



Изучение рождения Z бозонов в pp - взаимодействиях при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ в эксперименте LHCb.

Дзюба А.А., НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Семинар ОФВЭ, 24 января 2023 г.

Аннотация



В докладе будут представлены результаты исследований рождения Z бозонов в область передних углов в протон-протонных взаимодействиях при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ. Измерения выполнены экспериментом LHCb на Большом адронном коллайдере (ЦЕРН). Получены интегральные и дифференциальные сечения рождения Z бозонов [1], исследованы угловые распределения для мюонных пар [2], получено указание на возможный вклад очарованных кварков в волновую функцию протона [3]. Использование мюонного канала распада Z бозона для калибровочных целей позволило провести измерения массы W бозона [4].

Ссылки:

1. LHCb Collaboration, Precision measurement of forward Z boson production in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV, JHEP 07 (2022) 026
2. LHCb Collaboration, First measurement of $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$ angular coefficients in the forward region of pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV, Phys. Rev. Lett. 129 (2022) 091801
3. LHCb Collaboration, Study of Z bosons produced in association with charm in the forward region, Phys. Rev. Lett. 128 (2022) 082001
4. LHCb Collaboration, Measurement of the W boson mass, JHEP 01 (2022) 036

Тяжелые калибровочные бозоны в СМ

Элементарные частицы

Масса	Заряд	Спин	Частица	Масса	Заряд	Спин	Частица	Масса	Заряд	Спин	Частица	Масса	Заряд	Спин	Частица
≈2.3 MeV/c ²	2/3	1/2	u up	≈1.275 GeV/c ²	2/3	1/2	c charm	≈173.07 GeV/c ²	2/3	1/2	t top	0	0	1	g gluon
≈4.8 MeV/c ²	-1/3	1/2	d down	≈95 MeV/c ²	-1/3	1/2	s strange	≈4.18 GeV/c ²	-1/3	1/2	b bottom	0	0	1	γ photon
0.511 MeV/c ²	-1	1/2	e electron	105.7 MeV/c ²	-1	1/2	μ muon	1.777 GeV/c ²	-1	1/2	τ tau	91.2 GeV/c ²	0	1	Z Z boson
<2.2 eV/c ²	0	1/2	ν _e electron neutrino	<0.17 MeV/c ²	0	1/2	ν _μ muon neutrino	<15.5 MeV/c ²	0	1/2	ν _τ tau neutrino	80.4 GeV/c ²	±1	1	W W boson

КВАРКИ

ЛЕПТОНЫ

БОЗОНЫ – переносчики взаимодействия

Стандартная модель имеет калибровочную группу

$$SU(3)_c \times SU(2)_w \times U(1)_Y$$

три калибровочных поля V_μ^i группы $SU(2)_w$

одно поле B_μ группы $U(1)_Y$

В результате механизма Хиггса массивными становятся три комбинации полей V_μ^i и B_μ , которые описывают W^\pm и Z -бозоны:

$$W_\mu^\pm = \frac{1}{\sqrt{2}} (V_\mu^1 \mp iV_\mu^2),$$

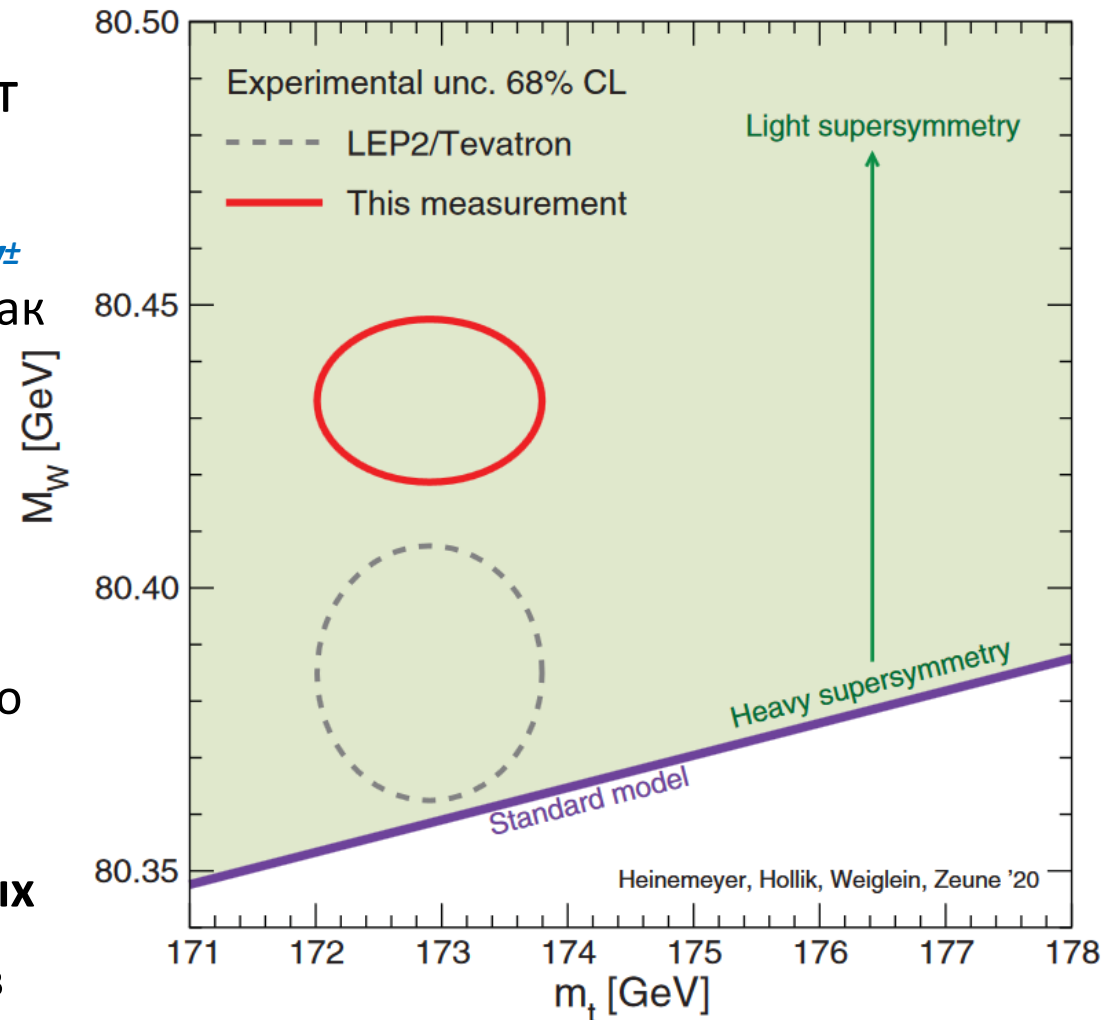
$$Z_\mu = \frac{1}{\sqrt{g^2 + g'^2}} (gV_\mu^3 - g'B_\mu).$$

Массы W и Z определяются константами связи (g и g') и ненулевым средним поля Хиггса (v)

$$M_W = \frac{gv}{2}, \quad M_Z = \frac{v\sqrt{g^2 + g'^2}}{2} = \frac{M_W}{\cos \theta_w}.$$

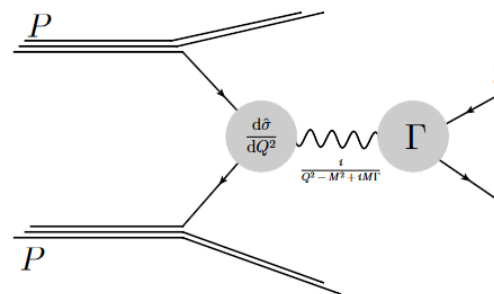
SM, SUSY и масса W

- Для калибровочных W^\pm и Z бозонов масса, возникающая при взаимодействии бозонных полей с полем Хиггса, – величина, которая может быть рассчитана, исходя из остальных параметров SM
 - Отклонение экспериментально измеренной массы W^\pm от **предсказаний SM** может быть интерпретировано как проявление новых фундаментальных частиц и взаимодействий
 - **MSSM predictions**, JHEP 2013 (2013) 84 →
 - **Измерения CDF**, Science 376 (2022) 170 →
- **Масса W** измеряется экспериментами LHC
 - Как будет показано в докладе, несмотря на низкую накопленную интегральную светимость (по сравнению с ATLAS и CMS), эксперимент LHCb оказывается конкурентоспособен в измерениях такого рода
 - **Для LHCb существенная часть систематической погрешности идет из-за неопределенности партонных распределений**, которые могут быть уточнены путем измерения дифференциальных сечений рождения Z в соответствующей кинематической области

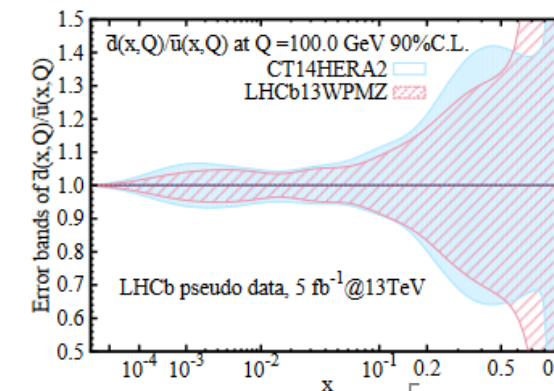
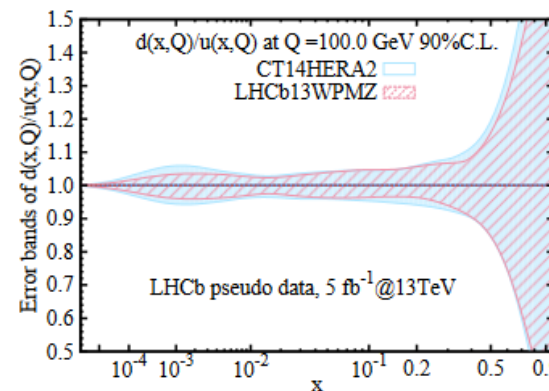
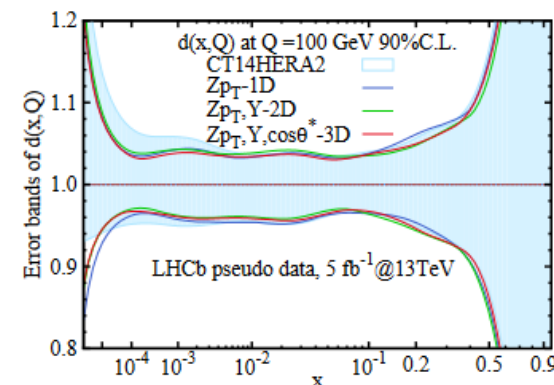
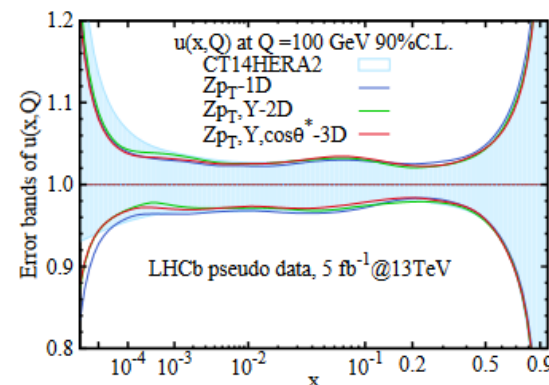


W/Z как «частицы-пробники» в исследованиях структуры протона

- Процессы Дрелла-Яна (DY)
- В рамках КХД сечение рождения Z вычисляется в третьем порядке теории возмущений (N^3LO).
 - [JHEP 03 \(2022\) 116](#)
 - [Phys. Rev. D 104, L111503](#)
- Измерение дифференциальных сечений рождения Z в кинематической области, доступной в эксперименте LHCb, позволит существенно уменьшить неопределенность партонных распределений для валентных кварков в области малых ($x \sim 5 \times 10^{-5}$) и больших ($x \sim 0,8$) долей импульса
 - [Chinese Phys. C 45 \(2021\) 023110](#) →



Схематическое изображение процесса Дрелла-Яна и его разложения на вероятность рождения виртуального калибровочного бозона и последующего распада на лептоны в конечном состоянии.



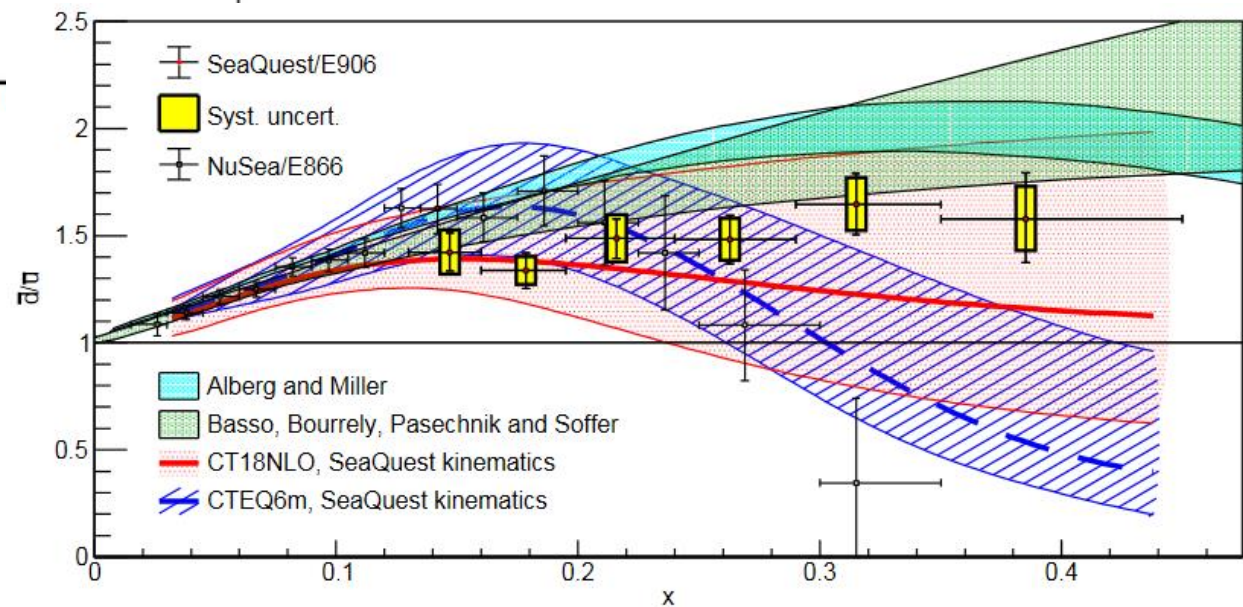
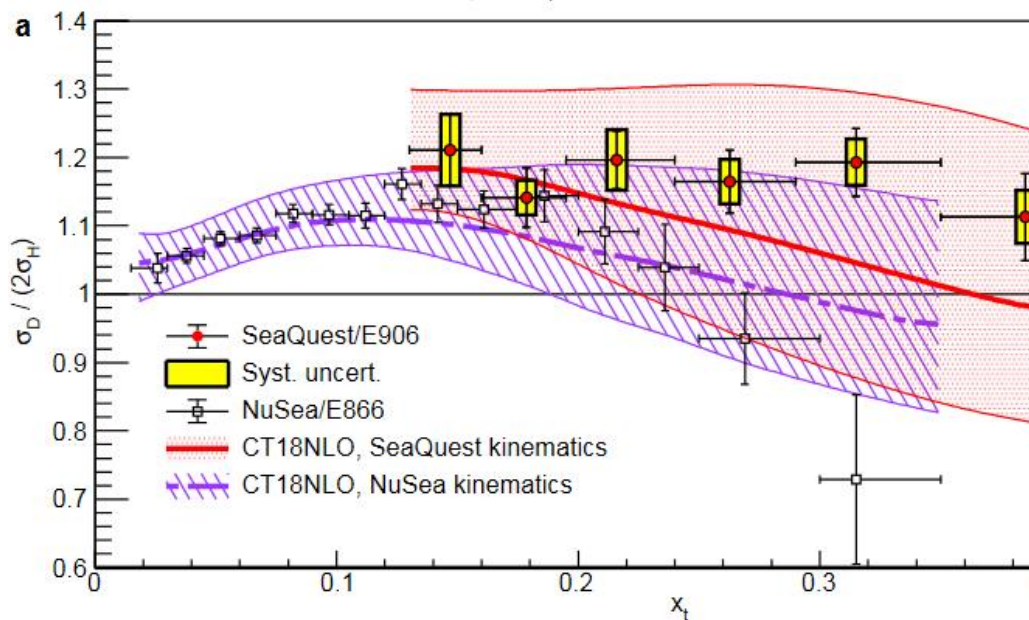
Выводы Chinese Phys. C 45 (2021) 023110

- The largest improvement is in the d quark PDFs. The uncertainty of the d quark PDFs can be improved significantly by the LHCb 13 TeV W^\pm/Z data in the whole x region. In the small- x region $10^{-5} < x < 10^{-2}$ especially, the uncertainty would be reduced by a factor of 60% at $x \sim 10^{-3}$.
- The uncertainty of u , s , c quark and gluon PDFs can be reduced across the whole x region, and significant improvements are expected in very small- and larger- x regions.
- The uncertainties of d/u and \bar{d}/\bar{u} ratios can be significantly reduced across the whole x range, even with only 5 fb^{-1} data. In the very larger- x region, the LHCb 13 TeV data could have a large impact on the d/u ratio.
- The LHCb 13 TeV W^\pm and Z data also has a large impact on the \bar{u} and \bar{d} quark PDFs, mainly in the small- x region.

