

Научная статья

УДК 539.126

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18309>

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ РОЖДЕНИЯ АДРОНОВ В ДЕЙТРОН-ДЕЙТРОННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ПРИ ЭНЕРГИЯХ 13,5 И 27,0 ГЭВ

Д. С. Шапаев , Я. А. Бердников

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Санкт-Петербург, Россия

 dima.shapaev@yandex.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследования факторов ядерной модификации адронов в столкновениях ядер дейтерия при значениях энергии $\sqrt{s_{NN}} = 13,5$ ГэВ и $\sqrt{s_{NN}} = 27,0$ ГэВ. Проведено сравнение полученных факторов ядерной модификации (J/ψ)-, D^\pm - и π^0 -мезонов с использованием функций партонного распределения свободных нуклонов и ядерно-модифицированных функций партонного распределения. Полученные результаты показали, что факторы ядерной модификации (J/ψ)- и π^0 -мезонов остаются близкими к единице на всем исследуемом диапазоне 0,5–4,5 ГэВ/с поперечного импульса. Значения факторов ядерной модификации D^\pm -мезонов резко снижаются при увеличении поперечного импульса при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 13,5$ ГэВ, тогда как при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 27,0$ ГэВ значения остаются близкими к единице.

Ключевые слова: фактор ядерной модификации, SPD, NICA, функция распределения партонов, адрон

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

Для цитирования: Шапаев Д. С., Бердников Я. А. Сравнительный анализ особенностей рождения адронов в дейтерон-дейтеронных взаимодействиях при энергиях 13,5 и 27,0 ГэВ // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2025. Т. 18. № 3. С. 98–106. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18309>

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.18309>

A COMPARATIVE ANALYSIS OF HADRON CREATION IN DEUTERON-DEUTERON INTERACTIONS AT ENERGIES OF 13.5 AND 27.0 GeV

D. S. Shapaev , Ya. A. Berdnikov

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

 dima.shapaev@yandex.ru

Abstract. This paper presents the results of nuclear modification factors for hadrons in deuteron-deuteron collisions at energies of $\sqrt{s_{NN}} = 13.5$ GeV and $\sqrt{s_{NN}} = 27.0$ GeV. We have applied the widely-used nuclear-modified parton distribution functions and parton distribution functions for free nucleons to determine nuclear modification factors (NMFs) of J/ψ , D^\pm and π^0 mesons. The obtained results showed the NMFs values of J/ψ and π^0 ones to remain close to unity over the entire transverse momentum range from 0.5 to 4.5 GeV/c. The NMFs values of D^\pm ones decreased sharply with increasing the transverse momentum at $\sqrt{s_{NN}} = 13.5$ GeV, but they remained close to unity at $\sqrt{s_{NN}} = 27.0$ GeV.



Keywords: nuclear modification factor, SPD, NICA, parton distribution function, hadron

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

For citation: Shapaev D. S., Berdnikov Ya. A., A comparative analysis of hadron creation in deuteron-deuteron interactions at energies of 13.5 and 27.0 GeV, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 18 (3) (2025) 98–106. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18309>

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

Введение

Измерение особенностей рождения D^{\pm} -, (J/ψ) - и π^0 -мезонов в протон-протонных ($p + p$) взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{pp}} = 27.0$ ГэВ и дейtron-дейtronных ($d + d$) взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 13.5$ ГэВ/нуклон [1] – это одна из предполагаемых целей в планируемом эксперименте SPD [2] на коллайдере NICA [3].

Основной механизм образования D^{\pm} - и (J/ψ) -мезонов при исследуемых энергиях происходит через слияние пары глюонов (gg), что приводит к созданию кварк-антикварковой пары ($c\bar{c}$) [4].

