

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

*На правах рукописи*

ГОРБУНОВ

Илья Николаевич

ИЗМЕРЕНИЕ АСИММЕТРИИ «ВПЕРЕД-НАЗАД» В  
ПРОЦЕССАХ РОЖДЕНИЯ МЮОННЫХ ПАР ПРИ  
СТОЛКНОВЕНИИ ПРОТОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ  
CMS НА LHC

Специальность 01.04.16 – физика атомного ядра  
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 2014

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий Объединенного института ядерных исследований

**Научный руководитель** кандидат физико-математических наук Шматов Сергей Владимирович

**Официальные оппоненты:**

Образцов Владимир Федорович – доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, ФГБУ ГНЦ ИФВЭ, Отделение экспериментальной физики, Лаборатория электрослабых процессов (№2), начальник

Булеков Олег Владимирович – кандидат физико-математических наук, НИЯУ МИФИ, кафедра 07 Экспериментальной ядерной физики и космофизики, доцент

**Ведущая организация** Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Защита состоится “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2014 года в “\_\_\_” часов на заседании диссертационного совета Д 720.001.02 при Лаборатории физики высоких энергий в Объединенном институте ядерных исследований по адресу 141980 г. Дубна, Московская область, ЛФВЭ ОИЯИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Лаборатории физики высоких энергий Объединенного института ядерных исследований [www.jinr.ru](http://www.jinr.ru)

Автореферат разослан “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Арефьев  
Валентин Александрович



## *Общая характеристика диссертации*

Настоящая работа основана на результатах исследований эксперимента «Компактный мюонный соленоид» (Compact Muon Solenoid – CMS [1]) на Большом адронном коллайдере (ЛHC), выполненных в 2010–2014 гг. в Европейской организации по ядерным исследованиям (ЦЕРН, Женева) и Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ (ЛФВЭ ОИЯИ, Дубна).

### Актуальность темы

Несмотря на точность предсказаний, стандартная модель взаимодействия элементарных частиц (СМ) имеет ряд недостатков: большое количество свободных параметров, неизвестное происхождение поколений кварков и лептонов, неясный механизм СР-нарушения и так далее. Кроме того, в рамках СМ отсутствует возможность объединения фундаментальных взаимодействий и описания гравитации. Астрофизические наблюдения показывают, что происхождение около 96% всей материи во Вселенной нам не известно. Следовательно, СМ нельзя рассматривать как окончательную теорию. Существует ряд подходов, позволяющих выйти за пределы СМ и в той или иной степени закрыть указанные проблемы.

Изучение закономерностей рождения лептонных пар в процессах Дрелла-Яна [2],  $q\bar{q} \rightarrow Z/\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$ , позволяет проверить предсказания СМ в новой области энергии и выполнить поиск новой физики за рамками СМ [3]. Присутствие в процессах Дрелла-Яна как векторных, так и аксиально-векторных токов приводит к появлению асимметрии вылета мюонов по направлениям “вперед-назад” относительно направ-

ления движения системы, в которой рожденная лептонная пара покоится ( $A_{FB}$ ). Величина асимметрии  $A_{FB}$  зависит от значений векторной и аксиально-векторной констант связи фермионов и  $Z$ -бозона  $g_V$  и  $g_A$ , следовательно, она будет чувствительна к наличию дополнительных вкладов в процессы СМ.

Возможное отличие значения асимметрии от предсказаний СМ может указывать на существование процессов за рамками СМ: новых нейтральных калибровочных бозонов [4], внутренней структуры кварков и лептонов [5], суперсимметричных частиц или дополнительных измерений [6]. Одной из отличительных особенностей асимметрии  $A_{FB}$  является ее характерная зависимость от кинематической переменной — быстроты новых нейтральных калибровочных бозонов, предсказываемых рядом различных моделей с расширенным калибровочным сектором [7]. Это позволяет произвести выбор между различными теоретическими сценариями, даже для частиц, имеющих одинаковый спин. Измерение  $A_{FB}$  позволяет наложить ограничения на функции распределения партонов. Более того, измерение асимметрии в  $Z$ -полюсе позволяет измерить значения слабого угла смешивания  $\sin^2 \theta_W$  [8].

Предыдущие результаты по измерению значения асимметрии  $A_{FB}$  были получены в экспериментах на Тэватроне в  $p\bar{p}$ -столкновениях при энергии  $\sqrt{s} = 1.96$  ТэВ в с.ц.м. [9]. Асимметрия была измерена в области инвариантных масс пары электронов  $M_{e^+e^-}$  от 40 до 600 ГэВ/ $c^2$ .

В диссертации представлены результаты измерения асимметрии вылета мюонов «вперед-назад» в процессах Дрелла-Яна на основе анализа данных, полученных в 2011–2012 гг. во время первого сеанса ЛНС в эксперименте CMS. За это время при энергии взаимодействующих

пучков протонов  $\sqrt{s} = 7$  и  $8$  ТэВ в с.ц.м. экспериментом CMS была набрана уникальная статистика данных, соответствующая интегральной светимости ( $\mathcal{L}_{int}$ )  $5.6$  фбн $^{-1}$  и  $19.6$  фбн $^{-1}$ .

**Целью работы** является измерение асимметрии вылета мюона по направлению «вперед-назад» в процессах Дрелла-Яна, развитие методов измерения асимметрии и коррекции данных в условиях  $pp$ -столкновений.

### **Научная новизна и практическая ценность**

Впервые проведено измерение асимметрии вылета мюона по направлению «вперед-назад» в диапазоне инвариантных масс  $M_{\mu^+\mu^-}$  от  $40$  до  $2000$  ГэВ/ $c^2$  и быстрот  $|Y_{\mu^+\mu^-}| < 2.4$  мюонной пары. Эти уникальные данные получены при рекордных значениях энергий сталкивающихся протонов в совершенно новой области инвариантных масс мюонной пары.

Результаты анализа экспериментальных данных позволили проверить предсказания СМ в новой области энергий.

Разработаны и реализованы критерии отбора мюонных пар в широкой области инвариантных масс, которые могут быть использованы для изучения характеристик процессов Дрелла-Яна как для проверки СМ, так и поиска новой физики.

На основании различных подходов разработана методика извлечения значения асимметрии  $A_{FB}$  из данных в условиях  $pp$ -столкновений и методы коррекции систематических эффектов.

Результаты измерения асимметрии в  $Z$ -полюсе позволили определить значение слабого угла смешивания  $\sin^2 \theta_W$  [8].

### Автор защищает

1. Результаты измерения значений асимметрии вылета мюонов по направлению «вперед-назад» в процессах Дрелла-Яна в зависимости от инвариантной массы в диапазоне  $40 \leq M_{\mu^+\mu^-} \leq 2000$  ГэВ/ $c^2$ .
2. Результаты измерения значения асимметрии  $A_{FB}$  в зависимости от быстроты пары мюонов в диапазоне  $|Y_{\mu^+\mu^-}| < 2.4$ .
3. Методику и программное обеспечение для извлечения значения асимметрии  $A_{FB}$  из данных в условиях  $pp$ -столкновений.
4. Методы коррекции систематических эффектов (конечного разрешения детекторов, излучения в конечном состоянии, акцептанса, эффективности и ошибок моделирования).
5. Результаты оценки фоновых процессов в рамках стандартной модели с помощью моделирования методом Монте-Карло и анализа экспериментальных данных.

### Апробация работы

Результаты исследований, составивших диссертацию, докладывались автором на научных семинарах и ученом совете Объединенного института ядерных исследований, рабочих совещаниях коллаборации CMS, на международных рабочих совещаниях, школах и конференциях:

- Международные сессии-конференции Секции ядерной физики ОФН РАН “Физика фундаментальных взаимодействий”, 5–8 ноября, 2013 г., Протвино, Россия; 21–25 ноября, 2011 г., Москва, Россия.