ГНР нейтрино

SeaQuest collaboration, J. Dove *et al.*, *The asymmetry of antimatter in the proton*, Nature **590** (2021) 561, [arXiv:2103.04024](https://arxiv.org/abs/2103.04024).

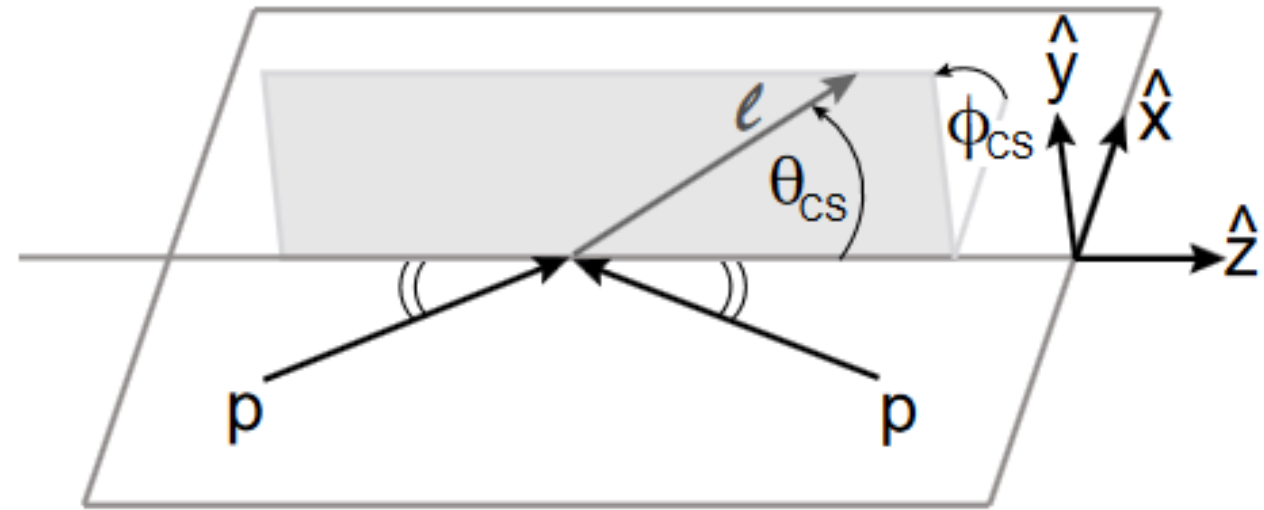
NuSea collaboration, R. S. Towell *et al.*, *Improved measurement of the \bar{d}/\bar{u} asymmetry in the nucleon sea*, Phys. Rev. D **64** (2001) 052002, [arXiv:hep-ex/0103030](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0103030).



Измерение угловых коэффициентов для распада $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$

- $pp \rightarrow \gamma^*/Z + X \rightarrow \mu^+ \mu^- + X$
- Кинематическое распределение лептонов в конечном состоянии обеспечивает прямое исследование поляризации промежуточного калибровочного бозона, который, в свою очередь, чувствителен к основным механизмам образования КХД.
 - Распределение для углов μ^+ в Collins-Soper frame [Phys. Rev. D16 (1977) 2219] описывается при помощи набора коэффициентов

$$\cos \theta = \frac{\ell_+^- \ell_-^+ - \ell_-^- \ell_+^+}{M \sqrt{M^2 + p_T^2}}, \quad \tan \phi = \frac{\sqrt{M^2 + p_T^2}}{M} \frac{\vec{\Delta} \cdot \hat{R}_T}{\vec{\Delta} \cdot \hat{p}_T},$$



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

$$+ A_3 \sin \theta \cos \phi + A_4 \cos \theta + A_5 \sin^2 \theta \sin 2\phi + A_6 \sin 2\theta \sin \phi + A_7 \sin \theta \sin \phi,$$

Измерение угловых коэффициентов для распада $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$

- $pp \rightarrow \gamma^*/Z + X \rightarrow \mu^+ \mu^- + X$
- Кинематическое распределение лептонов в конечном состоянии обеспечивает прямое исследование поляризации промежуточного калибровочного бозона, который, в свою очередь, чувствителен к основным механизмам образования КХД.
 - Распределение для углов μ^+ в Collins-Soper frame [Phys. Rev. D16 (1977) 2219] описывается при помощи набора коэффициентов

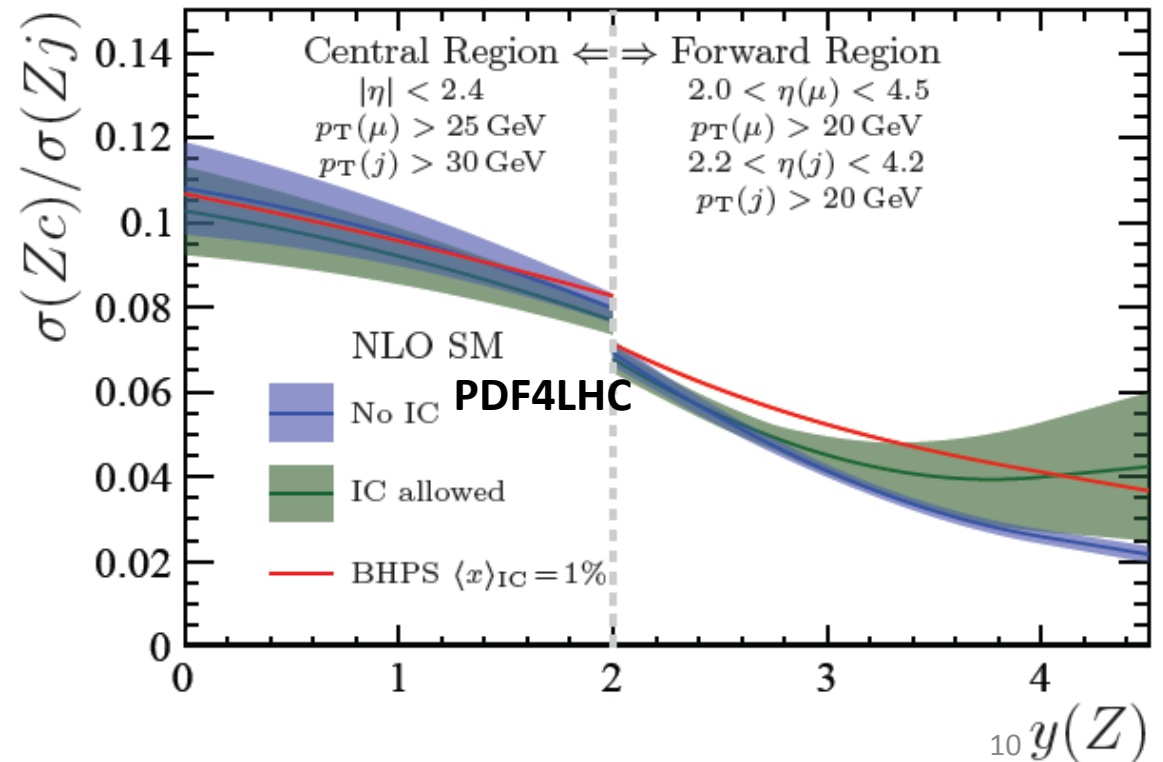
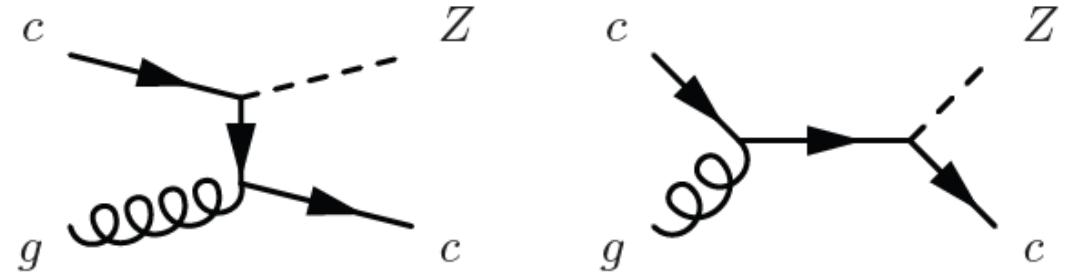
$$\frac{d\sigma}{d \cos \theta d\phi} \propto (1 + \cos^2 \theta) + \frac{1}{2} A_0 (1 - 3 \cos^2 \theta) + A_1 \sin 2\theta \cos \phi + \frac{1}{2} A_2 \sin^2 \theta \cos 2\phi + A_3 \sin \theta \cos \phi + A_4 \cos \theta + A_5 \sin^2 \theta \sin 2\phi + A_6 \sin 2\theta \sin \phi + A_7 \sin \theta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

A_2 пропорционально свертке кварковой и антикварковой функций Бюра-Малдерса (transverse-momentum dependent (TMD) parton distribution function) в сталкивающихся частицах

- В ведущем порядке теории возмущений (LO) в рамках КХД все угловые коэффициенты обращаются в нуль при стремлении поперечного импульса ди-лептона к нулю, за исключением A_4 , который отличен от нуля из-за нарушения четности в слабом взаимодействии.
- В порядке следующем за ведущим порядком (NLO), A_{0-3} становятся ненулевыми
- A_{5-7} имеют небольшие отклонения от нуля только в следующем за ведущим порядком (NNLO).

Внутреннее очарование протона

- Вклад очарованных кварков в волновую функцию протона
 - расщепление глюонов: $g \rightarrow c\bar{c}$
 - $|uudc\bar{c}\rangle$ компонента в в.ф. протона = внутреннее очарование протона = intrinsic charm (IC) / непертурбативный
- S. J. Brodsky, P. Hoyer, C. Peterson, and N. Sakai, The intrinsic charm of the proton,
 - Phys. Lett. B93 (1980) 451.
- IC может быть обнаружен в pp взаимодействиях через рождение Z и очарованной струи
- Эффект более ярко выражен при больших быстротах



LHCb: Find \ Identify \ Measure

Excellent vertexing allows efficient heavy quark hadrons selection / gives access to decay time distribution / prompt-secondary separation for charm

Protons collision point

Excellent PID allows to suppress background dramatically and explore many decay modes

Excellent tracking

Muon system – nice tagging & great potential to search for rare decays with di-muons

