

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ДРЕЛЛА – ЯНА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ «КОМПАКТНЫЙ МЮОННЫЙ СОЛЕНОИД» НА БОЛЬШОМ АДРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ

И. Н. ГОРБУНОВ¹⁾, А. В. ЛАНЁВ¹⁾, В. В. ШАЛАЕВ^{1),2)}, С. В. ШМАТОВ¹⁾

(от имени коллаборации CMS)

¹⁾Объединенный институт ядерных исследований,
ул. Жолио Кюри, 6, 141980, г. Дубна, Московская область, Россия

²⁾Государственный университет «Дубна»,
ул. Университетская, 19, 141982, г. Дубна, Московская область, Россия

Представлены результаты измерений дифференциальных и дважды дифференциальных сечений ($\frac{d\sigma}{dM}$ и $\frac{d^2\sigma}{dMdy}$) процессов Дрелла – Яна в протон-протонных столкновениях при энергии 7 и 8 ТэВ в системе центра масс. Дважды дифференциальные сечения $\frac{d^2\sigma}{dMdy}$ изучены в диапазоне значений переменной Бьёркена $0,0003 < x_{\pm} < 1,0$ и масштаба взаимодействий $600 < Q^2 < 750\,000$ (ГэВ²/с²), а дифференциальное сечение $\frac{d\sigma}{dM}$ исследовано в более широком диапазоне: $300 < Q^2 < 3\,000\,000$ (ГэВ²/с²). Измерения выполнены в объединенном канале с парой электронов и мюонов на данных эксперимента «Компактный мюонный соленоид» (CMS), набранных во время первого этапа работы Большого адронного коллайдера (ЛHC) в 2011 и 2012 гг. и соответствующих интегральной светимости 5,1 фбн⁻¹ при 7 ТэВ и 20,6 фбн⁻¹ при 8 ТэВ. Также обсуждаются измерения величин асимметрии вылета лептонов «вперед-назад» A_{FB} и угловых коэффициентов A_i . Полученные результаты в пределах погрешности совпадают с предсказаниями стандартной модели в первом и втором порядках теории возмущений.

Ключевые слова: Большой адронный коллайдер; эксперимент CMS; процесс Дрелла – Яна; угловые коэффициенты; дифференциальное сечение; асимметрия «вперед-назад».

Образец цитирования:

Горбунов И.Н., Ланёв А.В., Шалаев В.В., Шматов С.В. Изучение процессов Дрелла – Яна в эксперименте «Компактный мюонный соленоид» на Большом адронном коллайдере. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2019;2:16–25.
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2019-2-16-25>

For citation:

Gorbunov IN, Lanyov AV, Shalaev VV, Shmatov SV. Study of Drell – Yan processes with the compact muon solenoid experiment at Large Hadron Collider. *Journal of the Belarusian State University. Physics.* 2019;2:16–25. Russian.
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2019-2-16-25>

Авторы:

Илья Николаевич Горбунов – кандидат физико-математических наук; старший научный сотрудник научно-экспериментального отдела физики на CMS лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина.

Александр Викторович Ланёв – кандидат физико-математических наук; ведущий научный сотрудник лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина.

Владислав Владимирович Шалаев – инженер научно-экспериментального отдела физики на CMS лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина¹⁾, аспирант кафедры биофизики факультета естественных и инженерных наук²⁾. Научный руководитель – С. В. Шматов.

Сергей Владимирович Шматов – кандидат физико-математических наук; начальник сектора № 1 новой физики на CMS.

Authors:

Ilya N. Gorbunov, PhD (physics and mathematics); senior researcher at the scientific experimental department of physics at CMS, Veksler and Baldin laboratory of high energy physics.
ilya.gorbunov@cern.ch

Alexander V. Lanyov, PhD (physics and mathematics); leading researcher at the Veksler and Baldin laboratory of high energy physics.

alexander.lanyov@cern.ch

Vladislav V. Shalaev, engineer at the scientific experimental department of physics at CMS, Veksler and Baldin laboratory of high energy physics^a, postgraduate student at the department of biophysics, faculty of natural and engineering sciences^b.
vladislav.shalaev@cern.ch

Sergey V. Shmatov, PhD (physics and mathematics); head at the department No. 1 of a new physics at CMS.

shmatov@cern.ch

STUDY OF DRELL – YAN PROCESSES WITH THE COMPACT MUON SOLENOID EXPERIMENT AT LARGE HADRON COLLIDER

I. N. GORBUNOV^a, A. V. LANYOV^a, V. V. SHALAEV^{a,b}, S. V. SHMATOV^a

(on behalf of the CMS Collaboration)

^aJoint Institute for Nuclear Research, 6 Zholio Kyuri Street, Dubna 141980, Moscow region, Russia

^bDubna State University, 6 Universitetskaya Street, Dubna 141982, Moscow region, Russia

Corresponding author: V. V. Shalaev (vladislav.shalaev@cern.ch)

The results of measurements of the differential and double-differential cross sections ($\frac{d\sigma}{dM}$ and $\frac{d^2\sigma}{dMdy}$) of Drell – Yan processes in proton-proton collisions at 7 and 8 TeV in c.m.s. are presented. The double-differential cross section $\frac{d^2\sigma}{dMdy}$ has been studied in the range of the Bjorken scaling variable values $0.0003 < x_{\pm} < 1.0$ and the evolution scale $600 < Q^2 < 750\,000$ (GeV²/c²), and the differential cross section $\frac{d\sigma}{dM}$ has been explored in a wider range $300 < Q^2 < 3\,000\,000$ (GeV²/c²). The measurements were performed in a combined channel with a pair of electrons and muons and are based on the experimental data of the Compact Muon Solenoid (CMS), collected during the first Large Hadron Collider (LHC) Run in 2011 and 2012. The statistic is corresponding to integrated luminosity of 5.1 fb⁻¹ at 7 TeV and 20.6 fb⁻¹ at 8 TeV. The measurements of the lepton forward-backward asymmetry A_{FB} and the angular coefficients A_i are also discussed. These results agree within the uncertainty with the predictions of the standard model in the leading- and next-to-leading orders.

