

Научная статья

УДК 539.12

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19313>

ДВОЙНАЯ ПРОДОЛЬНАЯ СПИНОВАЯ АСИММЕТРИЯ ЛЕГКИХ ПСЕВДОСКАЛЯРНЫХ МЕЗОНОВ, РОЖДЕННЫХ В СТОЛКНОВЕНИЯХ ПРОДОЛЬНО-ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ПРОТОНОВ

Д. В. Круашвили , Я. А. Бердников

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Санкт-Петербург, Россия

 kruashvili.dv@edu.spbstu.ru

Аннотация. В работе проанализирована (методом моделирования Монте-Карло) величина двойной продольной спиновой асимметрии π -, K - и η -мезонов, рожденных в столкновениях продольно-поляризованных протонов при энергиях 510, 200 и 27 ГэВ. Моделирование проведено с использованием программного пакета Pythia8, предварительно модифицированного для поставленной задачи: учета спиральных функций распределения партонов и сечений взаимодействия поляризованных партонов с определенными спиральностями. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными для значений энергии 510 и 200 ГэВ из литературных источников показало их неплохое соответствие. Это послужило основанием для расчетного прогнозирования результатов планируемого эксперимента NICA для рассмотренных мезонов при энергии 27 ГэВ.

Ключевые слова: Pythia8, двойная продольная спиновая асимметрия, функция распределения, партонное сечение рассеяния

Финансирование: Работа выполнена в рамках Государственного задания на проведение фундаментальных исследований (код темы FSEG-2025-0009).

Для цитирования: Круашвили Д. В., Бердников Я. А. Двойная продольная спиновая асимметрия легких псевдоскалярных мезонов, рожденных в столкновениях продольно-поляризованных протонов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2026. Т. 19. № 3. С. 162–170. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19313>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19313>

THE DOUBLE LONGITUDINAL SPIN ASYMMETRY OF LIGHT PSEUDOSCALAR MESONS PRODUCED IN COLLISIONS OF LONGITUDINALLY POLARIZED PROTONS

D. V. Kruashvili , Ya. A. Berdnikov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

 kruashvili.dv@edu.spbstu.ru

Abstract. The magnitude of the double longitudinal spin asymmetry of π -, K -, and η -mesons generated in collisions of longitudinally polarized protons at energies of 510, 200, and 27 GeV has been analyzed (using Monte Carlo simulation). The simulation was carried out using the Pythia8 software package, which had been previously modified for the task at hand: accounting for spiral parton distribution functions and interaction cross-sections of polarized partons with certain spiralities. A comparison of the simulation results with experimental data for energy values of 510 and 200 GeV from literature sources showed a good agreement. This



served as the basis for calculating the results of the planned NICA experiment for the considered mesons at an energy of 27 GeV.

Keywords: Pythia8, double longitudinal spin asymmetry, distribution function, parton cross section

Funding: The reported study was carried out within the framework of the State Assignment for Fundamental Research (Subject Code FSEG-2025-0009).

For citation: Kruashvili D. V., Berdnikov Ya. A., The double longitudinal spin asymmetry of light pseudoscalar mesons produced in collisions of longitudinally polarized protons, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 19 (3) (2026) 162–170. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19313>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

В настоящее время проводится много экспериментов по изучению рождения мезонов в столкновениях продольно-поляризованных протонов [1 – 6]. Особый интерес представляет проблема, связанная с неодинаковой вероятностью рождения мезонов в столкновениях протонов, обладающих одинаковой и разной спиральностями. Физической величиной, характеризующей различие выходов частиц в столкновениях таких протонов, служит двойная продольная спиновая асимметрия (ДПСА), которая определяется следующим выражением [7]:

$$A_{LL} = \frac{d\sigma^{(++)} - d\sigma^{(+-)}}{d\sigma^{(++)} + d\sigma^{(+-)}}. \quad (1)$$

В числителе формулы (1) стоит разность инклюзивных сечений рождения мезона в столкновении протонов с одинаковой ($d\sigma^{(++)}$) и разной ($d\sigma^{(+-)}$) спиральностями. Величина ДПСА нормируется на сумму инклюзивных сечений (с точностью до множителя 2 [8]), что представляет собой усредненное по спиральностям сечение – неполяризованное сечение $d\sigma$:

$$d\sigma = \frac{1}{4} (d\sigma^{(++)} + d\sigma^{(+-)} + d\sigma^{(-)} + d\sigma^{(++)}) = \frac{1}{2} (d\sigma^{(++)} + d\sigma^{(+-)}). \quad (2)$$

