

## ДВОЙНЫЕ ПРОДОЛЬНЫЕ СПИНОВЫЕ АСИММЕТРИИ В ПРЯМОМ РОЖДЕНИИ ФОТОНОВ НА КОЛЛАЙДЕРЕ NICA

*В. А. Салеев<sup>а, б, 1</sup>, А. В. Шипилова<sup>а, б, 2</sup>*

<sup>а</sup> Самарский национальный исследовательский университет, Самара, Россия

<sup>б</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В работе проведен расчет двойных продольных спиновых асимметрий в рождении прямых фотонов на коллайдере NICA в лидирующем приближении коллинеарной партонной модели. Представлены предсказания для возможных значений асимметрий при различных энергиях коллайдера NICA.

In this paper, we calculate double longitudinal-spin asymmetries in the direct photon production at the NICA collider in the leading order of the collinear parton model. Predictions for potential measurements of asymmetries are presented at different energies of the NICA collider.

PACS: 13.88.+e; 12.38.-t; 13.85.-t

### ВВЕДЕНИЕ

Исследование двойных продольных спиновых асимметрий (ДПСА) в рождении прямых фотонов, струй и заряженных пионов требуется для изучения вклада поляризации кварков и глюонов в полный спин протона:

$$\frac{1}{2}\Delta\Sigma + \Delta G + L_q + L_g = \frac{1}{2}, \quad (1)$$

$$\Delta\Sigma = \sum_{q=u,d,s} \int_0^1 \Delta q(x) dx, \quad \Delta G = \int_0^1 \Delta g(x) dx, \quad (2)$$

где  $L_q(L_g)$  — орбитальные моменты кварков (глюонов), а  $\Delta\Sigma(\Delta G)$  — спиновые. Извлечение спиральной функции распределения глюона  $\Delta g(x)$  является одной из задач физической программы коллайдера NICA [1], где планируется изучать соударения пучков продольно-поляризованных протонов  $p \rightarrow p^{(\leftarrow)}$ . ДПСА ранее были экспериментально исследованы в рождении нейтральных пионов [2], заряженных пионов [3],

---

<sup>1</sup>E-mail: saleev@samsu.ru

<sup>2</sup>E-mail: shipilova.av@ssau.ru

струй [4], дистрий [5, 6], тяжелых мезонов [7] и  $J/\psi$ -мезонов [8]. Несмотря на высокие статистические характеристики данных процессов, для их описания требуется моделирование эффектов адронизации. С этой точки зрения более предпочтительным каналом является рождение прямых фотонов, в котором ДПСА были измерены коллаборацией PHENIX при энергиях 200 [9] и 510 ГэВ [10]. В эксперименте NICA планируется провести измерения в  $p \rightarrow p^{(\leftarrow)}$ -соударениях при энергиях 20 и 27 ГэВ.

## ОСНОВНОЙ ФОРМАЛИЗМ

ДПСА в столкновениях продольно-поляризованных протонов определяется формулой

$$A_{LL} = \frac{d\sigma^{++} - d\sigma^{+-}}{d\sigma^{++} + d\sigma^{+-}} = \frac{d\Delta\sigma}{d\sigma}, \quad (3)$$

где  $\sigma^{++}$  ( $\sigma^{+-}$ ) — сечения процессов столкновения протонов с одинаковой (и разной) спиральностью;  $\Delta\sigma$  и  $\sigma$  — сечения рождения в случае поляризованных и неполяризованных протонов.

Введение функций распределения поляризованных партонов позволяет представить разность сечений протонов с различной поляризацией в виде

$$d\Delta\sigma^\gamma = \sum_{a,b=q\bar{q},g} \int dx_a dx_b \Delta f_a(x_a, \mu^2) \Delta f_b(x_b, \mu^2) d\Delta\sigma_{ab}^\gamma, \quad (4)$$

где  $\Delta\sigma_{ab}^\gamma$  — сечения рождения фотонов поляризованными партонами;  $\Delta f_{a(b)}(x_{1,2}, \mu^2)$  — функции распределения партонов  $a(b)$  в поляризованных протонах;  $x_a$  и  $x_b$  — доли импульса протонов, сталкивающихся при энергии в с. ц. м.  $\sqrt{S} \simeq \sqrt{2(P_1 P_2)}$  с импульсами  $P_1^\mu = (\sqrt{S}/2)(1, 0, 0, 1)$  и  $P_2^\mu = (\sqrt{S}/2)(1, 0, 0, -1)$ .

В лидирующем приближении (ЛП) коллинеарной партонной модели (КПМ), содержащем члены  $\mathcal{O}(\alpha_s \alpha_{\text{em}})$ , прямые фотоны образуются в сильно доминирующем подпроцессе комптоновского рассеяния  $q + g \rightarrow q + \gamma$  и кварк-антикварковой аннигиляции с рождением фотона и глюона  $q + \bar{q} \rightarrow g + \gamma$ , где для  $p_T \simeq 2 - 6$  ГэВ  $q = u, d, s$ .