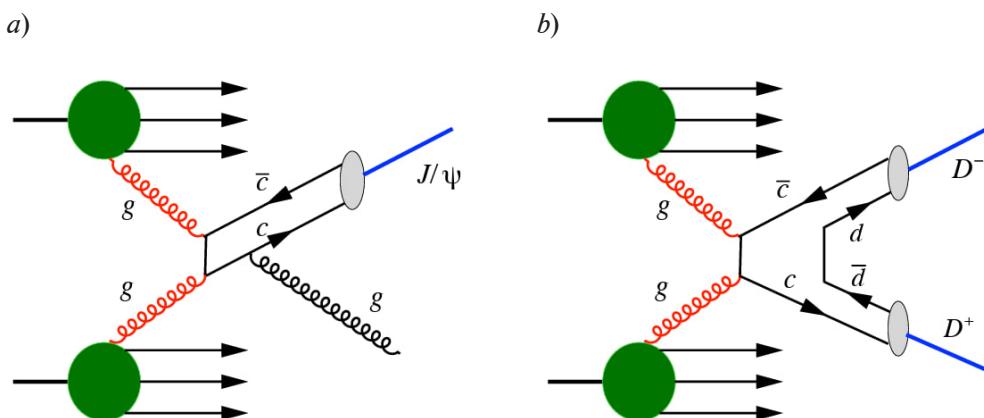


Рис. 1 [4]. Диаграммы Фейнмана для рождения (J/ψ) -мезона (a) и D^{\pm} -мезонов (b).

Рождение происходит через слияние пары глюонов (gg),
что приводит к созданию кварк-антикварковой пары ($c\bar{c}$)

Как следует из рис. 1, a, в ходе адронизации кварк-антикварковая пара ($c\bar{c}$) может образовать (J/ψ) -мезон. Схема рождения D^{\pm} -мезонов приведена на рис. 1, b: $cd \rightarrow D^+, \bar{c}\bar{d} \rightarrow D^-$.

Регистрацию (J/ψ) -мезонов в рамках проекта SPD можно осуществлять через слабые мюонные моды распада [4]:

$$J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$$

Регистрация D^{\pm} -мезонов предполагается в следующих каналах распада [4]:

$$D^+ \rightarrow \pi^+ K^- \pi^+ \text{ (BF} = 0,094\text{)}; D^- \rightarrow \pi^- K^+ \pi^- \text{ (BF} = 0,094\text{)}.$$

Таким образом, исследование особенностей процессов рождения D^{\pm} - и (J/ψ) -мезонов позволяет получать информацию о свойствах и роли глюонов в протон-протонных и дейtron-дейtronных взаимодействиях (а также в ядро-ядерных). В частности, можно извлечь информацию о функциях распределения глюонов в нуклонах и ядрах.

Измерение выходов нейтральных пионов, состоящих из $u\bar{u}$ - и $d\bar{d}$ -кварков, может способствовать проверке и уточнению существующих моделей, описывающих рождение

этих частиц. Сравнение выходов нейтральных пионов с более тяжелыми частицами, такими как мезоны D^\pm и J/ψ , поможет лучше понять роль тяжелых кварков в столкновениях нуклонов и ядер при высоких энергиях.

При изучении процессов рождения адронов принято использовать функции распределения партонов (PDF). Функция распределения партонов $f_i(x, Q^2)$ используется для описания вероятности нахождения в адроне i -го партона; x – параметр партонна, определяющий долю импульса нуклона, которую несет партон; Q^2 – величина, которая следует выражению

$$Q^2 = -q^2,$$

где q^2 – 4-импульс виртуальной частицы [5].

Особый интерес представляет область больших значений переменной x , где наблюдается существенное расхождение между теоретическими предсказаниями для глюонной функции распределения в дейтроне и глюонной функции распределения в нуклоне [4].

Для анализа нуклон-ядерных и ядро-ядерных столкновений были получены ядерно-модифицированные функции распределения партонов [6]. Принципиальным отличием данных функций от функций распределения партонов, взятых для свободных нуклонов (PDF), является то, что они учитывают нуклонный состав ядер и взаимодействия между нуклонами в ядре.

