

ЭЛЕКТРОСЛАБЫЕ ПОПРАВКИ ВЫСШИХ ПОРЯДКОВ ДЛЯ ПРОЦЕССА ДРЕЛЛА–ЯНА НА LHC

Е. В. Дыдышко^{1,2}, *В. Л. Ермольчик*¹, *В. А. Зыкунов*^{2,3,*},
*Х. Г. Суарес*¹, *С. В. Шматов*^{2,4}

¹ Научно-исследовательский институт ядерных проблем
Белорусского государственного университета, Минск

² Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

³ Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель, Белоруссия

⁴ Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

Представлены анализ и сравнение предсказаний основных программ для учета электрослабых радиационных поправок для процесса Дрелла–Яна при больших инвариантных массах дилептона.

Analysis and comparison of predictions of the main codes for electroweak radiative corrections in the Drell–Yan process in the high lepton pair invariant mass region.

PACS: 13.85.-t; 12.15.Lk

ВВЕДЕНИЕ

Изучение закономерностей рождения лептонных пар в процессе Дрелла–Яна ($q\bar{q} \rightarrow Z/\gamma^* \rightarrow l^+l^-$) [1] имеет исключительную важность для физики адронных коллайдеров. Измерение сечения процесса Дрелла–Яна на Большом адронном коллайдере (LHC) представляет собой важнейший тест Стандартной модели взаимодействия элементарных частиц (СМ) в новой области энергий. Процесс Дрелла–Яна также является основным источником фона при проведении поисков «новой» физики за пределами Стандартной модели [2], которые возможны при условии надежного определения экспериментальных и теоретических погрешностей.

Существенные неточности в вычислениях процесса Дрелла–Яна, особенно в области больших инвариантных масс, связаны с неопределенностями в кварковых и глюонных функциях распределения (т. е. с использованием различных наборов структурных функций), неопределенностями выбора шкалы

*E-mail: zykunov@cern.ch

факторизации КХД и бегущей константы связи КХД. Влияние этих эффектов на величину сечения процесса Дрелла–Яна для случая столкновения пучков протонов Большого адронного коллайдера (ЛНС) при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ рассмотрено в работе [3]. При этих условиях процессы Дрелла–Яна измерены в эксперименте «Компактный мюонный соленоид» (CMS) в области инвариантных пар до $3000 \text{ ГэВ}/c^2$ [4]. Величина полных систематических ошибок варьируется от 2% в области Z -пика до нескольких десятков процентов в области ТэВ-ных значений инвариантных масс.

Все это предъявляет серьезные требования к теоретическим описаниям и предсказаниям таких процессов, что, в свою очередь, обосновывает необходимость создания для этого специализированных средств. В настоящее время интенсивно развиваются и создаются новые программные пакеты, позволяющие учитывать высшие порядки теории возмущений для процесса Дрелла–Яна. В этой работе была предпринята попытка сравнения различных подходов для учета электрослабых радиационных эффектов с прицелом на условия работы ЛНС.

1. МЕТОДЫ И ГЕНЕРАТОРЫ

В настоящее время для решения проблемы предсказания и учета радиационных эффектов для процесса Дрелла–Яна существует более десятка программ, различающихся в подходах и фокусирующихся на различных эффектах высших порядков.

В самом общем смысле выделяются аналитический и численный подходы. Применительно к задаче учета радиационных эффектов под численным подходом понимается любое использование методов Монте-Карло (МК) или квази-Монте-Карло, в то время как задействие квадратурных формул типа Гаусса и аналогичных естественно отнести к аналитическому подходу.

В аналитическом подходе все, какие возможно, интегралы по фазовому объему снимаются аналитически в терминах специальных функций либо быстро сходящихся рядов. В тех случаях, где этого осуществить нельзя, используются квадратурные формулы с высокой скоростью сходимости, достигаемой благодаря известной информации о расположении сингулярностей на комплексной плоскости. Для процесса Дрелла–Яна такой подход реализован только в проекте SANC [5] и Python-версии LPPG. Основными достоинствами этого подхода являются высокая точность и скорость вычислений. Главный же недостаток — трудности в учете ограничений детекторов реальных экспериментов.