$$\sigma(IP) \approx 20\mu m$$

$$\delta p/p = 0.4 - 0.6 \%$$

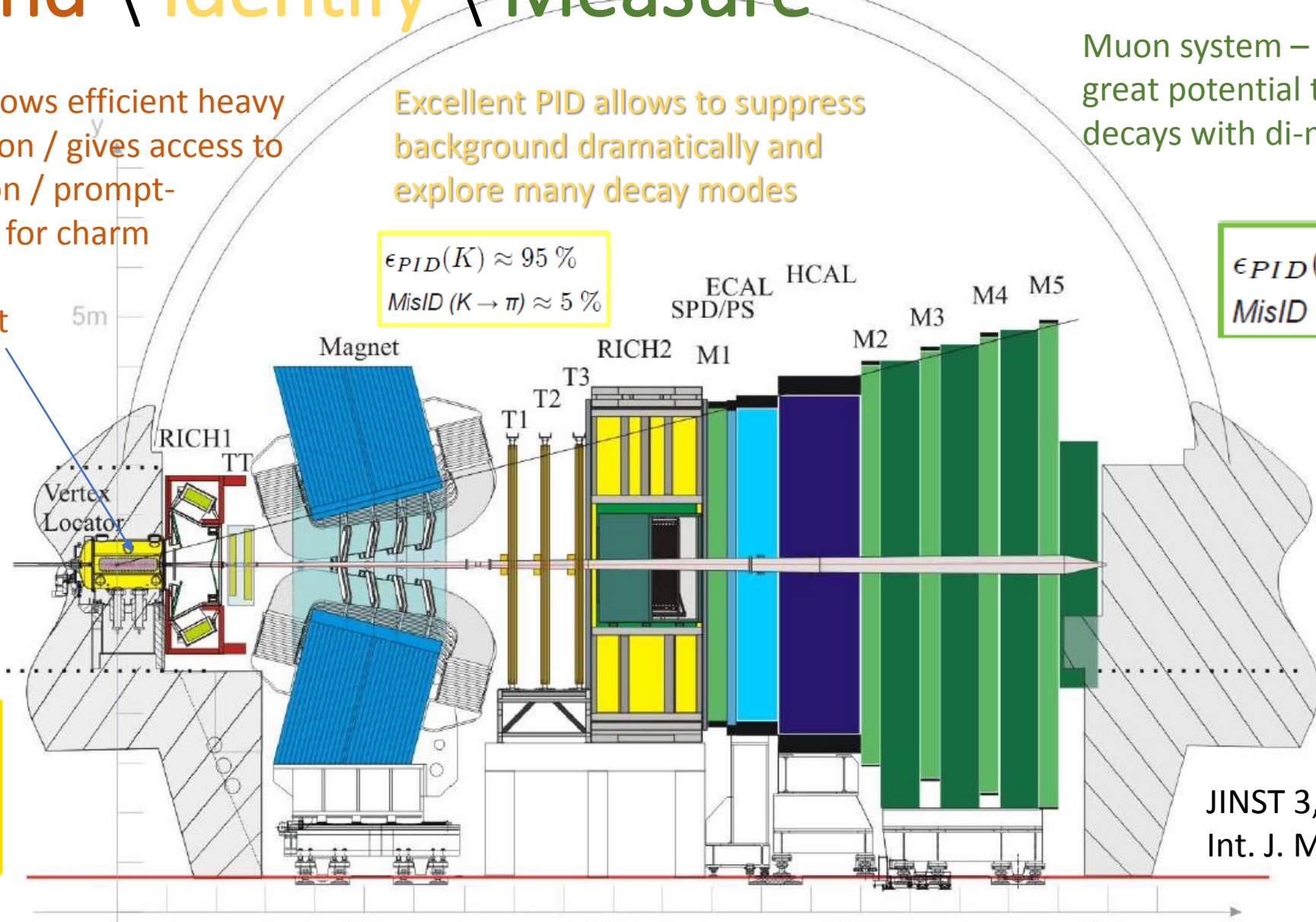
$$\epsilon_{track} > 96 \%$$

$$\epsilon_{PID}(K) \approx 95 \%$$

$$MisID(K \rightarrow \pi) \approx 5 \%$$

$$\epsilon_{PID}(\mu) \approx 97 \%$$

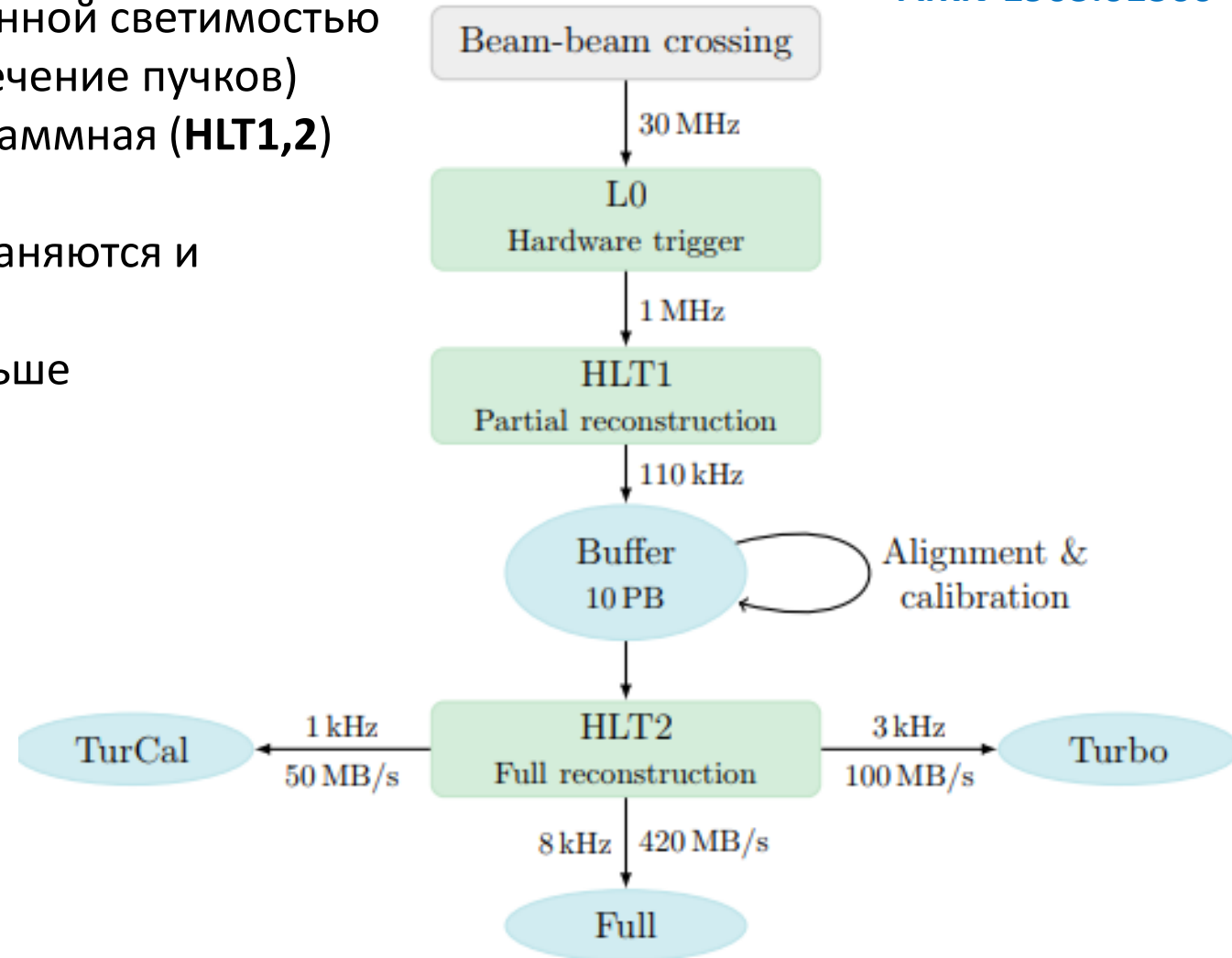
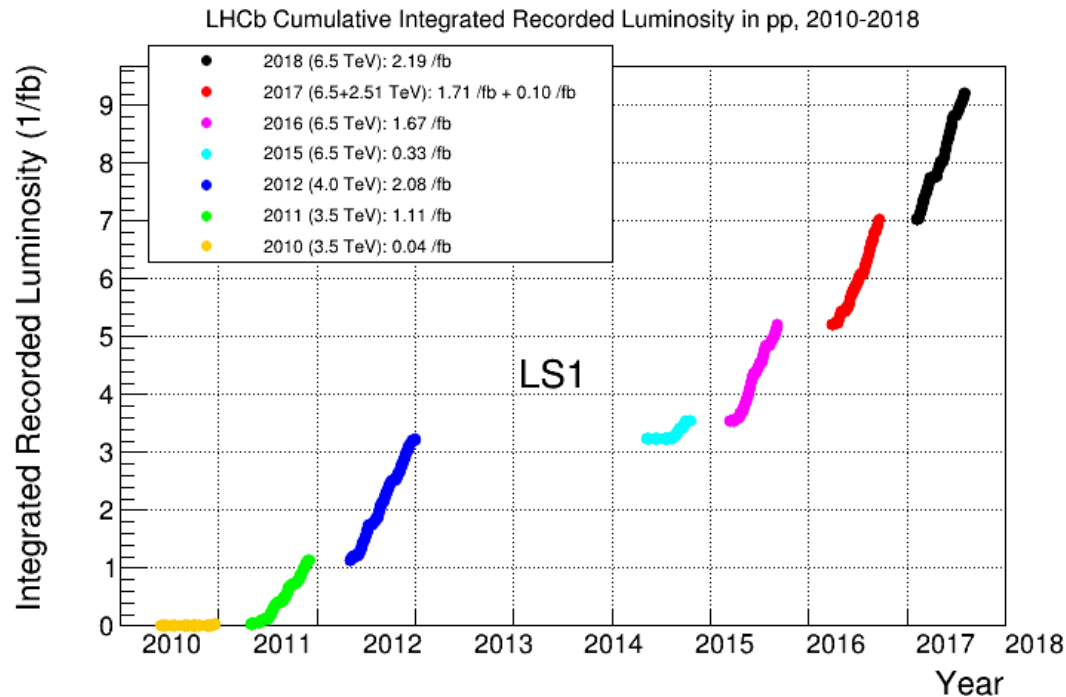
$$MisID(\pi \rightarrow \mu) \approx 3 \%$$



JINST 3, (2008) S08005;
Int. J. Mod. Phys. A 30,
(2015) 153022

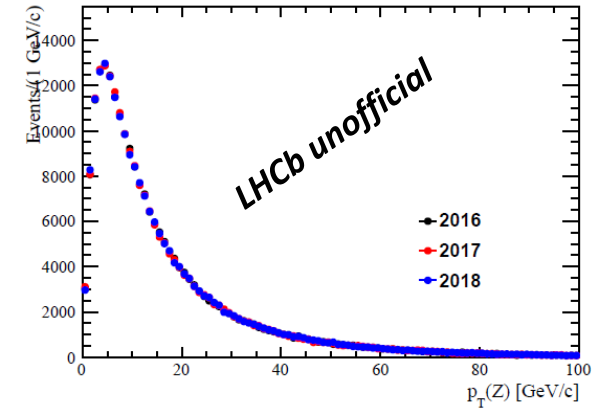
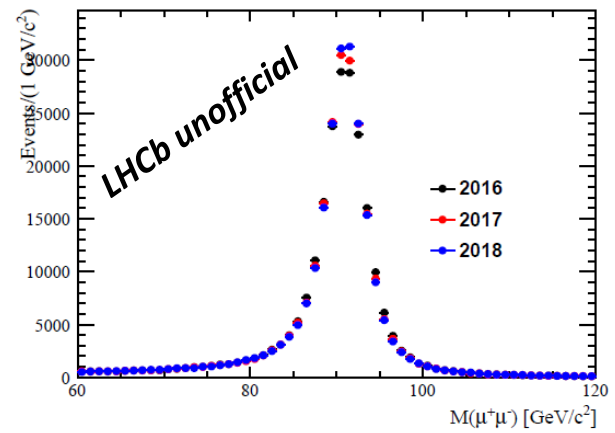
Светимость и триггер

- LHCb работает в режиме с постоянной мгновенной светимостью (1.1 видимых взаимодействий на пересечение пучков)
- Две ступени триггера: аппаратная (L0) и программная (HLT1,2)
- **Turbo-режим для Run-2** – события-кандидаты реконструируемые на уровне триггера сохраняются и используются в оффлайн анализе:
 - Больше событий т.к. размер события меньше

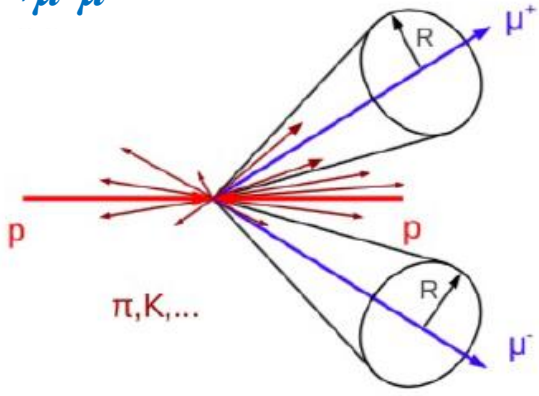


Критерии отбора событий ($Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$)

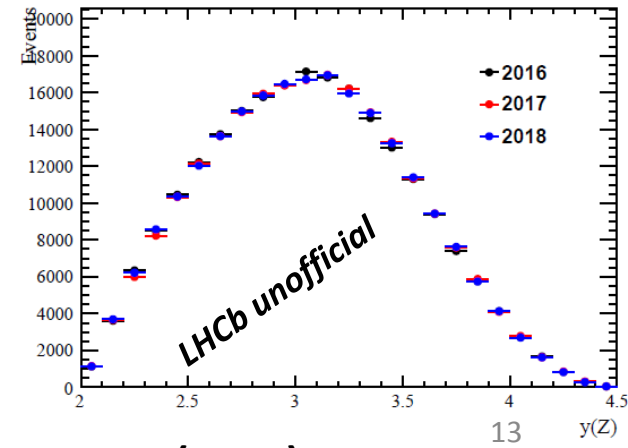
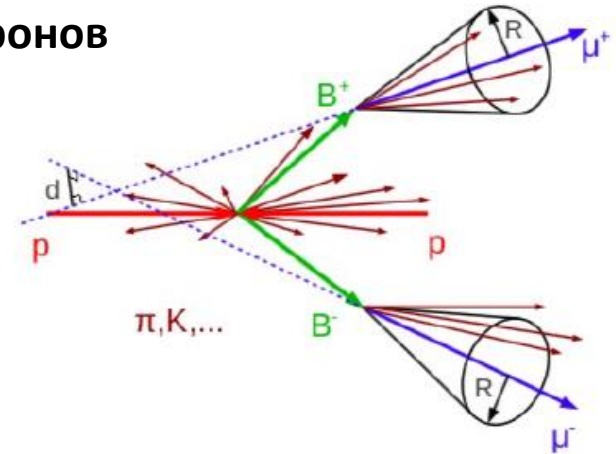
- Треки идентифицируются как мюоны, если они совпадают с попаданиями либо в три, либо во все четыре самые мюонные станции за калориметром
- Мюоны: $p_T > 20 \text{ GeV}/c$ и $2.0 < \eta < 4.5$ JHEP 07 (2022) 026
- Относительная неопределенность в измерении импульса для каждого мюона не более 10%.
 - Изоляция для работы по изучению угловых распределений: $p_T^\mu / p_T^{\text{конус}} > 0.85$ и $R < 0.5$



$Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$



Фон от прелестных адронов



Критерии отбора событий ($W \rightarrow \mu\nu$)

- Треки идентифицируются как мюоны, если они совпадают с попаданиями либо в три, либо во все четыре самые дальние мюонные станции за калориметром
- Мюоны: $p_T > 6 \text{ GeV}/c$ и $2.2 < \eta < 4.4$
- Разница в качестве «фитирования» первичной вершины с и без мюонного трека: $\Delta\chi_{\text{IP}}^2 < 9$
- Относительная неопределенность в измерении импульса для каждого мюона не более 6%.
- **Изоляция:** дополнительная энергия в конусе $< 4 \text{ GeV}$ и $R < 0.4$
- **Вето**, если в событии есть второй мюона с $p_T > 25 \text{ GeV}/c$ для подавления вклада $Z \rightarrow \mu^+\mu^-$

Вклад фоновых событий

- Тяжелые кварки:

- Требование на $\Delta\chi_{IP}^2$
- Требование на «изоляцию» ($R < 0.5$)
- Учет эффективности
- Вклад фона порядка 1%

- Неправильно идентифицированные адроны:

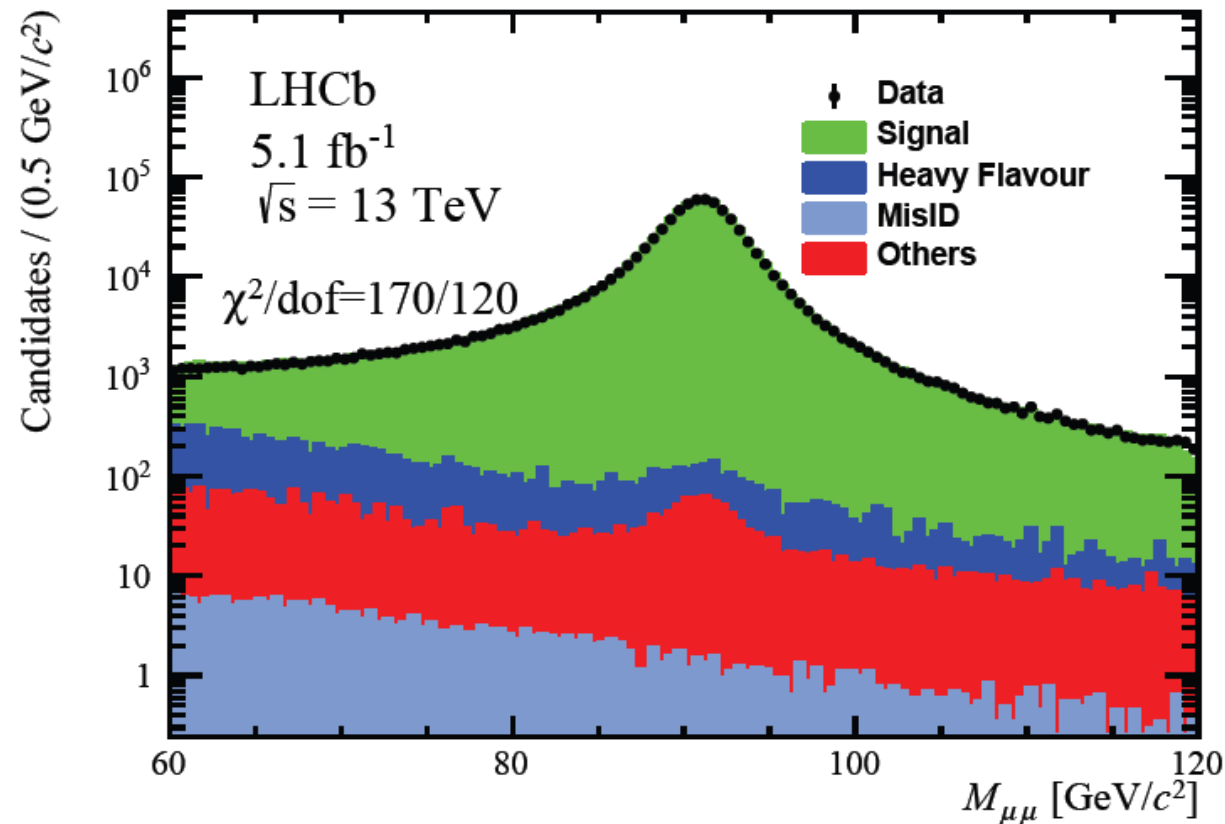
- Мюоны одного заряда за вычетом компоненты от тяжелых кварков

- Электрослабые процессы:

- $t\bar{t}$, W^+W^- , $W^\pm Z$, ZZ
- $Z \rightarrow \tau^+\tau^-$
- Вычисление MC в NNLO порядке теории

