

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ, ПУЧКОВ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

УДК 539.1.09.

ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ В ПРОЦЕССЕ ДРЕЛЛА–ЯНА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ CMS НА БОЛЬШОМ АДРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ

© 2021 г. В. В. Шалаев^{a, b, *}, И. Н. Горбунов^a, С. В. Шматов^{a, b}

^aОбъединенный институт ядерных исследований, ул. Жолио-Кюри 6, Дубна, Московская обл., 141980 Россия

^bГосударственный университет “Дубна”, ул. Университетская 19, Дубна, Московская обл., 141980 Россия

*E-mail: vladislav.shalaev@cern.ch

Поступила в редакцию 25.09.2020 г.

После доработки 25.09.2020 г.

Принята к публикации 25.09.2020 г.

В работе представлен обзор результатов измерения первых пяти поляризационных коэффициентов A_0 – A_4 угловых распределений мюонов, образованных в результате распада Z^0 -бозона в условиях протон-протонных столкновений при энергии 8 ТэВ в с.с.м. Использованы данные, набранные экспериментом CMS в течение 2011–2012 гг. (LHC Run 1). Статистика соответствует интегральной светимости 19.7 фбн^{-1} .

Ключевые слова: компактный мюонный соленоид (CMS), процесс Дрелла–Яна, угловые коэффициенты, поляризация, Z -бозон, Большой адронный коллайдер

DOI: 10.56304/S2079562920060512

1. ВВЕДЕНИЕ

Сигналами новой физики, лежащей за рамками Стандартной модели взаимодействия элементарных частиц (СМ), могут служить отклонения поведения измеренных кинематических и пространственных характеристик процессов СМ от теоретических предсказаний [1]. Одним из таких процессов является рождение пары лептонов в результате аннигиляции кварка и антикварка посредством обмена калибровочным бозоном $q\bar{q} \rightarrow \gamma^*/Z^0 \rightarrow \ell^+\ell^-$ – процесс Дрелла–Яна (рис. 1) [2]. Этот процесс имеет исключительную важность для физики адронных коллайдеров, поскольку измерение его характеристик представляет собой критический тест СМ в новой области энергий.

Предыдущие эксперименты позволили провести изучение этого процесса в области переданных 4-импульсов Q до значений порядка несколько сотен ГэВ/с [3]. Современные данные экспериментов на “Большом адронном коллайдере” (LHC), ATLAS [4] и CMS [5], позволяют существенно расширить эту область до нескольких ТэВ/с, т. е. впервые выйти за границу ТэВ-ного масштаба взаимодействий.

В настоящее время сечения процесса Дрелла–Яна рассчитаны в первом (next-to-leading, NLO) и втором (next-to-next-leading, NNLO) порядках тео-

рии возмущений (ТВ) КХД с точностью $\sim 2 - 4\%$ в области масс Z -бозона ($\sim 90 \text{ ГэВ}/c^2$) [6], таким образом, измерения характеристик этого процесса должны проводиться с точностью не уступающей точности теоретических расчетов. Одним из преимуществ данного процесса является его простая экспериментальная сигнатура — два хорошо пространственно изолированных лептона в конечном состоянии, что обуславливает высокую эффективность подавления фоновых процессов и регистрации сигнальных событий.

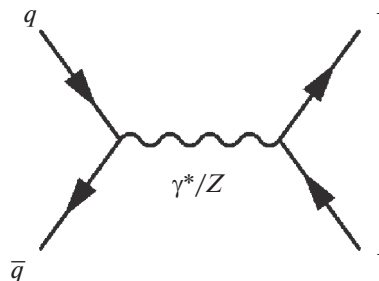


Рис. 1. Рождение пары лептонов в процессе Дрелла–Яна $q\bar{q} \rightarrow \gamma^*/Z \rightarrow \ell^+\ell^-$.

Также процесс Дрелла–Яна является источником фоновых событий для ряда других исследуемых в эксперименте CMS процессов: 4-х лептонного распада бозона Хиггса, рождения калибровочных бозонов и пар t -кварков, а также используется для оценки технических характеристик детекторных систем.