- XV Workshop on High Energy Spin Physics (DSPIN-2013), October 8–12, 2013, Dubna, Russia.
- 15th and 16th Annual RDMS CMS Collaboration Conference, September 3–5, 2013, Nor Amberd, Armenia May 22–28, 2011, Alushta (Crimea), Ukraine.
- XVI LOMONOSOV CONFERENCE ON ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS, August 22–28, 2013, Moscow.
- The XXI International Workshop “High Energy Physics and Quantum Field Theory”, June 23–30, 2013, Saint Petersburg Area, Russia.
- 20th International Symposium on Spin Physics (SPIN2012), September 17-22, 2012, Dubna, Russia.
- XVI научная конференция молодых ученых и специалистов ОМУС-2012, ОИЯИ, Дубна, 06 по 11 февраля 2012 года.

### **Публикации и личный вклад автора**

Основные результаты диссертации изложены в 6 публикациях (4 из списка ВАК). Личный вклад автора в получение результатов, выносимых на защиту, является определяющим и полностью отражен во всех защищаемых результатах. Результаты, вошедшие в диссертацию, неоднократно отмечались премиями для молодых ученых и специалистов Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ. Автор является лауреатом стипендии имени академика В. И. Векслера за 2014 г. по направлению «Экспериментальная и теоретическая физика частиц», стипендии имени академика М. А. Маркова за 2013 г., гранта молодым



научным сотрудникам ОИЯИ и победителем конкурса постерных докладов совещании Программно-консультативного комитета по физике частиц ОИЯИ в 2012 г. Кроме того, некоторые, не вошедшие в диссертацию результаты автора отмечены премией Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ 2012 г. и премией губернатора Московской области в сфере науки и инноваций для молодых ученых и специалистов за 2013 г.

**Диссертация основывается на следующих опубликованных работах:**

1. Gorbunov, I. N. and Shmatov, S. V. Measurement of the Forward-Backward Asymmetry of  $\mu^+\mu^-$  Pairs in CMS / I. N. Gorbunov, S. V. Shmatov // Physics of Particles and Nuclei. - 2014. - **Vol. 45, No 1.** - Pp. 211-213.
2. Gorbunov, I. *et al.* Forward-backward Asymmetry of Drell-Yan Muon Pairs / I. Gorbunov, A. Lanyov, S. Shmatov, J. Han, K. Kovitanggoon, D. Silvers, A. Bodek // Geneva:CERN. CMS Analysis Note. - 2013. - CERN-CMS-AN-2013/260. - pp. 11
3. Горбунов, И. Н., Шматов, С. В. Измерение асимметрии «вперед-назад»  $A_{FB}$  и слабого угла смешивания в процессах рождения пар лептонов в pp-столкновениях при  $\sqrt{s} = 7$  ТэВ в эксперименте CMS на ЛHC / И. Н. Горбунов, С. В. Шматов // Ядерная физика. - 2013. - **Т. 76 No 9.** - С. 1160-1165
4. Chatrchayn, S. *et al.* Forward-backward asymmetry of Drell-Yan lepton pairs in pp collisions at 7 TeV / S. Chatrchayn, ..., I. Gorbunov

*et al.* (CMS Collaboration) // Physics Letters B. - 2013. - **Vol. 718**,  
**No 3.** - Pp. 752-772

5. Chatrchyan, S. *et al.* Measurement of the differential and double-differential Drell-Yan cross sections in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV / S. Chatrchyan, ..., I. Gorbunov *et al.* (CMS Collaboration) // JHEP. - 2013. - **Vol. 12.** - P. 030
6. Chatrchyan, S. *et al.*  $A_{FB}$  in Muon and Electron final state at 8 TeV / S. Chatrchyan, ..., I. Gorbunov *et al.* (CMS Collaboration) // Geneva:CERN. CMS Public Analysis Summary. - 2014. - CERN-CMS-PAS-SMP-14-004

### Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Список литературы содержит 65 наименований. Полный объем диссертации – 108 страниц, включая 4 таблицы и 56 рисунков.

#### *Содержание работы*

Во введении обсуждены актуальность работы, основные задачи, решаемые в диссертации, а также дана общая характеристика работы, включая структуру.

В Главе 1 рассмотрены методические вопросы проведения эксперимента на установке CMS (рис. 1), дано описание детекторных систем и системы отбора событий в режиме реального времени (триггерной системы CMS).

Подробно рассмотрены особенности устройства системы трекера и мюонной системы установки CMS, а также наиболее распространенные алгоритмы реконструкции и идентификации мюонов, их преимущества

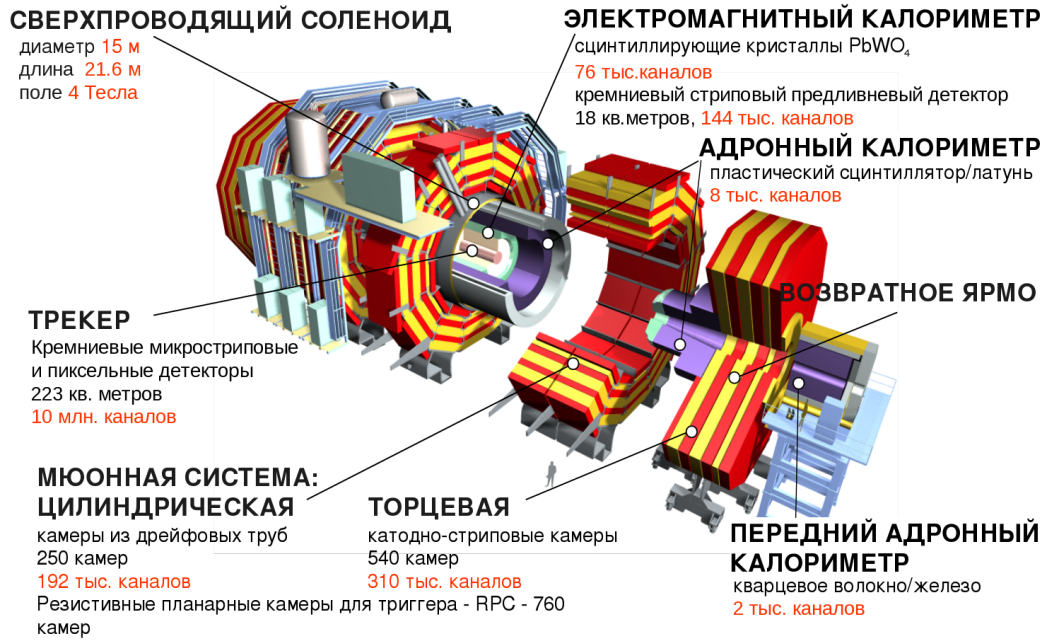


Рис. 1: Общий вид детектора CMS

и недостатки и их эффективности. Показано, что совместное использование мюонной системы и системы трекера позволяет измерить поперечный импульс мюона с разрешением от 1% до 5% при  $p_T < 1$  ТэВ/с в области значений псевдобыстрот  $|\eta| \leq 2.4$ .

В Главе 2 рассмотрены вопросы описания процессов Дрелла-Яна в рамках СМ и методы измерения асимметрии вылета мюонов в этих процессах.

Теория электрослабых взаимодействий описывает взаимодействия калибровочных бозонов и фермионов (на примере обмена  $Z^0$ ):

$$\frac{g}{2\cos\theta_W} \sum \bar{\psi}_i \gamma^\mu (g_V^i - g_A^i \gamma^5) \psi_i Z_\mu, \quad (1)$$

где  $g_V$  и  $g_A$  – векторные и аксиально-векторные константы связи, а  $\theta_W$  – слабый угол смешивания Вайнберга.