Квадраты модулей амплитуд поляризованных и неполяризованных жестких процессов рассеяния партонов  $a + b \rightarrow \gamma + c$  выглядят следующим образом [11]:

$$\overline{|M_{qg \rightarrow \gamma q}|^2} = -\frac{16}{3} \pi^2 \alpha_{\text{em}} \alpha_s e_q^2 \frac{\hat{s}^2 + \hat{t}^2}{\hat{s} \hat{t}}, \quad (5)$$

$$\Delta \overline{|M_{qg \rightarrow \gamma q}|^2} = -\frac{16}{3} \pi^2 \alpha_{\text{em}} \alpha_s e_q^2 \frac{\hat{s}^2 - \hat{t}^2}{\hat{s} \hat{t}}, \quad (6)$$

$$\overline{|M_{q\bar{q} \rightarrow \gamma g}|^2} = \frac{128}{9} \pi^2 \alpha_{\text{em}} \alpha_s e_q^2 \frac{\hat{u}^2 + \hat{t}^2}{\hat{u} \hat{t}}, \quad (7)$$

$$\Delta \overline{|M_{q\bar{q} \rightarrow \gamma g}|^2} = -\frac{128}{9} \pi^2 \alpha_{\text{em}} \alpha_s e_q^2 \frac{\hat{u}^2 + \hat{t}^2}{\hat{u} \hat{t}}, \quad (8)$$

где  $\hat{s} = (q_1 + q_2)^2$ ,  $\hat{t} = (q_1 - p_\gamma)^2$ ,  $\hat{u} = (q_2 - p_\gamma)^2$  — мандельштамовские переменные;  $e_q$  — заряд кварка.

Путем алгебраических преобразований формула (4) может быть приведена к удобному для расчетов виду:

$$d\Delta\sigma^\gamma = \sum_{a,b=q\bar{q},g} \int dx_a dx_b \Delta f_a(x_a, \mu^2) \Delta f_b(x_b, \mu^2) \frac{\Delta |M_{ab \rightarrow \gamma X}|^2}{8\pi} \frac{p_{\gamma T}}{x_a x_b s^2} dp_{\gamma T} dy_\gamma. \quad (9)$$

В нашей работе мы принимаем масштаб ренормализации равным масштабу факторизации  $\mu = \mu_R = \mu_F$ .

Наиболее современные наборы поляризованных функций распределения представлены в работах [12–15], их сравнение и обсуждение неопределенностей приведены в работе [16].

### РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 мы представляем результаты наших расчетов ДПСА в рождении прямых фотонов в рамках ЛП КПМ в сравнении с экспериментальными данными коллаборации PHENIX [9] и [10] при энергиях столкновения продольно-поляризованных протонов  $\sqrt{S} = 200$  ГэВ и  $\sqrt{S} = 510$  ГэВ, быстротах фотонов  $|y_\gamma| < 0,35$  и  $|y_\gamma| < 0,25$ , на рис. *a* и *б* соответственно. Теоретические расчеты, выполненные с использованием поляризованных функций распределения DSSV [13] и NNPDFpol1.1 [14], при центральном выборе жесткого масштаба  $\mu = p_T$ , обозначены штриховой и сплошной линиями соответственно. Оба результата лежат в пределах погрешностей эксперимента, за исключением одной точки в области больших поперечных импульсов.

Предсказания для зависимости  $A_{LL}^\gamma$  от  $x_T = 2p_T/\sqrt{S}$  при энергии коллайдера NICA  $\sqrt{S} = 20$  и 27 ГэВ и быстротах  $|y_\gamma| < 3$  представлены на рис. 2. Заштрихованная область иллюстрирует коридор неопределенностей, связанный с выбором жесткого масштаба  $p_T/2 < \mu < 2p_T$ . Представленные зависимости показывают, что ДПСА являются положительными и монотонно увеличиваются с увеличением  $p_T$  и уменьшением энергии столкновения. Однако изучение области относительно высоких  $p_T$  ограничивается экспериментально доступной областью, связанной с малой статистикой.