Согласно теореме факторизации [8], разность сечений $d\sigma^{(++)} - d\sigma^{(+-)}$ можно представить в виде свертки Δf спиральных функций распределения партонов a и b (Δf_a и Δf_b) в сталкивающихся протонах, функции D_c^M – фрагментации партона c в мезон M и поляризованного сечения партонного подпроцесса $d\Delta\sigma^{ab \rightarrow cd}$, которое представляет собой разность сечений столкновения партонов с одинаковой и разной спиральностями: $d\sigma^{ab(++) \rightarrow cd} - d\sigma^{ab(+-) \rightarrow cd}$:

$$2(d\sigma^{(++)} - d\sigma^{(+-)}) = \sum_{a,b,c,d} \Delta f_a \otimes \Delta f_b \otimes D_c^M \otimes d\Delta\sigma^{ab \rightarrow cd}.$$

Суммирование проводится по всем типам партонов в протоне: по валентным и морским кваркам, а также по глюонам.

Таким образом ДПСА принимает следующий вид:

$$A_{LL} = \frac{\sum_{a,b,c,d} \Delta f_a \otimes \Delta f_b \otimes D_c^M \otimes d\Delta\sigma^{ab \rightarrow cd}}{d\sigma}.$$

Из полученного выражения следует, что ДПСА позволяет изучать спиральные функции распределения партонов в протоне. Данные функции распределения позволяют определять вклад кварков и глюонов в спин протона. В одном из современных подходов [9], принято считать, что спин протона формируется из спинов морских и валентных кварков $\Delta\Sigma$, глюонов ΔG и орбитальных моментов кварков и глюонов L_q, L_g :

$$S_p = 1/2 = (1/2) \Delta\Sigma + \Delta G + L_q + L_g.$$

При этом спины кварков и глюонов выражаются через интегрирование спиральных функций распределения [7]:

$$\Delta\Sigma = \sum_q \int \Delta f_q(x, Q^2) dx, \quad \Delta G = \int \Delta g(x, Q^2) dx.$$

Таким образом, исследование двойной продольной спиновой асимметрии позволит внести ясность в ныне актуальную проблему спина протона.

Цели данной работы – разработать программу, которая бы позволяла использовать функции распределения партонов с определенной спиральностью, а также сечения жесткого партонного подпроцесса партонов (также с определенной спиральностью), далее с помощью программы выполнить моделирование требуемого столкновения протонов, а в случае соответствия полученных результатов экспериментальным данным осуществить прогнозирование для условий планируемого эксперимента NICA.

Для достижения поставленной цели был выбран модифицированный нами программный пакет Pythia8. Кроме того, были поставлены следующие задачи:

смоделировать столкновения протонов с одинаковой и разной спиральностями при энергиях 510 и 200 ГэВ для расчета ДПСА π^+ , π^- , π^0 , K^+ , K^- и η -мезонов;

провести сравнение полученных результатов с имеющимися в литературе экспериментальными данными;

на этой основе предсказать возможную величину ДПСА π^+ , π^- , π^0 , K^+ , K^- и η -мезонов при энергии 27 ГэВ.

Методика исследования

Для вычисления двойной продольной спиновой асимметрии необходимо определить, в соответствии с формулой (1), инклюзивные сечения рождения мезона $d\sigma^{(++)}$ и $d\sigma^{(+-)}$ в столкновении протонов. Указанные сечения можно представить в следующем виде [10]:

$$d\sigma^{(++)} = f_{a+}^+ \otimes f_{b+}^+ \otimes D_c^M \otimes d\sigma^{ab(++) \rightarrow cd} + f_{a+}^+ \otimes f_{b-}^+ \otimes D_c^M \otimes d\sigma^{ab(+-) \rightarrow cd} + \\ + f_{a-}^+ \otimes f_{b+}^+ \otimes D_c^M \otimes d\sigma^{ab(+-) \rightarrow cd} + f_{a-}^+ \otimes f_{b-}^+ \otimes D_c^M \otimes d\sigma^{ab(--) \rightarrow cd}; \quad (2)$$

$$d\sigma^{(+-)} = f_{a+}^+ \otimes f_{b+}^- \otimes D_c^M \otimes d\sigma^{ab(++) \rightarrow cd} + f_{a+}^+ \otimes f_{b-}^- \otimes D_c^M \otimes d\sigma^{ab(+-) \rightarrow cd} + \\ + f_{a-}^+ \otimes f_{b+}^- \otimes D_c^M \otimes d\sigma^{ab(+-) \rightarrow cd} + f_{a-}^+ \otimes f_{b-}^- \otimes D_c^M \otimes d\sigma^{ab(--) \rightarrow cd}, \quad (3)$$