В численном подходе при использовании методов Монте-Карло и им родственных можно выделить два основных типа программ: МК-интеграторы и МК-генераторы. Первый тип использует обширный набор приемов и техник ускорения сходимости численных предсказаний для наблюдаемых, основным

из которых является метод вычитания наиболее сингулярных вкладов. Разницу интегрируют методом МК, а сингулярный вклад — аналитически. Методы вычитания диполей [6–8] и метод Бардина–Шумейко [9] относятся к этому типу в однопетлевом случае. Они использованы в программах RADY и MC@NLO [10]. Методом Sector-Decomposition благодаря использованию плюс-распределений обобщается этот подход на многопетлевой случай и используется в программе FEWZ [11]. Основным достоинством использования МК-интеграторов является возможность наложения кинематических ограничений любой сложности, а также построение распределений любой наблюдаемой величины. Главным недостатком методов этого типа является потеря знакопостоянства подынтегрального выражения, не позволяющая интерпретировать его значение в случайной точке в качестве веса некоторого события, что было бы желательно для моделирования прохождения частиц через детектор.

МК-генераторы в отличие от МК-интеграторов создаются с целью моделирования событий данного процесса, поэтому требование положительности весов ограничивает выбор методов оптимизации. В сущности таких методов два: 1) разбиение фазового объема на области и 2) замены переменных. Первый из них используется в программах ZGRAD [12], READY [13] в рамках алгоритма Vegas и в программе WINHAC [14], созданной на основе алгоритма FOAM [15]. Разбиение фазового объема позволяет также отделить узкие сингулярные области, внутри которых при определенных условиях возможно упрощение кинематики и последующее аналитическое интегрирование. При этом возникают нефизические параметры, отсутствие зависимости от которых следует проверять отдельно. Их появление является неизбежным следствием того, что в конечном порядке теории возмущений подынтегральное выражение имеет смысл лишь как обобщенная функция, к которой можно лишь строить приближения, зависящие от параметра. Только учет высших порядков теории возмущений вместе с пересуммированием вкладов сингулярных областей позволяет избавиться от нефизических параметров. Такое пересуммирование в случае коллинеарных и инфракрасных сингулярностей осуществлено в программах POWHEG [16, 17], PHOTOS, HORACE [18], а также в C++-версии LPPG [19].

2. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данной работе приводятся результаты сравнения электрослабых поправок для процесса Дрелла–Яна для условий LHC. Параметры сравнения были выбраны теми же, что и в работе [20].

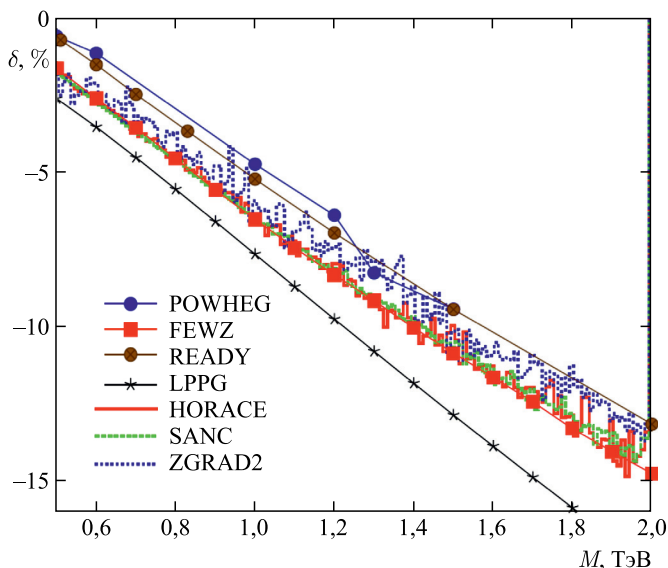
Для сравнения выбраны программы HORACE, POWHEG, ZGRAD, SANC, FEWZ, READY, LPPG.py. Все они включают электрослабые поправки первого порядка в теории возмущений, в том числе эффекты тормозного излучения фотонов.