Согласно теореме факторизации [7], в коллинеарном приближении дифференциальное сечение рождения адрона H можно представить следующим образом:

$$E_H \frac{d^3\sigma}{dp_H^3} = \sum_{a,b,c} f_a \otimes f_b \otimes d\hat{\sigma}_{ab}^c \otimes D_c^H,$$

где f_a, f_b – функции распределения партонов; $d\hat{\sigma}_{ab}^c$ – сечение жесткого партонного подпроцесса; a, b, c – взаимодействующие партоны; D_c^H – функция фрагментации.

Различные функции распределения партонов влияют на сечение рождения адрона при условии, что для каждой частицы применяются одинаковые функции фрагментации.

Цель настоящей работы – определить особенности рождения адронов в столкновениях ядер дейтерия ($d + d$).

Для моделирования ($d + d$)-столкновений использованы ядерно-модифицированные функции распределения партонов (n PDF) и функции распределения партонов свободных нуклонов (PDF).

Методика исследования

Анализ выходов адронов в ($d + d$)-столкновениях при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 13,5$ и $27,0$ ГэВ проведен в настоящей работе на основе данных моделирования, полученных нами с помощью программного пакета Pythia8 [8].

Выбраны варианты расчета, в которых используются функции двух видов: функции распределения партонов, полученные для свободных нуклонов (PDF); ядерно-модифицированные (в данном случае в дейтроне) функции партонного распределения (n PDF).

В связи с тем, что значения энергии столкновений пучков дейтронов намного больше, чем энергия связи нуклонов в дейтроне (2,23 МэВ), для моделирования дейтрона можно принять модель несвязанных (свободных) нуклонов, для которых в рамках партонной модели используются партонные функции распределения свободных нуклонов (PDF). Столкновения пучков дейтронов можно представить на основе PDF как столкновение каждого нуклона одного ядра дейтрона с каждым нуклоном другого. При этом возможны четыре комбинации нуклон-нуклонных столкновений: pp , pn , np , nn . Если учесть примерное сходство значений полных сечений этих взаимодействий [9], то целесообразно принять эти взаимодействия равновероятными без существенной потери точности.

В нашей предыдущей статье [10] было установлено, что различные комбинации взаимодействующих нуклонов, составляющих ядро дейтерия, приводят к разному количеству образующихся прямых фотонов. Однако данная зависимость не должна наблюдаться при формировании (J/ψ)- и D^\pm -мезонов, так как вероятности их образования не зависят от электрического заряда кварка. Сечение рождения пары кварк-антикварк в результате глюон-глюонного взаимодействия пропорционально квадрату константы сильного взаимодействия [4].



Альтернативный подход к исследованию столкновений пучков дейtronов – это применение ядерно-модифицированных функций партонного распределения *nPDF*, полученных для дейtronов [11 – 13]. Многообразие используемых функций связано с их происхождением от разных экспериментальных данных, что может вызывать расхождения и в получаемых результатах. Поэтому для гарантии достоверности и возможности сравнения данных выбраны три различные ядерно-модифицированные функции распределения партонов.

Поскольку программа Pythia8 позволяет использовать в расчетах только одну партонную функцию распределения, для ускорения процесса расчета всех выбранных нами *nPDF* мы использовали весовой коэффициент *w* (формула для его вычисления дана в статье [14]):

$$w = \frac{x_1 f_i^{p/d}(x_1; Q^2)}{x_1 f_i^p(x_1; Q^2)} \cdot \frac{x_2 f_i^{p/d}(x_2; Q^2)}{x_2 f_i^p(x_2; Q^2)}, \quad (1)$$

где $x_1 f_i^{p/d}(x_1, Q^2)$, $x_2 f_i^{p/d}(x_2, Q^2)$ – ядерно-модифицированные функции распределения партонов (*nPDF*) для дейtronов в первом и втором ядрах; $x_1 f_i^p(x_1, Q^2)$, $x_2 f_i^p(x_2, Q^2)$ – партонные функции распределения свободных нуклонов (PDF) первого и второго ядер.