- Полный вклад фона (1.5 ± 0.1)%

796 000 событий-кандидатов



ЖНЕР 07 (2022) 026

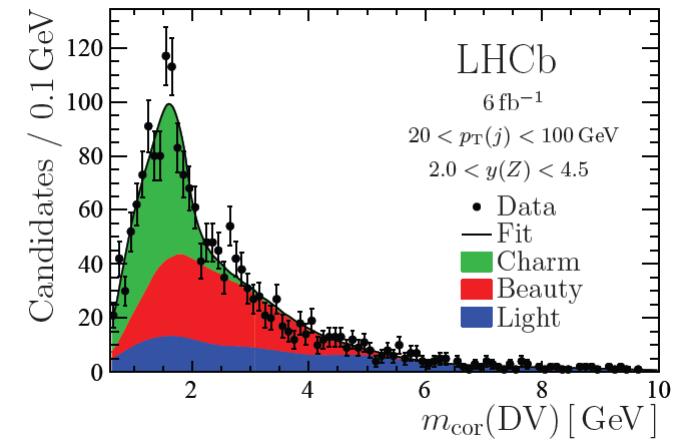
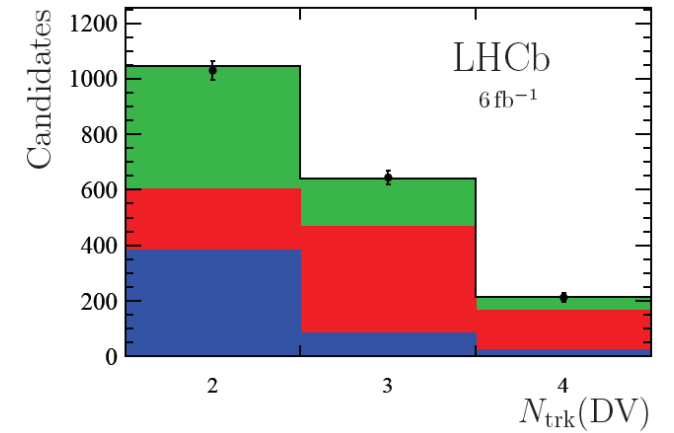
Критерии отбора событий (*c*-jets)

Чувствительный объем (fiducial region):

<i>Z</i> bosons	$p_T(\mu) > 20 \text{ GeV}, 2.0 < \eta(\mu) < 4.5, 60 < m(\mu^+\mu^-) < 120 \text{ GeV}$
Jets	$20 < p_T(j) < 100 \text{ GeV}, 2.2 < \eta(j) < 4.2$
Charm jets	$p_T(c \text{ hadron}) > 5 \text{ GeV}, \Delta R(j, c \text{ hadron}) < 0.5$
Events	$\Delta R(\mu, j) > 0.5$

- Мюоны: $p_T > 10 \text{ GeV/c}$ и $2.2 < \eta < 4.4$
- Струи: anti- k_T алгоритм (FastJet)
 - Если для одной первичной вершины было реконструировано струй несколько, что выбиралась одна с наибольшим p_T
- Идентификация *c*-струй:
 - Детально: JINST 17(2022) P02028, arXiv:2112.08435
 - Вторичная вершина (displaced-vertex, DV) в конусе струи
 - Подавление *b*-струй:
 - Распределение по множественности: $N_{trk}(DV)$
 - $m_{cor}(DV) \equiv \sqrt{m(DV)^2 + [p(DV) \sin \theta]^2} + p(DV) \sin \theta$

Phys. Rev. Lett. 128 (2022) 082001



Эффективность идентификации:

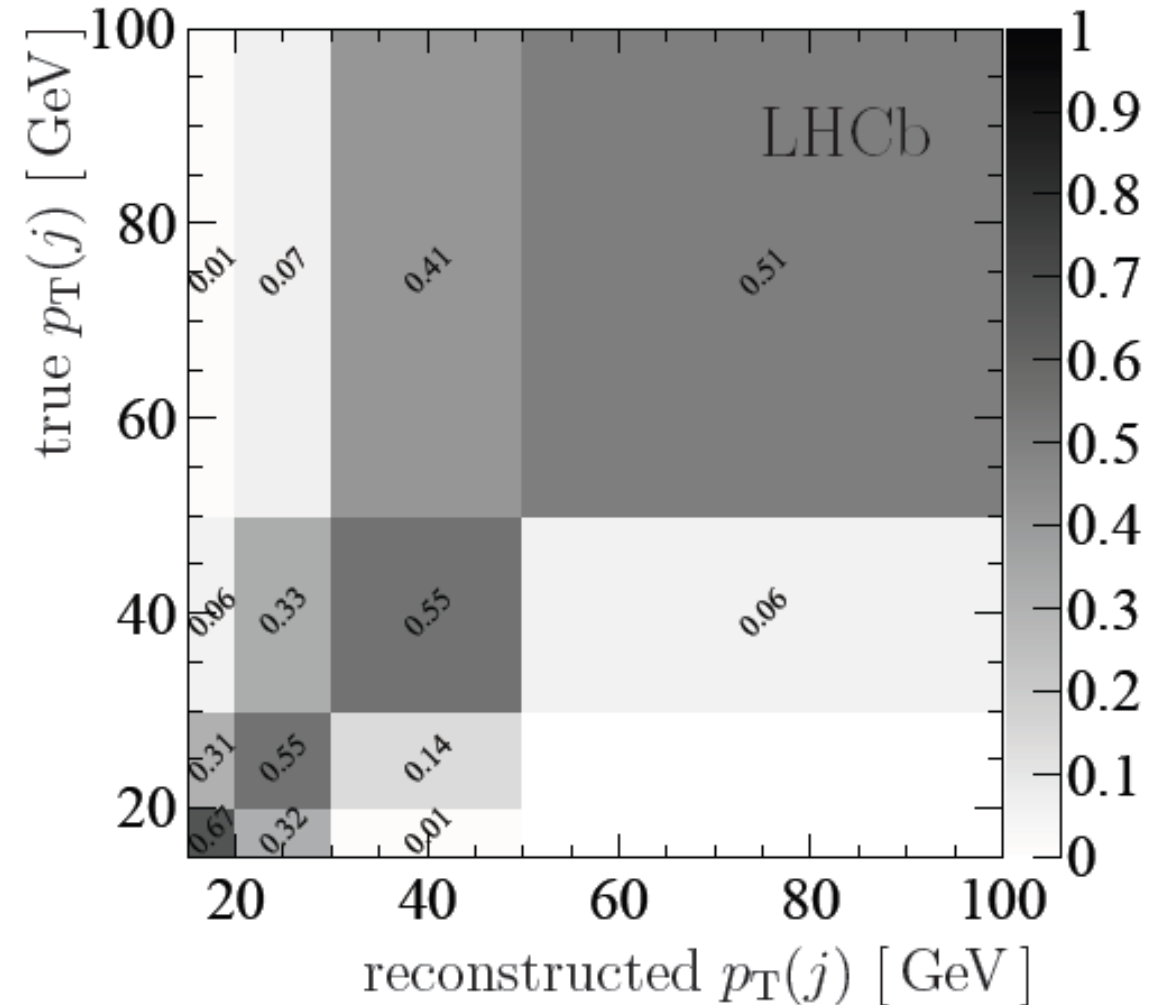
- $p_T = 20\text{-}30 \text{ GeV/c}$ $(23,9 \pm 1,4)\%$,
- $p_T = 30\text{-}50 \text{ GeV/c}$ $(24,4 \pm 1,9)\%$,
- $p_T = 50\text{-}100 \text{ GeV/c}$ $(23,6 \pm 4,1)\%$.

Эффект миграции и систематика

Phys. Rev. Lett. 128 (2022) 082001

- Отклик детектора изучается с использованием распределения p_T -баланса $p_T(j)=p_T(Z)$ для Zj -кандидатов, которые разлетаются в разные стороны в поперечной плоскости →
- Эффективность алгоритма c -таггинга определялась в двух струйных событиях, в которых одна струя имела идентифицированный очарованный адрон
 - Подробнее о процедуре: **JINST 17 (2022) P02028**
- Систематические погрешности

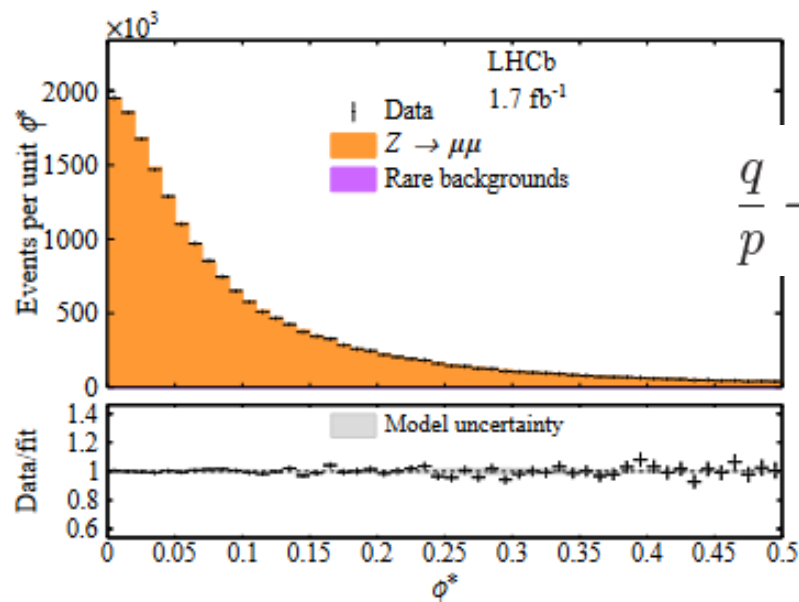
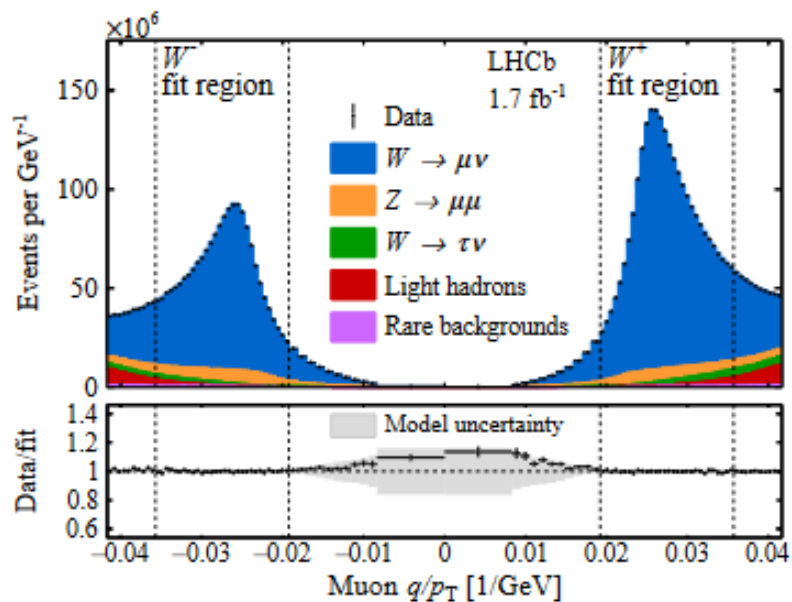
Source	Relative Uncertainty
c tagging	6–7%
DV-fit templates	3–4%
Jet reconstruction	1%
Jet p_T scale & resolution	1%
Total	8%



Пример: c -струи

Калибровка импульса

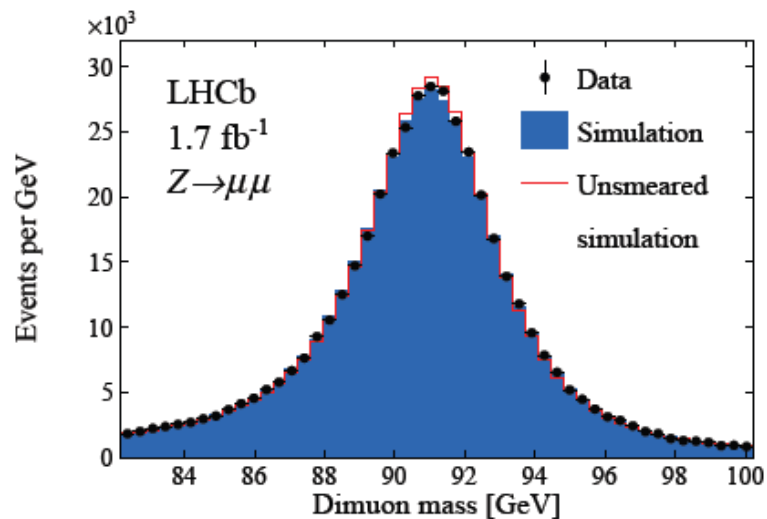
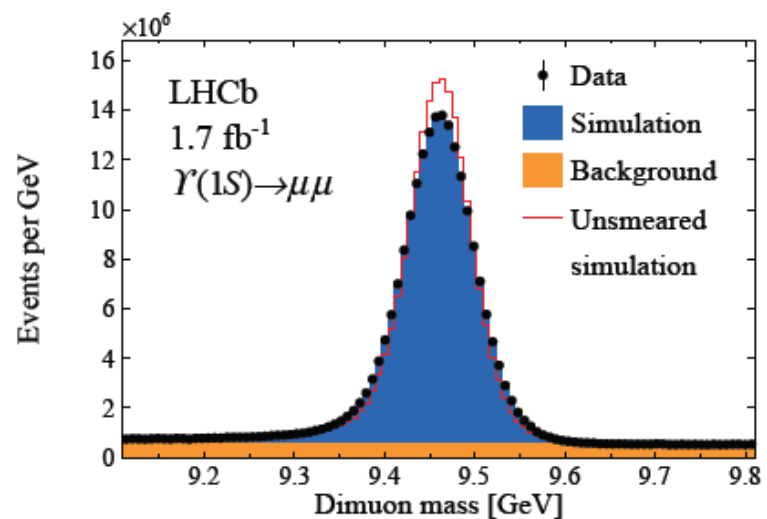
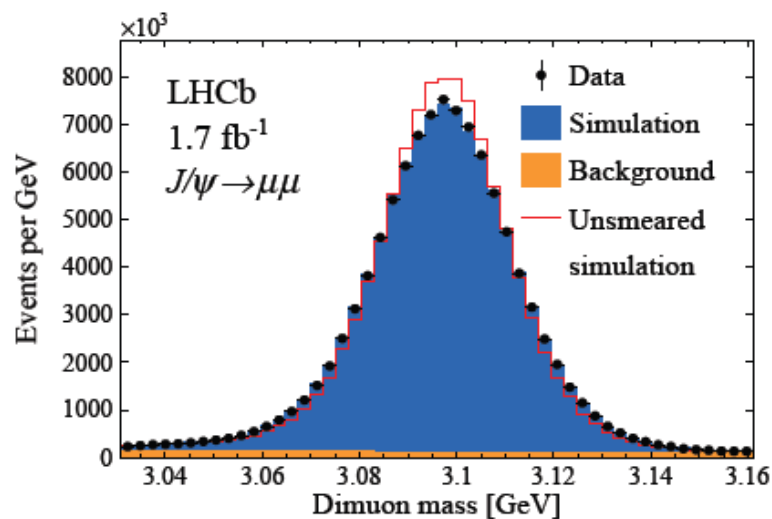
- Выстройка детектора (alignment) осуществлялась по положению пика **Z** бозона, который «устанавливался» на мировые значения
- Калибровка импульса наиболее важна для измерения m_W
 - Распределение для отношение q/p , полученного из МС, модифицировалось, чтобы соответствовать экспериментальным данным
 - Параметры определялись из калибровочных распределений **J/ψ**, **Υ(1S)** и **Z**
- Погрешность, соответствующая калибровке, оценивается в 5 МэВ



$$\frac{q}{p} \rightarrow \frac{q}{p \cdot \mathcal{N}(1 + \alpha, \sigma_{\text{MS}})} + \mathcal{N}\left(\delta, \frac{\sigma_\delta}{\cosh \eta}\right)$$

$$\phi^* = \frac{\tan((\pi - \Delta\phi)/2)}{\cosh(\Delta\eta/2)} \sim \frac{p_T^Z}{M}$$

Калибровка импульса



Сечение

$$\frac{d\sigma_{Z \rightarrow \mu^+ \mu^-}}{da} = \frac{N_Z \cdot f_{\text{FSR}}^Z}{\mathcal{L} \cdot \epsilon^Z \cdot \Delta a}$$