Keywords: Large Hadron Collider; CMS experiment; Drell – Yan process; differential cross section; angular coefficients; forward-backward asymmetry.

Введение

На сегодняшний день абсолютное большинство наблюдаемых явлений в физике элементарных частиц может быть успешно описано в рамках стандартной модели (СМ). На протяжении нескольких десятилетий экспериментальные данные подтверждают справедливость данной теории и ее предсказательную силу. Вместе с тем, несмотря на отсутствие опровержений прогнозов СМ, их удивительную точность и открытие последнего краеугольного камня – бозона Хиггса, эта модель обладает рядом внутренних недостатков и нерешенных проблем (проблема иерархий энергетических масштабов и присутствия темной материи во Вселенной, неясный механизм СР-нарушения, отсутствие в СМ гравитационных взаимодействий, большое количество свободных параметров и др.), что не позволяет считать ее окончательным вариантом теории. Необходимость решения данных проблем жестко диктует выход за рамки СМ, т. е. приводит к задаче построения более общей теории. К настоящему времени уже разработано множество теоретических сценариев, позволяющих расширить СМ и с определенным успехом разрешить описанные выше проблемы. Так, некоторыми из них предсказывается рождение ненаблюдаемых пока калибровочных бозонов и проявление прочих эффектов новой физики при возрастании энергии взаимодействия.

В целях проверки справедливости СМ при больших энергетических масштабах, а также поиска новой физики, выходящей за рамки данной теории, осуществляется глобальная программа экспериментальных исследований (см., например, обзоры [1–5]) на различных ускорительных комплексах, в частности в одном из двух многоцелевых экспериментов на Большом адронном коллайдере «Компактный мюонный соленоид» (CMS) [6]. Традиционным направлением является изучение закономерностей рождения пар лептонов при аннигиляции кварк-антикварковой пары посредством обмена переносчиками электрослабого взаимодействия $q\bar{q} \rightarrow \gamma^*/Z \rightarrow l^+l^-$ – процесса Дрелла – Яна [7] (рис. 1).

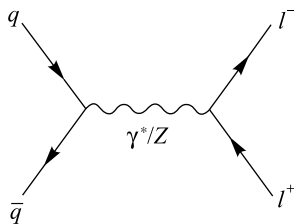


Рис. 1. Рождение пары лептонов в процессе Дрелла – Яна

Fig. 1. Drell – Yan dilepton production

Процессы подобного рода интересны для изучения на ускорителе ЛHC по ряду причин. Во-первых, это проверка теоретических расчетов и увеличение точности измерения сечений процесса Дрелла – Яна. На данный момент теоретические вычисления этих сечений проводятся в первом (NLO) и втором (NNLO) порядках теории возмущений и достигают точности ~1 % в области масс Z-бозона (~90 ГэВ), так что

сравнение предсказываемых значений с измеренными в эксперименте позволяет оценить наши знания о природе процесса Дрелла – Яна и осуществить поиск отклонений от предсказаний СМ, а также стимулирует дальнейшие вычисления в рамках пертурбативной теории КХД. Во-вторых, данный процесс имеет простую экспериментальную топологию (сигнатуру) – два изолированных лептона с большими поперечными импульсами в конечном состоянии. Такая топология событий обеспечивает как высокую эффективность регистрации лептонной пары, так и надежное подавление фоновых событий. Большая накопленная статистика позволяет с высокой точностью выполнить измерение дифференциальных сечений рождения мюонных пар в процессах Дрелла – Яна и изучить их угловые распределения в зависимости от быстроты и инвариантной массы мюонной пары. Также можно использовать процесс Дрелла – Яна для оценки технических характеристик детектора (энергетического разрешения, эффективностей реконструкции и идентификации лептонов).

Таким образом, измерения характеристик процесса Дрелла – Яна (сечений, их энергетических зависимостей, угловых распределений и пространственной асимметрии частиц в конечном состоянии) очень важны для реализации различных исследований в рамках физической программы ЛНС. Они являются не только чувствительным инструментом для поиска сигналов новой физики за рамками СМ, но и одним из источников фонов при изучении парного рождения топ-кварков, калибровочных бозонов, поиске и измерении свойств бозона Хиггса в канале распада на 4 лептона.

В данной работе приведен краткий обзор главных результатов по исследованию закономерностей рождения пар лептонов в процессе Дрелла – Яна, основанных на данных, набранных в 2011–2012 гг. во время первого этапа работы ЛНС (Run 1) на сталкивающихся протонных пучках при энергии 7 и 8 ТэВ в системе центра масс. Полный объем проанализированных данных соответствует интегральной светимости $5,1 \text{ фбн}^{-1}$ при 7 ТэВ и $20,6 \text{ фбн}^{-1}$ при 8 ТэВ.

Дифференциальное сечение процессов Дрелла – Яна

На рис. 2 и 3 представлены соответственно дифференциальное $\frac{1}{\sigma_z} \frac{d\sigma}{dM}$ и дважды дифференциальное сечение $\frac{1}{\sigma_z} \frac{d\sigma}{dM} \frac{d\sigma}{dy}$ пар лептонов $\mu^+\mu^-$ и e^+e^- при $\sqrt{s} = 8 \text{ ТэВ}$ в процессах Дрелла – Яна (M – инвариантная масса лептонной пары, y – ее быстрота) [8]. Величины измеренных сечений находятся в хорошем согласии с результатами NNLO-вычислений в рамках СМ во всем диапазоне инвариантных масс ($20 < M < 1500 \text{ ГэВ}/c^2$) и быстрот ($0 < |y| < 2,4$). В частности, в области Z-пика суммарная относительная неопределенность измерения дифференциального сечения составляет менее 6 %, что является самым точным измерением этой характеристики на коллайдерах на данный момент.

