Научная статья
УДК 532.517
DOI: https://doi.org/10.18721/JPM.19214

ДВОЙНАЯ ПРОДОЛЬНАЯ СПИНОВАЯ АСИММЕТРИЯ (J/ψ)-МЕЗОНОВ, РОЖДЕННЫХ В ПРОДОЛЬНО-ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ПРОТОН-ПРОТОННЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ

Д. В. Круашвили ✉, **Я. А. Бердников**
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия
✉ kruashvili.dv@edu.spbstu.ru

Аннотация. В работе предложено расширение программного пакета Pythia8, благодаря которому появилась возможность рассчитывать столкновения продольно-поляризованных протонов с рождением (J/ψ)-мезонов. Получены спектры по поперечному импульсу и двойная продольная спиновая асимметрия (J/ψ)-мезонов при энергии 510 ГэВ. Проведено сравнение расчетных результатов с экспериментальными данными и установлено их вполне удовлетворительное согласие. Этот успех послужил основанием для предсказания результатов эксперимента SPD на коллайдере NICA. Представлены соответствующие вычисления спектра по поперечному импульсу и двойная продольная спиновая асимметрия (J/ψ)-мезона при энергии 27 ГэВ. Все выводы сделаны в рамках коллинеарной партонной модели.

Ключевые слова: Pythia8, двойная продольная спиновая асимметрия, функция распределения партонов, 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 (J/ψ)-мезонов, рожденных в продольно-поляризованных протон-протонных столкновениях // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2026. Т. 19. № 2. С. 171–177. DOI: https://doi.org/10.18721/JPM.19214

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.19214

DOUBLE LONGITUDINAL SPIN ASYMMETRY OF J/ψ MESONS PRODUCED IN PROTON-PROTON COLLISIONS WITH LONGITUDINAL POLARIZATION

D. V. Kruashvili ✉, **Ya. A. Berdnikov**
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia
✉ kruashvili.dv@edu.spbstu.ru

Abstract. The paper puts forward an extension of the Pythia8 software package, which makes it possible to calculate collisions of longitudinally polarized protons with the production of J/ψ mesons. The transverse momentum spectra of J/ψ mesons and the double longitudinal spin asymmetry of them at an energy of 510 GeV have been obtained. The calculated results were compared with experimental data, and a satisfactory agreement between them was established. This success served as the basis for predicting the results of the SPD experiment at the NICA collider. The corresponding calculations of the transverse momentum spectrum and the double longitudinal spin asymmetry of the J/ψ mesons at an energy of 27 GeV were presented. All conclusions were based on the collinear parton model.

© Круашвили Д. В., Бердников Я. А., 2026. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

Keywords: Pythia8, double longitudinal spin asymmetry, parton 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., Double longitudinal spin asymmetry of J/ψ mesons produced in proton-proton collisions with longitudinal polarization, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 19 (2) (2026) 171–177. DOI: https://doi.org/10.18721/JPM.19214

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

Введение

Изучение рождения (J/ψ)-мезонов в протон-протонных (pp) столкновениях открывает доступ к функциям распределения глюонов в протоне, которые в свою очередь позволяют оценить вклад глюонов в спин протона [1].

Спин протона можно представить по формуле Манохараж – Джаффе [2]:

$$S_p = 1/2 = (1/2)\,\Delta\Sigma + \Delta G + L_q + L_g, \tag{1}$$

где $(1/2)\Delta\Sigma$, ΔG – вклады от спиральностей кварков [3] и глюонов, соответственно; L_q, L_g – вклады от орбитальных моментов кварков q и глюонов g, соответственно.

Эти вклады выражаются следующим образом [4]:

$$\Delta\Sigma = \sum_q \int \Delta f_q(x,Q^2)dx,\ \Delta G = \int \Delta g(x,Q^2)dx, \tag{2}$$

где

$$\Delta f_q\left(x,Q^2\right) = f_q^+\left(x,Q^2\right) - f_q^-\left(x,Q^2\right),\ \Delta g\left(x,Q^2\right) = g^+\left(x,Q^2\right) - g^-\left(x,Q^2\right) \tag{3}$$

(см. работу [5]).