$V$ – $A$  структура слабых токов приводит к появлению асимметрии

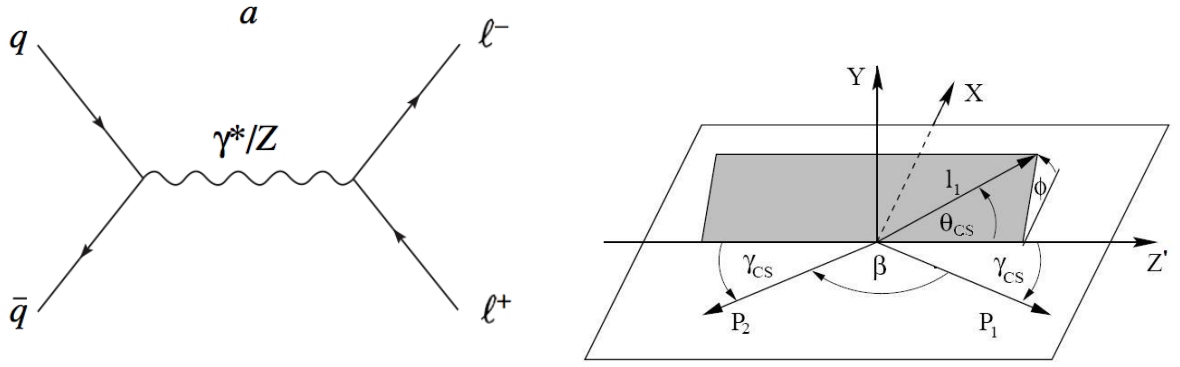


Рис. 2: (а) Рождение пары лептонов в процессе аннигиляции кварк-антикварковой пары (процесс Дрелла-Яна)  $q\bar{q} \rightarrow Z/\gamma^* \rightarrow \mu^+\mu^-$ . (б) Система Коллинса-Сопера.

в дифференциальных сечениях рождения пар лептонов в процессах  $q\bar{q} \rightarrow Z/\gamma \rightarrow l^+l^-$  (рис. 2а) по углу вылета лептона (антилептона) относительно кварка (антикварка) в системе покоя лептонной пары [4, 9]:

$$\frac{d\sigma}{d\cos\theta} = \frac{4\pi\alpha^2}{3s} \left[ \frac{3}{8}A(1 + \cos^2\theta) + B\cos\theta \right], \quad (2)$$

$$A = Q_l^2 Q_q^2 + 2Q_l Q_q g_V^q g_V^l \text{Re}(\chi(s)) + (g_V^{l2} + g_A^{l2})(g_V^{q2} + g_A^{q2})|\chi(s)|^2$$

$$B = \frac{3}{2}g_A^q g_A^l (Q_l Q_q \text{Re}(\chi(s)) + 2g_V^q g_V^l |\chi(s)|^2)$$

$$\chi(s) = \frac{1}{\cos^2\theta_W \sin^2\theta_W} \frac{s}{s - M_Z^2 + i\Gamma_Z M_Z}$$

где  $\theta$  – угол испускания лептона по отношению к импульсу кварка в системе центра масс лептонной пары,  $A$  и  $B$  – параметры, зависящие от слабого изоспина  $I$  и заряда аннигилирующих фермионов  $Q$ .

Для уменьшения неопределенности, связанной с поперечным импульсом кварков, используется система координат Коллинса–Сопера [10]. В этой системе угол  $\theta_{CS}^*$  – угол между импульсом лептона и осью  $z'$ , которая делит пополам угол между кварком и антикварком (рис.2б):

$$\cos\theta_{CS}^* = \frac{2(P_1^+ P_2^- - P_1^- P_2^+)}{\sqrt{Q^2(Q^2 + Q_T^2)}}, \quad (3)$$

где  $Q$  и  $Q_T$  – 4-импульс и поперечный импульс дилептонной системы,  $P_{1,2}$  – компоненты 4-импульса  $l^+$  и  $l^-$  соответственно, а  $P_i^\pm = 2^{-1/2}(P_i^0 \pm P_i^3)$ . В этом случае асимметрия задается по отношению к направлениям «вперед» (Forward) и «назад» (Backward), определяемых знаком косинуса:  $\cos\theta_{CS}^* \geq 0$  ( $\cos\theta_{CS}^* \leq 0$ ). На рис. 3а приведены распределения по  $\cos\theta_{CS}^*$  в области инвариантных масс мюонной пары  $M_{\mu^+\mu^-} \geq 200$  ГэВ/с<sup>2</sup> и быстрот  $0.48 < Y_{\mu^+\mu^-} < 1.44$  для экспериментальных данных и Монте-Карло событий. Выбор данного интервала  $Y_{\mu^+\mu^-}$  обусловлен минимальной, по сравнению с другими интервалами, ошибкой определения направления «вперед» («назад») (рис. 3б) при малом влиянии обрезаний по псевдобыстроте (аксептанс установки) и поперечному импульсу мюона.

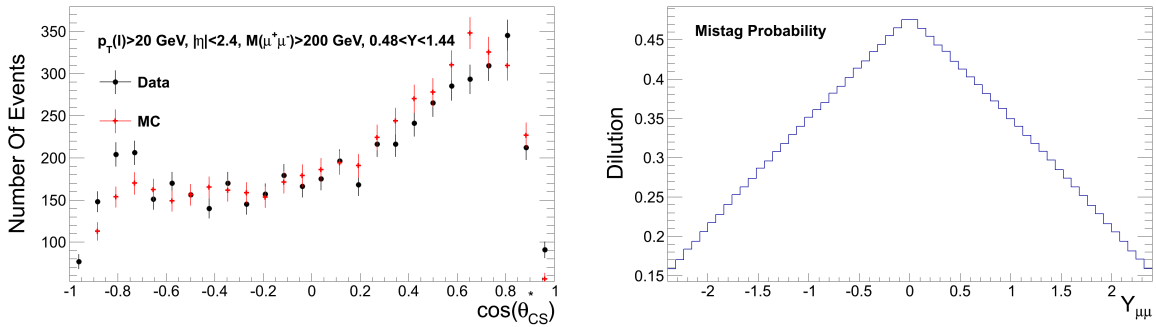


Рис. 3: (а) Распределение  $\mu^-$  по  $\cos\theta_{CS}^*$  в процессе Дрелла-Яна. (б) Вероятность ошибки выбора направления «вперед» («назад») в зависимости от быстроты  $Y_{\mu^+\mu^-}$  мюонной пары (условие  $pp$ -эксперимента).

Подобное определение предполагает, что известно первоначальное направление кварка, но это условие не выполняется в случае кинематики  $pp$ -экспериментов. Однако направление движения кварка мож-

но зафиксировать направлением вылета двухлептонной системы [11], так как рождение пары происходит в результате аннигиляции преимущественно валентного кварка и морского антикварка, а импульс валентного кварка в среднем больше импульса морского антикварка. Заметим, что при таком приближении возможна ошибка в определении направления кварка, что необходимо учитывать при вычислении значения асимметрии (рис. 3б).