Исследование процесса Дрелла–Яна является одним из традиционных направлений для многих ускорительных экспериментов, в частности, для эксперимента “Компактный мюонный соленоид” (CMS) на LHC [7]. Уникальные свойства ускорительного комплекса LHC позволяют набрать необходимую статистику для прецизионного измерения дифференциальных сечений [6] и изучения пространственных закономерностей [8], в частности, зависимости угловых распределений от кинематических переменных лептонной пары — быстроты, инвариантной массы и поперечного импульса. Данная статья содержит краткий обзор результатов измерения коэффициентов угловых распределений мюонов, образованных в процессе Дрелл–Яна, полученные коллаборацией CMS на основе данных, набранных экспериментом в 2011–2012 гг. во время выполнения первой фазы рабочей программы LHC (Run-1) при энергии протонных пучков $\sqrt{s} = 8$ ТэВ и соответствующих интегральной светимости 19.7 фбн^{-1} [9].

2. УГЛОВЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ

Угловые распределения пар лептонов чувствительны к эффектам высших порядков КХД, поляризации протона и пр. Поэтому измерение коэффициентов A_i , возникающих в выражении для дважды дифференциального сечения при соответствующих угловых полиномах, вызывает особый интерес. В лидирующем порядке теории возмущений это сечение выглядит следующим образом:

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

где ϕ^* и θ^* полярный и азимутальный углы в системе центра масс пары лептонов (система Колинса–Сопера [10]). Строго говоря, угловые коэффициенты A_i являются функциями кинематических переменных Z -бозона — быстроты, инвариантной массы, поперечного импульса. Каждый коэффициент чувствителен к проявлению определенного эффекта: например, коэффициенты A_0, A_1, A_2 отвечают за поляризацию Z -бозона, а коэффициенты A_3 и A_4 отражают влияние V-A структуры слабых токов. В частности, коэффициент A_4

описывает величину пространственной асимметрии вылета пары лептонов в системе покоя Z -бозона A_{FB} и является единственным ненулевым коэффициентом в лидирующем порядке КХД при $q_T \rightarrow 0$ [8].

Важной измеряемой характеристикой, связанной с инвариантностью относительно поворота системы координат, является величина нарушения так называемого соотношения Лама–Тунга $A_0 = A_2$ [11]. Появление ненулевой разницы между коэффициентами A_0 и A_2 при возрастании поперечного импульса Z -бозона впервые наблюдалось в эксперименте NA10 (CERN) в 1988 году [12]. Годом позже нарушение также наблюдалось в одном из экспериментов Fermilab [13], однако, результаты эксперимента CDF на Tevatron установили сохранение соотношения Лама–Тунга в пределах статистических ошибок в области $q_T < 55 \text{ ГэВ}/c$ [14]. Таким образом, данные экспериментов ATLAS и CMS вносят окончательную ясность в вопрос о наличии нарушения, а также позволяют провести его измерения в новой области поперечных импульсов.

3. АНАЛИЗ ДАННЫХ И ОТБОР СОБЫТИЙ

Для сравнения экспериментальных данных с предсказаниями СМ, а также для оценки эффективности отбора и реконструкции событий было произведено моделирование сигнальных и фоновых процессов. Моделирование сигнального процесса $q\bar{q} \rightarrow \gamma^*/Z \rightarrow \ell^+\ell^-$ на основе вычислений в главном порядке ТВ осуществлялось генератором MadGraph [15] с использованием набора кварковых и глюонных структурных функций (PDF) CTEQ6L (Coordinated Theoretical/Experimental Project on QCD Phenomenology and Tests of the Standard Model) [16], в NLO порядке — генераторами PYTHIA [17]+POWHEG [18] с набором PDF CT10 (сокращение от CTEQ с 2010 г.) [19]. Для моделирования сигнальных событий в NNLO порядке ТВ использовался генератор FEWZ [20]. Партонные ливни, а также некоторые фоновые процессы (рождение пар WW, WZ, ZZ) моделировались с помощью генератора PYTHIA. Вклад процессов $W + \text{jet}, \tau^+\tau^-, t\bar{t}$ и одиночного рождения t -кварка учитывался генераторами MadGraph и POWHEG. Моделирование прохождения частиц через вещество детектора, учитывающее особенности конструкции экспериментального комплекса CMS было реализовано с помощью программного пакета GEANT4 [21].