Измерения сопоставлены с предсказаниями FEWZ, использующими различные наборы функций распределений партонов PDF (NNPDF2.1, CT10) (рис. 3). Точные измерения дважды дифференциальных сечений могут быть применены для улучшения существующих оценок PDF.

Увеличение энергии взаимодействия с 7 до 8 ТэВ обеспечивает возможность измерения энергетической зависимости сечений процесса Дрелла – Яна. Следует отметить, что эти сечения зависят от разных теоретических параметров, таких как бегущая константа связи КХД, PDF, масштабы перенормировки и факторизации КХД. Теоретические погрешности, связанные с неопределенностями этих параметров, существенны, но коррелированы с энергией, поэтому измерения отношений этих сечений, нормированных на сечение рождения в области пика Z-бозона, могут улучшить точность сравнения результатов измерения с предсказаниями СМ.

Таким образом, энергетическая зависимость сечений $\frac{d\sigma}{dM}$ и $\frac{d^2\sigma}{dMdy}$ является важной характеристикой для тестирования PDF, которые к тому же чрезвычайно чувствительны к эффектам высших порядков КХД. Указанные зависимости изучались с помощью измерения отношения сечений, полученных при $\sqrt{s} = 7 \text{ ТэВ}$ и $\sqrt{s} = 8 \text{ ТэВ}$ (рис. 4). Для уменьшения систематических погрешностей сечения во всей области M нормированы на сечения в области M_Z .

Форма распределений не противоречит ожиданиям СМ с учетом зависимости PDF от энергетического масштаба взаимодействий Q и переменной Бьёркена x : в области малых x наблюдается линейный рост отношения дифференциальных сечений к функции логарифма массы (при этом в области Z-пика отношение равно 1 по определению), а начиная с $x \sim 0,3$ ($M \sim 200 \text{ ГэВ}/c^2$) следует быстрый рост, обусловленный повышением доступного масштаба взаимодействия для энергии столкновений протонов 8 ТэВ. Мы можем констатировать согласие в пределах ошибок измерения отношения R с теоретическим предсказанием (вероятность согласия составляет 87 %).

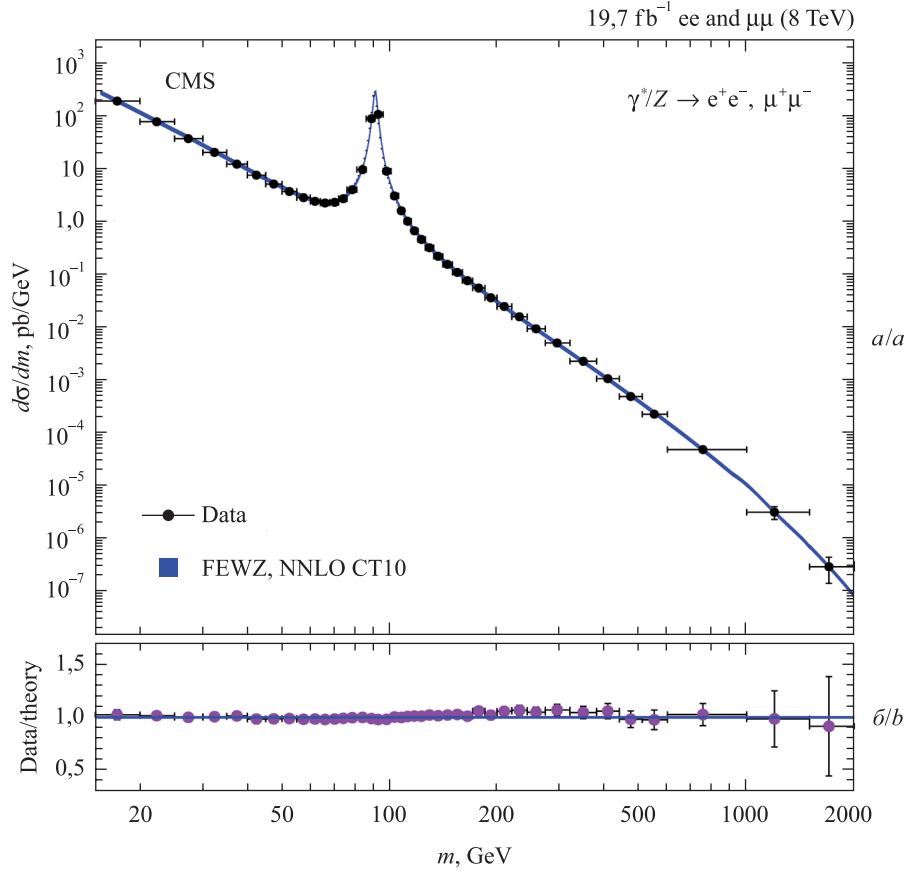


Рис. 2. Дифференциальное сечение $\frac{1}{\sigma_Z} \frac{d\sigma}{dm}$ рождения пар лептонов ($\mu^+\mu^-$ и e^+e^-) в процессах Дрелла – Яна [8] (a); сравнение экспериментальных данных и предсказаний СМ в NNLO (b)

Fig. 2. The Drell – Yan differential cross section as measured in the combined dilepton channel and as predicted by NNLO calculations [8] (a); comparison of experimental data and predictions of SM in NNLO (b)

Исследование данного отношения в различных интервалах M показало, что при небольших значениях масс оно практически не зависит от быстроты пары, но с увеличением значения массы, начиная с области Z -пика, демонстрирует довольно сильный рост до 20 %. Если в области масс, меньших массы Z -бозона, теоретические предсказания PDF NNLO NNPDF2.1 находятся в более тесном согласии с измеренными значениями, чем PDF NNLO CT10, то в районе Z -пика в обоих случаях наблюдается небольшая разница между данными и теорией (в центральной области абсолютной быстроты). В областях с большой быстротой и большой массой измерения находятся на нижнем крае диапазона неопределенности предсказаний теории ввиду ограниченности статистики при $\sqrt{s} = 7$ ТэВ.