где $f_{a\xi}^e$ – функция распределения партона a (b) со спиральностью ξ в протоне со спиральностью e ; $d\sigma^{ab(\xi_1\xi_2) \rightarrow cd}$ – сечение жесткого подпроцесса рассеяния партонов a , b со спиральностями ξ_1 , ξ_2 .

Спиральные функции распределения тогда выражаются следующим образом [10]:

$$\Delta f_{a(b)} = f_{a(b)+}^+ - f_{a(b)-}^+ = f_{a(b)-}^- - f_{a(b)+}^-. \quad (4)$$

В то же время неполяризованные функции распределения – функции распределения партонов в протоне, не учитывающие спиральность партона, представляются в виде [10]:

$$f_{a(b)} = f_{a(b)+}^+ + f_{a(b)-}^+ = f_{a(b)-}^- + f_{a(b)+}^-. \quad (5)$$

В исходном виде генератора Монте-Карло программный пакет Pythia8 при генерации протон-протонных столкновений осуществляет свертку неполяризованных функций распределения, а также функции фрагментации и неполяризованного партонного сечения [11]:

$$d\sigma = f_a \otimes f_b \otimes D_c^M \otimes d\sigma^{ab \rightarrow cd},$$

где $d\sigma^{ab \rightarrow cd} = \frac{1}{4} \sum_{\xi_1 \xi_2} d\sigma^{ab(\xi_1 \xi_2) \rightarrow cd}$.

Спиральность партонов в исходном коде пакетом Pythia8 не учитывается. Таким образом, для генерации протон-протонных столкновений с сечениями $d\sigma^{(++)}$ и $d\sigma^{(+-)}$ пакет



Pythia8 необходимо модифицировать; для этого следует добавить новый параметр: спиральность партонов жесткого рассеяния. Кроме того, надлежит добавить сечения жесткого рассеяния партонов с заданными спиральностями и соответствующие функции распределения партонов с этими спиральностями. Для вычисления величин $d\sigma^{(++)}$ и $d\sigma^{(+-)}$ необходимо проделать по 4 запуска модифицированного генератора, в каждом из которых в пакете Pythia8 задается жесткий процесс, соответствующий одному из слагаемых формул (7) и (8).

В нашей работе были учтены следующие партонные процессы:

$$gg \rightarrow gg, gg \rightarrow q\bar{q}, q\bar{q} \rightarrow gg, qq \rightarrow qq, qg \rightarrow qg.$$