Для анализа отбирались пары мюонов с поперечным импульсом пары $q_T < 200 \text{ ГэВ}/c$ и быстротой $|y| < 2.1$. Измерения проводилась в области масс Z -бозона $81 < m < 101 \text{ ГэВ}/c^2$. Было про-

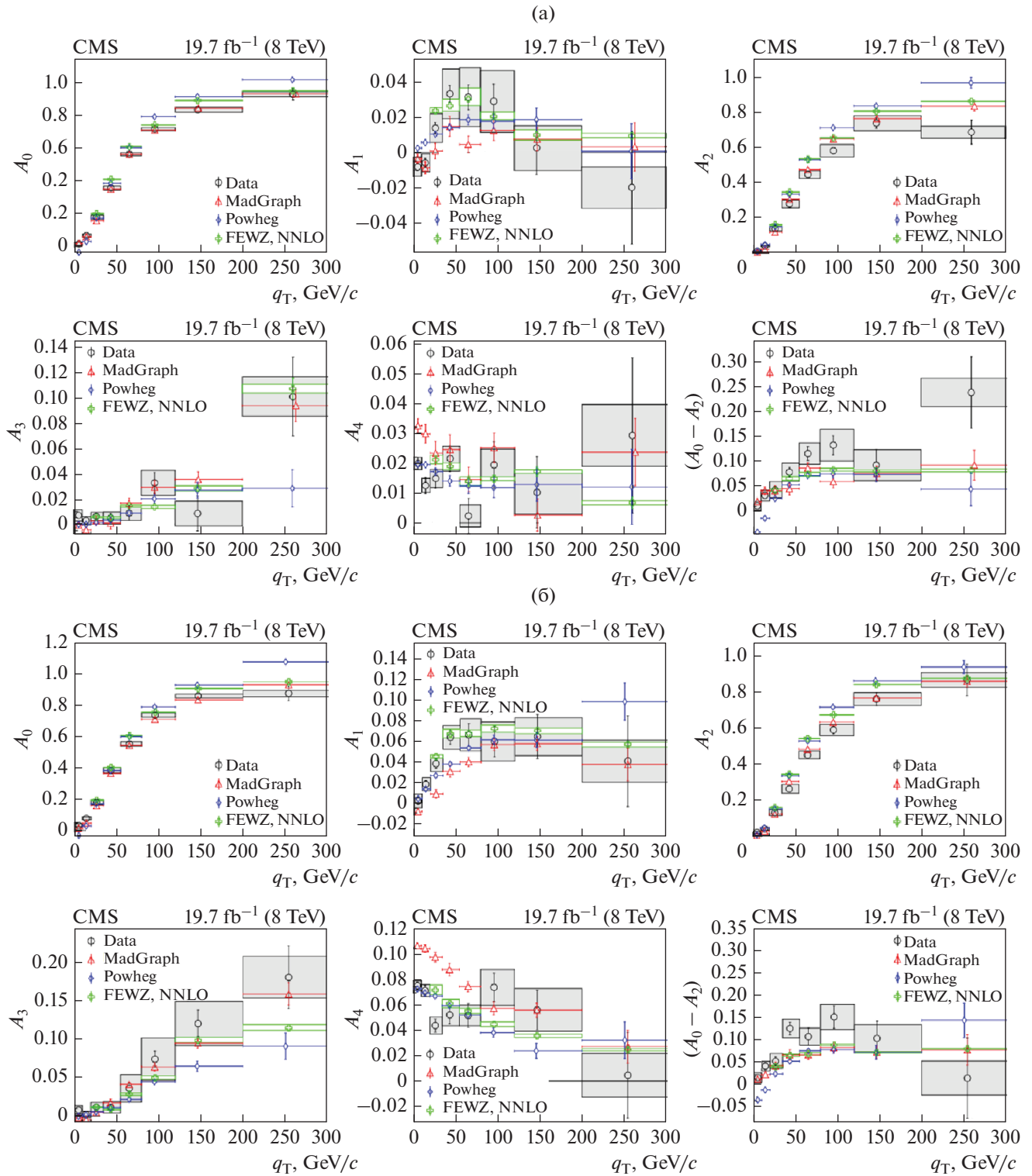


Рис. 2. Зависимость величин угловых коэффициентов от поперечного импульса пары q_T в двух интервалах быстрой: (а) $0 < |y| < 1$; (б) $1 < |y| < 2.1$, при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ в мюонном канале [9]. Измеренные значения (открытые кружки) приведены со статистическими ошибками, а систематические ошибки отмечены серыми закрашенными областями. Треугольниками обозначены предсказания MadGraph, ромбами – предсказания POWHEG, крестиками и прямоугольниками – соответственно предсказания FEWZ и их неопределенность, связанная с выбором PDF.

анализировано $4.3 \cdot 10^6$ и $2.5 \cdot 10^6$ событий в двух интервалах быстроты: $|y| < 1$ и $1.0 < |y| < 2.1$ соответственно.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты измерения значений первых пяти угловых коэффициентов A_0, A_1, A_2, A_3, A_4 , а также разницы коэффициентов $A_0 - A_2$ как функции поперечного импульса Z -бозона в двух интервалах быстроты $|y| < 1$ и $1.0 < |y| < 2.1$ представлены на рис. 2. Значения коэффициента A_4 , полученные на генераторе MadGraph, практически во всех диапазонах q_T превышают соответствующие результаты POWHEG и FEWZ, поскольку значения слабого угла смешивания в MadGraph вычисляются без учета радиационных поправок, однако, результаты измерений коэффициентов A_0 и A_2 лучше согласуются с предсказаниями MadGraph, особенно в области больших поперечных импульсов. Также было обнаружено, что