Угловые коэффициенты A_i

Также важным направлением исследований процессов Дрелла – Яна, позволяющим извлечь информацию о PDF, эффектах высших порядков КХД и влиянии поляризации протонов на сечение процесса, является измерение угловых коэффициентов A_i в уравнении для дважды дифференциального сечения. В нулевом порядке теории возмущений уравнение выглядит следующим образом:

$$\frac{d^2\sigma}{d\theta^* d\varphi^*} = \sum_{i=0}^5 \sigma^i = 1 + \cos^2 \theta^* + \frac{1}{2} A_0 (1 - 3 \cos^2 \theta^*) + A_1 \sin(2\theta^*) \cos \varphi^* + \frac{1}{2} A_2 \sin^2 \theta^* \cos(2\varphi^*) + A_3 \sin \theta^* \cos \varphi^* + A_4 \cos \varphi^*,$$

где θ^* и φ^* – азимутальный и полярный углы в системе покоя Z -бозона (в данном случае – система Коллинза – Сопера); A_0, A_1, \dots, A_4 – коэффициенты, являющиеся функциями кинематических переменных Z -бозона (q_T, y, M).

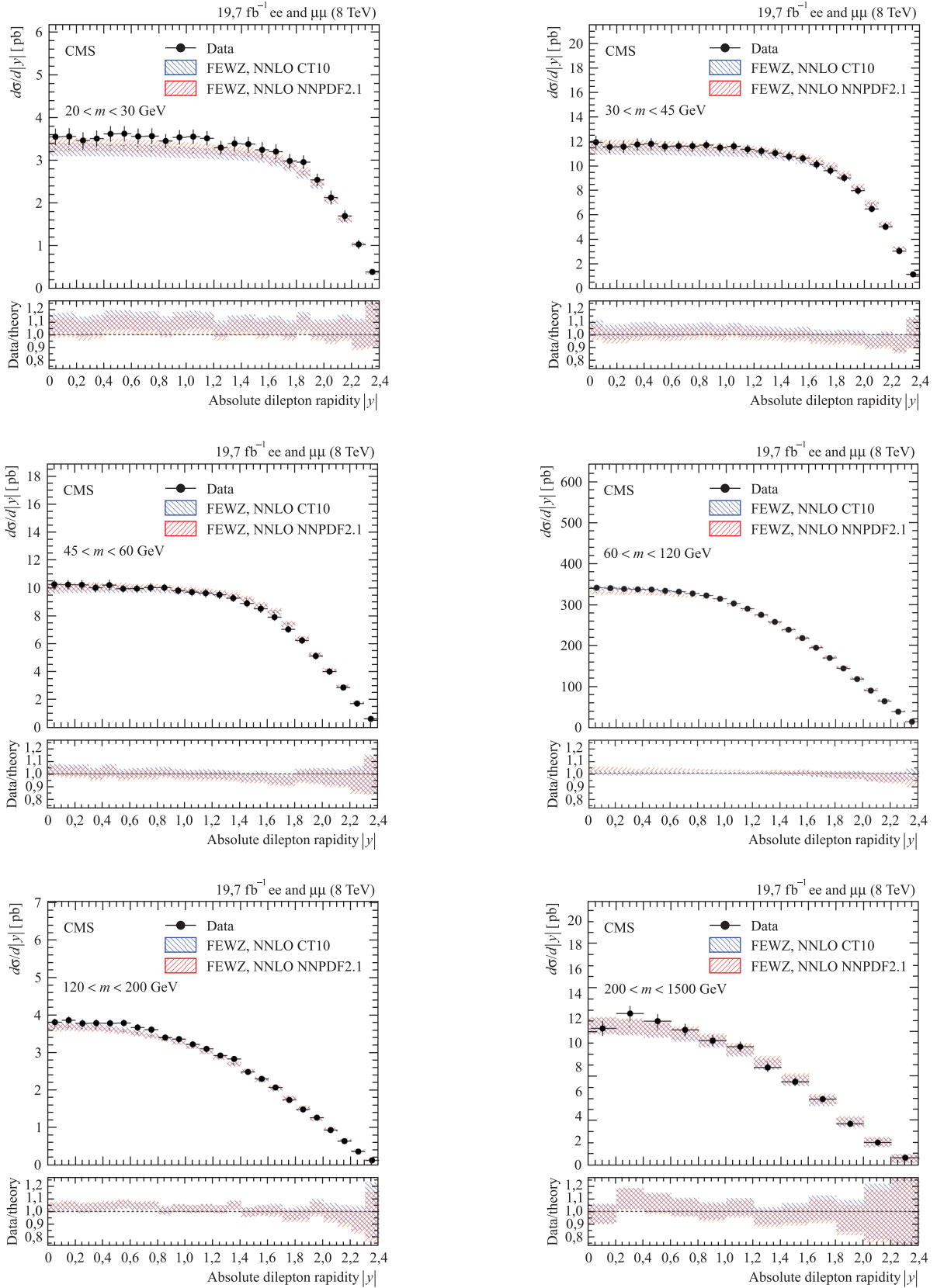


Рис. 3. Двойное дифференциальное сечение $\frac{1}{\sigma_Z} \frac{d\sigma}{dM} \frac{d\sigma}{dy}$ пар лептонов ($\mu^+\mu^-$ и e^+e^-) в процессах Дрелла – Яна в зависимости от быстроты Z-бозона в 6 интервалах инвариантной массы [8]. Сравнение экспериментальных данных и предсказаний СМ в NNLO

