

ОДНОПЕТЛЕВЫЕ ЭЛЕКТРОСЛАБЫЕ ПОПРАВКИ К ПРОДОЛЬНО-ПОЛЯРИЗОВАННОМУ ПРОЦЕССУ ДРЕЛЛА–ЯНА. I. СЛУЧАЙ НЕЙТРАЛЬНОГО ТОКА

*С. Г. Бондаренко^а, Е. В. Дыдышко^{а,б}, Л. В. Калиновская^а,
Р. Р. Садыков^{а,1}, В. Л. Ермольчик^{а,б}*

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета, Минск

Представлены полные однопетлевые электрослабые поправки к процессу Дрелла–Яна в канале нейтрального тока $pp \rightarrow \ell^+ \ell^- X$ для случая продольной поляризации начальных частиц. Исследуемые одно- и двухспиновые асимметрии позволяют извлечь информацию о поляризованных партонных функциях распределения. С помощью Монте-Карло генератора событий ReneSANCe тщательно изучено численное влияние электрослабых поправок следующего порядка к распределению асимметрий по быстрой векторного бозона и псевдобыстротам лептонов в адрон-адронной системе центра масс.

Complete one-loop electroweak corrections to neutral current Drell–Yan process $pp \rightarrow \ell^+ \ell^- X$ are presented for the case of longitudinal polarization of initial particles. The single- and double-spin asymmetries under study allow us to extract information about polarized parton distribution functions. Numerical impact of electroweak next-order corrections to asymmetries as function of the vector boson rapidity and lepton pseudorapidities in the hadron–hadron centre-of-mass frame using the MC generator ReneSANCe is thoroughly studied.

PACS: 12.15.–y; 12.15.Lk; 12.38.Bx

ВВЕДЕНИЕ

Теоретические расчеты однопетлевых QED и электрослабых (EW) радиационных поправок к процессам Дрелла–Яна [1] на адронных коллайдерах высоких энергий были проведены несколькими группами (см. статьи [2–10] и ссылки в них).

Измерение сечения процесса Дрелла–Яна в поляризованных адрон-адронных столкновениях предоставит важную информацию о поляризации кваркового моря в нуклоне. До настоящего времени эта информация извлекалась только из экспериментов по глубоконеупругому рассеянию, таких как $l-p$ рассеяние на ускорителе HERA и $\mu-e$ рассеяние в эксперименте SMC в ЦЕРН и т. д.

¹E-mail: srr@nusun.jinr.ru

В нашей группе были созданы компьютерные программы, необходимые для описания поляризованных процессов для этих экспериментов, а именно: код *μela* [11] для исследования спин-зависимой структурной функции $g_1(x)$ дейтрона из поляризованного глубоконеупругого рассеяния мюонов [12] и программа *polHERTOR* [13] для глубоконеупругого рассеяния с продольно- и поперечно-поляризованным нуклоном для эксперимента HERMES на HERA. В этих расчетах слабыми поправками пренебрегали из-за их малости.

Релятивистский коллайдер тяжелых ионов (RHIC) — единственная когда-либо построенная установка для высокоэнергетичных поляризованных протонов с реализованным режимом продольной поляризации. В настоящее время доступно 93 пб^{-1} данных для продольно-поляризованных p - p столкновений при $\sqrt{s} = 200 \text{ ГэВ}$ (набранных с 2009 по 2015 г. в экспериментах PHENIX и STAR на коллайдере RHIC) и 569 пб^{-1} при $\sqrt{s} = 510 \text{ ГэВ}$ (набранных в 2012 и 2013 гг. в экспериментах PHENIX и STAR) [14, 15]. Для повышения точности извлечения поляризованных партонных функций распределения (PDF) рассматривается возможность набора дополнительных $1,1 \text{ фб}^{-1}$ данных при энергии $\sqrt{s} = 510 \text{ ГэВ}$ в 2023–2025 гг.

xFitter [16, 17] — хорошо известный пакет программ для определения PDF. Он включает в себя анализ данных широкого круга экспериментов, в частности экспериментов на фиксированной мишени, а также на Tevatron, HERA и LHC. *xFitter* может анализировать эти данные, используя теоретические предсказания. Данная статья написана с учетом интереса команды *xFitter* к фитированию поляризованных PDF.