Сечения $d\sigma/dt$, учитывающие спиральности начальных частиц для этих процессов [10], имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}\frac{d\sigma^{++}}{dt}(q_\alpha q_\beta \rightarrow q_\alpha q_\beta) &= \frac{8}{9} \left[\frac{s^2}{t^2} + \delta_{\alpha\beta} \left(\frac{s^2}{u^2} - \frac{2}{3} \frac{s^2}{tu} \right) \right]; \\ \frac{d\sigma^{+-}}{dt}(q_\alpha q_\beta \rightarrow q_\alpha q_\beta) &= \frac{8}{9} \left[\frac{u^2}{t^2} + \delta_{\alpha\beta} \frac{t^2}{u^2} \right]; \\ \frac{d\sigma^{++}}{dt}(q_\alpha \bar{q}_\beta \rightarrow q_\mu \bar{q}_\lambda) &= \frac{8}{9} \left[\delta_{\alpha\mu} \delta_{\beta\lambda} \frac{s^2}{t^2} \right]; \\ \frac{d\sigma^{+-}}{dt}(q_\alpha \bar{q}_\beta \rightarrow q_\mu \bar{q}_\lambda) &= \frac{8}{9} \left(\delta_{\alpha\mu} \delta_{\beta\lambda} \frac{u^2}{t^2} + \delta_{\alpha\beta} \delta_{\mu\lambda} \frac{t^2 + u^2}{s^2} - \frac{2}{3} \delta_{\alpha\gamma} \delta_{\alpha\beta} \delta_{\mu\lambda} \frac{u^2}{st} \right); \\ \frac{d\sigma^{++}}{dt}(qg \rightarrow qg) &= \frac{2s^2}{t^2} - \frac{8}{9} \frac{s^2}{us}; \quad \frac{d\sigma^{+-}}{dt}(qg \rightarrow qg) = \frac{2u^2}{t^2} - \frac{8}{9} \frac{u^2}{us}; \\ \frac{d\sigma^{++}}{dt}(\bar{q}g \rightarrow \bar{q}g) &= \frac{2s^2}{t^2} - \frac{8}{9} \frac{s^2}{us}; \quad \frac{d\sigma^{+-}}{dt}(\bar{q}g \rightarrow \bar{q}g) = \frac{2u^2}{t^2} - \frac{8}{9} \frac{u^2}{us}; \\ \frac{d\sigma^{++}}{dt}(gg \rightarrow q\bar{q}) &= 0; \\ \frac{d\sigma^{+-}}{dt}(gg \rightarrow q\bar{q}) &= \frac{1}{3} \frac{u^2 + t^2}{ut} - \frac{3}{4} \frac{t^2 + u^2}{s^2}; \quad \frac{d\sigma^{++}}{dt}(q\bar{q} \rightarrow gg) = 0; \\ \frac{d\sigma^{+-}}{dt}(q\bar{q} \rightarrow gg) &= \frac{64}{27} \frac{t^2 + u^2}{ut} - \frac{16}{3} \frac{t^2 + u^2}{s^2}; \\ \frac{d\sigma^{++}}{dt}(gg \rightarrow gg) &= \frac{9}{2} \left(\frac{2s^2}{ut} - \frac{su}{t^2} - \frac{st}{u^2} \right); \\ \frac{d\sigma^{+-}}{dt}(gg \rightarrow gg) &= \frac{9}{2} \left(6 - \frac{2s^2}{ut} - \frac{su}{t^2} - \frac{st}{u^2} - \frac{2ut}{s^2} \right).\end{aligned}$$

Функции распределения партонов с определенными спиральностями были получены из системы уравнений (9), (10), при этом в качестве спиральных функций распределения были взяты наборы партонных функций: NNPDFpol11_100, а в качестве неполяризованных функций – распределения NNPDF31_nnlo_as_0118 из библиотеки LHAPDF [12].

В программе, запускающей модифицированный вариант программы Pythia8, задается спиральность ξ партонов a и b , подключаются соответствующие функции распределения $f_{a\xi}^{e_1}, f_{b\xi}^{e_2}$ для генерации столкновений протонов со спиральностями e_1, e_2 и отбираются мезоны, которые образовались в процессе фрагментации партонов c или d , образовавшихся в результате жесткого процесса $ab \rightarrow cd$. Далее находятся инвариантные спектры [13]:

$$E \frac{d^3 \sigma^{++}}{dp^3} = \frac{1}{2\pi p_T} \frac{d^2 N^{++}}{dp_T dy} \frac{\sigma^{++}_{tot}}{N_{events}}; E \frac{d^3 \sigma^{+-}}{dp^3} = \frac{1}{2\pi p_T} \frac{d^2 N^{+-}}{dp_T dy} \frac{\sigma^{+-}_{tot}}{N_{events}},$$

где p_T — поперечный импульс мезона; N^{++} , N^{+-} — число рожденных мезонов в столкновениях протонов со спиральностями $(++)$ и $(+-)$, соответственно; y — быстрота мезона; σ_{tot} — полное сечение; N_{ev} — число сгенерированных событий.

Таким образом, выражение для двойной продольной спиновой асимметрии (ДПСА) принимает следующий вид:

$$A_{LL} = \frac{E \frac{d^3 \sigma^{++}}{dp^3} - E \frac{d^3 \sigma^{+-}}{dp^3}}{E \frac{d^3 \sigma^{++}}{dp^3} + E \frac{d^3 \sigma^{+-}}{dp^3}}.$$

Результаты расчетов и их обсуждение

На рис. 1 – 3 представлена рассчитанная нами величина ДПСА в зависимости от значений поперечного импульса для π^+ , π^- , π^0 , K^+ , K^- и η -мезонов, рожденных в столкновениях продольно-поляризованных протонов при энергиях 510, 200 и 27 ГэВ, соответственно. Приводится также сравнение результатов расчета ДПСА с имеющимися в литературе экспериментальными данными.