В эксперименте величина асимметрии  $A_{FB}$  может быть извлечена различными методами. Она может быть вычислена путем независимого измерения числа двухлептонных событий для различных интервалов по инвариантной массе в областях «вперед» и «назад» [12]. Полное сечение для событий «вперед» ( $\sigma_F$ ) и «назад» ( $\sigma_B$ ) можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned}\sigma_F &= \int_0^1 \frac{d\sigma}{d(\cos\theta)} d(\cos\theta) \\ \sigma_B &= \int_{-1}^0 \frac{d\sigma}{d(\cos\theta)} d(\cos\theta),\end{aligned}\tag{4}$$

а асимметрию  $A_{FB}$ , как

$$A_{FB} = \frac{\sigma_F - \sigma_B}{\sigma_F + \sigma_B}.\tag{5}$$

Другой метод заключается в извлечении значения асимметрии  $A_{FB}$  из аппроксимации угловых распределений лептонов [12]. Но при больших значениях быстроты пары, когда неопределенность выбора направления мала, угловые распределения лептонов сильно искажены из-за ограниченного аксептанса. Поэтому оптимальным является анализ угловых распределений, учитывающий корреляции всех трех эф-

фектов: зависимости от фазового объема установки, инвариантной массы и ошибки в определении направления кварка [12]. Однако этот метод имеет ограниченную точность ввиду недостаточной статистики. В дальнейшем будет использоваться метод независимого измерения числа двухлептонных событий.

В **Главе 3** сформулированы критерии отбора событий и проведена оценка числа фоновых событий на основании их моделирования методом Монте-Карло, а также их оценки из экспериментальных данных.

Для сравнения полученных результатов с предсказаниями СМ, а также для определения эффективности реконструкции и отбора событий, было выполнено моделирование сигнальных и фоновых событий. Сигнальный ( $Z/\gamma^* \rightarrow \mu^+\mu^-$ ) и фоновый ( $Z/\gamma^* \rightarrow e^+e^-, \tau^+\tau^-$ ) процессы моделировались на основе вычислений в первом порядке теории возмущений (NLO) с помощью генератора POWHEG [13]. Моделирование партонных ливней проводилось генератором PYTHIA v6.2.24 [14] с NLO-функциями распределения партонов (PDF) CT10 [15] и настройками параметров на данных LHC [16]. Кроме того, генератор PYTHIA использовался для моделирования фоновых процессов рождения струй в КХД и пар калибровочных бозонов  $WW$ ,  $WZ$ ,  $ZZ$ . Для других фоновых процессов применялись POWHEG и TAUOLA [17] (рождение и распады пар  $t\bar{t}$ , одиночного  $t$ -кварка,  $tW$  и пр.) и MadGraph [18] (совместное рождение  $W + jet$ ). Последующее прохождение элементарных частиц через вещество детекторных систем моделировалось с помощью пакета GEANT4 [19], позволяющего учесть специфику конструкции детекторных систем CMS.

Отбор мюонов проводился в соответствии со следующими условия-

ми. Во-первых, в режиме реального времени (on-line) системой триггера CMS отбирались события, в которых один мюон имеет импульс более 8 ГэВ/с а второй более 17 ГэВ/с. Во-вторых, после реконструкции мюоны должны иметь противоположные знаки заряда и быть хорошо изолированными, то есть должен отсутствовать сигнал от других частиц вокруг мюона в трекаре и адронном калориметре. Требование изоляции позволяет подавить фон от мюонов, рожденных в процессах образования струй (фон от процессов КХД) Заметим, что критерий изоляции трека не использует информацию электромагнитного калориметра, поскольку он оказывает существенное влияние на сигнальные события из-за эффектов КЭД-излучения в конечном состоянии. Для подавления фона от процессов КХД применялось ограничение на прицельный параметр мюонных треков – это расстояние не должно превышать 2 мм в плоскости  $x - y$  и 5 мм по  $z$ . Данное условие позволило отбросить все фоновые космические мюоны без существенного влияния на сигнальные события. На заключительном этапе отбора событий требовалось, чтобы оба мюона попадали в интервал псевдобыстрот  $|\eta| < 2.4$ , а поперечный импульс каждого мюона превышал 20 ГэВ/с.

Из полного объема данных, набранных экспериментом CMS в 2012 г. в протон-протонных столкновениях при  $\sqrt{s} = 8$  ТэВ в с.д.м. и соответствующих значению интегральной светимости  $\sim 19.6$  фб<sup>-1</sup>, было отобрано более  $8 \times 10^6$  событий, что в четыре раза превышает число событий, использованных для анализа данных 2011 года. На рис. 4а показано распределение числа событий по инвариантной массе мюонной пары. Измеренное распределение (черные точки с отложенными



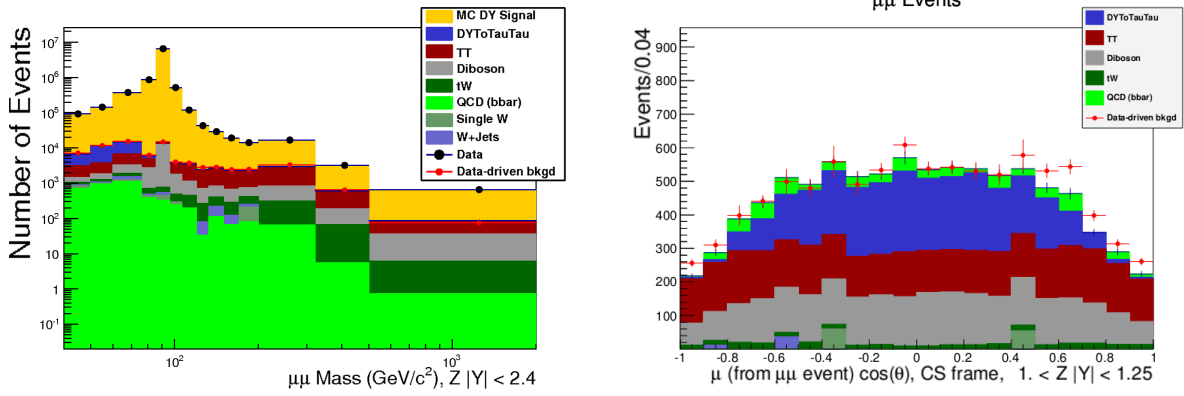


Рис. 4: (а) Распределение числа событий по инвариантной массе мюонной пары. Приведены экспериментальные данные и результаты моделирования сигнального и фоновых процессов. (б) Количество фоновых событий, оцененное методами на основе Монте-Карло моделирования и данных, при  $1.0 < |Y_{\mu+\mu-}| < 1.25$ .

статистическими погрешностями) хорошо совпадают с результатами моделирования методом Монте-Карло (закрашенные области — вклады сигнального и фоновых процессов).

На контрольных наборах данных определены корректирующие коэффициенты для учета эффективности и величины фона [21, 22]. Использовались три различных метода и показано хорошее согласие данных и Монте-Карло событий в угловых распределениях продуктов распада калибровочных бозонов при их парном ( $WZ$  и  $ZZ$ ) и инклюзивном ( $W$ ) рождении. Фон от процессов  $Z \rightarrow \tau\tau$ ,  $WW$ ,  $t\bar{t}$  и одиночного  $t$  учтен методом, основанном на сравнении числа  $\mu\mu$ - и  $e\mu$ -пар в конечном состоянии для данных и Монте-Карло ( $e\mu$ -метод). Фон от парного рождения струй оценивался с помощью сравнения числа пар мюонов одного заряда (ПМОЗ) и пар противоположно заряженных мюонов (ППЗМ). Итоговая оценка фона вычислялась как сумма всех фонов данных процессов с учетом всех значимых источников фона. Во всех

интервалах значений инвариантной массы и быстроты мюонной пары продемонстрировано хорошее согласие между уровнем фона, вычисляемым на основе моделирования, и извлеченным из данных (см., например, рис. 4б).