Исследование продольно-поляризованных протон-протонных столкновений на уровне QCD было проведено в нескольких статьях. Наиболее важные работы для продольно-поляризованного процесса Дрелла–Яна с QCD поправками: полные аналитические результаты для дифференциального сечения процесса по инвариантной массе [18, 19], исследование распределений с лептонной поляризацией [20, 21], полное вычисление $\mathcal{O}(\alpha_s)$ поправок в MS-схеме [22], изучение одно- и двухспиновых асимметрий [23].

Данная статья — следующий шаг в серии исследований, посвященных процессам Дрелла–Яна в p - p -моду Монте-Карло (MC) генератора *ReneSANCe* [24] и интегратора *MCSANC* [25–27]. В последней работе мы представили описание внедрения процессов Дрелла–Яна для моделирования столкновений на адрон-адронных коллайдерах с учетом электрослабых и QCD поправок в следующем за ведущим порядке (NLO), а также с учетом EW поправок высших порядков через параметр $\Delta\rho$.

В этой статье анализируются результаты, полученные с помощью MC-генератора *ReneSANCe*, для EW поправок в следующем за ведущим порядке к процессу рождения массивных лептонных пар в канале нейтрального тока при столкновениях продольно-поляризованных протонов:

$$pp \rightarrow Z/\gamma^* X \rightarrow \ell^+ \ell^- X. \quad (1)$$

Преимущество команды SANC (Support for Analytic and Numeric Calculations for experiments at colliders) заключается в опыте расчета однопетлевых EW поправок с использованием подхода спиральных амплитуд [28]. Это позволяет довольно легко рассчитать эффекты поляризации. Вычисления основаны на программных модулях SANC [29].

Мы изучаем чувствительность одно- и двухспиновых асимметрий к величине и поведению однопетлевых EW поправок в случае продольной поляризации.

Статья организована следующим образом: в разд. 1 мы определяем наблюдаемые для поляризованного процесса Дрелла–Яна, в разд. 2 представлены численные результаты, и наконец, идет заключение.

1. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ СЕЧЕНИЕ

Дифференциальное сечение продольно-поляризованного процесса Дрелла–Яна на адронном уровне может быть получено сверткой партонного сечения с кварковыми PDF:

$$d\sigma(\Lambda_1, \Lambda_2, s) = \sum_{q_1 q_2} \sum_{\lambda_1 \lambda_2} \int_0^1 \int_0^1 dx_1 dx_2 f_{q_1}^{\Lambda_1 \lambda_1}(x_1) f_{q_2}^{\Lambda_2 \lambda_2}(x_2) d\hat{\sigma}_{q_1 q_2}(\lambda_1, \lambda_2, \hat{s}), \quad (2)$$

где $\Lambda_i = \pm 1$ и $\lambda_i = \pm 1$ — спиральности каждого протона и кварка соответственно и $\hat{s} = x_1 x_2 s$.

Партонные распределения $f_{q_i}^{\Lambda_i \lambda_i}$ могут быть получены из неполяризованных f_{q_i} и продольно-поляризованных Δf_{q_i} PDF:

$$f_{q_i}^{\Lambda_i \lambda_i} = \frac{1}{2}(f_{q_i} + \Lambda_i \lambda_i \Delta f_{q_i}). \quad (3)$$

На однопетлевом уровне партонное сечение может быть записано в виде суммы

$$\hat{\sigma}^{1\text{-loop}} = \hat{\sigma}^{\text{Born}} + \hat{\sigma}^{\text{virt}}(\lambda) + \hat{\sigma}^{\text{soft}}(\lambda, \bar{\omega}) + \hat{\sigma}^{\text{hard}}(\bar{\omega}) + \hat{\sigma}^{\text{subt}}, \quad (4)$$

где $\hat{\sigma}^{\text{Born}}$ — вклад древесного (борновского) приближения; $\hat{\sigma}^{\text{virt}}$ — вклад виртуальных (петлевых) поправок; $\hat{\sigma}^{\text{soft}}$ — вклад мягкого фотонного излучения и $\hat{\sigma}^{\text{hard}}$ — вклад жесткого фотонного излучения (с энергией $E_\gamma > \bar{\omega}$). Полная сумма не зависит от инфинитезимальных вспомогательных параметров $\bar{\omega}$ (разделяет мягкое и жесткое тормозное излучение) и λ (фиктивная масса фотона, регуляризирующая инфракрасные расходимости). Отдельный вклад $\hat{\sigma}^{\text{subt}}$ связан с вычитанием коллинеарных расходимостей, связанных с пренебрежением массами кварков. Для выполнения процедуры вычитания на партонном уровне мы используем подход, описанный в наших работах [29, 30]. Партонное сечение берется в системе центра масс начальной пары кварк–антикварк.