В выражения (3) входят следующие слагаемые: $f_q^+\left(x,Q^2\right), f_q^-\left(x,Q^2\right)$ – функции распределения кварка типа q в протонах с положительной и отрицательной спиральностями, с долей импульса протона x при масштабе Q^2; $g^+(x, Q^2)$, $g^-(x, Q^2)$ – функции распределения глюона g в протонах с положительной и отрицательной спиральностями с долей импульса протона x при масштабе Q^2.

В литературе функции $\Delta f_q(x, Q^2)$ и $\Delta g(x, Q^2)$ принято называть «поляризованные функции распределения кварков и глюонов в протоне» (соответственно) [5]. Следует отметить, что согласно работе [3], функции $\Delta g(x, Q^2)$ изучены не так хорошо, как $\Delta f_q(x, Q^2)$.

Именно указанная недостаточная изученность этих функций, а также участие глюонов во взаимодействиях [5], приводящих к образованию (J/ψ)-мезона в протон-протонных столкновениях, и послужили мотивацией к проведению данного исследования.

Цель настоящей работы – выяснение условий и особенностей рождения (J/ψ)-мезонов в столкновениях поляризованных и неполяризованных протонов.

Методика исследования

Двойная продольная спиновая асимметрия (Double Longitudinal Spin Asymmetry (DLSA)) [4] в столкновениях продольно-поляризованных протонов определяется следующей формулой:

$$A_{LL} = \frac{d\sigma^{(++)} - d\sigma^{(+-)}}{d\sigma^{(++)} + d\sigma^{(++)}} = \frac{d\Delta\sigma}{d\sigma}, \tag{4}$$

где $d\sigma^{(++)}$, $d\sigma^{(+-)}$ – сечения процессов столкновения протонов с одинаковыми (++) и разными (+–) спиральностями; $d\Delta\sigma^{(++)}$, $d\Delta\sigma^{(+-)}$ – сечения рождения (J/ψ)-мезонов в столкновениях поляризованных протонов и неполяризованных (короче: поляризованное и неполяризованное сечения, соответственно) [4].

© Kruashvili D. V., Berdnikov Ya. A., 2026. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

Согласное теореме о факторизации [6], неполяризованное сечение

$$d\sigma(pp\rightarrow J/\psi + X)$$

рождения адрона J/ψ в полуинклюзивном протон-протонном столкновении неполяризованных протонов можно записать в виде свертки неполяризованных партонных функций распределения $f_a(x_a, Q^2)$ и $f_b(x_b, Q^2)$ [7, 8]:

$$d\sigma\left(pp \rightarrow J/\psi + X\right) = \sum_{a,b,d} \int dx_a f_a\left(x_a, Q^2\right) \int dx_b \cdot f_b\left(x_b, Q^2\right) \cdot d\hat{\sigma}^{(ab\rightarrow(c\bar{c})d)} \tag{5}$$

Поляризованное сечение

$$d\Delta\sigma(pp\rightarrow J/\psi + X)$$

рождения адрона J/ψ в полуинклюзивном протон-протонном столкновении продольно-поляризованных протонов записывается в виде свертки продольно-поляризованных партонных функций распределения $\Delta f_a(x_a, Q^2)$ и $\Delta f_b(x_b, Q^2)$ [7 – 9]:

$$d\Delta\sigma\left(pp \rightarrow J/\psi + X\right) = \sum_{a,b,d} \int dx_a \Delta f_a\left(x_a, Q^2\right) \int dx_b \cdot \Delta f_b\left(x_b, Q^2\right) \cdot d\Delta\hat{\sigma}^{(ab\rightarrow(c\bar{c})d)}. \tag{6}$$

В выражениях (5) и (6) a, b – партоны (кварки, глюоны) сталкивающихся протонов; запись $(c\bar{c})d$ состоит из обозначения кварк-антикварковой пары очарованных кварков $(c\bar{c})$ и партона d, которые рождаются в процессе $ab \rightarrow (c\bar{c})d$; x_a, x_b – доли импульса первого протона, которую несет партон a, и второго протона, которую несет партон b.