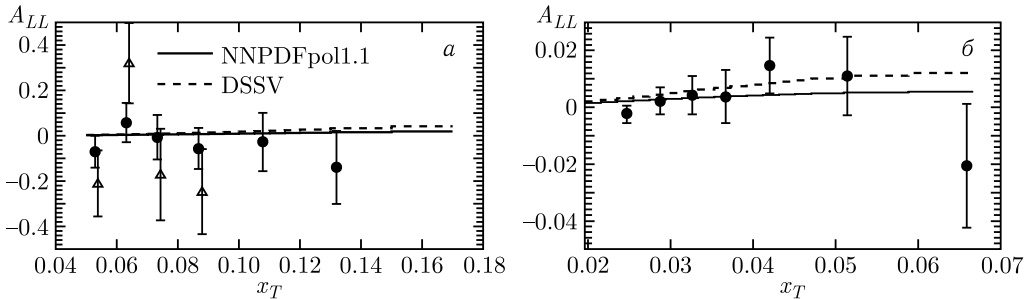


Рис. 1. Двойные продольные спиновые асимметрии в прямом рождении фотонов при  $\sqrt{S} = 200$  ГэВ (*a*) и  $\sqrt{S} = 510$  ГэВ (*б*). Сплошная линия — поляризованные функции распределения NNPDFpol1.1, штриховая — функция распределения DSSV, точки на рис. *a* (*б*) — экспериментальные данные коллаборации PHENIX [9] ([10])

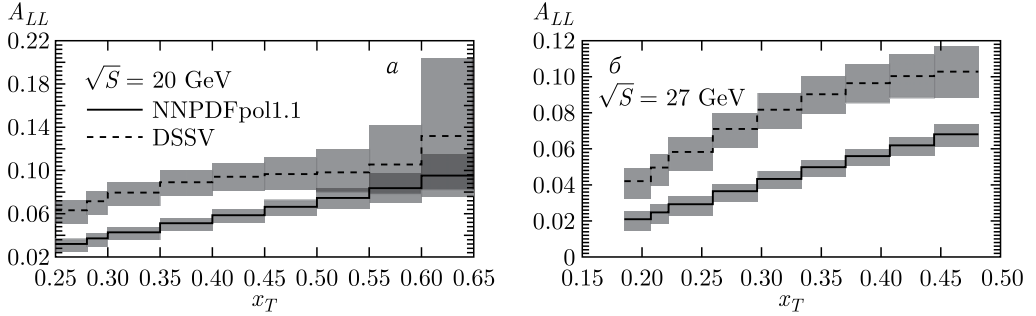


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для энергий  $\sqrt{S} = 20$  ГэВ (а) и  $\sqrt{S} = 27$  ГэВ (б). Заштрихованная область иллюстрирует неопределенность  $p_T/2 < \mu < 2p_T$

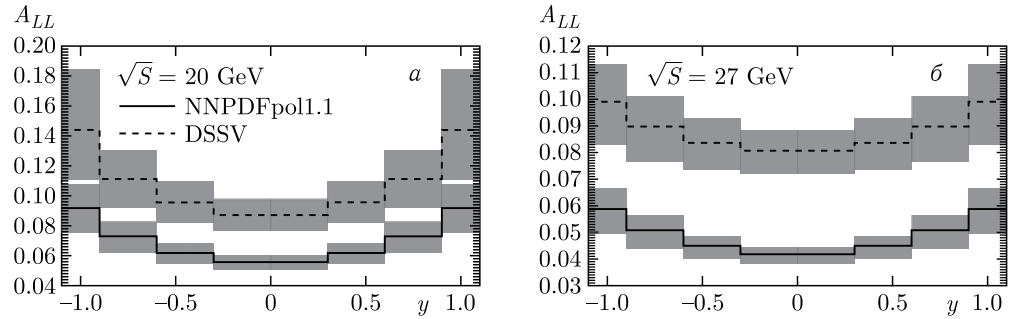


Рис. 3. То же, что на рис. 2, в зависимости от быстроты фотона

На рис. 3 представлены аналогичные предсказания в зависимости от быстроты фотона  $y$  при  $\sqrt{S} = 20$  ГэВ и  $\sqrt{S} = 27$  ГэВ соответственно. Наибольшие значения асимметрий предсказываются при выборе функций распределения DSSV [13]. Полученные нами результаты согласуются с результатами более ранних предсказаний для близких энергий  $\sqrt{S} = 39$  ГэВ в работе [17].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе мы рассчитали двойные продольные асимметрии в рождении прямых фотонов в  $p \rightarrow p \rightarrow (\leftarrow)$ -соударениях на коллайдере NICA при энергиях  $\sqrt{S} = 20$  ГэВ и  $\sqrt{S} = 27$  ГэВ, в ЛП КПИМ, с поляризованными функциями распределения NNPDFpol1.1 [14] и DSSV [13]. Выбор последних приводит к предсказаниям наибольших асимметрий, вплоть до 18%, что допускает возможность их экспериментального наблюдения. Адекватность выбранной модели мы подтверждаем удовлетворительным описанием существующих экспериментальных данных коллаборации PHENIX [9, 10]. Более точные предсказания могут быть получены путем расчетов с учетом вклада высших поправок по теории возмущений КХД.