Введем следующие комбинации полностью поляризованных компонент адрон-адронного сечения σ^{++} , σ^{+-} , σ^{-+} , σ^{--} :

$$\sigma = \frac{1}{4}(\sigma^{++} + \sigma^{+-} + \sigma^{-+} + \sigma^{--}), \quad (5)$$

$$\Delta\sigma_L = \frac{1}{4}(\sigma^{++} + \sigma^{+-} - \sigma^{-+} - \sigma^{--}), \quad (6)$$

$$\Delta\sigma_{LL} = \frac{1}{4}(\sigma^{++} - \sigma^{+-} - \sigma^{-+} + \sigma^{--}), \quad (7)$$

где σ соответствует неполяризованному сечению.

Мы используем следующие определения:
для *односпиновой асимметрии*

$$A_L(I) = \frac{\Delta d\sigma_L/dI}{d\sigma/dI}, \quad (8)$$

и для *двухспиновой асимметрии*:

$$A_{LL}(I) = \frac{\Delta d\sigma_{LL}/dI}{d\sigma/dI}. \quad (9)$$

Наблюдаемая I в нашем случае — это либо быстрота лептонной пары $\ell^+\ell^-$:

$$y_Z = \frac{1}{2} \ln \frac{E_{\ell^+\ell^-} + p_{\ell^+\ell^-}^z}{E_{\ell^+\ell^-} - p_{\ell^+\ell^-}^z}, \quad (10)$$

где $E_{\ell^+\ell^-}$ и $p_{\ell^+\ell^-}^z$ — энергия и z -компонента импульса пары $\ell^+\ell^-$ в лабораторной системе отсчета, либо псевдобыстрота отдельного заряженного лептона:

$$\eta_{\ell^\pm} = -\ln \tan \frac{\vartheta_{\ell^\pm}}{2}. \quad (11)$$

Здесь ϑ_{ℓ^\pm} — угол между импульсом ℓ^\pm и осью z лабораторной системы отсчета, которая направлена вдоль импульса первого протона.

2. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Входные параметры. Численные расчеты были выполнены в $\alpha(0)$ -схеме при $\sqrt{s} = 500$ ГэВ со следующим набором входных параметров:

$$\begin{aligned} \alpha^{-1}(0) &= 137,035999084, & G_F &= 1,1663787 \cdot 10^{-5} \text{ ГэВ}^{-2}, \\ M_W &= 80,379 \text{ ГэВ}, & M_Z &= 91,1876 \text{ ГэВ}, & M_H &= 125,25 \text{ ГэВ}, \\ \Gamma_W &= 2,085 \text{ ГэВ}, & \Gamma_Z &= 2,4952 \text{ ГэВ}, \\ |V_{ud}| &= 0,9737, & |V_{us}| &= 0,2252, & |V_{cd}| &= 0,221, \\ |V_{cs}| &= 0,987, & |V_{cb}| &= 0, & |V_{ub}| &= 0, \\ m_e &= 0,51099895 \text{ МэВ}, & m_\mu &= 0,1056583745 \text{ ГэВ}, & m_\tau &= 1,77686 \text{ ГэВ}, \\ m_d &= 0,066 \text{ ГэВ}, & m_u &= 0,066 \text{ ГэВ}, & m_s &= 0,15 \text{ ГэВ}, \\ m_c &= 1,67 \text{ ГэВ}, & m_b &= 4,78 \text{ ГэВ}, & m_t &= 172,76 \text{ ГэВ}. \end{aligned} \quad (12)$$

Значения параметров были взяты из PDG-2020 [31], за исключением масс легких кварков (u , d и s), которые были взяты из [32].

Мы использовали набор PDF NNPDF23_nlo_as_0119 [33] для неполяризованных партонных распределений f_{q_i} и набор PDF NNPDFpol11_100 [34] для продольно-поляризованных распределений Δf_{q_i} из библиотеки LHAPDF6 [35] с масштабом факторизации $\mu_F = M_{\ell\ell}$.