Программы POWHEG и HORACE позволяют учесть в лидирующем логарифмическом приближении эффекты многократного тормозного излучения с помощью алгоритмов фотонных ливней. В данной работе эти эффекты не исследовались, и при сравнении соответствующие опции были выключены.

Петлевые интегралы в программах ZGRAD, HORACE и POWHEG используют библиотеку LoopTools. В программах SANC, FEWZ, READY и LPPG.py все интегралы вычислялись независимо, с использованием специфики процесса. При этом в READY использовался асимптотический подход для области больших инвариантных масс лептонной пары, а в программе LPPG.py аналитически сняты интегралы по угловым переменным.

Результаты сравнения представлены на рисунке.

Из рисунка видно, что предсказания различных программ хорошо согласуются друг с другом. Неопределенность в предсказании величины поправки практически полностью лежит в диапазоне флуктуаций метода Монте-Карло. Иными словами, статистическая погрешность, определяемая числом точек МК, имеет тот же масштаб, что и систематическая неопределенность, вызванная различиями в методах аналитических расчетов и характером сделанных аппроксимаций. Дополнительного изучения требуют влияния неопределенностей входных параметров, в том числе функций партонной плотности, а также выбора схемы ренормализации и факторизации на величину электро-слабой радиационной поправки.



Графики зависимости электрослабой радиационной поправки δ от инвариантной массы лептонной пары M

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Коллектив авторов выражает благодарность организаторам Международной сессии-конференции секции ядерной физики ОФН РАН за возможность представить данную работу перед ведущими учеными в области физики частиц, а также лично А. Б. Арбузову, С. Г. Бондаренко и Л. В. Калиновской за помощь при сравнении с программой SANC.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Drell S. D., Yan T.-M.* Massive Lepton-Pair Production in Hadron-Hadron Collisions at High Energies // *Phys. Rev. Lett.* 1970. V. 25. P. 316.
2. *CMS Collab.* CMS Technical Design Report. V. II: Physics Performance // *J. Phys. G.* 2007. V. 34. P. 995;
Ланев А. В. Результаты коллаборации CMS: бозон Хиггса и поиски новой физики // *УФН.* 2014. Т. 184. С. 99;
Ланев А. В. Последние результаты коллаборации CMS по поискам физики вне Стандартной модели // *ЯФ.* 2015. Т. 78. С. 558;
Савина М. В. Поиск калуца-клейновских возбуждений гравитона и микроскопических черных дыр с помощью детектора CMS на LHC // Там же. С. 571;
Шматов С. В. Поиск физики за рамками Стандартной модели во взаимодействии протонов при $\sqrt{s} = 7$ ТэВ в эксперименте CMS на LHC // *ЯФ.* 2013. Т. 76. С. 1166;
Шматов С. В. Обзор результатов эксперимента CMS // *ЯФ.* 2015. Т. 78. С. 546;
Шматов С. В. Обзор результатов эксперимента CMS на LHC по поиску дополнительных пространственных измерений // *ЯФ.* 2016. Т. 79. С. 157;
Шматов С. В. Обзор результатов эксперимента CMS // Тр. объединенного семинара RDMS CMS «Физика на LHC». Дубна, 2016. Т. 4. С. 13.
3. *Коноплянников В. Ф., Савина М. В., Шматов С. В., Шульга С. Г.* О точности вычислений сечений рождения пар мюонов в процессе Дрелла-Яна при столкновении протонов на LHC // *Письма в ЭЧАЯ.* 2014. Т. 11. С. 1122;
Гавриленко М. Г., Коноплянников В. Ф., Савина М. В., Шматов С. В., Шульга С. Г. Сечения процесса Дрелла-Яна в столкновении протонов на LHC // *ЯФ.* 2016. Т. 79. С. 50.
4. *CMS Collab.* Measurement of the Differential Drell-Yan Cross Section in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV. CMS-PAS-SMP-16-009.
5. *Sadykov R., Arbuзов A., Bardin D., Bondarenko S., Christova P., Kalinovskaya L., Kolesnikov V., Sapronov A., Uglov E.* SANC System and Its Applications for LHC // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2014. V. 523. P. 012043.
6. *Ellis R. K., Ross D. A., Terrano A. E.* The Perturbative Calculation of Jet Structure in e^+e^- Annihilation // *Nucl. Phys. B.* 1981. V. 178. P. 421.
7. *Frixione S., Kunszt Z., Signer A.* Three-Jet Cross Sections to Next-to-Leading Order // *Nucl. Phys. B.* 1996. V. 467. P. 399.