Fig. 3. The Drell – Yan dilepton rapidity distribution $\frac{1}{\sigma_Z} \frac{d\sigma}{dM} \frac{d\sigma}{dy}$ within the detector acceptance, plotted for different mass ranges, as measured in the combined dilepton channel and as predicted by NNLO calculations [8]. Bottom figure shows a comparison of experimental data and predictions of SM in NNLO

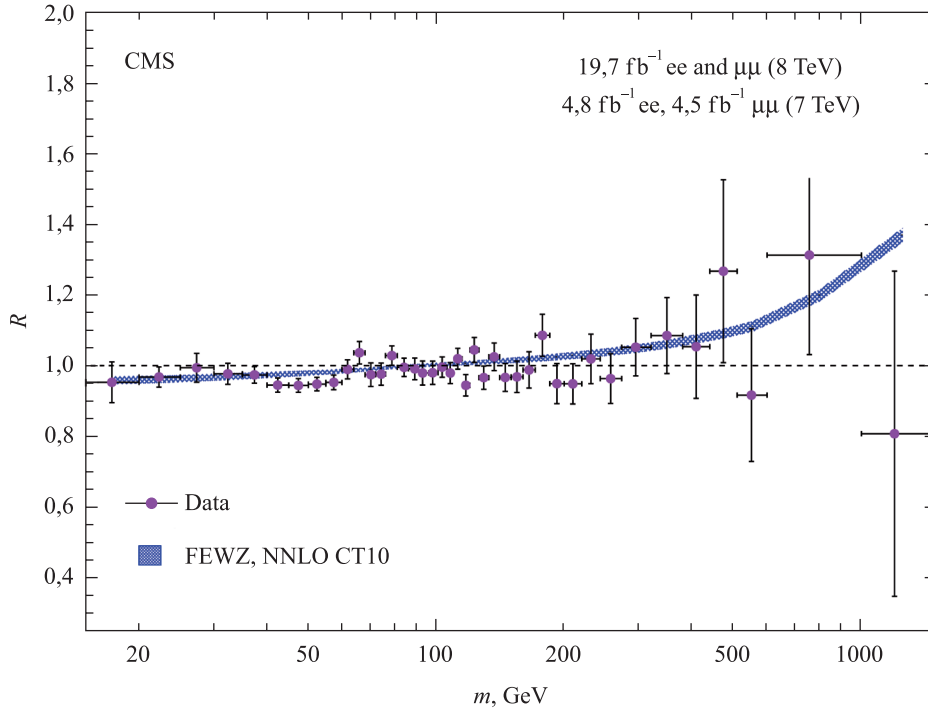


Рис. 4. Отношение дифференциальных сечений $\frac{d\sigma}{dM}$, измеренных при \sqrt{s} , равном 8 и 7 ТэВ, в зависимости от инвариантной массы лептонной пары [8]. Приводятся NNLO-вычисления CM

Fig. 4. Measured DY double ratios at center-of-mass energies of 7 and 8 TeV in the combined dilepton channel as compared to NNLO calculations [8]

На рис. 5 представлены результаты измерения угловых коэффициентов A_i ($i = 1, 4$) и разности $A_0 - A_2$ в зависимости от поперечного импульса Z -бозона в двух интервалах быстроты в мюонном канале [9]. Как и предсказывает СМ, значения угловых коэффициентов возрастают пропорционально величине поперечного импульса Z -бозона (кроме A_4 , который отвечает за асимметрию «вперед-назад» A_{FB} и присутствует в лидирующем порядке (ЛО) теории возмущений КХД), так как влияние эффектов высших порядков увеличивается с ростом q_T . Также отметим, что значения коэффициентов A_0 и A_2 хоть и являются близкими, однако имеет место ненулевая разность между ними (нарушение теоремы Лама – Тунга) [10], значение которой также пропорционально q_T . Первые однозначные указания на нарушение соотношения Лама – Тунга при росте поперечного импульса Z -бозона q_T были получены еще в 1988 г. в эксперименте NA10 (ЦЕРН) и подтверждены годом спустя экспериментами в Фермилабе. Однако эксперимент CDF на Тэватроне зафиксировал сохранение этого соотношения в пределах ошибок в области q_T до 55 ГэВ/с. Поэтому данные ЛHC представляли собой ценность для того, чтобы поставить точку в этом вопросе. Результаты эксперимента CMS на статистике первого сеанса работы ЛHC однозначно продемонстрировали нарушение соотношения Лама – Тунга в области q_T до 200 ГэВ/с. При этом величина нарушения оказалась большей, чем предсказывается вычислениями во втором порядке теории возмущений. Таким образом, остается непонятным, с чем связано остаточное нарушение соотношения Лама – Тунга: с недоучтенными вкладами за пределами второго порядка КХД или с другими явлениями (эффекты от высших порядков и твистов КХД, а также нетривиальной структуры вакуума КХД, отражающейся в корреляции спинов партонов и их ненулевого импульса в начальном состоянии). На этот вопрос должны дать ответ комплексные исследования, включающие как более точные измерения на большей статистике, так и развитие соответствующего теоретического описания физических процессов.