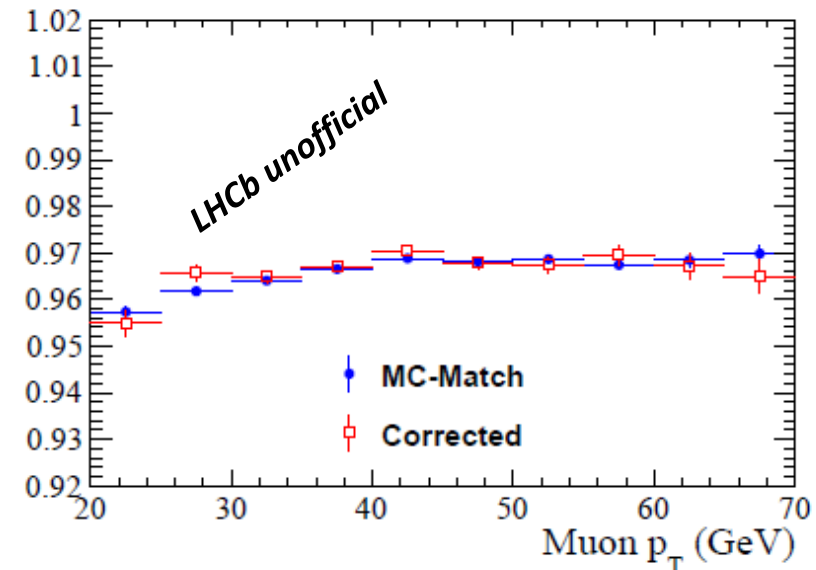
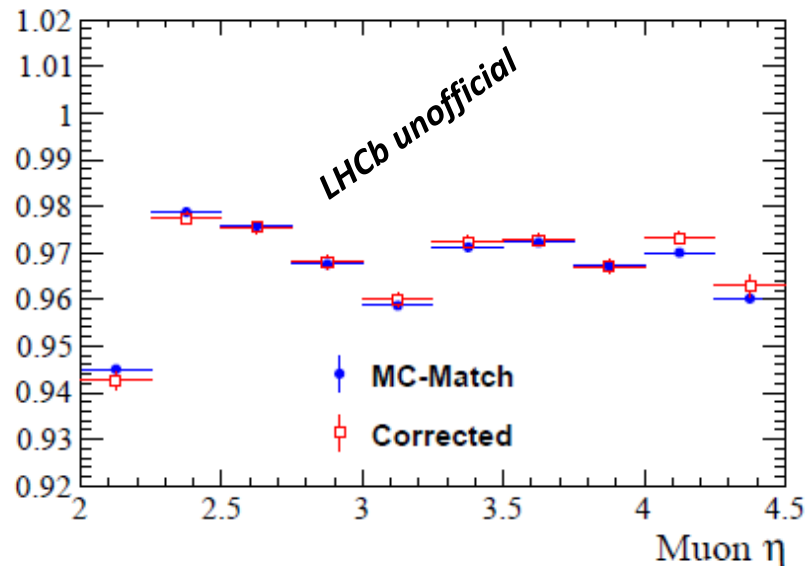
Кинематическая переменная → da Светимость → \mathcal{L} Эффективность → ϵ^Z

- 18 интервалов по y^Z , от 2.0 до 4.5
 - Ширина интервала 0.125 до $y^Z=4.0$ и 0.25 выше
- 14 интервалов по p_T^Z
 - [0.0, 2.2, 3.4, 4.6, 5.8, 7.2, 8.7, 10.5, 12.8, 15.4, 19.0, 24.5, 34.0, 63.0, 270.0] GeV/c
 - Unfolding только по этой переменной (итерационный байесовский метод)
- 15 интервалов по ϕ^*
 - [0.002, 0.01, 0.02, 0.03, 0.05, 0.07, 0.10, 0.15, 0.20, 0.30, 0.40, 0.60, 0.80, 1.20, 2.00, 4.00]
 - $\phi_\eta^* = \tan((\pi - \Delta\phi^{\ell\ell})/2) \sin(\theta_\eta^*)$, $\cos(\theta_\eta^*) = \tanh[(\eta^- - \eta^+)/2]$
 - Лучшее разрешение на коллайдерах
- Светимость измеряется централизованно (JINST 9 (2014) P12005)
 - Ван-дер-Мееровское сканирование (счет при изменении положения пучков)
 - Взаимодействие с остаточным газом в трубе

Эффективность

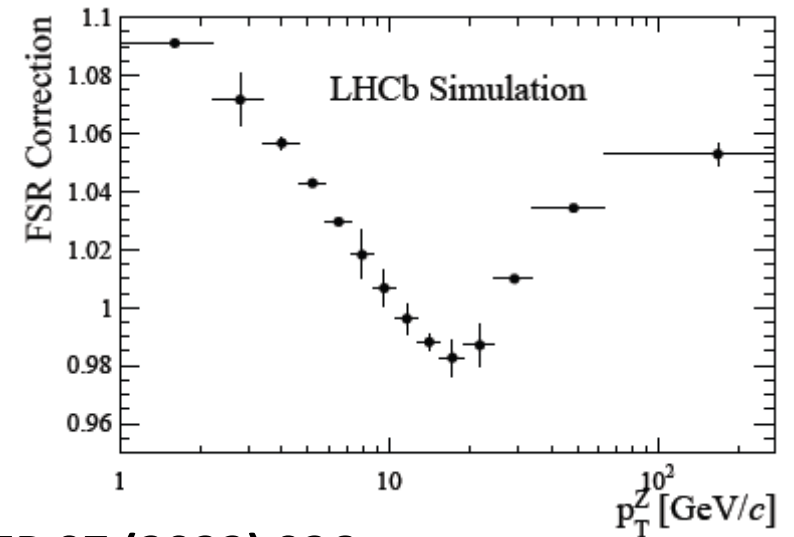
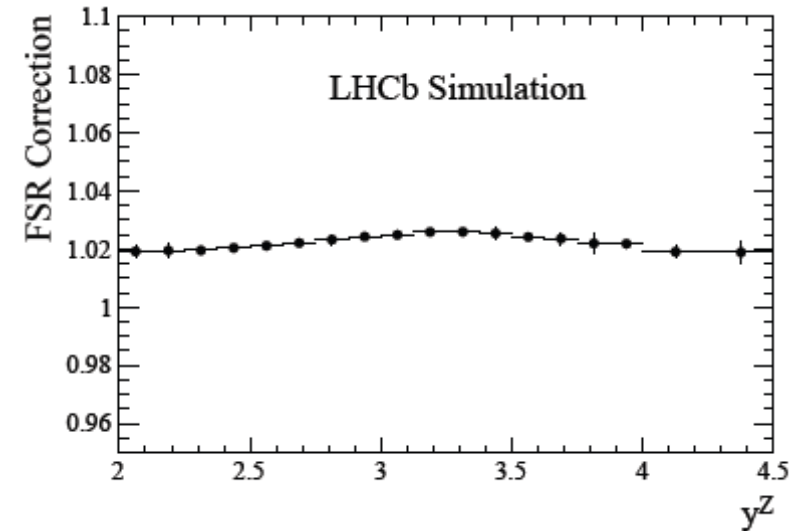
$$\epsilon^Z = \left(\epsilon_{\text{track}}^{\mu^+} \cdot \epsilon_{\text{track}}^{\mu^-} \right) \cdot \left(\epsilon_{\text{ID}}^{\mu^+} \cdot \epsilon_{\text{ID}}^{\mu^-} \right) \cdot \left(\epsilon_{\text{trig}}^{\mu^+} + \epsilon_{\text{trig}}^{\mu^-} - \epsilon_{\text{trig}}^{\mu^+} \cdot \epsilon_{\text{trig}}^{\mu^-} \right)$$

- Все эффективности измерялись методом **tag-and-probe** для набора предотобранных событий **Z** (с более мягкими требованиями на событие)
- Проверка на Монте-Карло
 - Сравнение tag-and-probe метода с истинными эффективностями (MC-truth)
- **Пример:** эффективность трекинга



Корректировка на излучение в конечном состоянии

- Измеренное сечение корректируется до борновского приближения КЭД, так что его можно напрямую сравнивать с различными теоретическими предсказаниями.
- Корректировка излучения конечного состояния \rightarrow отношение предсказаний связки ResBos+PHOTOS и ResBos.
- Корректирующие факторы получены для всех переменных в каждом интервале, для которого извлекалось сечение

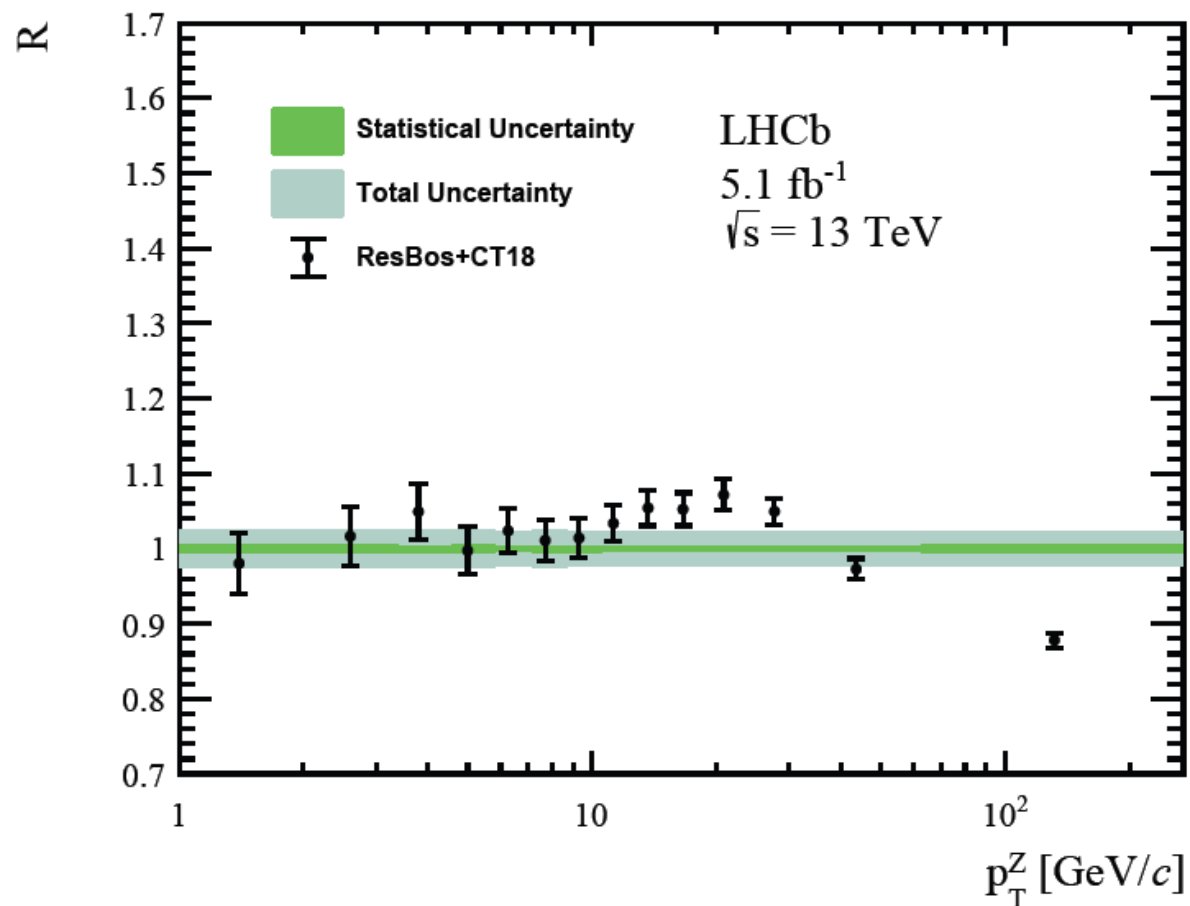
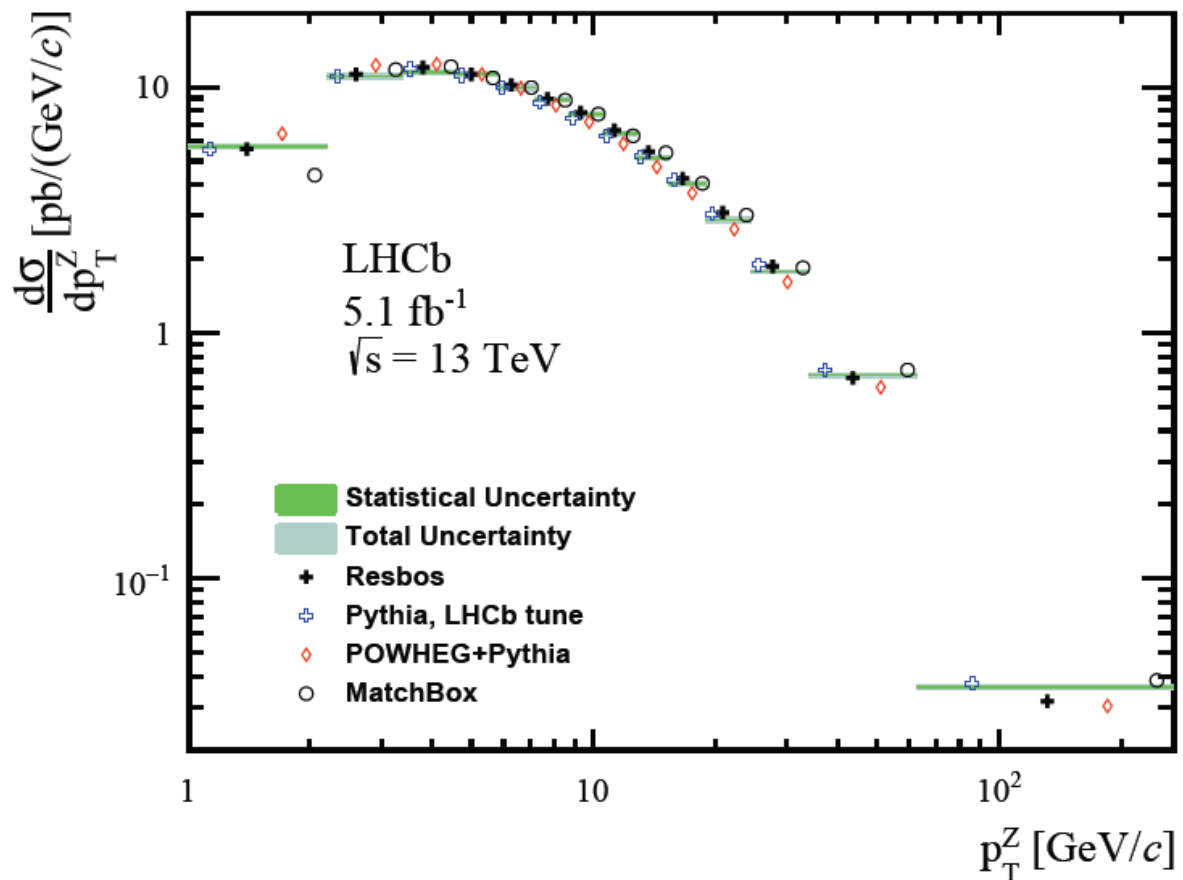