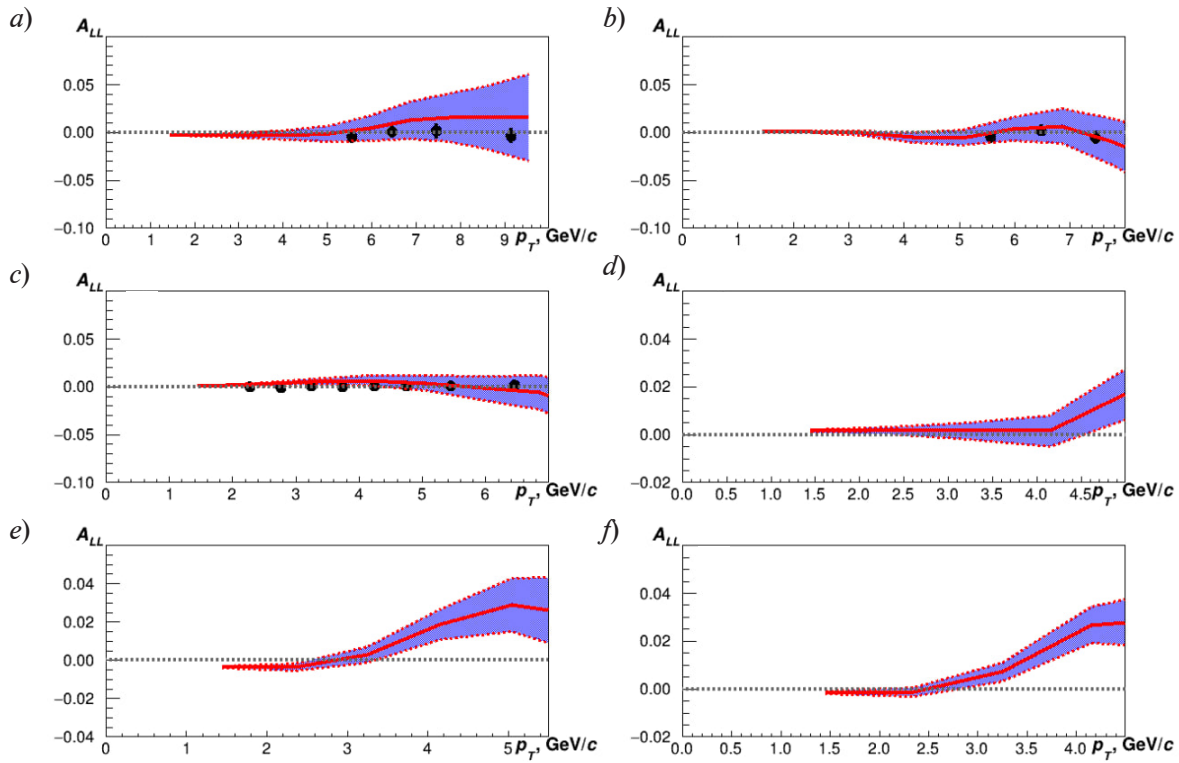


Рис. 1. Расчетные зависимости величины ДПСА от значений поперечного импульса для 6 типов мезонов при энергии 510 ГэВ в сравнении с экспериментальными данными работ [2, 3]. Типы мезонов: π^- (a), π^+ (b), π^0 (c), K^+ (d), K^- (e) и η (f). Экспериментальные данные из статей [3] (a, b), [2] (c) показаны черными точками