В тех же выражениях (5) и (6) $d\hat{\sigma}^{(ab\rightarrow(c\bar{c})d)}$, $d\Delta\hat{\sigma}^{(ab\rightarrow(c\bar{c})d)}$ – сечения взаимодействия $ab\rightarrow (c\bar{c})d$ неполяризованных партонов и поляризованных, соответственно.

В рамках цвет-октетной модели выражения для сечения рождения (J/ψ)-мезона, принимают следующий вид [10]:

$$d\sigma\left(pp \rightarrow J/\psi + X\right) = \sum_{a,b,d} \int dx_a f_a\left(x_a, Q^2\right) \int dx_b \cdot f_b\left(x_b, Q^2\right) \sum_n \left\langle \mathcal{O}^{J/\psi}\left[n\right]\right\rangle \times$$
$$\times d\hat{\sigma}\left(ab \rightarrow c\bar{c}\left[n\right]d\right), \tag{7}$$

$$d\Delta\sigma\left(pp \rightarrow J/\psi + X\right) = \sum_{a,b,d} \int dx_a \Delta f_a\left(x_a, Q^2\right) \int dx_b \cdot \Delta f_b\left(x_b, Q^2\right) \sum_n \left\langle \mathcal{O}^{J/\psi}\left[n\right]\right\rangle \times$$
$$\times d\Delta\hat{\sigma}\left(ab \rightarrow c\bar{c}\left[n\right]d\right). \tag{8}$$

В выражениях (7) и (8) партонное сечение представлено как сумма всех $[n]$ возможных состояний пары $c\bar{c}$ очарованных кварка c и антикварка $\bar{c}$ [10]:

$$^3S_1^{(1)},\ ^3S_1^{(8)},\ ^1S_0^{(8)},\ ^3P_0^{(8)},\ ^3P_1^{(8)},\ ^3P_2^{(8)}. \tag{9}$$

Коэффициенты $\left\langle \mathcal{O}^{J/\psi}[n]\right\rangle$ отвечают за вероятность образования (J/ψ)-мезона из определенного состояния [10] (n – номер возможного кварк-антикваркового состояния пары $c\bar{c}$ очарованных кварков).

В настоящей работе учтены следующие процессы взаимодействия глюонов g, кварков q и антикварков $\bar{q}$, в которых могут рождаться (J/ψ)-мезоны:

$$gg \rightarrow (c\bar{c}) + g \rightarrow J/\psi + g,$$
$$qg \rightarrow (c\bar{c}) + q \rightarrow J/\psi + q,$$
$$q\bar{q} \rightarrow (c\bar{c}) + g \rightarrow J/\psi + g.$$

В исходном виде программного пакета Pythia8 [11] при генерации протон-протонных столкновений происходит свертка неполяризованных функций распределения и используются неполяризованные партонные сечения, что позволяет найти неполяризованное сечение (6). Для нахождения поляризованного сечения (7), которое необходимо для вычисления DLSA, необходимо заменить неполяризованные функции распределения и

неполяризованные партонные сечения поляризованными, что и было сделано в настоящей работе. Чтобы сгенерировать образование (J/ψ)-мезона, был изменен файл SigmaOnia.cc в Pythia8. В этом файле вместо исходных партонных сечений были использованы поляризованные партонные сечения [10].

Замена функций распределения происходит непосредственно в коде с помощью команды

pythia.readString("PDF: pSet = LHAPDF6:"+ name_pdf_set).

Исходные, неполяризованные, функции распределения были заменены поляризованными [12].

Проведенная модификация Pythia8 дала возможность рассчитать с помощью Pythia8 поляризованное сечение $d\Delta\sigma$ для (J/ψ)-мезона. Это, в свою очередь, дало возможность вычислить DLSA.

Результаты расчетов

С целью валидации алгоритма, предложенного в данной работе, и модификации программы расчета двойной продольной спиновой асимметрии (DLSA) (J/ψ)-мезонов, рожденных в продольно-поляризованных протон-протонных столкновениях, были получены при значении энергии 510 ГэВ следующие расчетные результаты:

спектры по поперечному импульсу (J/ψ)-мезонов, рожденных в столкновениях неполяризованных протонов (рис. 1);

DLSA для (J/ψ)-мезона (рис. 2).