В Главе 4 приведены результаты разработки методов коррекции различных систематических эффектов, влияющих на точность измерения асимметрии. Представлены результаты вычисления значений асимметрии в зависимости от инвариантной массы мюонной пары в четырех интервалах значений быстроты пары  $|Y_{\mu^+\mu^-}| = 0, 1, 1.25, 1.5$  и 2.4.

Для лучшего согласия результатов экспериментальных измерений и результатов моделирования выполнен ряд коррекций, учитывающих неэффективность реконструкции (включая пространственную разбалансировку детекторных частей установки CMS), влияние множественных первичных вершин (pile-up) и ошибок моделирования. На рис. 5 показано распределения числа событий по инвариантной массе для пар мюонов с инвариантной массой в диапазоне  $40 < M_{\mu^+\mu^-} < 120$  ГэВ/ $c^2$  после наложения различных коррекций для четырех диапазонов по скорости ( $0 < |Y_{\mu^+\mu^-}| \leq 1.0$ ,  $1 < |Y_{\mu^+\mu^-}| < 1.25$ ,  $1.25 < |Y_{\mu^+\mu^-}| < 1.5$  и  $1.5 < |Y_{\mu^+\mu^-}| < 2.4$ ). Показано хорошее согласие экспериментальных данных и результатов Монте-Карло моделирования.

Вычисленное после проведения коррекций методом прямого счета значение асимметрии  $A_{FB}$  находится в хорошем согласии с результатами моделирования с помощью генератора POWHEG с учетом полного «отклика» установки CMS и процедуры реконструкции.

Тем не менее следует отметить, что даже после этих поправок изме-

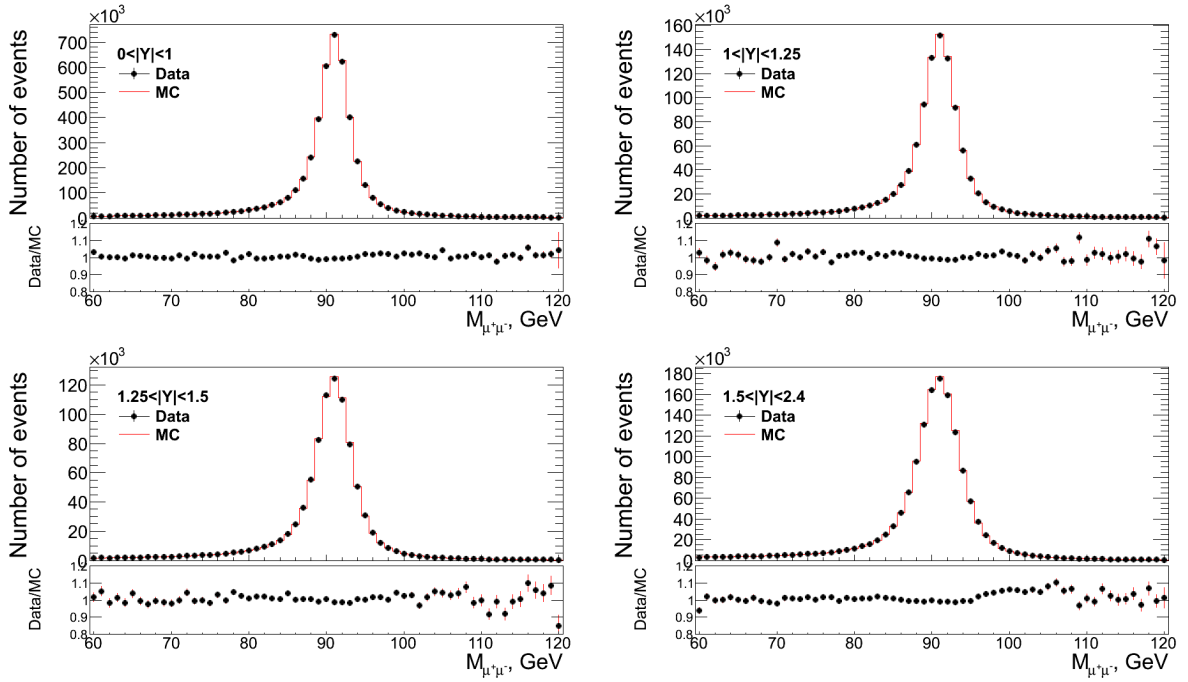


Рис. 5: Распределения числа событий по инвариантной массе для четырех диапазонов по быстроте ( $0 < |Y_{\mu^+\mu^-}| \leq 1.0$ ,  $1 < |Y_{\mu^+\mu^-}| < 1.25$ ,  $1.25 < |Y_{\mu^+\mu^-}| < 1.5$  и  $1.5 < |Y_{\mu^+\mu^-}| < 2.4$ ).

рения асимметрии дают «размытый» результат по сравнению с асимметрией, ожидаемой в СМ на партонном уровне, из-за ряда эффектов: перераспределение числа событий по бинам инвариантной массы вследствие конечного разрешения детекторов (bin-to-bin migration), обрезаний фазового объема установки (аксептанс), неизвестного направления движения кварков/антикварков на ЛНС и излучения в конечном состоянии (FSR) [12, 20].

Для компенсации этих эффектов разработана процедура последовательной коррекции данных (unfolding), основанная на многомерном (по инвариантной массе и  $\cos \theta_{CS}$ ) методе Байеса с числом итераций, равным четырем [23]. Получены матрицы отклика, сопоставляющие измеренное на эксперименте и реальное (из Монте-Карло) количество

событий в каждом из интервалов по инвариантной массе и быстройте:

$$N_j^{meas}(F, k) = \sum_{i=1}^{15} (R_{ij}^{FF}(k)N_i^{true}(F, k) + R_{ij}^{FB}(k)N_i^{true}(B, k))$$

$$j = 1, \dots, 14; k = 1, \dots, 4. \quad (6)$$

$$N_j^{meas}(B, k) = \sum_{i=1}^{15} (R_{ij}^{BB}(k)N_i^{true}(F, k) + R_{ij}^{BF}(k)N_i^{true}(F, k))$$

$$j = 1, \dots, 14; k = 1, \dots, 4. \quad (7)$$

Здесь  $N_j(F, k)$  и  $N_j(B, k)$  – соответственно количество событий в направлении «вперед» и «назад» в каждом из интервалов по массе  $j$  и интервалов по быстройте  $k$ . Матрица отклика  $R_{ij}^{FF}(k)$  описывает «сдвиг» по интервалам инвариантной массы событий смоделированных и реконструированных в направлении «вперед» в  $k$ -ом интервале по быстройте, а  $R_{ij}^{BB}(k)$  описывает тоже самое в направлении «назад».  $R_{ij}^{FB}(k)(R_{ij}^{BF}(k))$  описывает перемещение по интервалам инвариантной массы событий смоделированных в направлении «назад» («вперед»), но реконструированных в противоположном направлении — «вперед» («назад») в  $k$ -ом интервале по быстройте. Для коррекции данных использовались обратные матрицы отклика (рис. 6), полученные с помощью программного пакета RooUnfold [23].