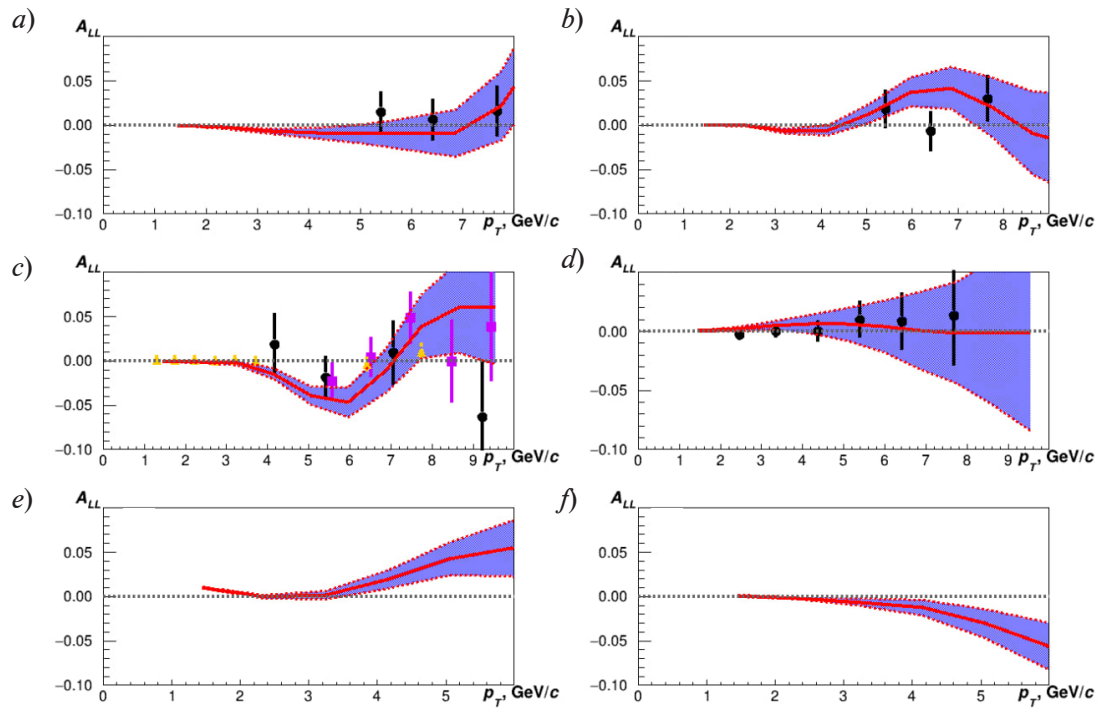


Рис. 2. Зависимости, аналогичные приведенным на рис. 1, для тех же 6 типов мезонов, но при энергии 200 ГэВ и в сравнении с экспериментальными данными работ [4] (a, b), [1] (c), [5] (d) – черные точки; [5] (c) – оранжевые, [6] (c) – фиолетовые точки

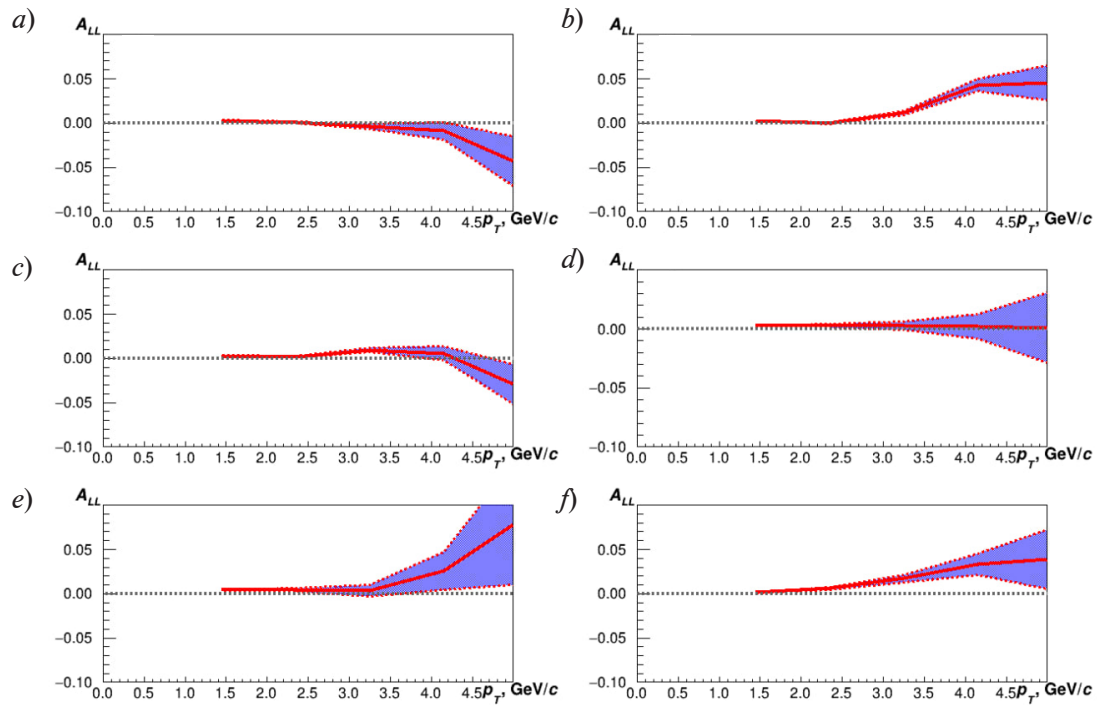


Рис. 3. Зависимости, аналогичные приведенным на рис. 1, 2, для тех же 6 типов мезонов, но при энергии 27 ГэВ (без сравнения с экспериментальными данными)

Анализ представленных результатов позволяет заключить, что величина ДПСА может быть как положительной, так и отрицательной, причем в зависимости от диапазона значений поперечного импульса. Отрицательная величина обусловлена разницей в характере столкновения протонов: при одних и тех же значениях поперечного импульса в столкновении протонов с одинаковыми спиральностями рождается меньше мезонов, чем в столкновении протонов с разными спиральностями.