Выбор указанного значения энергии был продиктован результатами экспериментов, выполненных коллаборациями STAR и PHENIX Брукхейвенской национальной лаборатории (США) [3, 13]. Данные по спектрам, показанные на рис. 1, умножены на вероятность (BR) распада (J/ψ)-мезона на мюон и антимюон). Эта вероятность (*англ.* Branching Ratio (BR)) – относительная доля определенного канала распада от общего числа распадов данной частицы. Она показывает, как часто мезон распадается именно по этому пути, и равна отношению парциальной ширины распада Γ_i к полной ширине распада Γ_{tot}: Γ_i/Γ_{tot}.

Анализ результатов, представленных на рис. 1 и 2, привел нас к следующим заключениям:

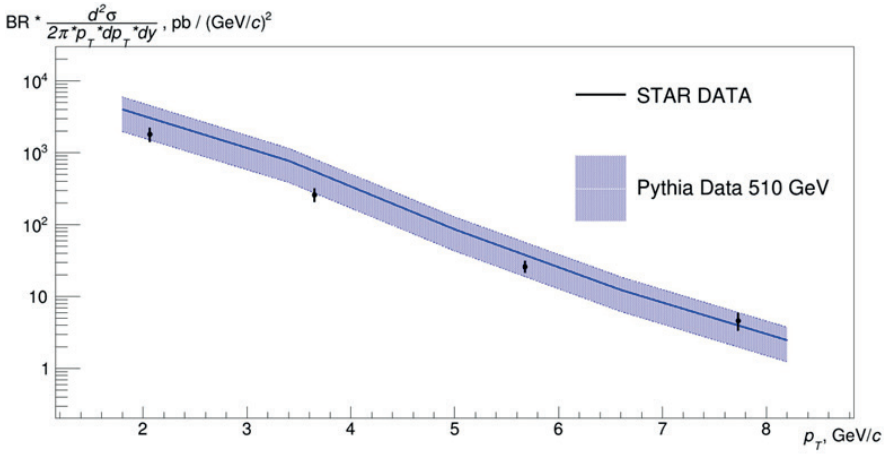


Рис. 1. Инвариантный спектр (J/ψ)-мезонов, рожденных в столкновениях неполяризованных протонов при энергии 510 ГэВ, по поперечному импульсу p_T (данные умножены на вероятность (BR) распада (J/ψ)-мезона на мюон и анти-мюон).

Результат нашего моделирования представлен синей сплошной кривой (ее размытость отражает диапазон ошибок расчета, обусловленный погрешностью партонных функций распределения).

Результаты эксперимента коллаборации STAR [13] представлены точками для сравнения

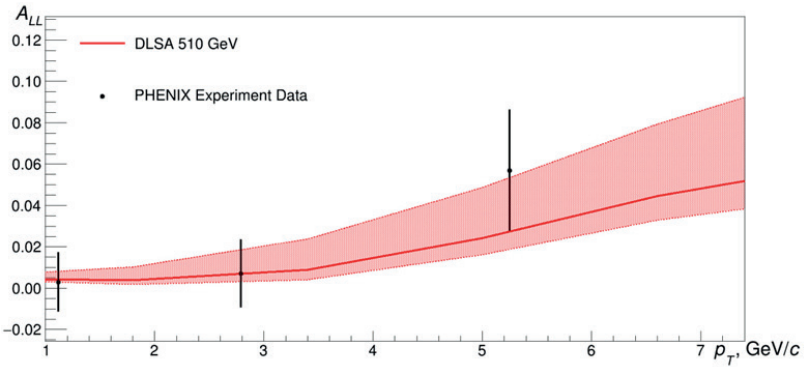


Рис. 2. Зависимость двойной продольной спиновой асимметрии (DLSA) (J/ψ)-мезонов, рожденных в продольно-поляризованных протон-протонных столкновениях при энергии 510 ГэВ, от поперечного импульса.