Дифференциальные сечения

$$2.0 < \eta < 4.5$$

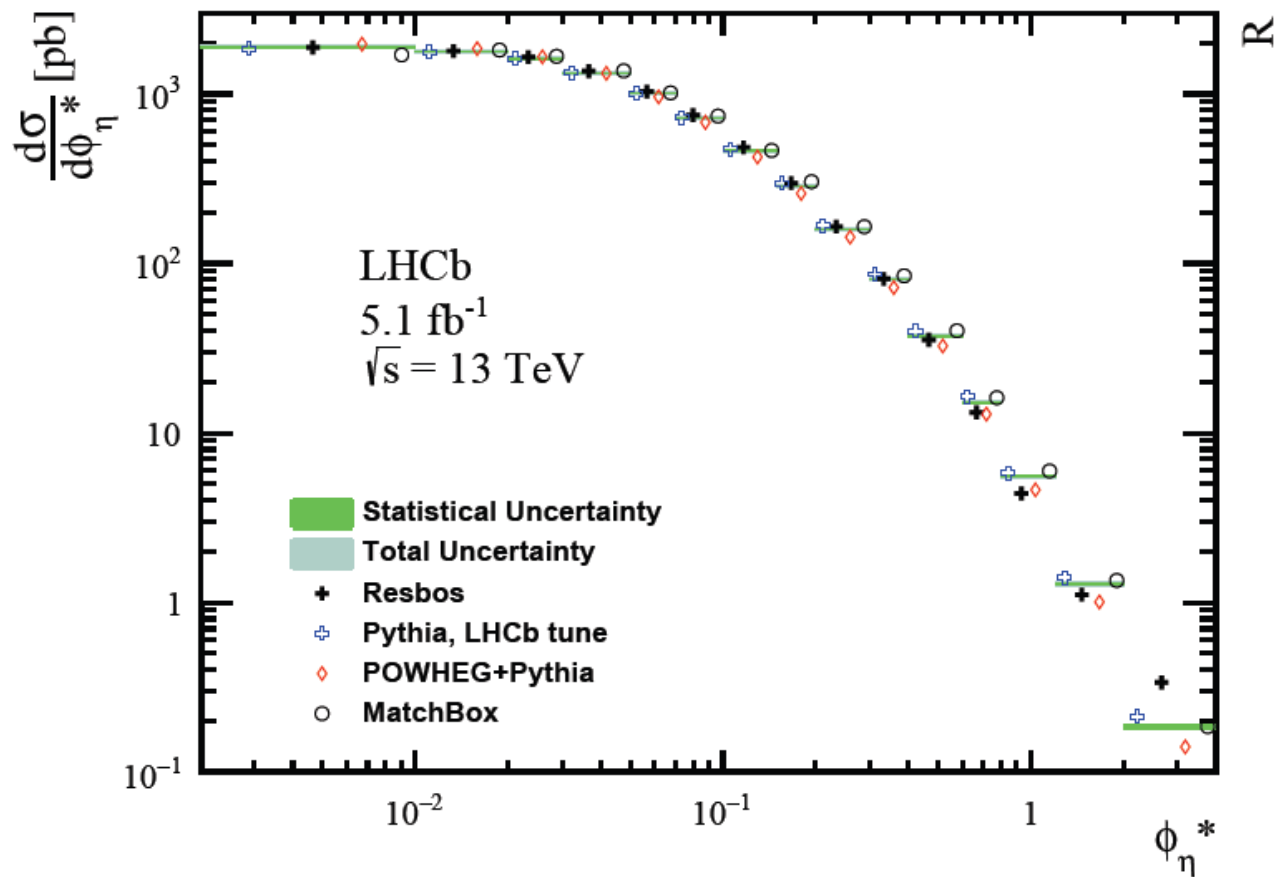
$$p_T > 20 \text{ GeV}/c$$

$$60 < M_{\mu\mu} < 120 \text{ GeV}/c^2$$

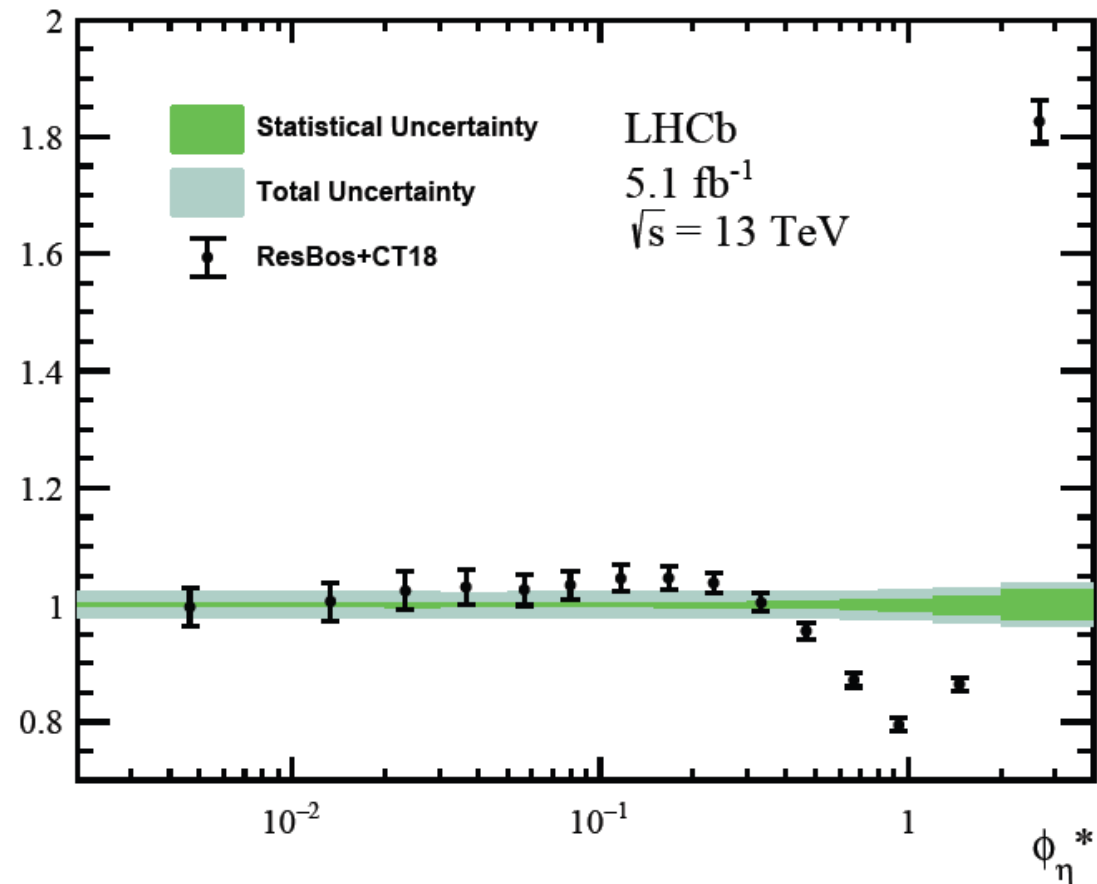


Дифференциальные сечения

$2.0 < \eta < 4.5$
 $p_T > 20 \text{ GeV}/c$
 $60 < M_{\mu\mu} < 120 \text{ GeV}/c^2$



R

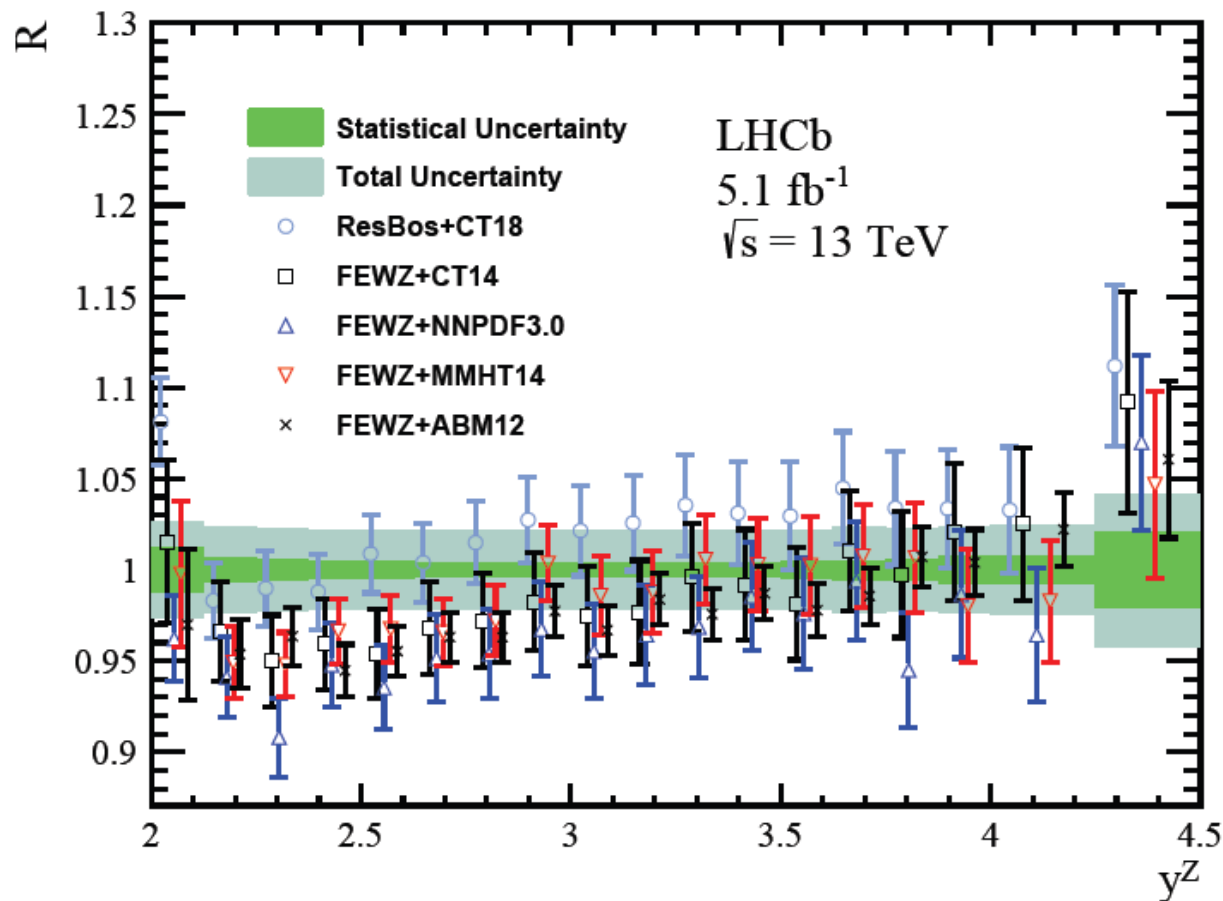
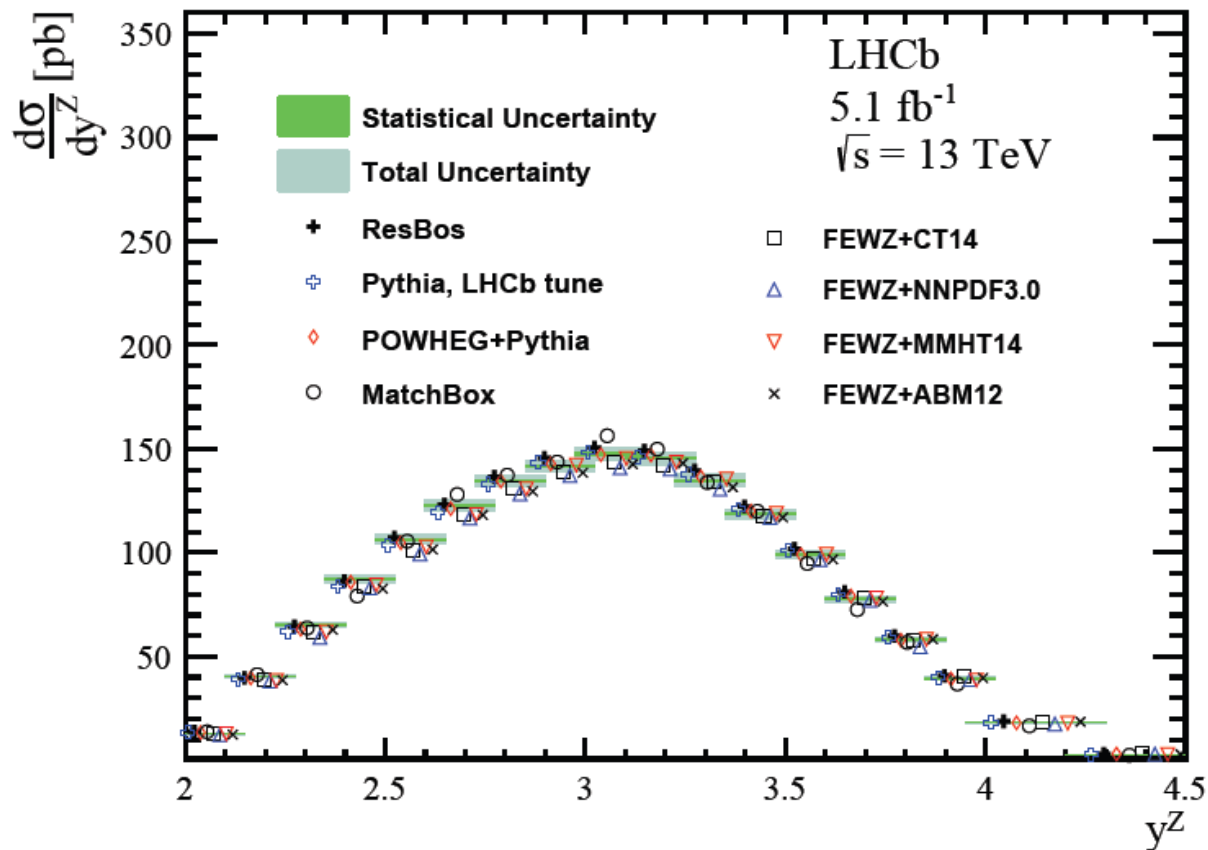