Заключение

В работе была рассмотрена возможность вычисления двойной продольной спиновой асимметрии (ДПСА) легких псевдоскалярных мезонов с помощью программного пакета Pythia8 с некоторой модификацией части исходного кода Pythia8. Такая модификация позволила рассчитывать величину ДПСА в протон-протонных столкновениях при разных значениях энергии. Проведено сравнение полученных расчетных результатов с экспериментальными данными, представленными в литературе, и показано вполне удовлетворительное их согласие при значениях энергии 510 и 200 ГэВ.

Полученное соответствие послужило основанием для расчетного прогнозирования результатов планируемого эксперимента NICA (см. рис. 3) при энергии 27 ГэВ. Модификация использованного программного пакета открывает новые возможности для дальнейших важных прогнозов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abelev B., Aggarwal M., Ahammed Z., et al. (STAR Collaboration). Longitudinal double-spin asymmetry and cross section for inclusive neutral pion production at midrapidity in polarized proton collisions at $s = 200$ GeV // *Physical Review D*. 2009. Vol. 80. No. 11. P. 111108.
2. Adare A., Aidala C., Ajitanand N. N., et al. (PHENIX Collaboration). Inclusive cross section and double-helicity asymmetry for π^0 production at midrapidity in $p + p$ collisions at $s = 510$ GeV // *Physical Review D*. 2016. Vol. 93. No. 1. P. 011501.
3. Acharya U., Adare A., Aidala C., et al. (PHENIX Collaboration). Measurement of charged pion double spin asymmetries at midrapidity in longitudinally polarized $p + p$ collisions at $s = 510$ GeV // *Physical Review D*. 2020. Vol. 102. No. 3. P. 032001.
4. Adare A., Aidala C., Ajitanand N. N., et al. (PHENIX Collaboration). Charged-pion cross sections and double-helicity asymmetries in polarized $p + p$ collisions at $s = 200$ GeV // *Physical Review D*. 2015. Vol. 91. No. 3. P. 032001.
5. Adare A., Aidala C., Ajitanand N. N., et al. (PHENIX Collaboration). Inclusive double-helicity asymmetries in neutral-pion and eta-meson production in $p + p$ collisions at $s = 200$ GeV // *Physical Review D*. 2014. Vol. 90. No. 1. P. 012007.
6. Adamczyk L., Adkins J., Agakishiev G., et al. (STAR Collaboration). Neutral pion cross section and spin asymmetries at intermediate pseudorapidity in polarized proton collisions at $s = 200$ GeV // *Physical Review D*. 2014. Vol. 89. No. 1. P. 012001.
7. Салеев В. А., Шпилова А. В. Двойные продольные спиновые асимметрии в прямом рождении фотонов на коллайдере NICA // *Письма в журнал «Физика элементарных частиц и атомного ядра»*. 2023. Т. 20. № 3 (248). С. 417–421.
8. Adare A., Afanasiev S., Aidala C., et al. (PHENIX Collaboration). Cross section and double helicity asymmetry for η mesons and their comparison to π^0 production in $p + p$ collisions at $s = 200$ GeV // *Physical Review D*. 2011. Vol. 83. No. 3. P. 032001.
9. Jaffe R. L., Manohar A. The g1 problem: Deep inelastic electron scattering and the spin of the proton // *Nuclear Physics B*. 1990. Vol. 337. No. 3. Pp. 509–546.
10. Babcock J., Monsay E., Sivers D. Quantum-chromodynamic predictions for inclusive spin-spin asymmetries at large transverse momentum // *Physical Review D*. 1979. Vol. 19. No. 5. P. 1483.
11. Ciesielski R., Goulianos K. MBR Monte Carlo simulation in PYTHIA8 // *arXiv preprint arXiv:1205.1446*. 2012.
12. 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 // *European Physics Journal C*. 2015. Vol. 75. No. 3. P. 132.