Результат нашего моделирования представлен красной сплошной кривой (ее размытость отражает диапазон ошибок расчета, обусловленных неточностями функций распределения (J/ψ)-мезонов [12]. Результаты эксперимента коллаборации PHENIX [3] представлены точками (отрезки – погрешности) для сравнения

данные моделирования, полученные нами с использованием модифицированной программы Pythia8, хорошо согласуются (в пределах ошибок) с экспериментальным спектром по поперечному импульсу p_T (J/ψ)-мезонов, рожденных в столкновениях неполяризованных протонов при энергии 510 ГэВ (см. рис. 1);

результаты наших расчетов с использованием указанной выше программы также хорошо (в пределах ошибок) согласуются с экспериментальной зависимостью DLSA (J/ψ)-мезонов, рожденных в столкновениях продольно-поляризованных протонов при энергии 510 ГэВ, от поперечного импульса.

Полученное нами, вполне удовлетворительное, согласие результатов расчетов с экспериментальными данными (см. рис. 1 и 2) позволяет предсказать поведение зависимостей DLSA (J/ψ)-мезонов во взаимодействиях поляризованных протонов. Результаты таких расчетов получены в данной работе (рис. 3) при энергии 27 ГэВ, характерной для планируемого эксперимента SPD коллайдера NICA.

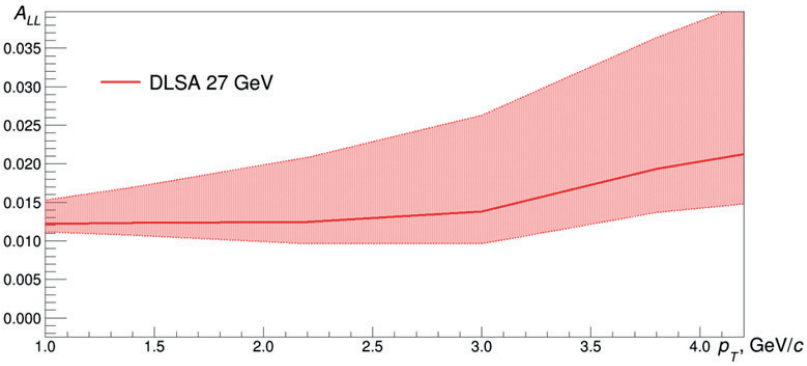


Рис. 3. Прогнозирующая зависимость DLSA (J/ψ)-мезонов, рожденных в продольно-поляризованных протон-протонных столкновениях, от поперечного импульса p_T. Расчетные данные аналогичны приведенным на рис. 2, но относятся к энергии 27 ГэВ (вместо 510 ГэВ на рис. 2)

Заключение

В работе была рассмотрена возможность вычисления двойной продольной спиновой асимметрии (DLSA) с помощью программного пакета Pythia8, путем модифицирования части исходного кода Pythia8. Такое новшество позволяет рассчитывать DLSA для (J/ψ)-мезона в протон-протонных столкновениях при различных значениях энергии. Приведено сравнение полученных расчетных данных с экспериментальными

результатами и показано вполне удовлетворительное их согласие при энергии 510 ГэВ. Такое соответствие послужило основанием для выполнения расчетного прогнозирования для планируемого эксперимента NICA (см. рис. 3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ji X., Xiong X., Yuan F.** Proton spin structure from measurable parton distributions // Physical Review Letters. 2012. Vol. 109. No. 15. P. 152005.

2. **Jaffe R. L., Manohar A.** The g_1 problem: Deep inelastic electron scattering and the spin of the proton // Nuclear Physics. B. 1990. Vol. 337. No. 3. 509–546.

3. **Adare A., Aidata C., Ajitanand N. N., et al.** Measurements of double-helicity asymmetries in inclusive J/ψ production in longitudinally polarized $p + p$ collisions at $s = 510$ GeV // Physical Review D. 2016. Vol. 94. No. 11. P. 112008.

4. **Салеев В. А., Шипилова 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.

5. **Stratmann M.** Polarized parton densities and processes // New Trends in HERA Physics 1999: Proceedings of the Ringberg Workshop Held at Tegernsee, Germany, 30 May – 4 June 1999, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2001. Pp. 83–97.

6. **Collins J. C., Soper D. E., Sterman G.** Factorization of hard processes in QCD // Advanced Series on Directions in High Energy Physics. 1988. Vol. 5. Pp. 1–91.

7. **Sivers D. W.** Single spin production asymmetries from the hard scattering of pointlike constituents // Physical Review D. 1990. Vol. 41. No. 1. Pp. 83–90.