Применялись следующие кинематические ограничения:

$$p_\perp(\mu^\pm) > 25 \text{ ГэВ}, \quad |\eta(\mu^\pm)| < 2,5, \quad M(\mu^+\mu^-) > 50 \text{ ГэВ}.$$

2.2. Дифференциальные распределения. Распределения по быстрой лептонной пары y_Z и псевдобыстройте заряженного лептона η_{ℓ^\pm} в борновском (LO) и однопетлевом порядке (NLO EW) и соответствующая разность между ними $\Delta A = A^{\text{NLO EW}} - A^{\text{LO}}$ показаны для односпиновой асимметрии на рис. 1–3 и для двухспиновой асимметрии на рис. 4–6. Аналогичные распределения для сечений в пикобарнах и соответствующие поправки δ в % показаны на рис. 7–9.

Для некоторых распределений наблюдается значительный вклад EW поправок в однопетлевом порядке. В то же время сами поляризационные асимметрии не меняют знака — A_L всегда положительна, а A_{LL} всегда отрицательна во всем кинематическом диапазоне.

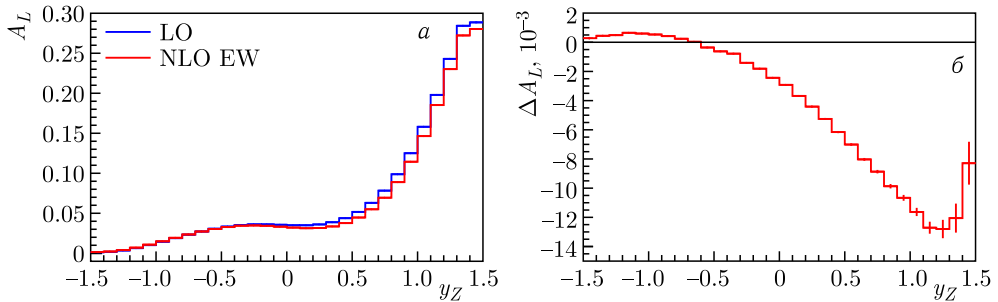


Рис. 1. Распределение по быстрой лептонной пары y_Z для односпиновой асимметрии $A_L(y_Z)$ на борновском и NLO EW уровнях (а) и соответствующая разность $\Delta A_L(y_Z)$ (б)

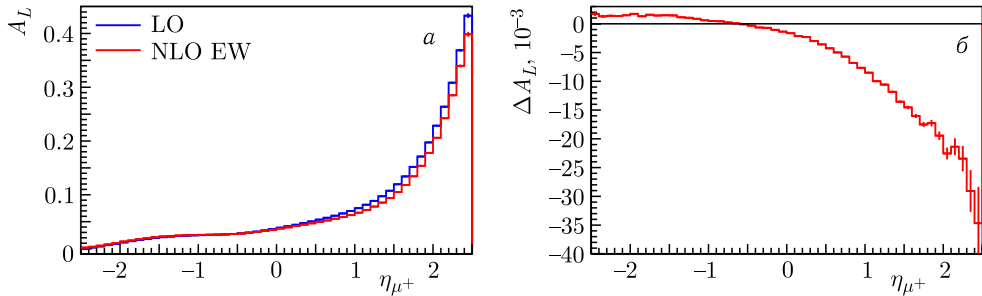


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, но для псевдобыстроты η_{μ^+}