Этот коэффициент *w* характеризует отношение вероятностей обнаружения партонов для двух различных функций распределения партонов при одинаковых значениях переменных *x* и *Q*². Таким образом, использование в расчетах весового коэффициента позволяет получать спектры адронов как для PDF, так и для *nPDF* в рамках единой вычислительной процедуры моделирования.

Ввиду малой вероятности рождения (*J/ψ*)- и *D*[±]-мезонов в (*d* + *d*)-столкновениях, в данной работе для увеличения статистики рождения (*J/ψ*)- и *D*[±]-мезонов применялись специальные настройки в Pythia8 (они представлены в Приложении в конце статьи). Важно отметить, что предложенные модификации не оказывают какого-либо влияния на физическую интерпретацию полученных результатов.

Функции распределения партонов взяты из программного пакета LHAPDF6 [14], который подключается непосредственно к генератору столкновений Pythia8. Компьютерный анализ включал применение следующих партонных функций распределения (далее их нумерация, выделенная жирным шрифтом, фигурируют в подписях к рисункам).

Для функций PDF: nNNPDF30_nlo_as_0118_p [11] (**FI**), TUJU21_nlo_1_1 [12] (**FII**), nCTEQ15HIX_FullNuc_1_1 [13] (**FIII**);

для функций *nPDF*: nNNPDF30_nlo_as_0118_A2_Z1 [11] (**FIV**), TUJU21_nlo_2_1 [12] (**FV**), nCTEQ15HIX_FullNuc_2_1 [13] (**FVI**).

Для количественной оценки различия в особенностях спектров адронов в (*d* + *d*)-столкновениях с использованием *nPDF* и спектров, полученных с использованием PDF, применялся фактор ядерной модификации R_{dd} .

Величину R_{dd} можно вычислять с помощью следующего соотношения [15]:

$$R_{dd} = \frac{1}{N_{coll}} \cdot \frac{d^2 N_{dd} / dp_T dy}{d^2 N_{pp} / dp_T dy}. \quad (2)$$

В числителе формулы (2) стоит инвариантный спектр адронов, полученный в столкновениях ядер дейтерия в диапазонах быстрот *dy* и поперечного импульса *dp_T*. Этот спектр нормируется на количество бинарных нуклон-нуклонных столкновений N_{coll} (для *d* + *d*). В знаменателе формулы (2) находится инвариантный спектр адронов, измеренных в (*p* + *p*)-взаимодействиях для тех же диапазонов быстрот и поперечного импульса.

Диапазон по быстроте ($|y| < 3$) в данной статье взят из работы [16].

Полученные результаты и их обсуждение

Результаты R_{dd} для адронов в зависимости от поперечного импульса *p_T* при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 13,5$ и $\sqrt{s_{NN}} = 27,0$ ГэВ в области быстрот $|y| < 3$ с применением разных функций распределения партонов, взятых для свободных протонов (PDF) (см. функции **FI** – **FIII**), представлены на рис. 2.