Асимметрия «вперед-назад» A_{FB}

Особое внимание при изучении угловых распределений в процессах Дрелла – Яна уделяют явлению асимметрии вылета мюона определенного знака в направлении «вперед-назад» относительно направления движения системы покоя рожденной лептонной пары. Эта асимметрия является следствием нарушения P -четности в процессах Дрелла – Яна, что вызвано присутствием в слабых взаимодействиях векторных и аксиально-векторных токов. Важность измерения A_{FB} обусловлена чувствительностью

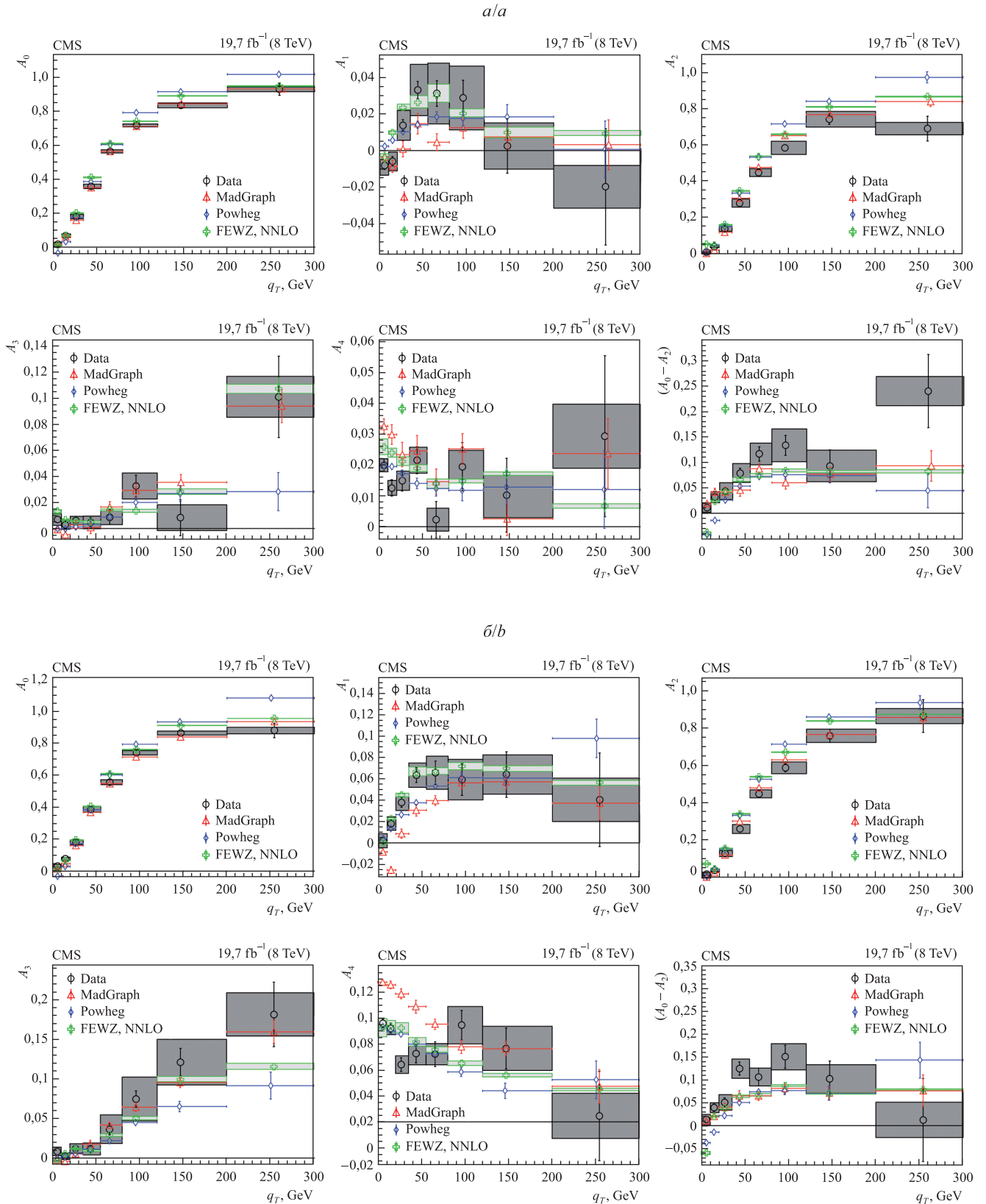


Рис. 5. Сравнение экспериментальных и предсказанных в NLO и NNLO значений угловых коэффициентов A_i и $A_0 - A_2$ в интервалах быстрот $0 < |y| < 1$ (a) и $1 < |y| < 2,1$ (б) при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ в мюонном канале [9]

Fig. 5. Comparison of the five angular coefficients A_i and $A_0 - A_2$ measured in the Collins – Soper frame for $0 < |y| < 1$ (a) and $1 < |y| < 2.1$ (b) at $\sqrt{s} = 8$ TeV in muon channel [9]

этой характеристики к разнообразным гипотетическим вкладам новой физики: дополнительных измерений, внутренней структуры кварков и лептонов, суперсимметричных частиц, новых нейтральных калибровочных бозонов и др., что является следствием зависимости величины асимметрии от значений векторной и аксиально-векторной констант связи Z -бозона и фермионов g_V и g_A . Кроме того, для проверки ряда моделей с расширенным калибровочным сектором A_{FB} обладает характерной зависимостью от быстроты лептонной пары, или, что то же самое, быстроты новой гипотетической частицы, распадающейся на лептонную пару. Таким образом, асимметрия A_{FB} является очень важным экспериментальным инструментом, позволяющим не только с хорошей точностью проверять предсказания СМ, но и выбрать из множества различных теоретических моделей, выходящих за ее рамки, наиболее точно описывающую природу наблюдаемых взаимодействий элементарных частиц.

Асимметрия вылета мюонов «вперед-назад» в процессах Дрелла – Яна была измерена во время первого этапа работы ЛНС в 2011–2012 гг. (Run 1) при $\sqrt{s} = 7$ ТэВ и $\sqrt{s} = 8$ ТэВ в экспериментах ATLAS и CMS. В частности, при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ асимметрия A_{FB} была измерена экспериментом CMS (рис. 6) в интервале значений инвариантной массы лептонной пары $40 < M_{l^+l^-} < 2000$ ГэВ/с² и в различных интервалах быстроты пары $|y| < 2,4$ [11]. В пределах среднеквадратичного отклонения 2σ результаты не противоречат предсказаниям СМ в NLO, что подтверждает предыдущие измерения при $\sqrt{s} = 7$ ТэВ [12].