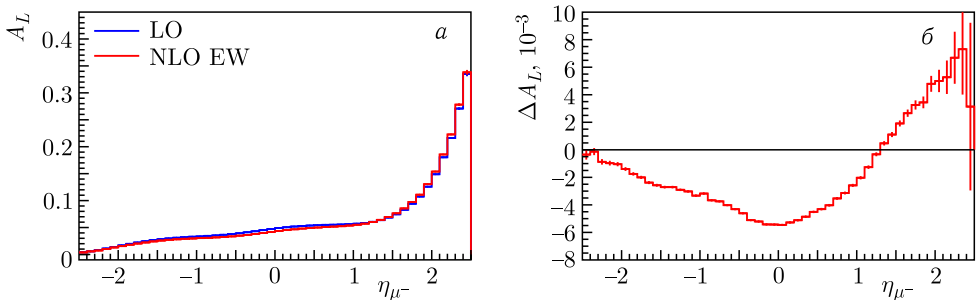


Рис. 3. То же, что и на рис. 1, но для псевдобыстроты η_{μ^-}

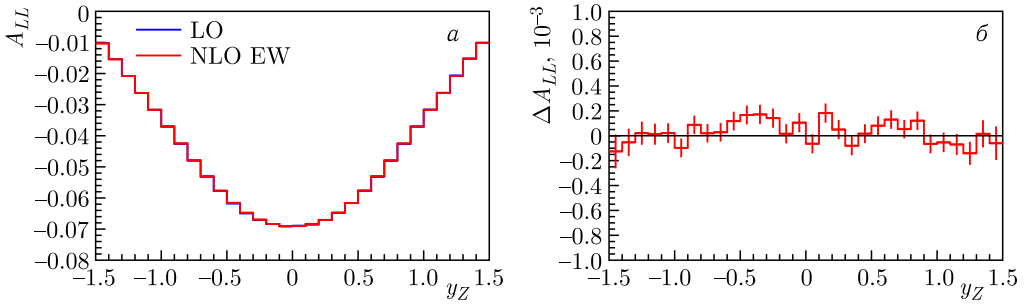


Рис. 4. Распределение по быстройте лептонной пары y_Z для двухспиновой асимметрии $A_L(y_Z)$ на борновском и NLO EW уровнях (а) и соответствующая разность $\Delta A_L(y_Z)$ (б)

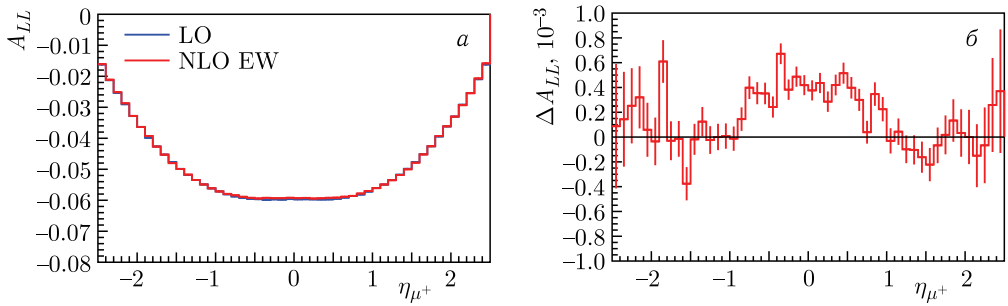


Рис. 5. То же, что и на рис. 4, но для псевдобыстроты η_{μ^+}

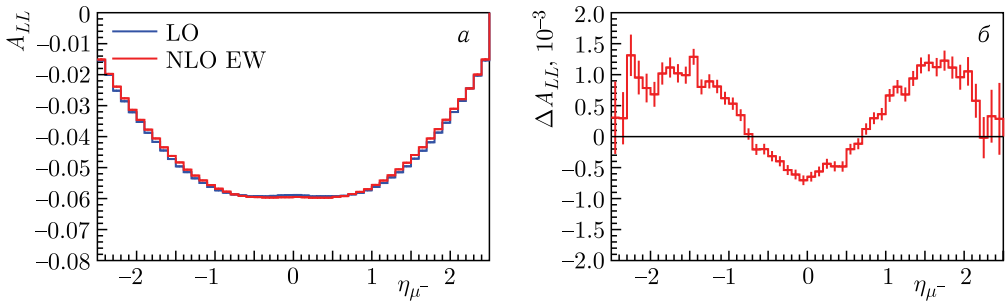


Рис. 6. То же, что и на рис. 4, но для псевдобыстроты η_{μ^-}

Электрослабые радиационные поправки сильно зависят от наблюдаемой и меняют знак.

Поправки к A_{LL} для распределения по быстройте y_Z согласуются с нулем, в то время как поправки для распределений по псевдобыстроте η_{μ^+} и η_{μ^-} , в основном, положительные и колеблются вблизи среднего значения около 1%.

Дифференциальные сечения по быстройте y_Z и псевдобыстротам η_{μ^+} и η_{μ^-} чувствительны к поляризации сталкивающихся протонов. Линия 00 соответствует неполяризованному случаю, а остальные линии — всевозможным комбинациям 100%-х поляризованных пучков. Видно, что относительные поправки δ отрицательны и сильно зависят от поляризации пучков. Они меняются от -3 до -5% в центральной обла-