8. **Collins J. C.** Fragmentation of transversely polarized quarks probed in transverse momentum distributions // Nuclear Physics B. 1993. Vol. 396. No. 1. Pp. 161–182.

9. **Bomhof C. J., Mulders P. J.** Gluonic pole cross sections and single spin asymmetries in hadron-hadron scattering // Journal of High Energy Physics. 2007. Vol. 2007. No. 2. P. 029.

10. **Klasen M., Kniehl B. A., Mihaila L. N., Steinhauser M.** Charmonium production in polarized high-energy collisions // Physical Review D. 2003. Vol. 68. No. 3. P. 034017.

11. **Ciesielski R., Goulianos K.** MBR Monte Carlo simulation in PYTHIA8 // arXiv preprint arXiv:1205.1446. 2012.

12. **Gehrmann T., Stirling W. J.** Spin-dependent parton distributions from polarized structure function data // Zeitschrift für Physik C.: Particles and Fields. 1995. Vol. 65. No. 3. Pp. 461–470.

13. **Adam J., Adamczyk L., Adams J. R., et al.** Measurements of the transverse-momentum-dependent cross sections of J/ψ production at mid-rapidity in proton+proton collisions at $s = 510$ and 500 GeV with the STAR detector // Physical Review D. 2019. Vol. 100. No. 5. P. 052009.

REFERENCES

1. **Ji X., Xiong X., Yuan F.,** Proton spin structure from measurable parton distributions, Phys. Rev. Lett. 109 (15) (2012) 152005.

2. **Jaffe R. L., Manohar A.,** The g_1 problem: Deep inelastic electron scattering and the spin of the proton, Nucl. Phys. B. 337 (3) (1990) 509–546.

3. **Adare A., Aidata C., Ajitanand N. N., et al.,** Measurements of double-helicity asymmetries in inclusive J/ψ production in longitudinally polarized $p + p$ collisions at $s = 510$ GeV, Phys. Rev. D. 94 (11) (2016) 112008.

4. **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.

5. **Stratmann M.,** Polarized parton densities and processes, New Trends in HERA Physics 1999: Proc. Ringberg Workshop Held at Tegernsee, Germany, 30 May–4 June 1999, Springer Berlin Heidelberg (2001) 83–97.

6. **Collins J. C., Soper D. E., Sterman G.,** Factorization of hard processes in QCD, Adv. Ser. Dir. High Energy Phys. 5 (1988) 1–91.

7. **Sivers D. W.,** Single-spin production asymmetries from the hard scattering of pointlike constituents, Phys. Rev. D. 41 (1) (1990) 83–90.

8. **Collins J. C.,** Fragmentation of transversely polarized quarks probed in transverse momentum distributions, Nucl. Phys. B. 396 (1) (1993) 161–182.

9. **Bomhof C. J., Mulders P. J.,** Gluonic pole cross sections and single spin asymmetries in hadron-hadron scattering, J. High Energy Phys. 2007 (2) (2007) 029.

10. **Klasen M., Kniehl B. A., Mihaila L. N., Steinhauser M.,** Charmonium production in polarized high-energy collisions, Phys. Rev. D. 68 (3) (2003) 034017.

11. **Ciesielski R., Goulianos K.,** MBR Monte Carlo simulation in PYTHIA8, arXiv preprint arXiv:1205.1446 (2012).

12. **Gehrmann T., Stirling W. J.,** Spin-dependent parton distributions from polarized structure function data, Z. Phys. C. 65 (3) (1995) 461–470.

13. **Adam J., Adamczyk L., Adams J. R., et al.,** Measurements of the transverse-momentum-dependent cross sections of J/ψ production at mid-rapidity in proton+proton collisions at $s = 510$ and 500 GeV with the STAR detector, Phys. Rev. D. 100 (5) (2019) 052009.

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
berdnikov@spbstu.ru
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
berdnikov@spbstu.ru
ORCID: 0000-0003-0309-5917

Статья поступила в редакцию 16.02.2026. Одобрена после рецензирования 03.03.2026. Принята 03.03.2026.

Received 16.02.2026. Approved after reviewing 03.03.2026. Accepted 03.03.2026.

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2026