На рис. 7 приведены результаты измерения величины  $A_{FB}$  при  $\sqrt{s} = 8$  ТэВ в с.ц.м. после наложения всех коррекций с соответствующими статистическими и систематическими (для данных) погрешностями [22, 24]. Полученные результаты хорошо согласуются с измерениями на пучках сталкивающихся протонов при  $\sqrt{s} = 7$  ТэВ в с.ц.м. [25] и в

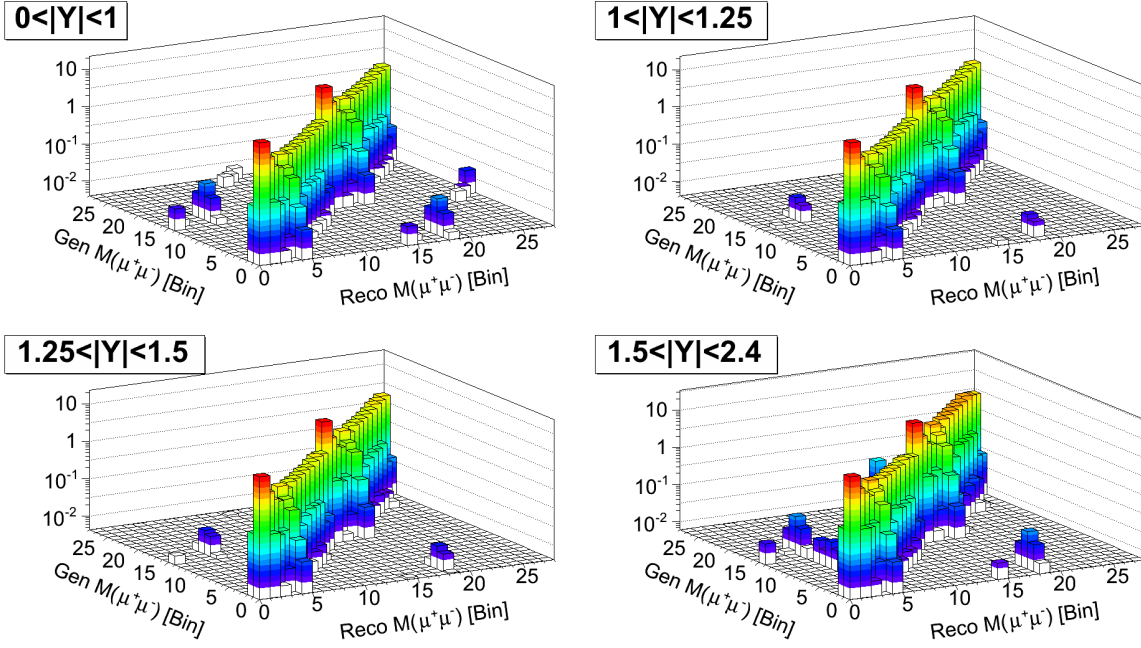


Рис. 6: Обратные матрицы отклика в четырех диапазонах быстрот мюонной пары ( $0 < |Y_{\mu^+\mu^-}| \leq 1.0$ ,  $1 < |Y_{\mu^+\mu^-}| < 1.25$ ,  $1.25 < |Y_{\mu^+\mu^-}| < 1.5$  и  $1.5 < |Y_{\mu^+\mu^-}| < 2.4$ ) для  $\cos \theta_{CS} < 0$  и  $\cos \theta_{CS} > 0$ .

пределах погрешностей совпадают с предсказаниями стандартной модели. Подробное описание результатов вычислений систематических погрешностей дано в Главе 5.

В **Главе 5** рассмотрены и обсуждены основные источники систематических погрешностей и процедуры их вычисления, приведены результаты вычислений погрешностей в зависимости от быстроты и инвариантной массы пары мюонов.

Систематические погрешности вычислены до и после наложения коррекций на разрешение детекторов, FSR и аксептанс для каждого интервала по  $Y_{\mu^+\mu^-}$  и  $M_{\mu^+\mu^-}$  путем варьирования начальных условий и коэффициентов коррекций (unfolding). Получившееся значение  $A_{FB}$  сравнивалось с центральным, то есть полученным без учета система-

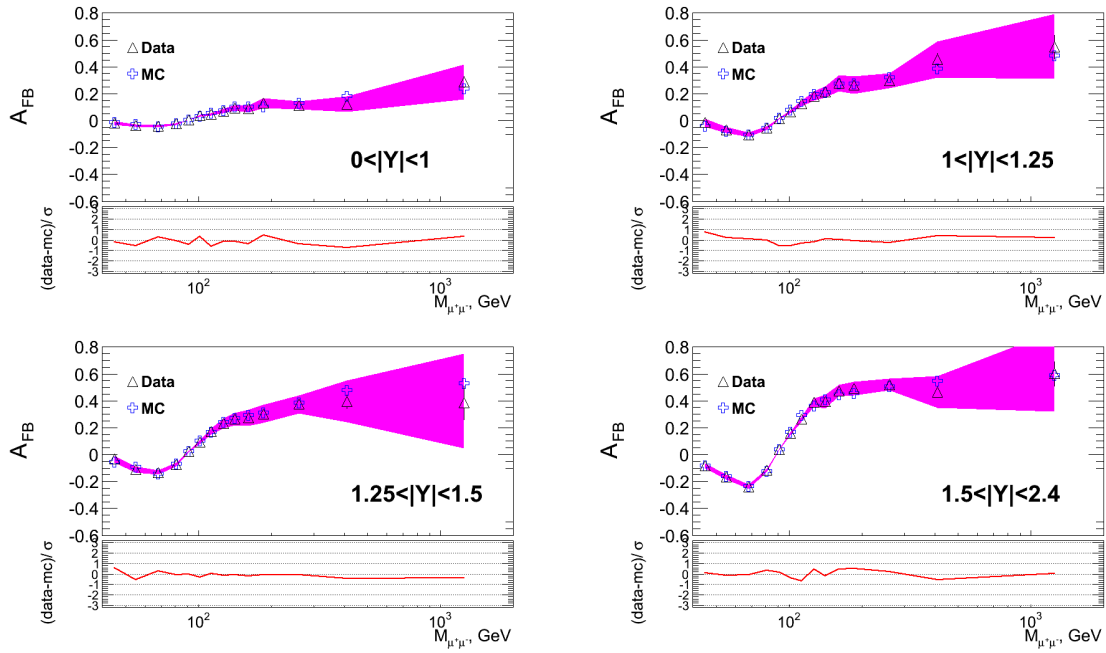


Рис. 7: Измеренная (после коррекций) асимметрия  $A_{FB}$  в зависимости от инвариантной массы и быстроты мюонной пары. Приведены систематические погрешности и результаты моделирования в рамках СМ.

тики, значением. Данная процедура применялась как к данным, так и к Монте-Карло событиям. Также учтено влияние систематических эффектов на матрицы отклика. В обоих случаях погрешностью считалась разница значений в интервалах по инвариантной массе и быстройте мюонной пары.

Для оценки влияния эффекта pile-up и вычисления погрешности коррекции импульса мюона соответствующие корректирующие коэффициенты изменялись на  $\pm 5\%$  или в пределах  $\pm \sigma$  соответственно от центрального значения. Погрешности вследствие FSR оценивалось путем варьирования бегущей константы связи КХД  $\alpha_s$ . Систематическая погрешность вычислялась как квадратичная сумма отклонений модифицированной  $A_{FB}$  от ее центрального значения. Неопределенность