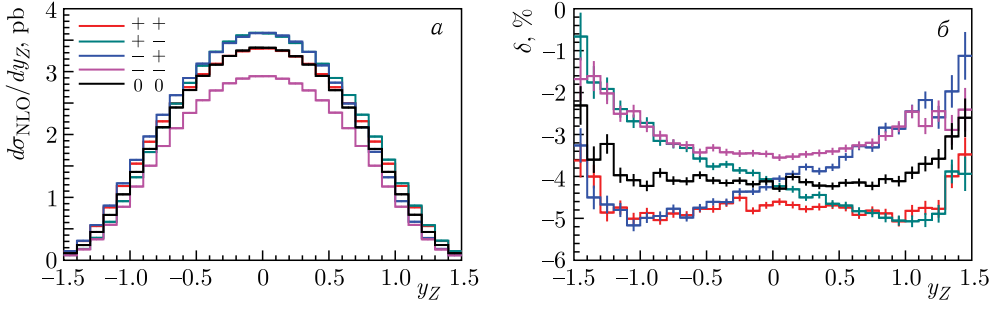


Рис. 7. Распределение по быстройте лептонной пары y_Z для NLO EW сечения в пб (а) и для соответствующей поправки δ в % (б) для компонент $(++)$, $(+-)$, $(-+)$, $(--)$, (00)

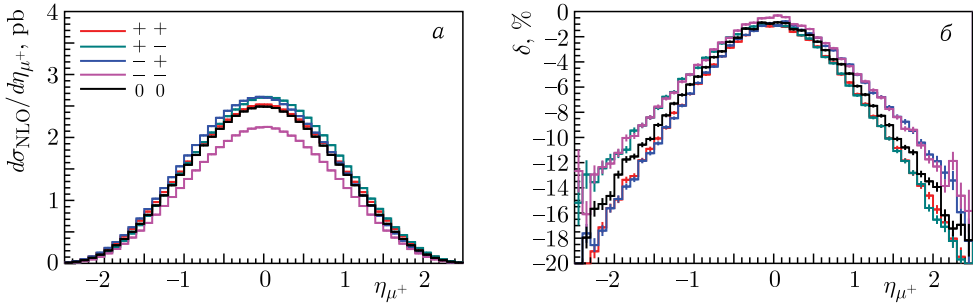


Рис. 8. То же, что и на рис. 7, но для псевдобыстроты η_{μ^+}

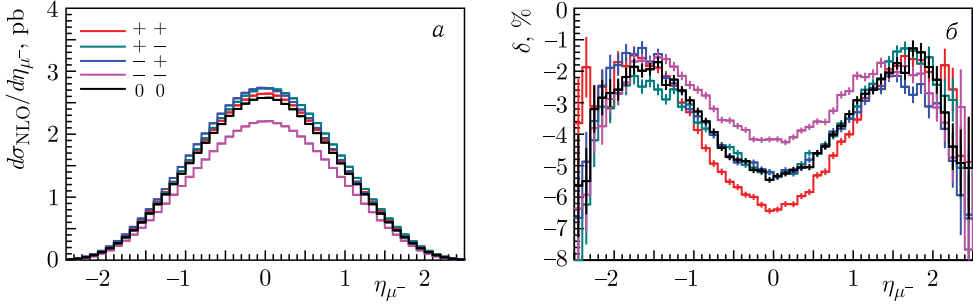


Рис. 9. То же, что и на рис. 7, но для псевдобыстроты η_{μ^-}

сти для быстройте y_Z и от -12 до -20% в краевой области для псевдобыстроты η_{μ^+} . Радиационные поправки симметричны для η_{μ^+} , η_{μ^-} и несимметричны для y_Z .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе впервые представлено изучение спиновых эффектов в следующем за ведущим порядке EW поправок для процесса Дрелла–Яна в канале нейтрального тока при столкновениях продольно-поляризованных протонов. Мы показали численные результаты для ряда наблюдаемых, полученных с помощью Монте-Карло ге-

нератора *RepeSANSe*. Эффекты полных однопетлевых электрослабых радиационных поправок к рассматриваемому процессу значительны.

Полученные EW поправки могут быть использованы для уменьшения систематической погрешности измерения поляризованных партонных распределений.

Мы также ожидаем заметного эффекта от радиационных EW поправок в поляризованном рождении заряженных векторных бозонов W^\pm и планируем его изучить. Другим направлением нашего исследования будет включение эффектов поперечной поляризации, которые тесно связаны с функциями партонных распределений, зависящими от поперечного импульса (TMD PDF).

Исследование поддержано Российским научным фондом (проект № 22-12-00021). Мы благодарны А. Б. Арбузову за обсуждение физических результатов.