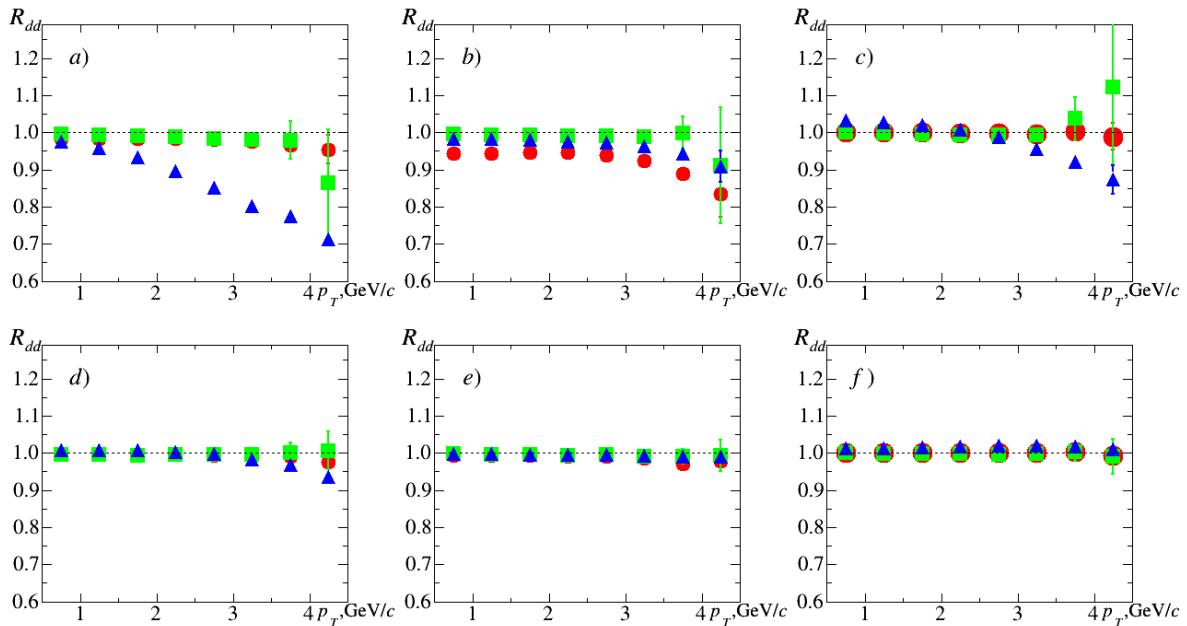


Рис. 2. Зависимости факторов ядерной модификации мезонов J/ψ (●), D^\pm (▲), π^0 (■) от поперечного импульса (см. ф-лу (2)) в $(d + d)$ -столкновениях при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 13,5$ ГэВ (a – c) и $\sqrt{s_{NN}} = 27,0$ ГэВ (d – f), в области быстрот $|y| < 3$, с применением разных функций распределения partонов, взятых для свободных протонов: a, d – функция FI; b, e – FII; c, f – FIII (нумерация функций дана в тексте).

Вертикальными отрезками показаны статистические погрешности

Результаты R_{dd} для адронов в зависимости от поперечного импульса p_T при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 13,5$ ГэВ и $\sqrt{s_{NN}} = 27,0$ ГэВ в области быстрот $|y| < 3$ с применением разных ядерно-модифицированных функций распределения partонов (n PDF) (см. функции FIV – FVI) представлены на рис. 3.