Дифференциальные сечения

$$2.0 < \eta < 4.5$$

$$p_T > 20 \text{ GeV}/c$$

$$60 < M_{\mu\mu} < 120 \text{ GeV}/c^2$$

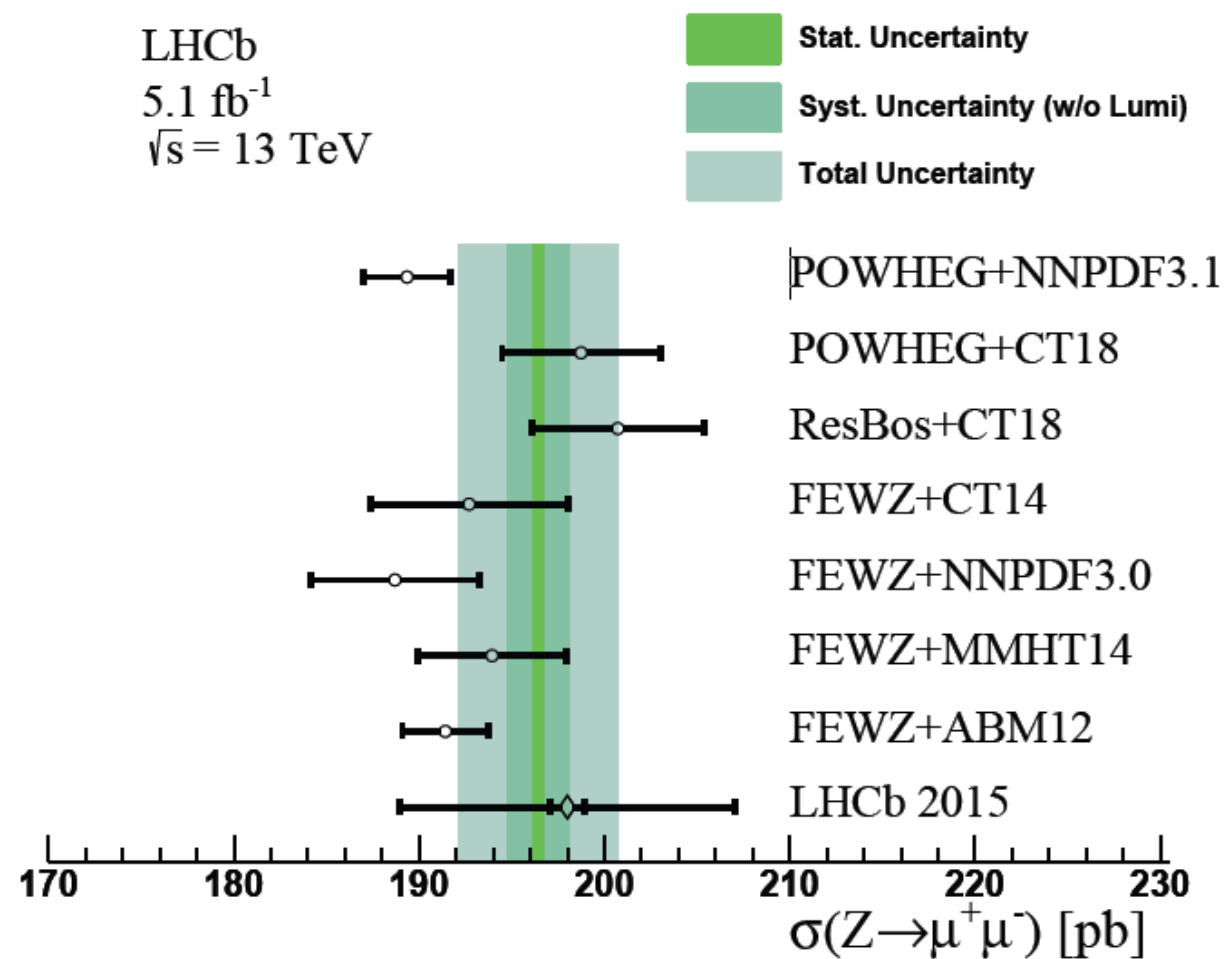


Интегральное сечение

$$2.0 < \eta < 4.5$$

$$p_T > 20 \text{ GeV}/c$$

$$60 < M_{\mu\mu} < 120 \text{ GeV}/c^2$$

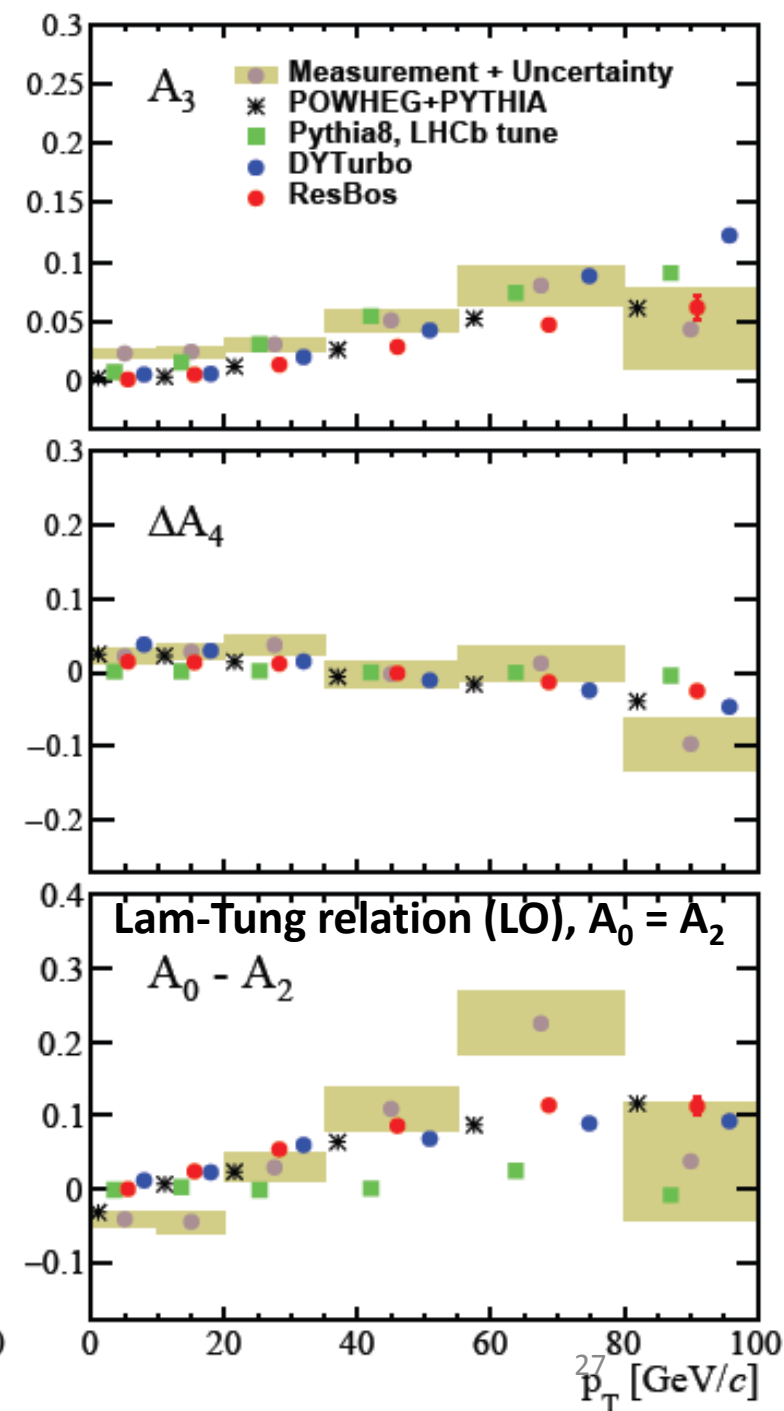
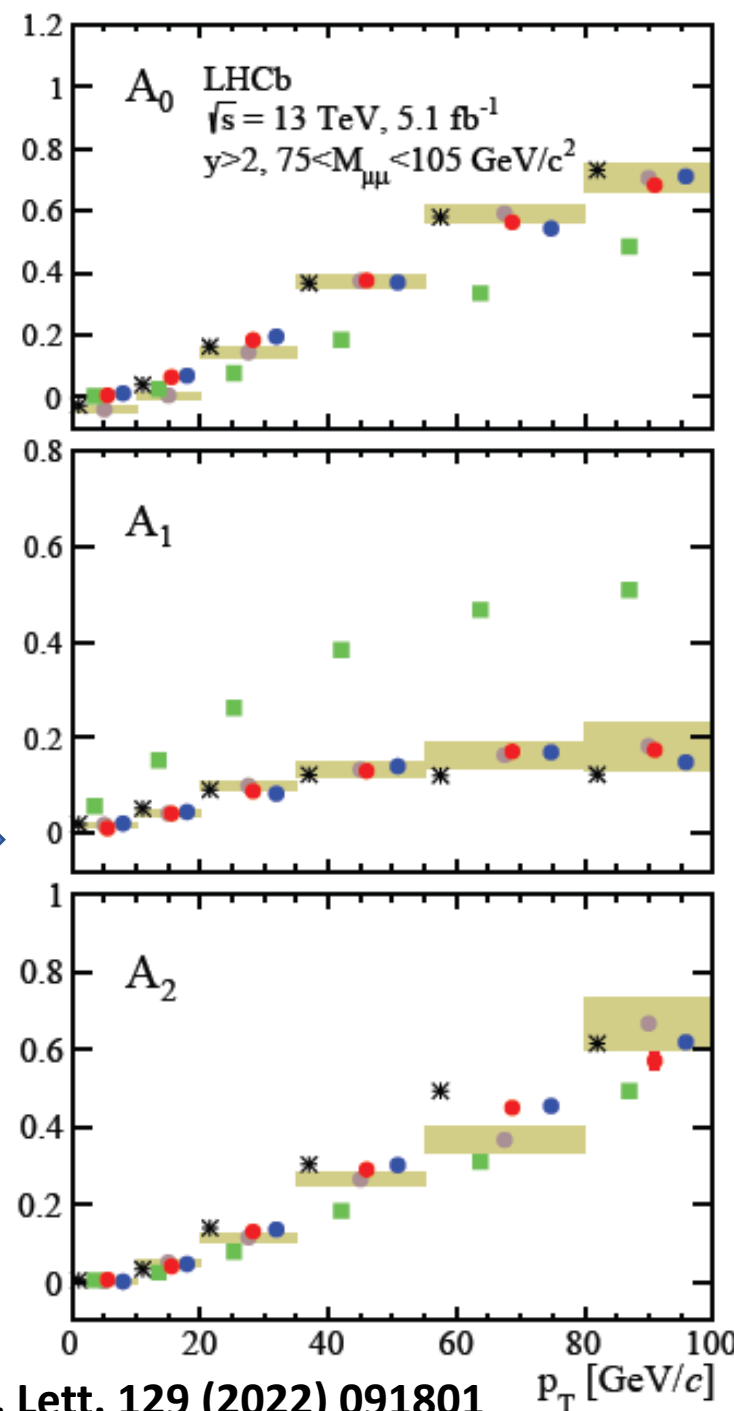


$$\sigma(Z \rightarrow \mu^+ \mu^-) = 196.4 \pm 0.2 \pm 1.6 \pm 3.9 \text{ pb},$$

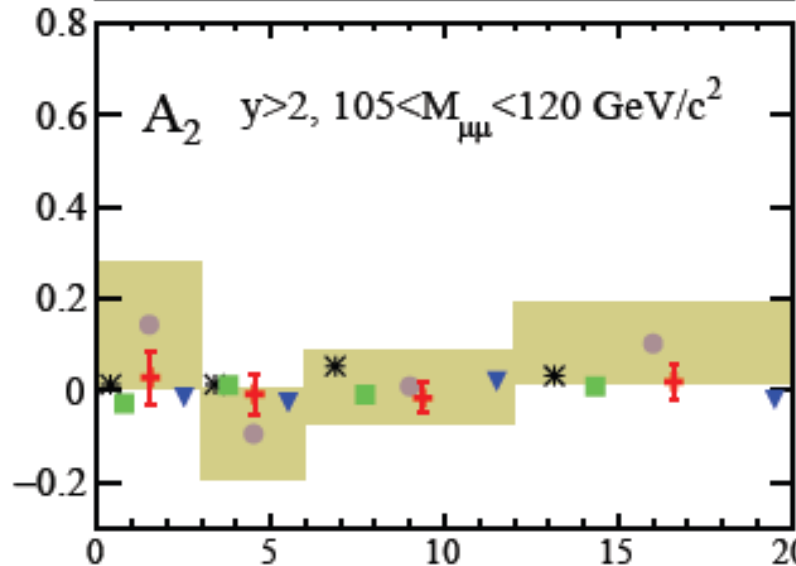
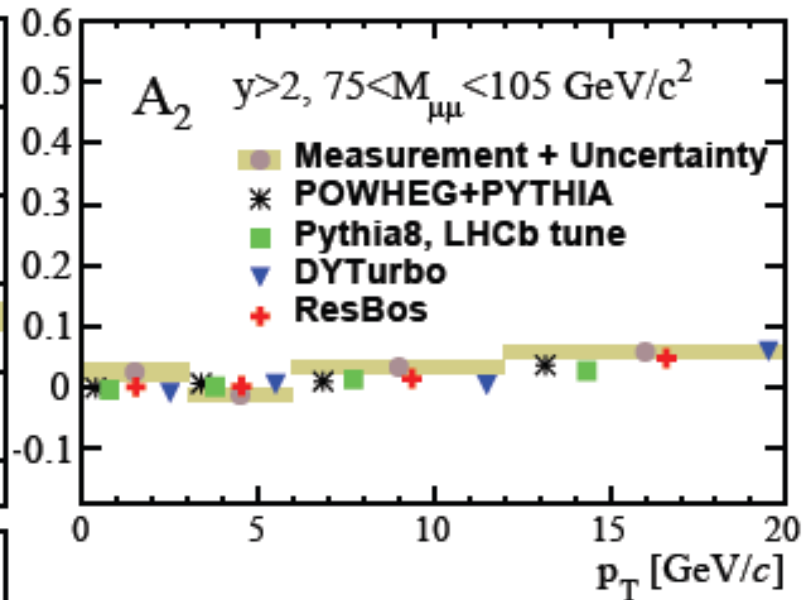
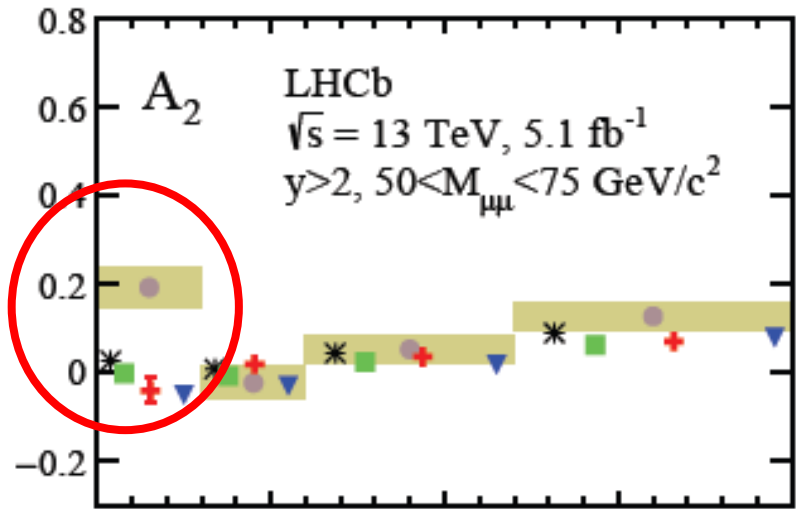
Source	$\Delta\sigma/\sigma$ [%]
Statistical	0.11
Background	0.06
Alignment & calibration	-
Efficiency	0.77
Closure	0.23
FSR	0.15
Total Systematic (excl. lumi.)	0.82
Luminosity	2.00
Total	2.16

Коэффициенты углового разложения

- В ведущем порядке теории возмущений (LO) в рамках КХД все угловые коэффициенты обращаются в нуль при стремлении поперечного импульса ди-лептона к нулю, за исключением A_4 , который отличен от нуля из-за нарушения четности в слабом взаимодействии.
- В порядке следующем за ведущим порядком (NLO), A_{0-3} становятся ненулевыми
- A_{5-7} имеют небольшие отклонения от нуля только в следующем за ведущим порядком (NNLO).
 - В данной работе $A_{5-7} = 0$ (fixed)



Коэффициенты углового разложения (малые p_T)

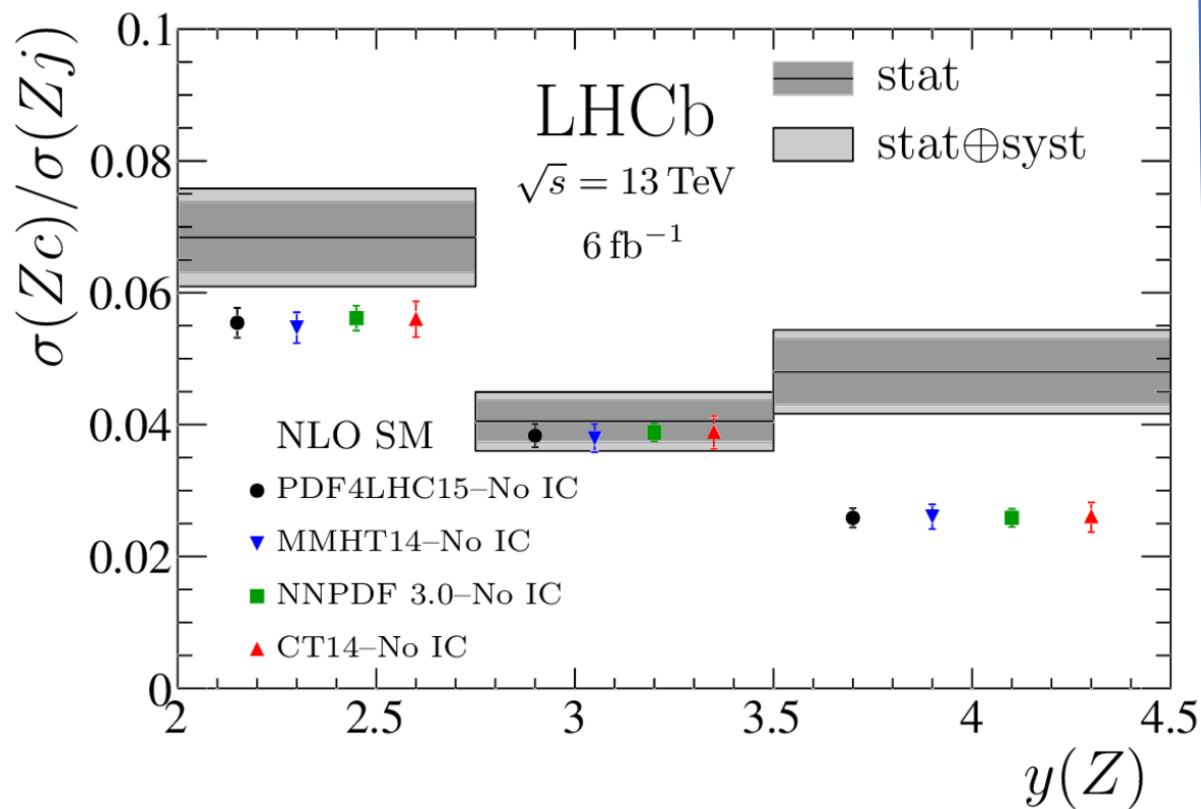


- Непертурбативные TMD PDF можно исследовать с помощью измерения A_2 в области малых p_T .