значения коэффициентов $A_0(q_T)$ и $A_2(q_T)$ измеренные в условиях протон-протонных столкновений на LHC, оказались больше полученных на протон-антипротонных пучках Tevatron, что объясняется большим вкладом в сигнальные события процесса комптоновского рассеяния кварка на глюоне в pp -столкновениях.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты измерения коэффициентов $A_0 - A_4$ угловых распределений мюонов в процессе Дрелла-Яна, полученные на основе статистики первого периода работы LHC, явно демонстрируют нарушение соотношения Лама-Тунга. Показано, что в исследуемом диапазоне поперечных импульсов $q_T < 300$ ГэВ/с $A_0 > A_2$, причем разность $A_0 - A_2$ возрастает с увеличением q_T . Более того, величина нарушения оказалась больше предсказываемой на основе NNLO вычислений. Причиной имеющихся расхождений могут являться неучтенные эффекты, такие как высшие твисты КХД, корреляции спина партонов и их ненулевого момента в начальном состоянии, и т.д. Однако, для более определенного ответа на этот вопрос требуется проведение ряда комплексных исследований, связанных с измерениями на большей статистике экспериментальных данных и развитием теоретического описания соответствующих физических процессов.

Полученные результаты очень важны для точной оценки массы W -бозона и предстоящих измерений электрослабого угла смешивания Вайнберга — значение $\sin^2 \theta_{\text{eff}}^W$ определяется многопараметрической аппроксимацией угловых распределений [22]. В настоящее время ведется анализ данных, набранных во время второго периода работы

LHC (LHC Run 2) при энергии 13 ТэВ, соответствующих интегральной статистике 140 фбн^{-1} .