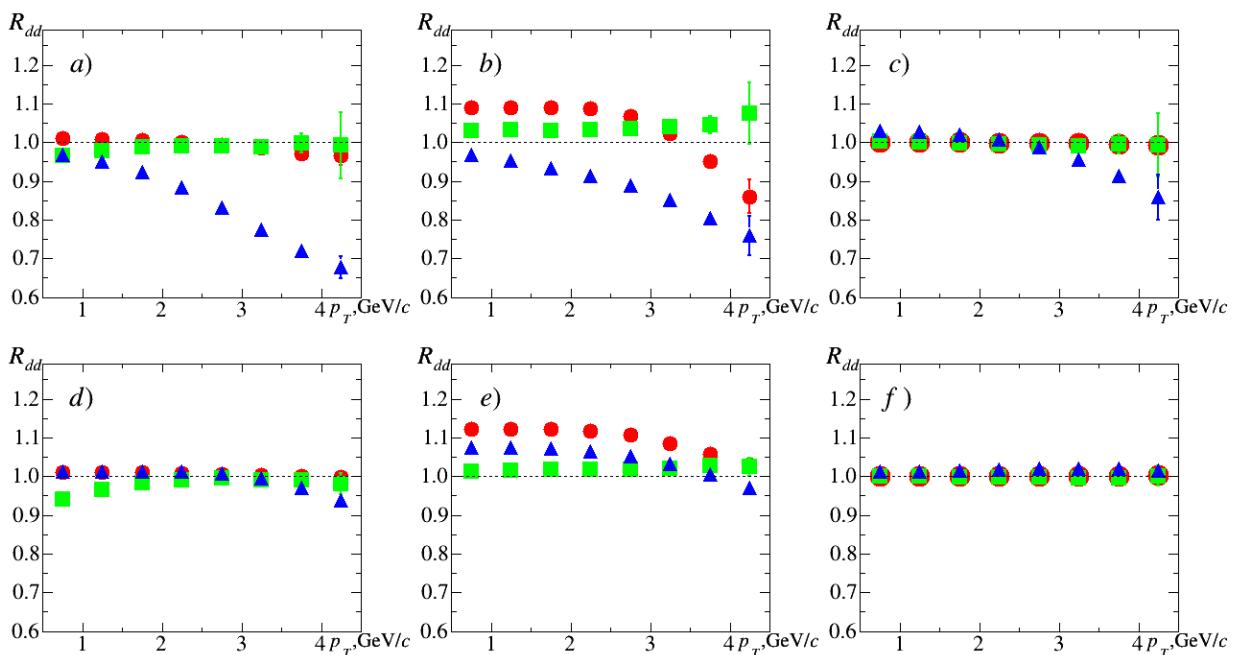


Рис. 3. Зависимости, аналогичные приведенным на рис. 2, при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 13,5$ ГэВ (a – c) и $\sqrt{s_{NN}} = 27,0$ ГэВ (d – f), для остальных ядерно-модифицированных функций partонного распределения: a, d – функция FIV; b, e – FV; c, f – FVI



На рис. 2 и рис. 3 можно заметить, что факторы ядерной модификации D^\pm -, (J/ψ) - и π^0 -мезонов, вычисленные с применением функций n PDF и PDF, имеют сходные значения на всем рассматриваемом диапазоне значений p_T . Тем не менее, небольшие различия в значениях R_{dd} при использовании партонных функций FII и FV могут свидетельствовать о наличии ядерных эффектов, влияющих на процесс образования частиц.

Результаты по факторам ядерной модификации R_{dd} , полученные с применением остальных функций (FI, FIII, FIV, FVI), не превышают единицы, что прогнозирует отсутствие возможных ядерных эффектов при образовании (J/ψ) - и π^0 -мезонов в дейтрон-дейтронных столкновениях.

Также можно отметить, что значения R_{dd} для D^\pm -мезонов падают с увеличением p_T при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 13,5$ ГэВ, в отличие от столкновений при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 27,0$ ГэВ, в которых значения R_{dd} остаются на уровне единицы. Причина такого поведения зависимостей требует дополнительного исследования.

Заключение

В данной работе рассчитаны факторы ядерной модификации D^\pm -, (J/ψ) - и π^0 -мезонов в $(d + d)$ -взаимодействиях при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 13,5$ и $\sqrt{s_{NN}} = 27,0$ ГэВ в зависимости от поперечного импульса p_T в области быстрых $|y| < 3$ с использованием PDF (FI – FIII) и n PDF (FIV – FVI).

Применение весового коэффициента (см. формулу (1)) в расчетах спектров адронов позволило ускорить процесс расчета спектров адронов.

Показано, что значения R_{dd} для адронов мало различаются при использовании разных функций: PDF и n PDF.

Установлено, что отношения инвариантных спектров (J/ψ) - и π^0 -мезонов в $(d + d)$ - и $(p + p)$ -столкновениях незначительно различаются при исследуемых энергиях для всех выбранных наборов PDF и n PDF. В то же время инвариантные спектры D^\pm -мезонов в $(d + d)$ -взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 13,5$ ГэВ уменьшаются относительно инвариантов спектров в $(p + p)$ - взаимодействиях при увеличении поперечного импульса p_T .