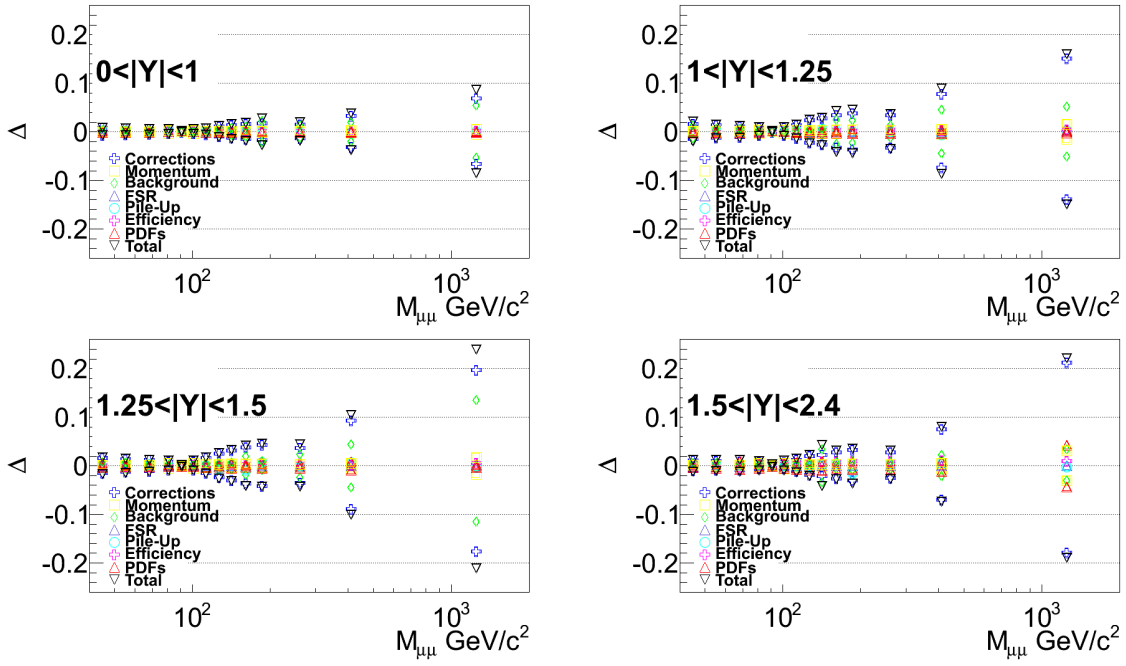


Рис. 8: Значения абсолютных систематических погрешностей измерения асимметрии  $A_{FB}$  для данных в зависимости от инвариантной массы и быстроты мюонной пары.

фона оценивалась из сравнения числа фоновых событий, полученных на Монте Карло и из анализа данных, независимо для событий «вперед» и «назад». Число фоновых событий варьировалось в пределах одного среднеквадратичного отклонения ( $\pm 1\sigma$ ) от центрального значения  $A_{FB}$ , что и принималось за систематическую погрешность фона. Влияние PDF оценено с помощью варьирования заданного центрального значения PDF для набора CT10 и вычисленного центрального (среднего) значения в случае набора NNPDF2.3 [26]. Влияние эффективностей оценено как разница между центральными значениями  $A_{FB}$  и значениями асимметрии, получаемыми без наложения эффективностей. Неопределенность процедуры коррекции оценена как квадратичная сумма ошибки моделирования и погрешности, связанной с регуляризацией матрицы отклика. Итоговая систематическая погрешность

вычислена как квадратичная сумма по отдельности для отрицательных и положительных погрешностей. Значения абсолютных систематических погрешностей измерения асимметрии  $A_{FB}$  для данных приведены на рис. 8 в зависимости от инвариантной массы и быстроты мюонной пары.

В **заключении** сформулированы основные выводы диссертационной работы.

В эксперименте CMS набрана уникальная статистика пар мюонов, образующихся в процессе Дрелла-Яна при взаимодействии сталкивающихся пучков протонов, в области инвариантных масс до 2000 ГэВ/с<sup>2</sup>. Интегральная светимость  $\mathcal{L}_{int}$  при  $\sqrt{s} = 7$  ТэВ в с.ц.м. составила 5.6 фбн<sup>-1</sup>, а при  $\sqrt{s} = 8$  ТэВ в с.ц.м.  $\mathcal{L}_{int} = 19.6$  фбн<sup>-1</sup>. Что позволило с высокой точностью произвести измерения асимметрии  $A_{FB}$ .

### **Основные результаты и выводы:**

1. Впервые измерены значения асимметрии вылета мюонов в направлении «вперед-назад» в процессах рождения пар мюонов в зависимости от инвариантной массы в диапазоне  $40 \leq M_{\mu^+\mu^-} \leq 2000$  ГэВ/с<sup>2</sup>. Результаты измерения на пучках сталкивающихся протонов при  $\sqrt{s} = 7$  и 8 ТэВ в с.ц.м. хорошо согласуются друг с другом и в пределах погрешностей совпадают с предсказаниями стандартной модели.
2. Впервые измерены значения асимметрии  $A_{FB}$  в зависимости от быстроты пары мюонов в диапазоне  $|Y_{\mu^+\mu^-}| < 2.4$ . Результаты измерения в пределах погрешностей совпадают с предсказаниями стандартной модели.



3. Разработана методика и создано программное обеспечение для извлечения значения асимметрии  $A_{FB}$  из экспериментальных данных в условиях  $pp$ -столкновений, основанные на различных способах восстановления асимметрии: аппроксимация угловых распределений, метод максимального правдоподобия, взвешивание угловых распределений и метод подсчета событий.
4. Исследованы различные методы коррекции систематических эффектов: влияние эффектов конечного разрешения детекторов, излучения в конечном состоянии, акцептанса, эффективности и ошибок моделирования. Создано программное обеспечение для коррекции этих эффектов.
5. Проведена оценка фоновых процессов в рамках стандартной модели с помощью моделирования методом Монте-Карло и анализа экспериментальных данных.

## Список литературы

- [1] Chatrchyan, S. *et al.* The CMS experiment at the CERN LHC. The Compact Muon Solenoid experiment / Chatrchyan, S. *et al.* (CMS Collaboration) // JINST. - 2008. - **Vol. 3**. - P. S08004
- [2] Drell, Sidney D., Yan, Tung-Mow. Massive Lepton-Pair Production in Hadron-Hadron Collisions at High Energies / Drell, Sidney D., Yan, Tung-Mow. // Phys. Rev. Lett. - 1970. - **Vol. 25, No 5**. - Pp. 316-320
- [3] Bayatian, G.L. *et al.* CMS Physics: Technical Design Report Volume 2: Physics Performance / Bayatian, G.L. *et al.*; Editor: A. De Roeck (CMS Collaboration) // J. Phys. G. - 2007. - **Vol. 34**. - Pp. 995-1579; Шматов, С. В. Поиск дополнительных измерений в эксперименте CMS на Большом адронном коллайдере / С. В. Шматов // Ядерная физика. - 2011. - **Т. 74, No 3**. - С. 511-517; Шматов, С. В. Поиск физики за рамками стандартной модели во взаимодействиях протонов при  $\sqrt{s} = 7$  ТэВ в эксперименте CMS на LHC / С. В. Шматов // Ядерная физика. - 2013. - **Т. 76, No 9**. - С. 1166-1174.
- [4] London, David and Rosner, Jonathan L. Extra Gauge Bosons in  $E_6$  / London, David and Rosner, Jonathan L. // Phys. Rev. D. - 1986. - **Vol. 34, No 5**. - Pp. 1530-1546; Rosner, Jonathan L. Off-peak lepton asymmetries from new  $Z$ 's / Rosner, Jonathan L. // Phys. Rev. D. - 1987. - **Vol. 35, No 7**. - Pp. 2244-2247; Rosner, Jonathan L. Forward-backward asymmetries in hadronically produced lepton pairs / Rosner, Jonathan L. // Phys. Rev. D. - 1996. - **Vol. 54, No 1**. - Pp. 1078-1082; Bodek, Arie and Baur, Ulrich. Implications of a 300-500 GeV/c<sup>2</sup>  $Z'$