8. *Catani S., Seymour M.H.* A General Algorithm for Calculating Jet Cross Sections in NLO QCD // Nucl. Phys. B. 1997. V.485. P. 291.
9. *Bardin D. Yu., Shumeiko N.M.* An Exact Calculation of the Lowest Order Electromagnetic Correction to the Elastic Scattering // Nucl. Phys. B. 1977. V.127. P. 242.
10. *Frixione S., Webber B.R.* Matching NLO QCD Computations and Parton Shower Simulations // JHEP. 2007. V. 10. P. 109.
11. *Ye L., Frank P.* Combining QCD and Electroweak Corrections to Dilepton Production in the Framework of the FEWZ Simulation Code // Phys. Rev. D. 2012. V.86. P.094034.
12. *Baur U., Brein O., Hollik W., Schappacher C., Wackerroth D.* Electroweak Radiative Corrections to Neutral-Current Drell–Yan Processes at Hadron Colliders // Phys. Rev. D. 2002. V. 65. P. 033007.
13. *Zygunov V.A.* Weak Radiative Corrections to Drell–Yan Process for Large Invariant Mass of Di-lepton Pair // Phys. Rev. D. 2007. V. 75. P. 073019;
Zygunov V.A. Electroweak and QCD Radiative Corrections to Drell–Yan Process for Experiments at the Large Hadron Collider // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. V.523. P.012053.
14. *Placzek W., Jadach S.* Multiphoton Radiation in Leptonic W -Boson Decays // Eur. Phys. J. C. 2003. V. 29. P. 325.
15. *Jadach S.* Foam: A General Purpose Cellular Monte Carlo Event Generator // Comp. Phys. Commun. 2003. V. 152. P. 55.
16. *Barze L., Montagna G., Nason P., Nicrosini O., Piccinini F., Vicini A.* Neutral Current Drell–Yan with Combined QCD and Electroweak Corrections in the POWHEG BOX. hep-ph/1302.4606.
17. *Bernaciak C., Wackerroth D.* Combining Next-to-Leading Order QCD and Electroweak Radiative Corrections to W -Boson Production at Hadron Colliders in the Powheg Framework // Phys. Rev. D. 2012. V. 85. P. 093003.
18. *Calame C., Montagna G., Nicrosini O., Vicini A.* Precision Electroweak Calculation of the Production of a High Transverse-Momentum Lepton Pair at Hadron Colliders // JHEP. 2007. V. 10. P. 109.
19. *Dydyshka Ya. V., Yermolchik V. L., Suarez J. H., Shumeiko N.M.* LePaProGen — Lepton Pair Production Generator // Phys. Part. Nucl. 2017. V. 48. P. 755.
20. *Buttar C., D’Hondt J., Kramer M., Salam G., Wobisch M., Adam N.E., Adler V., Arbutov A., Bardin D., Baur U., Bhatti A. A., Bondarenko S., Buge V., Butterworth J. M., Cacciari M.* Standard Model Handles and Candles Working Group: Tools and Jets Summary Report // Physics at TeV Colliders, La physique du TeV aux collisionneurs, Les Houches, June 11–29, 2007. P. 121–214; arXiv: 0803.0678.