13. Adler S. S., Afanasiev S., Aidala C., et al. (PHENIX Collaboration). High transverse momentum η meson production in $p + p$, $d + Au$, and $Au + Au$ collisions at $s_{NN} = 200$ GeV // Physical Review C. 2007. Vol. 75. No. 2. P. 024909.

REFERENCES

1. Abelev B., Aggarwal M., Ahammed Z., et al. (STAR Collaboration), Longitudinal double-spin asymmetry and cross section for inclusive neutral pion production at midrapidity in polarized proton collisions at $s = 200$ GeV, Phys. Rev. D. 80 (11) (2009) 111108.
2. Adare A., Aidala C., Ajitanand N. N., et al. (PHENIX Collaboration), Inclusive cross section and double-helicity asymmetry for π^0 production at midrapidity in $p + p$ collisions at $s = 510$ GeV, Phys. Rev. D. 93 (1) (2016) 011501.
3. Acharya U., Adare A., Aidala C., et al. (PHENIX Collaboration), Measurement of charged pion double spin asymmetries at midrapidity in longitudinally polarized $p + p$ collisions at $s = 510$ GeV, Phys. Rev. D. 102 (3) (2020) 032001.
4. Adare A., Aidala C., Ajitanand N. N., et al. (PHENIX Collaboration), Charged-pion cross sections and double-helicity asymmetries in polarized $p + p$ collisions at $s = 200$ GeV, Phys. Rev. D. 91 (3) (2015) 032001.
5. Adare A., Aidala C., Ajitanand N. N., et al. (PHENIX Collaboration), Inclusive double-helicity asymmetries in neutral-pion and eta-meson production in $p + p$ collisions at $s = 200$ GeV, Phys. Rev. D. 90 (1) (2014) 012007.
6. Adamczyk L., Adkins J., Agakishiev G., et al. (STAR Collaboration), Neutral pion cross section and spin asymmetries at intermediate pseudorapidity in polarized proton collisions at $s = 200$ GeV, Phys. Rev. D. 89 (1) (2014) 012001.
7. Saleev V. A., Shipilova A. V., Double longitudinal-spin asymmetries in direct photon production at NICA, Phys. Part. Nuclei. Lett. 20 (3) (2023) 400–403.
8. Adare A., Afanasiev S., Aidala C., et al. (PHENIX Collaboration), Cross section and double helicity asymmetry for η mesons and their comparison to π^0 production in $p + p$ collisions at $s = 200$ GeV, Phys. Rev. D. 83 (3) (2011) 032001.
9. Jaffe R. L., Manohar A., The g1 problem: Deep inelastic electron scattering and the spin of the proton, Nucl. Phys. B. 337 (3) (1990) 509–546.
10. Babcock J., Monsay E., Sivers D., Quantum-chromodynamic predictions for inclusive spin-spin asymmetries at large transverse momentum, Phys. Rev. D. 19 (5) (1979) 1483.
11. Ciesielski R., Goulianos K., MBR Monte Carlo simulation in PYTHIA8, arXiv preprint arXiv:1205.1446 (2012).
12. Buckley A., Ferrando J., Lloyd S., et al., LHAPDF6: parton density access in the LHC precision era, Eur. Phys. J. C. 75 (3) (2015) 132.
13. Adler S. S., Afanasiev S., Aidala C., et al. (PHENIX Collaboration), High transverse momentum η meson production in $p + p$, $d + Au$, and $Au + Au$ collisions at $s_{NN} = 200$ GeV, Phys. Rev. C. 75 (2) (2007) 024909.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КРУАШВИЛИ Дмитрий Васильевич — инженер Высшей школы фундаментальных физических исследований Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
kruashvili.dv@edu.spbstu.ru

БЕРДНИКОВ Ярослав Александрович — доктор физико-математических наук, профессор Высшей школы фундаментальных физических исследований Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
yberdnikov1947@gmail.com
ORCID: 0000-0003-0309-5917

THE AUTHORS

KRUASHVILI Dmitry V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
kruashvili.dv@edu.spbstu.ru

BERDNIKOV Yaroslav A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
yberdnikov1947@gmail.com
ORCID: 0000-0003-0309-5917

*Статья поступила в редакцию 21.04.2026. Одобрена после рецензирования 19.05.2026.
Принята 19.05.2026.*

Received 21.04.2026. Approved after reviewing 19.05.2026. Accepted 19.05.2026.