Приложение

Настройки параметров генератора событий Monte Carlo Pythia8 с целью увеличения образования мезонов

Параметр	Позиция	Параметр	Позиция
<i>Для (J/ψ)-мезонов</i>			
Charmonium:all	on	HardQCD:gg2ccbar	on
PhaseSpace:pTHatMin	0,1	HardQCD:qqbar2ccbar	on
PhaseSpace:pTHatMax	10,0	PhaseSpace:mHatMin	0,0
PhaseSpace:pTHatMinDiverge	0,5	PhaseSpace:pTHatMinDiverge	0,5
BeamRemnants:primordialKT	on	BeamRemnants:primordialKT	on
BeamRemnants:primordialKTsoft	0,9	BeamRemnants:primordialKTsoft	1,1
BeamRemnants:primordialKThard	1,8	BeamRemnants:primordialKThard	1,8
BeamRemnants:halfScaleForKT	2,0	BeamRemnants:halfScaleForKT	2,0
BeamRemnants:halfMassForKT	4,0	BeamRemnants:halfMassForKT	4,0
BeamRemnants:reducedKTatHighY	0,5	BeamRemnants:reducedKTatHighY	0,7
BeamRemnants:primordialKTremnant	0,4	BeamRemnants:primordialKTremnant	0,4
443:onMode	off		
443:onIfAll	13 -13		

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Savin I., Efremov A., Peshekhonov D., Kovalenko A., Teryaev O., Shevchenko O., Nagajcev A., Guskov A., Kukhtinand V., Toplilin N. Spin physics experiments at NICA-SPD with polarized proton and deuteron beams // EPJ Web of Conferences. 2015. Vol. 85. 23 January. P. 02039.
2. Ladygin V. P. Spin physics detector at NICA // JPS Conference Proceedings. Proceedings of the 24th International Spin Symposium (SPIN-2021). 2022. Vol. 37. P. 011012.
3. Trubnikov G., Butenko A., Golovatyuk V., Guskov A., Kapishin M., Kekelidze V., Lednický R., Meshkov I., Sorin A. NICA heavy-ion collider at JINR (Dubna). Status of accelerator complex and first physics at NICA // Journal of Physics: Conference Series. 2023. Vol. 2586. No. 1. P. 012013.
4. Arbuzov A., Bacchetta A., Butenschoen M., et al. (SPD Collaboration). On the physics potential to study the gluon content of proton and deuteron at NICA SPD // Progress in Particle and Nuclear Physics. 2021. Vol. 119. July. P. 103858.
5. Ethier J. J., Nocera E. R. Parton distributions in nucleons and nuclei // Annual Review of Nuclear and Particle Science. 2020. Vol. 70. No. 1. Pp. 43–76.
6. Eskola K. J. Global analysis of nuclear PDFs – latest developments // Nuclear Physics A. 2013. Vol. 910–911. August. Pp. 163–170.
7. De Florian D., Sassot R., Stratmann M. Global analysis of fragmentation functions for pions and kaons and their uncertainties // Physical Review D. 2007. Vol. 75. No. 11. P. 114010.
8. Bierlich C., Chakraborty S., Desai N., et al. A comprehensive guide to the physics and usage of PYTHIA 8.3 // SciPost Physics. 2022. Advance online publication. <https://inspirehep.net/literature/2056998>.
9. Murthy P. V. R., Ayre C. A., Gustafson H. R., Jones L. W., Longo M. J. Neutron total cross sections on nuclei at Fermilab energies // Nuclear Physics B. 1975. Vol. 92. No. 3. Pp. 269–308.
10. Шапаев Д. С., Бердников Я. А. Рождение прямых фотонов во взаимодействиях ядер дейтерия при энергиях 13,5 и 27,0 ГэВ // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2024. Т. 17. № 4. С. 138–146.
11. Khalek R. A., Gauld R., Giani T., Nocera E. R., Rabemananjara T. R., Rojo J. nNNPDF3.0: evidence for a modified partonic structure in heavy nuclei // European Physics Journal C. 2022. Vol. 82. No. 6. P. 507.
12. Helenius I., Walt M., Vogelsang W. NNLO nuclear parton distribution functions with electroweak-boson production data from the LHC // Physical Review D. 2022. Vol. 105. No. 9. P. 094031.
13. Segarra E. P., Ježo T., Accardi A., et al. Extending nuclear PDF analyses into the high- x , low- Q^2 region // Physical Review D. 2021. Vol. 103. No. 11. P. 114015.
14. Buckley A., Ferrando J., Lloyd S., Nordström K., Page B., Rüfenacht M., Schönher M., Watt G. LHAPDF6: parton density access in the LHC precision era // European Physics Journal C. 2015. Vol. 75. No. 3. P. 132.
15. Rezaeian A. H., Schaefer A. Hadrons and direct photon production in pp and pA collisions at the LHC and saturation effects // Physical Review D. 2010. Vol. 81. No. 11. P. 114032.
16. 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.