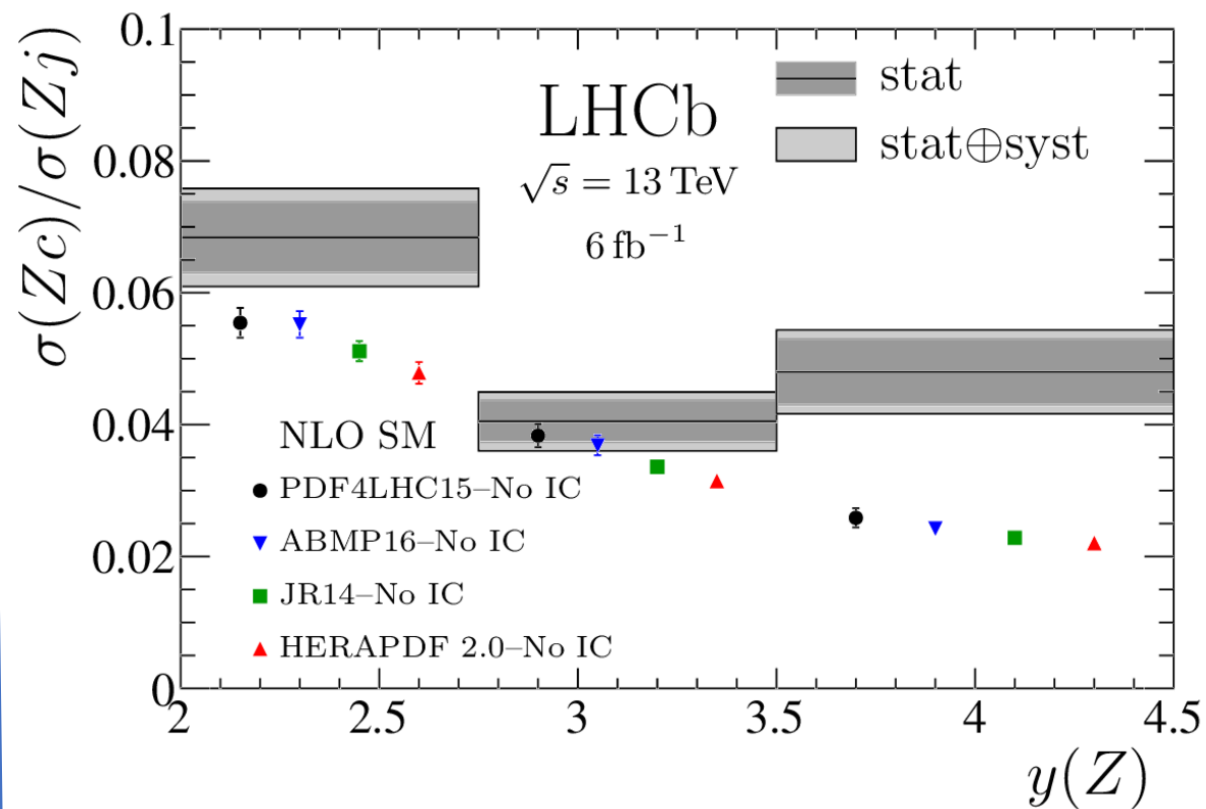
- Хорошее согласие во всех кинематических интервалах **кроме одного**
- Неясно, могут ли непертурбативные корреляции спин-импульс в протоне, описываемые распределением Бур-Малдерса, привести к таким вариациям, поскольку нет доступных феноменологических расчетов.
- Ни один из расчетов, использованных при сравнении, не включает этот тип непертурбативного эффекта.

Сравнение с теорией без IC

Три набора PDF, из которых формируется набор PDF4LHC15, обеспечивают согласованное предсказание.

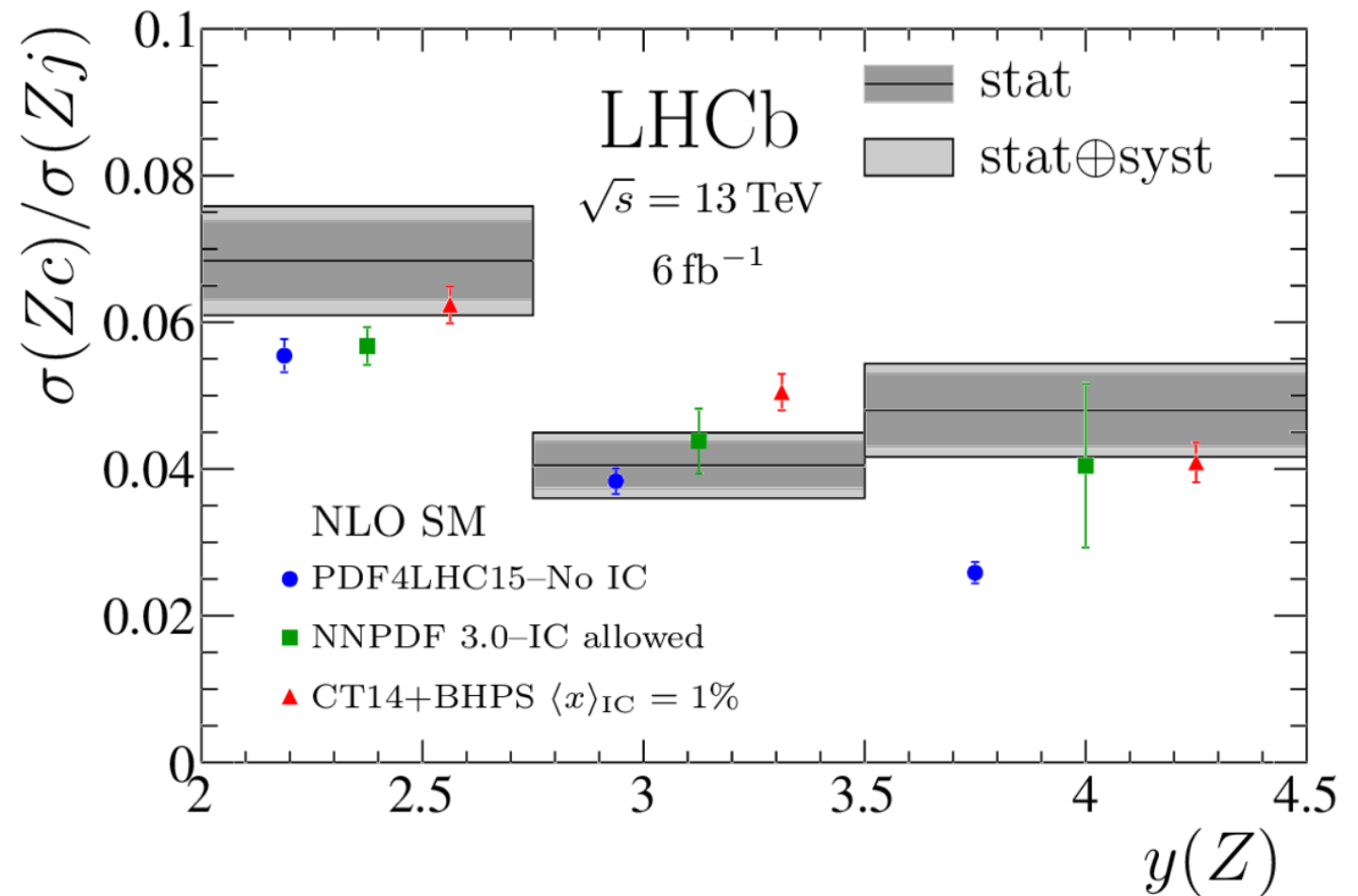


Наборы PDF ABM16, JR14 и HERAPDF 2.0 также дают качественно схожие предсказания, хотя предсказания JR14 и HERAPDF 2.0 смещены в сторону более низких значений.



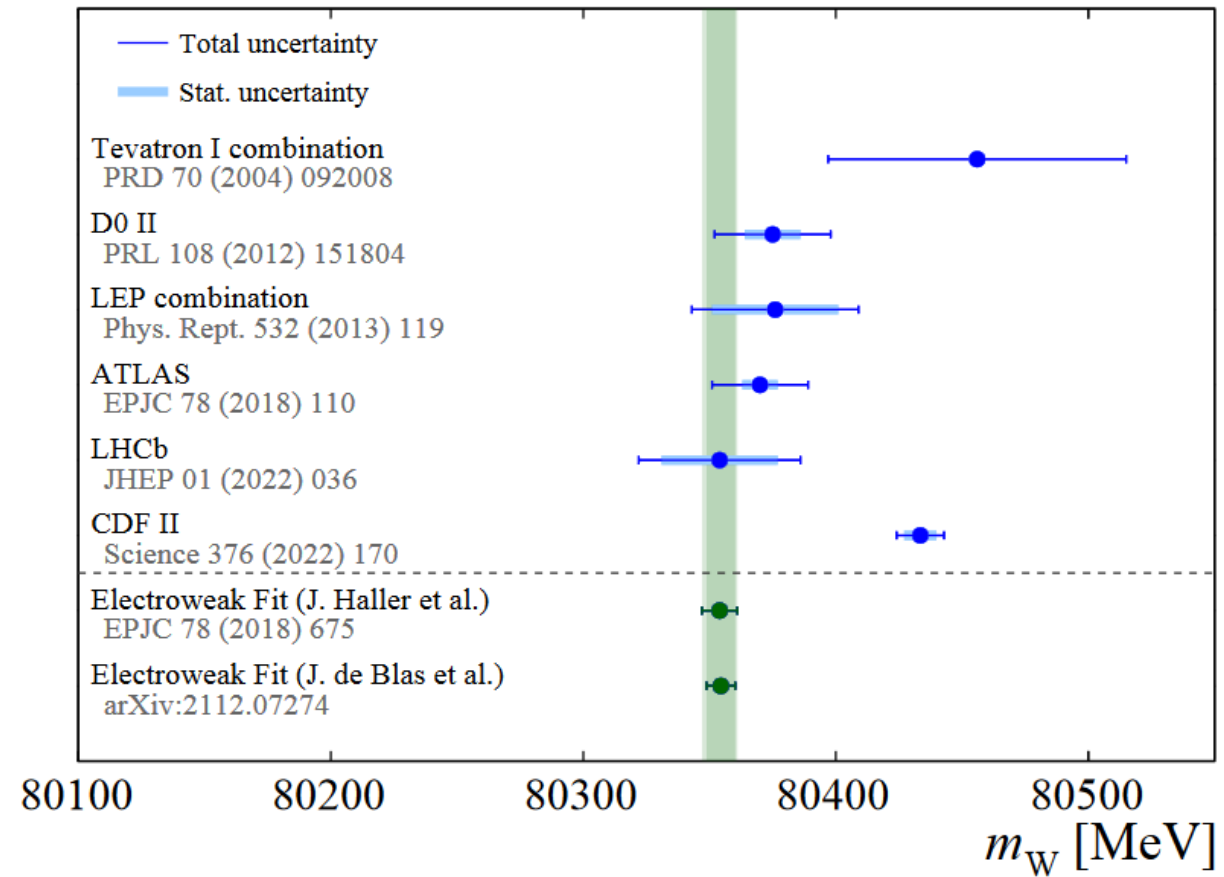
Сравнение с теорией с включением IC

- Наблюдаемый спектр демонстрирует значительное усиление отношения Z_c/Z_j при больших быстротах Z
- Это согласуется с ожидаемым эффектом, если волновая функция протона содержит компоненту $|uudc\bar{c}\rangle$, предсказанную BHPS.
- Однако выводы о том, содержит ли протон внутреннее очарование, можно сделать только после включения этих результатов в глобальный анализ PDF.



Масса W

- Сравнение предсказаний СМ и прямых измерений
- Измерения базируются на описании p_T -распределения для мюонов из распада W
- Контроль по параметрам мюонов из распадов Z
 - $m_W = 80354 \pm 23_{\text{stat}} \pm 10_{\text{exp}} \pm 17_{\text{theory}} \pm 9_{\text{PDF}} \text{ MeV}$
 - JHEP 01 (2022) 036
- Измерение LHCb находится в прекрасном согласии с предсказаниями СМ
- По точности новое измерение сопоставимой с объединенными данными LEP



- Измерения CDF II (апрель 2022) отклонение измеренной массы W , от предсказаний СМ.
- Индивидуально каждое предыдущее измерение находится в согласии с результатами CDF, но общая картина явно свидетельствует о расхождении

Выводы

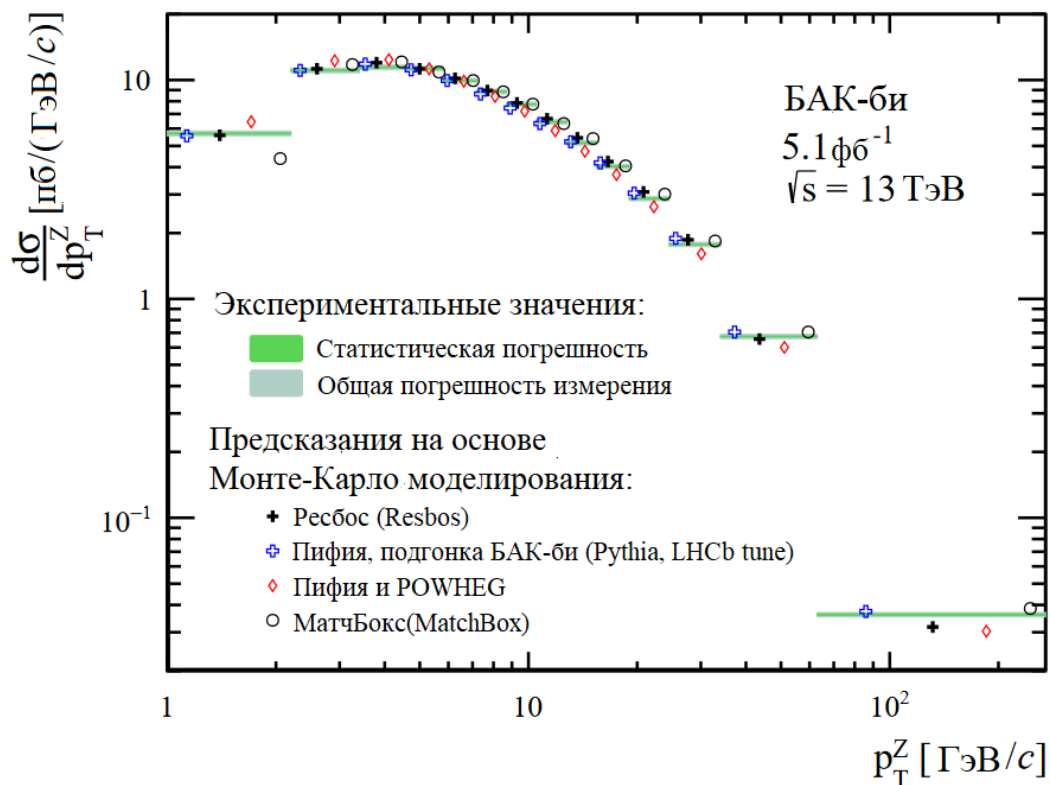
- Измерение дифференциальных характеристик рождения Z бозона производилось при помощи выделения событий распада $Z \rightarrow \mu^+\mu^-$ в наборе данных LHCb при $\sqrt{s} = 13 \text{ ТэВ}$ (**JHEP 07 (2022) 026**)
 - Был проведен анализ угловых распределений и распределений поперечному импульсу
 - Экспериментальные данные находятся в хорошем согласии с теоретическими предсказаниями.
- Коэффициенты углового разложения в целом согласуются с пулом теоретических предсказаний в том числе в районе малых p_T (**Phys. Rev. Lett. 129 (2022) 091801**).
- В исследовании корреляций $Z + c\text{-струя}$ получено указание на вклад очарованных кварков в волновую функцию протона (**Phys. Rev. Lett. 128 (2022) 082001**)
- Измерена масса W бозона с точностью сопоставимой с объединенными данными LEP (**JHEP 01 (2022) 036**)

Запасные слайды

Измерение сечений рождения Z бозона в pp взаимодействиях при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ на LHCb

- В рамках КХД сечение рождения Z вычисляется в третьем порядке теории возмущений (N^3LO).
- Измерение дифференциальных сечений рождения Z в кинематической области, доступной в эксперименте LHCb (БАК-би), позволит существенно уменьшить неопределенность партонных распределений для валентных кварков в области малых ($x \sim 5 \times 10^{-5}$) и больших ($x \sim 0,8$) долей импульса

796 000 событий-кандидатов.



- Измерение дифференциальных характеристик рождения Z бозона производилось при помощи выделения событий распада $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$ в наборе данных LHCb при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ.
- Был проведен анализ угловых распределений и распределений поперечному импульсу
- Экспериментальные данные находятся в хорошем согласии с теоретическими предсказаниями.
- Результаты работы опубликованы: **JHEP 07 (2022) 26**
- Сотрудники НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, обеспечивали бесперебойную работу Мюонной системы LHCb и принимавших активное участие в подготовке публикации