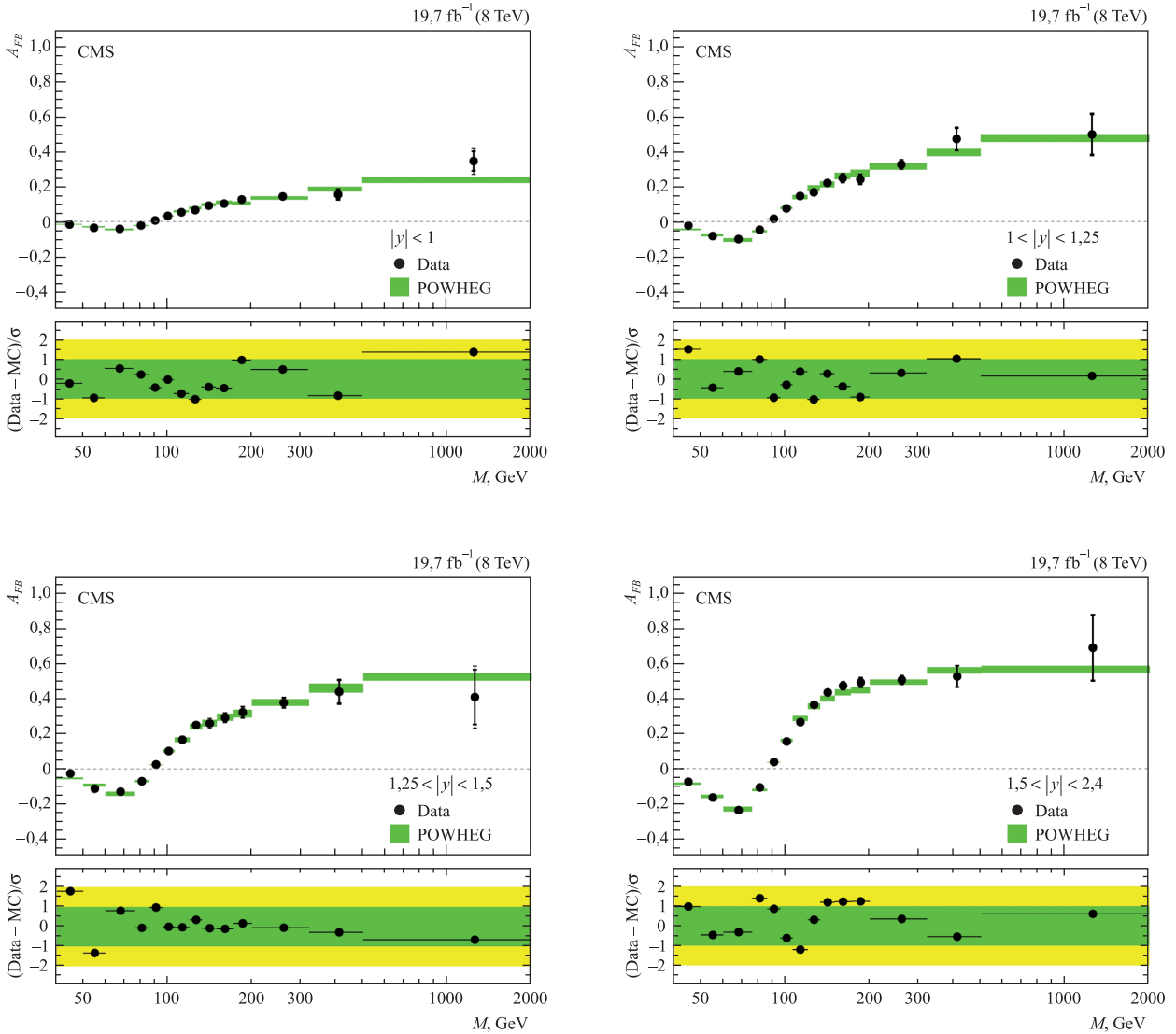


Рис. 6. Распределение A_{FB} для данных, набранных CMS при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ по инвариантной массе пары лептонов в интервале $40 < M_{l^+l^-} < 2000$ ГэВ в четырех интервалах быстроты [11]

Fig. 6. A_{FB} dilepton invariant mass distribution for mass interval $40 < M_{l^+l^-} < 2000$ GeV at $\sqrt{s} = 8$ TeV for four rapidity bins [11]

Заклучение

На основе всего вышесказанного можно сделать вывод, что изучение процесса Дрелла – Яна представляет большую важность для различных исследований в рамках физической программы ЛHC. Этот процесс не только является чувствительным инструментом для поиска сигналов новой физики за рамками SM, но также служит значимым тестом самой SM и фоном для массы других физически интересных процессов (с парой топ-кварков, калибровочных бозонов и пр.).

В данной работе были освещены результаты изучения процессов Дрелла – Яна в эксперименте CMS, полученные на данных, накопленных за время первого этапа работы ЛHC с 2010 по 2012 г. при энергии сталкивающихся пучков 7 и 8 ТэВ в системе центра масс. Все экспериментальные данные совпадают с теоретическими предсказаниями в пределах погрешности, а проявления новой физики обнаружены не были.