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. 316–320; Erratum // *Ibid.* P. 902.
2. *Mosolov V. A., Shumeiko N. M.* Electromagnetic Effects in Drell–Yan Processes // *Nucl. Phys. B.* 1981. V. 186. P. 397–411.
3. *Сороко А. В., Шумейко Н. М.* Об электромагнитных поправках к процессам Дрелла–Яна в кварковой партонной модели // *ЯФ.* 1990. Т. 52, № 2. С. 514–523.
4. *Wackerath D., Hollik W.* Electroweak Radiative Corrections to Resonant Charged Gauge Boson Production // *Phys. Rev. D.* 1997. V. 55. P. 6788–6818; arXiv:hep-ph/9606398.
5. *Baur U., Keller S., Wackerath D.* Electroweak Radiative Corrections to W Boson Production in Hadronic Collisions // *Phys. Rev. D.* 1999. V. 59. P. 013002; arXiv:hep-ph/9807417.
6. *Dittmaier S., Krämer M.* Electroweak Radiative Corrections to W Boson Production at Hadron Colliders // *Phys. Rev. D.* 2002. V. 65. P. 073007; arXiv:hep-ph/0109062.
7. *Baur U., Brein O., Hollik W., Schappacher C., Wackerath D.* Electroweak Radiative Corrections to Neutral Current Drell–Yan Processes at Hadron Colliders // *Phys. Rev. D.* 2002. V. 65. P. 033007; arXiv:hep-ph/0108274.
8. *Baur U., Wackerath D.* Electroweak Radiative Corrections to Weak Boson Production at Hadron Colliders // *Nucl. Phys. B. Proc. Suppl.* 2003. V. 116. P. 159–163; arXiv:hep-ph/0211089.
9. *Baur U., Wackerath D.* Electroweak Radiative Corrections to $p\bar{p} \rightarrow W^\pm \rightarrow \ell^\pm \nu$ beyond the Pole Approximation // *Phys. Rev. D.* 2004. V. 70. P. 073015; arXiv:hep-ph/0405191.
10. *Carloni Calame C. M., Montagna G., Nicrosini O., Vicini A.* Precision Electroweak Calculation of the Charged Current Drell–Yan Process // *JHEP.* 2006. V. 12. P. 016; arXiv:hep-ph/0609170.
11. *Bardin D. Y., Kalinovskaya L.* QED Corrections for Polarized Elastic Muon e Scattering. 1997. 12; arXiv:hep-ph/9712310.
12. *Adams D. et al. (Spin Muon (SMC) Collab.).* The Spin Dependent Structure Function $g_1(x)$ of the Deuteron from Polarized Deep Inelastic Muon Scattering // *Phys. Lett. B.* 1997. V. 396. P. 338–348.
13. *Bardin D. Y., Blumlein J., Christova P., Kalinovskaya L.* $O(\alpha)$ QED Corrections to Neutral Current Polarized Deep Inelastic Lepton–Nucleon Scattering // *Nucl. Phys. B.* 1997. V. 506. P. 295–328; arXiv:hep-ph/9612435.
14. *Aschenauer E. C. et al.* The RHIC Cold QCD Plan for 2017 to 2023: A Portal to the EIC. 2016. 2; arXiv:1602.03922.