REFERENCES

1. Savin I., Efremov A., Peshekhonov D., et al., Spin physics experiments at NICA-SPD with polarized proton and deuteron beams, EPJ Web Conf. 85 (23 Jan) (2015) 02039.
2. Ladygin V. P., Spin physics detector at NICA, JPS Conf. Proc., Proc. 24th Int. Spin Symp. (SPIN-2021), 37 (2022) 011012.
3. Trubnikov G., Butenko A., Golovatyuk V., et al., NICA heavy-ion collider at JINR (Dubna). Status of accelerator complex and first physics at NICA, J. Phys.: Conf. Ser. 2586 (1) (2023) 012013.
4. Arbuzov A., Bacchetta A., Butenschoen M., et al. (SPD Collaboration), On the physics potential to study the gluon content of proton and deuteron at NICA SPD, Prog. Part. Nucl. Phys. 119 (July) (2021) 103858.



5. Ethier J. J., Nocera E. R., Parton distributions in nucleons and nuclei, *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 70 (1) (2020) 43–76.
6. Eskola K. J., Global analysis of nuclear PDFs – latest developments, *Nucl. Phys. A.* 910–911 (Aug) (2013) 163–170.
7. De Florian D., Sassot R., Stratmann M., Global analysis of fragmentation functions for pions and kaons and their uncertainties, *Phys. Rev. D.* 75 (11) (2007) 114010.
8. Bierlich C., Chakraborty S., Desai N., et al., A comprehensive guide to the physics and usage of PYTHIA 8.3, *SciPost Phys.* (2022). Advance online publication. <https://inspirehep.net/literature/2056998>.
9. Murthy P. V. R., Ayre C. A., Gustafson H. R., et al., Neutron total cross sections on nuclei at Fermilab energies, *Nucl. Phys. B.* 92 (3) (1975) 269–308.
10. Shapaev D. S., Berdnikov Ya. A., The creation of direct photons during interactions of deuterium nuclei at energies of 13.5 GeV and 27.0 GeV, *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics.* 17 (4) (2024) 138–146 (in Russian).
11. Khalek R. A., Gauld R., Giani T., et al., nNNPDF3.0: evidence for a modified partonic structure in heavy nuclei, *Eur. Phys. J. C.* 82 (6) (2022) 507.
12. Helenius I., Walt M., Vogelsang W., NNLO nuclear parton distribution functions with electroweak-boson production data from the LHC, *Phys. Rev. D.* 105 (9) (2022) 094031.
13. Segarra E. P., Ježo T., Accardi A., et al., Extending nuclear PDF analyses into the high- x , low- Q^2 region, *Phys. Rev. D.* 103 (11) (2021) 114015.
14. 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.
15. Rezaeian A. H., Schaefer A., Hadrons and direct photon production in pp and pA collisions at the LHC and saturation effects, *Phys. Rev. D.* 81 (11) (2010) 114032.
16. 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.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ШАПАЕВ Дмитрий Сергеевич – студент Физико-механического института Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
 dima.shapaev@yandex.ru
 ORCID: 0009-0006-8542-4401

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

SHAPAEV Dmitry S.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
 29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
 dima.shapaev@yandex.ru
 ORCID: 0009-0006-8542-4401

BERDNIKOV Yaroslav A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

berdnikov@spbstu.ru

ORCID: 0000-0003-0309-5917

*Статья поступила в редакцию 25.04.2025. Одобрена после рецензирования 12.05.2025.
Принята 12.05.2025.*

Received 25.04.2025. Approved after reviewing 12.05.2025. Accepted 12.05.2025.