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90212.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Rubakov V.A. // Phys. Usp. 2012. V. 55. P. 949; Lanyov A.V. // Phys. At. Nucl. 2015. V. 78. P. 521; Shmatov S.V. // Phys. At. Nucl. 2013. V. 76. P. 1106; Shmatov S.V. // Phys. At. Nucl. 2015. V. 78. P. 508; Shmatov S.V. // Phys. At. Nucl. 2016. V. 79. P. 266; Shmatov S.V. // Proc. Joint RDMS—CMS Seminar on Physics at the LHC. 2016. V. 4. P. 13; Savina M.V. // Phys. At. Nucl. 2015. V. 78. P. 532.
2. Drell S.D., Yan T-M. // Phys. Rev. Lett. 1970. V. 25(5) P. 316; Matveev V.A., Muradyan R.M., Tavheliidze A.N. Preprint JINR, P2-4543. 1969. Dubna.
3. CDF Collab. // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 87. P. 131802; CDF Collab. // Phys. Lett. B, 2010. V. 692. P. 232; D0 Collab. // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 82. P. 4769.
4. ATLAS Collab. // Phys. Lett. B. 2013. V. 725. P. 223; ATLAS Collab. // J. High Energy Phys. 2014. V. 2014 (6). P. 112.
5. Golutvin I.A., Shmatov S.V. // Phys. At. Nucl. 2017. V. 48. P. 604.
6. CMS Collab. // J. High Energy Phys. 2019. V. 2019 (12). P. 61; Khachatryan V. et al. (CMS collab.) // Eur. Phys. J. C. 2018. V. 75. P. 147; CMS Collab. // High Energy Phys. 2011. V. 2011 (10). P. 007.
7. Chatrchyan S. et al. (CMS collab.) // J. Instrum. 2008. V. 3. P. S08004.
8. CMS Collab. // Phys. Rev. D. 2011. V. 84. P. 112002.
9. Khachatryan V. et al. (CMS Collab.) // Phys. Lett. B. 2015. V. 750. P. 154.
10. Collins J.C., Soper D.E. // Phys. Rev. D. 1977. V. 16. P. 2219.
11. Lam C.S., Tung W.-K. // Phys. Rev. D. 1978. V. 18. P. 2447.
12. Guanziroli M. et al. (NA10 Collaboration) // Z. Phys. C. 1988. V. 37. P. 545.
13. Conway J. S. et al. // Phys. Rev. D. 1989. V. 39. P. 92.
14. Aaltonen T. et al. (CDF Collab.) // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 106. P. 241801.
15. Alwall J. et al. // J. High Energy Phys. 2014. V. 2014 (7). P. 079.
16. Pumplin J. et al. // J. High Energy Phys. 2002. V. 2002 (7). P. 012.
17. Sjostrand T., Mrenna S., and Skands P. // J. High Energy Phys. 2006. V. 2006 (5). P. 026.
18. Frixione S., Nason P., Oleari C. // J. High Energy Phys. 2007. V. 2007 (11). P. 070.
19. Lai H.-L. et al. // Phys. Rev. D. 2010. V. 82. P. 074024.
20. Gavin R., Li Y., Petriello F., Quackenbush S. // Comput. Phys. Commun. 2011. V. 182. P. 2388.
21. GEANT4 Collab. // Nucl. Instrum. Meth. A. 2003. V. 506. P. 250.
22. CMS Collab. // Eur. Phys. J. C. 2018. V. 78. P. 701.

Drell–Yan Angular Coefficients Measurement with the CMS Experiment at the LHC**V. V. Shalaev^{1, 2, *}, I. N. Gorbunov¹, and S. V. Shmatov^{1, 2}**¹*Joint Institute for Nuclear Research, ul. Joliot-Curie 6, Dubna, Moscow oblast, 141980 Russia*²*Dubna State University, ul. Universitetskaya 19, Dubna, Moscow oblast, 141980 Russia***e-mail: vladislav.shalaev@cern.ch*

Received September 25, 2020; revised September 25, 2020; accepted September 25, 2020

The review of measurements of the first five angular coefficients for Z bosons produced in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV and decaying to $\mu^+\mu^-$ is presented. The data collected by the CMS detector during the LHC Run-I (2011–2012) was used. Full statistics corresponds to integrated luminosity $L_{\text{int}} = 19.7 \text{ fb}^{-1}$.

Keywords: Compact Muon Solenoid (CMS), Drell–Yan process, angular coefficients, polarization, Z-boson, Large Hadron Collider (LHC)