Библиографические ссылки

1. Голутвин ИА, Шматов СВ. Результаты и перспективы исследований эксперимента CMS на ЛHC. *Физика элементарных частиц и атомного ядра*. 2017;48(5):604–616.
2. Шматов СВ. Некоторые результаты эксперимента CMS на ЛHC по поиску физики за рамками стандартной модели. *Физика элементарных частиц и атомного ядра*. 2018;49(4):1291–1301.
3. Шматов СВ. Поиск физики за рамками стандартной модели во взаимодействии протонов при $\sqrt{s} = 7$ ТэВ в эксперименте CMS на ЛHC. *Ядерная физика*. 2013;76(9):1166–1174. DOI: 10.7868/S0044002713090195.
4. Ланёв АВ. Результаты коллаборации CMS по поиску тяжелых дилептонных и дифотонных резонансов. *Физика элементарных частиц и атомного ядра*. 2017;48(5):677–683.
5. Ланёв АВ. Результаты коллаборации CMS: бозон Хиггса и поиски новой физики. *Успехи физических наук*. 2014;184:996. DOI: 10.3367/UFNr.0184.201409i.0996.
6. Chatrchyan S, Hmayakyan G, Khachatryan V, Sirunyan AM, Adam W, Bauer T, et al. (CMS collaboration). The CMS experiment at the CERN LHC. *Journal of Instrumentation*. 2008;3:S08004. DOI: 10.1088/1748-0221/3/08/S08004.
7. Drell SD, Yan T-M. Massive lepton pair production in hadron-hadron collisions at high-energies. *Physical Review Letters*. 1970;25(5):316–320. DOI: 10.1103/PhysRevLett.25.316.
8. Khachatryan V, Sirunyan AM, Tumasyan A, Adam W, Bergauer T, Dragicovic M, et al. (CMS collaboration). Measurements of differential and double-differential Drell – Yan cross sections in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV. *European Physical Journal C*. 2015;75:147. DOI: 10.1140/epjc/s10052-015-3364-2.
9. Khachatryan V, Sirunyan AM, Tumasyan A, Adam W, Bergauer T, Dragicovic M, et al. (CMS collaboration). Angular coefficients of Z bosons produced in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV and decaying to $\mu^+\mu^-$ as a function of transverse momentum and rapidity. *Physical Letters B*. 2015;750:154–175. DOI: 10.1016/j.physletb.2015.08.061.
10. Lam CS, Tung W-K. Systematic approach to inclusive lepton pair production in hadronic collisions. *Physical Review D*. 1978;18:2447. DOI: 10.1103/PhysRevD.18.2447.
11. Khachatryan V, Sirunyan AM, Tumasyan A, Adam W, Asilar E, Bergauer T, et al. (CMS collaboration). Forward-backward asymmetry of Drell – Yan lepton pairs in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV. *European Physical Journal C*. 2016;76:325. DOI: 10.1140/epjc/s10052-016-4156-z.
12. Chatrchyan S, Khachatryan V, Sirunyan AM, Tumasyan A, Adam W, Bergauer T, et al. (CMS collaboration). Forward-backward asymmetry of Drell – Yan lepton pairs in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV. *Physical Letters B*. 2013;718(3):752–772. DOI: 10.1016/j.physletb.2012.10.082.

References

1. Golutvin IA, Shmatov SV. [Results and prospects of research on the CMS LHC experiment]. *Fizika elementarnykh chastits i atomnogo yadra*. 2017;48(5):604–616. Russian.
2. Shmatov SV. [Some results of BSM physic searching with the CMS experiment at the CERN LHC]. *Fizika elementarnykh chastits i atomnogo yadra*. 2018;49(4):1291–1301. Russian.
3. Shmatov SV. Searches for physics beyond the standard model in proton-proton interactions at $\sqrt{s} = 7$ TeV in the CMS experiment at the LHC. *Yadernaya fizika*. 2013;76(9):1166–1174. DOI: 10.7868/S0044002713090195. Russian.
4. Lanev AV. [CMS collaboration results of searching heavy dilepton and diphoton resonances]. *Fizika elementarnykh chastits i atomnogo yadra*. 2017;48(5):677–683. Russian.
5. Lanev AV. [CMS collaboration results: Higgs boson and searching of a new physic]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 2014;184:996. DOI: 10.3367/UFNr.0184.201409i.0996.
6. Chatrchyan S, Hmayakyan G, Khachatryan V, Sirunyan AM, Adam W, Bauer T, et al. (CMS collaboration). The CMS experiment at the CERN LHC. *Journal of Instrumentation*. 2008;3:S08004. DOI: 10.1088/1748-0221/3/08/S08004.
7. Drell SD, Yan T-M. Massive lepton pair production in hadron-hadron collisions at high-energies. *Physical Review Letters*. 1970;25(5):316–320. DOI: 10.1103/PhysRevLett.25.316.
8. Khachatryan V, Sirunyan AM, Tumasyan A, Adam W, Bergauer T, Dragicovic M, et al. (CMS collaboration). Measurements of differential and double-differential Drell – Yan cross sections in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV. *European Physical Journal C*. 2015;75:147. DOI: 10.1140/epjc/s10052-015-3364-2.

9. Khachatryan V, Sirunyan AM, Tumasyan A, Adam W, Bergauer T, Dragicevic M, et al. (CMS collaboration). Angular coefficients of Z bosons produced in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV and decaying to $\mu^+\mu^-$ as a function of transverse momentum and rapidity. *Physical Letters B*. 2015;750:154–175. DOI: 10.1016/j.physletb.2015.08.061.
10. Lam CS, Tung W-K. Systematic approach to inclusive lepton pair production in hadronic collisions. *Physical Review D*. 1978; 18:2447. DOI: 10.1103/PhysRevD.18.2447.
11. Khachatryan V, Sirunyan AM, Tumasyan A, Adam W, Asilar E, Bergauer T, et al. (CMS collaboration). Forward-backward asymmetry of Drell – Yan lepton pairs in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV. *European Physical Journal C*. 2016;76:325. DOI: 10.1140/epjc/s10052-016-4156-z.
12. Chatrchyan S, Khachatryan V, Sirunyan AM, Tumasyan A, Adam W, Bergauer T, et al. (CMS collaboration). Forward-backward asymmetry of Drell – Yan lepton pairs in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV. *Physical Letters B*. 2013;718(3):752–772. DOI: 10.1016/j.physletb.2012.10.082.

Статья поступила в редколлегию 07.03.2019.
Received by editorial board 07.03.2019.