**Благодарности.** Работа выполнена частично в рамках выполнения Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации образовательным и исследовательским институтам по проекту FSSS-2020-0014. Авторы благодарят за полезные комментарии и плодотворные дискуссии Алексея Гуськова, Игоря Денисенко, Олега Теряева и других членов коллаборации SPD NICA.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Arbuzov A. et al.* On the Physics Potential to Study the Gluon Content of Proton and Deuteron at NICA SPD // Prog. Part. Nucl. Phys. 2021. V. 119. P. 103858; arXiv:2011.15005.
2. *Adam J. et al. (STAR Collab.)*. Longitudinal Double-Spin Asymmetries for  $\pi^0$ s in the Forward Direction for 510 GeV Polarized  $pp$  Collisions // Phys. Rev. D. 2018. V. 98. P. 032013; arXiv:1805.09745.
3. *Acharya U. A. et al. (PHENIX Collab.)*. Measurement of Charged Pion Double Spin Asymmetries at Midrapidity in Longitudinally Polarized Collisions at  $\sqrt{s} = 510$  GeV // Phys. Rev. D. 2020. V. 102. P. 032001; arXiv:2004.02681.
4. *Djawotho P. et al. (STAR Collab.)*. Gluon Polarization and Jet Production at STAR // Nuovo Cim. C. 2013. V. 036. P. 35–38; arXiv:1303.0543 [nucl-ex].
5. *Adamczyk L. et al. (STAR Collab.)*. Measurement of the Cross Section and Longitudinal Double-Spin Asymmetry for Dijet Production in Polarized  $pp$  Collisions at  $\sqrt{s} = 200$  GeV // Phys. Rev. D. 2017. V. 95. P. 071103; arXiv:1610.06616.
6. *Adam J. et al. (STAR Collab.)*. Longitudinal Double-Spin Asymmetries for Dijet Production at Intermediate Pseudorapidity in Polarized  $pp$  Collisions at  $\sqrt{s} = 200$  GeV // Phys. Rev. D. 2018. V. 98. P. 032011; arXiv:1901.08674.
7. *Adare A. et al. (PHENIX Collab.)*. Double-Spin Asymmetry of Electrons from Heavy-Flavor Decays in  $p + p$  Collisions at  $\sqrt{s} = 200$  GeV // Phys. Rev. D. 2013. V. 87. P. 012011; arXiv:1209.3278 [hep-ex].
8. *Adare A. et al. (PHENIX Collab.)*. Measurements of Double-Helicity Asymmetries in Inclusive  $J/\psi$  Production in Longitudinally Polarized  $p + p$  Collisions at  $\sqrt{s} = 510$  GeV // Phys. Rev. D. 2016. V. 94. P. 112008; arXiv:1606.01815.
9. *Bennett R. et al. (PHENIX Collab.)*. Longitudinal Double Spin Asymmetry and Cross Section for Direct Photon Production Measured at Mid-Rapidity in Polarized  $\sqrt{s} = 200$  GeV  $pp$  Collisions at PHENIX // AIP Conf. Proc. 2009. V. 1149. P. 265–268.
10. *Ji Z.* Longitudinal Double Helicity Asymmetry  $A_{LL}$  from Direct Photon, Jet and Charged Pion Production in Polarized  $\bar{p} + \bar{p}$  Collisions // SciPost Phys. Proc. 2022. V. 8. P. 090; doi:10.21468/SciPostPhysProc.8.090; arXiv:2107.13972 [nucl-ex].
11. *Berger E. L., Qiu J.* Probing Gluon Polarization in Hadronic Direct Photon Production // Phys. Rev. D. 1989. V. 40. P. 778–786.
12. *Ethier J. J., Sato N., Melnitchouk W.* First Simultaneous Extraction of Spin-Dependent Parton Distributions and Fragmentation Functions from a Global QCD Analysis // Phys. Rev. Lett. 2017. V. 119. P. 132001; arXiv:1705.05889.
13. *de Florian D., Sassot R., Stratmann M., Vogelsang W.* Evidence for Polarization of Gluons in the Proton // Phys. Rev. Lett. 2014. V. 113. P. 012001; arXiv:1404.4293 [hep-ph].
14. *Nocera E. R., Ball R. D., Forte S., Ridolfi G., Rojo J.* 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].
15. *Leader E., Sidorov A. V., Stamenov D. B.* New Analysis Concerning the Strange Quark Polarization Puzzle // Phys. Rev. D. 2015. V. 91. P. 054017; arXiv:1410.1657 [hep-ph].
16. *Ethier J. J., Nocera E. R.* Parton Distributions in Nucleons and Nuclei // Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 2020. V. 70. P. 1–35; arXiv:2001.07722.
17. *Anselmino M. et al.* On the Physics Potential of Polarized Nucleon–Nucleon Collisions at HERA // Proc. of Workshop “Future Physics at HERA”, Hamburg, Germany, 1996. V. 1. P. 2; arXiv:9608393.

Получено 27 октября 2022 г.