_i для комбинации каналов



Партонные функции различных наборов

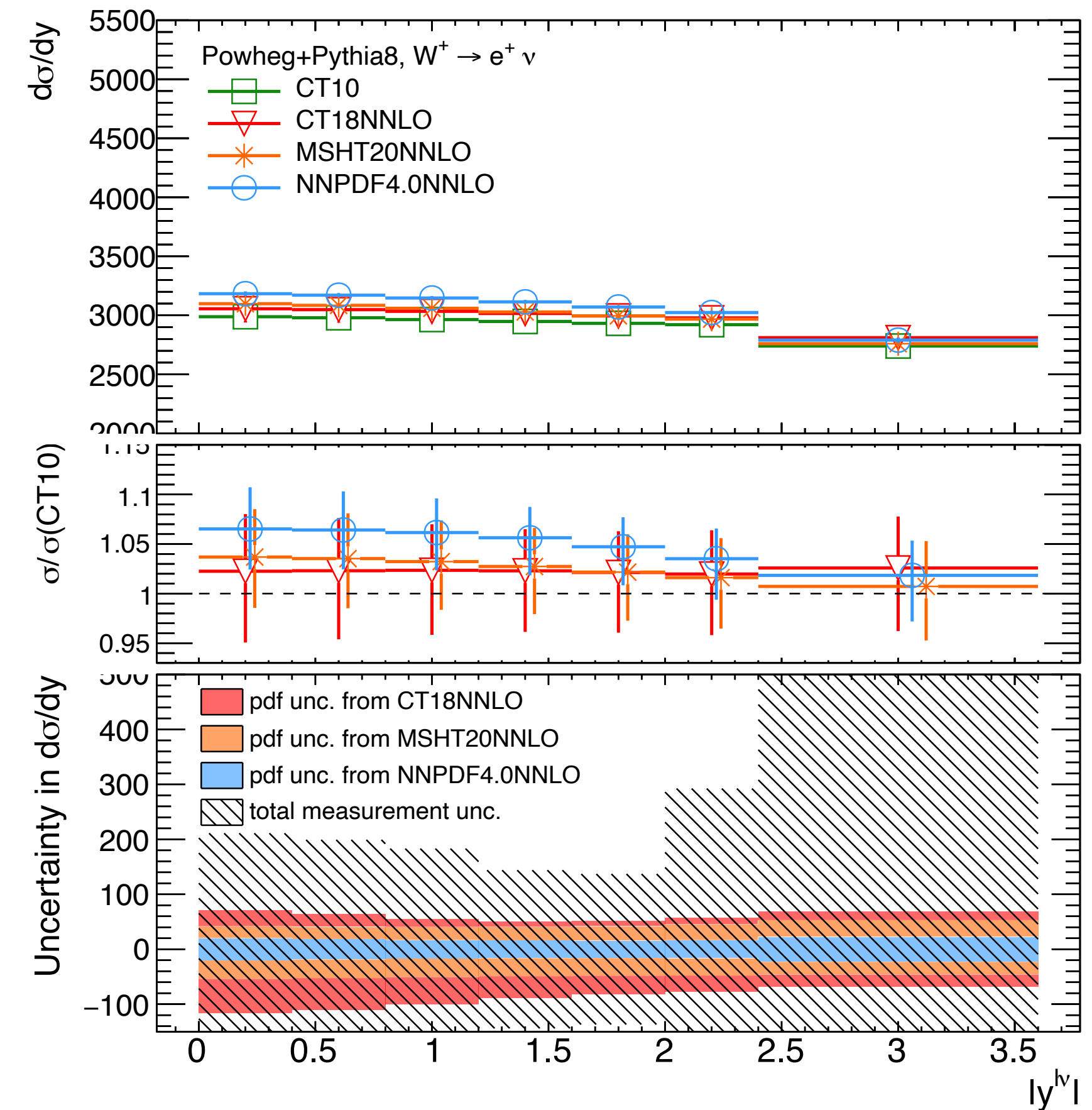
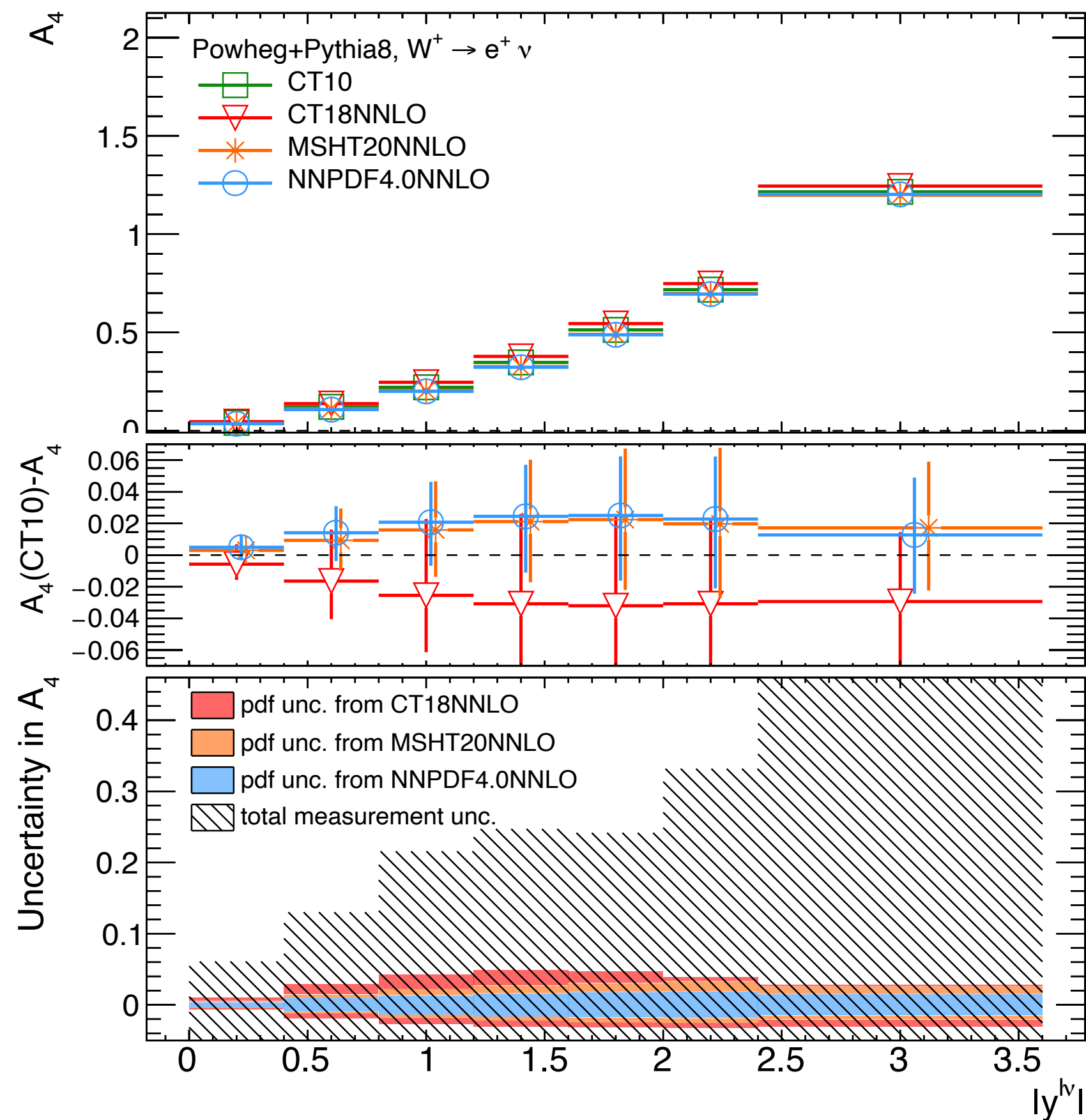


Измерения CDF



CDF Collaboration, doi:10.1103/PhysRevD.73.052002

Сравнение экспериментальной и ПФР погрешностей



- ▶ для A_4 и σ полная погрешность измерений больше чем погрешность ПФР для предсказаний, однако, является сравнимой
- ▶ Наибольшую погрешность ПФР для предсказаний имеет набор CT18NNLO, а наименьшую NNPDF4.0NNLO.