- boson on  $p\bar{p}$  collider data at  $\sqrt{s} = 1.8 \text{ TeV}$  [Электронный ресурс] / Bodek, Arie and Baur, Ulrich // arXiv:hep-ph/0102160v3 - 2001 - **Vol. 3**. - Режим доступа: <http://arxiv-web3.library.cornell.edu/abs/hep-ph/0102160v3>; Abe, F. Search for New Gauge Bosons Decaying into Dileptons in  $p\bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.8 \text{ TeV}$  / Abe, F. et al. (CDF Collaboration) // Phys. Rev. Lett. - 1997. - **Vol. 79, No 12**. - Pp. 2192-2197.
- [5] Abe, F. Limits on Quark-Lepton Compositeness Scales from Dileptons Produced in 1.8 TeV  $p\bar{p}$  Collisions / Abe, F. et al. (CDF Collaboration) // Phys. Rev. Lett. - 1997. - **Vol. 79, No 12**. - Pp. 2198-2203
- [6] Davoudiasl, H., Hewett, J. L. and Rizzo, T. G. Phenomenology of the Randall-Sundrum Gauge Hierarchy Model / Davoudiasl, H., Hewett, J. L. and Rizzo, T. G. // Phys. Rev. Lett. - 2000. - **Vol. 84, No 10**. - Pp. 2080-2083
- [7] Голутвин, И. А. Поиск новых нейтральных калибровочных бозонов на ЛHC / Голутвин, И. А., Пальчик, В. В., Савина, М. В., Шматов, С. В. // Ядерная физика. - 2007. - **Т. 70, No 1**. - С. 61-67
- [8] Chatrchyan, S. Measurement of the weak mixing angle with the Drell-Yan process in proton-proton collisions at the LHC / Chatrchyan, S. et al. (CMS Collaboration) // Phys. Rev. D. - 2011. - **Vol. 84, No 11**. - p. 112002
- [9] Acosta, D. Measurement of the forward-backward charge asymmetry of electron-positron pairs in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 1.96 \text{ TeV}$  / Acosta,

- D. et al.* (CDF Collaboration) // Phys.Rev. D. - 2005. - **Vol. 71, No 5.** - p. 052002
- [10] Collins, John C. and Soper, Davison E. Angular Distribution of Dileptons in High-Energy Hadron Collisions / Collins, John C. and Soper, Davison E. // Phys. Rev. D. - 1977. - **Vol. 16, No 7.** - Pp. 2219-2225
- [11] Dittmar, M. Neutral current interference in the TeV region: The experimental sensitivity at the CERN LHC / Dittmar, Michael // Phys. Rev. D. - 1997. - **Vol. 55, No 1.** - Pp. 161-166; Dittmar, M.  $Z/\gamma$  studies at the LHC: an update / Michael Dittmar, Anne-Sylvie Nicollerata, Abdelhak Djouadi // Physics Letters B. - 2004. - **Vol. 583, No 1–2.** – Pp. 111-120.
- [12] Горбунов, И. Н., Шматов, С. В. Измерение асимметрии «вперед-назад»  $A_{FB}$  и слабого угла смешивания в процессах рождения пар лептонов в pp-столкновениях при  $\sqrt{s} = 7$  ТэВ в эксперименте CMS на LHC / Горбунов, И. Н., Шматов, С. В. // Ядерная физика. - 2013. - **Т. 76 No 9.** - С. 1160-1165
- [13] Frixione, S., Nason, P., and Oleari, C. Matching NLO QCD computations with Parton Shower simulations: the POWHEG method [Электронный ресурс] / S. Frixione, P. Nason, and C. Oleari // doi:10.1088/11266708/2007/11/070; arXiv:0709.2092 [hep-ph]. - 2007. - Режим доступа: <http://arxiv.org/pdf/0709.2092v1.pdf>; Alioli, S., Nason, P., Oleari C., and Re, E. NLO vector-boson production

- matched with shower in POWHEG / S. Alioli, P. Nason, C. Oleari, and E. Re // JHEP. - 2008. - **Vol. 0807**. - P. 060.
- [14] Sjostrand, T., Mrenna, S. and P. Skands PYTHIA 6.4 Physics and Manual / T. Sjostrand, S. Mrenna, and P. Skands // JHEP. - 2006. - **Vol. 0605**. - P. 026
- [15] Lai, Hung-Liang *et al.* New parton distributions for collider physics / H-L. Lai, M. Guzzi, J. Huston, Zh. Li, P. M. Nadolsky, J. Pumplin, and C.-P. Yuan // Phys. Rev. D. - 2010. - **Vol. 82, No 7**. - P. 074024.
- [16] Field, R. Min-Bias and the Underlying Event at the LHC [Электронный ресурс] / Rick Field // arXiv:1110.5530 [hep-ph]. - 2011. - Режим доступа: <http://arxiv.org/pdf/1110.5530v1.pdf>
- [17] Davidson, N. *et al.* Universal Interface of TAUOLA Technical and Physics Documentation [Электронный ресурс] / N. Davidson, G. Nanava, T. Przedzinski, E. Richter-Was, and Z. Was // IFJPAN-IV-2009-10; arXiv:1002.0543 [hep-ph]. - 2010. - Режим доступа: <http://xxx.lanl.gov/abs/1002.0543>;
- [18] Alwall, J. *et al.* MadGraph/MadEvent v4: The New Web Generation / J. Alwall, P. Demin, S. Visscher, R. Frederix, M. Herquet, *et al.* // arXiv:0706.2334 [hep-ph]; JHEP. - 2007. - **Vol. 0709**. - P. 028
- [19] Agostinelli S. *et al.* Geant4 – A simulation toolkit / S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, *et al.* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators,

Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. - 2003. - **Vol. 506, No 3.** - Pp. 250-303

- [20] Gorbunov, I. N. and Shmatov, S. V. Measurement of the Forward-Backward Asymmetry of  $\mu^+\mu^-$  Pairs in CMS / I. N. Gorbunov, S. V. Shmatov // Physics of Particles and Nuclei. - 2014. - **Vol. 45, No 1.** - Pp. 211-213
- [21] Chatrchyan, S. *et al.* Measurement of the differential and double-differential Drell-Yan cross sections in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV / S. Chatrchyan, ..., I. Gorbunov *et al.* (CMS Collaboration) // JHEP. - 2013. - **Vol. 12.** - P. 030
- [22] Gorbunov, I. *et al.* Forward-backward Asymmetry of Drell-Yan Muon Pairs / I. Gorbunov, A. Lanyov, S. Shmatov, J. Han, K. Kovitanggoon, D. Silvers, A. Bodek // Geneva:CERN. CMS Analysis Note. - 2013. - CERN-CMS-AN-2013/260
- [23] Adye, T Unfolding algorithms and tests using RooUnfold [Электронный ресурс] / Tim Adye // Proceedings of the PHYSTAT 2011 Workshop, CERN, Geneva, Switzerland, January 2011, CERN-2011-006, pp 313-318; arXiv:1105.1160 [physics.data-an]. - 2011. - Режим доступа: <http://arxiv.org/abs/1105.1160>
- [24] Chatrchayn, S. *et al.*  $A_{FB}$  in Muon and Electron final state at 8 TeV / S. Chatrchayn, ..., I. Gorbunov *et al.* (CMS Collaboratio) // Geneva:CERN. CMS Public Analysis Summary. - 2014. - CERN-CMS-PAS-SMP-14-004

- [25] Chatrchayn, S. *et al.* Forward-backward asymmetry of Drell-Yan lepton pairs in pp collisions at 7 TeV / S. Chatrchayn, ..., I. Gorbunov *et al.* (CMS Collaboration) // Physics Letters B. - 2013. - **Vol. 718**, **No 3.** - Pp. 752-772
- [26] Ball, R. D. *et al.* Parton distributions with LHC data / Richard D. Ball *et al.* // Nuclear Physics B. - 2013. - **Vol. 867**, **No 2.** - Pp. 244-289