15. Tokarev M. Recent STAR Spin Results and Spin Measurements at RHIC // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2018. V. 15, No. 5. P. 478–491.
16. Alekhin S. *et al.* HERAFitter // *Eur. Phys. J. C.* 2015. V. 75, No. 7. P. 304; arXiv: 1410.4412 [hep-ph].
17. Abdolmaleki H. *et al.* (*xFitter Collab.*). xFitter: An Open Source QCD Analysis Framework. A Resource and Reference Document for the Snowmass Study. 2022. 6; arXiv:2206.12465.
18. Kamal B. QCD Corrections to Spin Dependent Drell–Yan and a Global Subtraction Scheme // *Phys. Rev. D.* 1996. V. 53. P. 1142–1152; arXiv:hep-ph/9511217.
19. Kamal B. Drell–Yan Forward–Backward and Spin Asymmetries for Arbitrary Vector Boson Production at Next-to-Leading Order // *Phys. Rev. D.* 1998. V. 57. P. 6663–6691; arXiv:hep-ph/9710374.
20. Kodaira J., Yokoya H. Lepton Helicity Distributions in Polarized Drell–Yan Process // *Phys. Rev. D.* 2003. V. 67. P. 074008; arXiv:hep-ph/0301228.
21. Bourrely C., Soffer J. Parton Distributions from W^\pm and Z Production in Polarized pp and pn Collisions at RHIC // *Nucl. Phys. B.* 1994. V. 423. P. 329–348; arXiv:hep-ph/9405250.
22. Gehrmann T. QCD Corrections to the Longitudinally Polarized Drell–Yan Process // *Nucl. Phys. B.* 1997. V. 498. P. 245–266; arXiv:hep-ph/9702263.
23. Gehrmann T. QCD Corrections to Double and Single Spin Asymmetries in Vector Boson Production at Polarized Hadron Colliders // *Nucl. Phys. B.* 1998. V. 534. P. 21–39; arXiv:hep-ph/9710508.
24. Bondarenko S., Dydyshka Y., Kalinovskaya L., Sadykov R., Yermolchik V. Hadron–Hadron Collision Mode in ReneSANCe-v1.3.0. 2022. 7; arXiv:2207.04332.
25. Bardin D., Bondarenko S., Christova P., Kalinovskaya L., Rumyantsev L., Sapronov A., von Schlippe W. SANC Integrator in the Progress: QCD and EW Contributions // *JETP Lett.* 2012. V. 96. P. 285–289; arXiv:1207.4400 [hep-ph].
26. Bondarenko S.G., Sapronov A.A. NLO EW and QCD Proton–Proton Cross Section Calculations with MCSANC-v1.01 // *Comput. Phys. Commun.* 2013. V. 184. P. 2343–2350; arXiv:1301.3687 [hep-ph].
27. Arbuzov A., Bardin D., Bondarenko S., Christova P., Kalinovskaya L., Klein U., Kolesnikov V., Rumyantsev L., Sadykov R., Sapronov A. Update of the MCSANC Monte Carlo Integrator, v.1.20 // *JETP Lett.* 2016. V. 103, No. 2. P. 131–136; arXiv:1509.03052.
28. Andonov A., Arbuzov A., Bardin D., Bondarenko S., Christova P., Kalinovskaya L., Nanava G., von Schlippe W. SANCscope — v.1.00 // *Comput. Phys. Commun.* 2006. V. 174. P. 481–517; Erratum // *Comput. Phys. Commun.* 2007. V. 177. P. 623–624; arXiv:hep-ph/0411186.
29. Arbuzov A., Bardin D., Bondarenko S., Christova P., Kalinovskaya L., Nanava G., Sadykov R. One-Loop Corrections to the Drell–Yan Process in SANC. II. The Neutral Current Case // *Eur. Phys. J. C.* 2008. V. 54. P. 451–460; arXiv:0711.0625 [hep-ph].
30. Arbuzov A., Bardin D., Bondarenko S., Christova P., Kalinovskaya L., Nanava G., Sadykov R. One-Loop Corrections to the Drell–Yan Process in SANC. I. The Charged Current Case // *Eur. Phys. J. C.* 2006. V. 46. P. 407–412; Erratum // *Eur. Phys. J. C.* 2007. V. 50. P. 505; arXiv:hep-ph/0506110.
31. Zyla P.A. *et al.* (*Particle Data Group Collab.*). Review of Particle Physics // *PTEP.* 2020. V. 2020, No. 8. P. 083C01.
32. Dittmaier S., Huber M. Radiative Corrections to the Neutral-Current Drell–Yan Process in the Standard Model and Its Minimal Supersymmetric Extension // *JHEP.* 2010. V. 01. P. 060; arXiv:0911.2329 [hep-ph].

33. *Ball R. D. et al.* Parton Distributions with LHC Data // Nucl. Phys. B. 2013. V. 867. P. 244–289; arXiv:1207.1303 [hep-ph].
34. *Nocera E. R. et al. (NNPDF Collab.)*. A First Unbiased Global Determination of Polarized PDFs and Their Uncertainties // Nucl. Phys. B. 2014. V. 887. P. 276–308; arXiv:1406.5539 [hep-ph].
35. *Buckley A., Ferrando J., Lloyd S., Nordström K., Page B., Rüfenacht M., Schönherr M., Watt G.* LHAPDF6: Parton Density Access in the LHC Precision Era // Eur. Phys. J. C. 2015. V. 75. P. 132; arXiv:1412.7420 [hep-ph].

Получено 14 ноября 2022 г.