

Научная статья

УДК 539.122

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17413>

## РОЖДЕНИЕ ПРЯМЫХ ФОТОНОВ ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ЯДЕР ДЕЙТЕРИЯ ПРИ ЭНЕРГИЯХ 13,5 И 27,0 ГэВ

Д. С. Шапаев <sup>□</sup>, Я. А. Бердников

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Санкт-Петербург, Россия

<sup>□</sup> [dima.shapaev@yandex.ru](mailto:dima.shapaev@yandex.ru)

**Аннотация.** В работе получены расчетным путем инвариантные спектры и факторы ядерной модификации прямых фотонов в столкновениях дейтронных пучков при энергиях  $\sqrt{s_{NN}} = 13,5$  и  $27,0$  ГэВ/нуклон, характерных для экспериментов, планирующихся в проекте NICA. Расчеты проводились как для ядерно-модифицированных функций партонного распределения, так и для функций распределения партонов, найденных для свободных нуклонов. Установлено, что учет ядерно-модифицированных функций партонного распределения слабо влияет на предсказания спектров прямых фотонов по поперечному импульсу и факторов ядерной модификации прямых фотонов в указанных взаимодействиях. Также оказалось, что факторы ядерной модификации прямых фотонов, рожденных в столкновениях дейтронов при рассматриваемых энергиях, незначительно зависят от поперечного импульса в диапазоне  $1 - 5$  ГэВ и отличаются от 1,0, принимая значения около 0,8.

**Ключевые слова:** прямой фотон, фактор ядерной модификации, SPD, NICA, функция распределения партонов

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках Государственного задания на проведение фундаментальных исследований (код темы FSEG-2024-0033).

**Для цитирования:** 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. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17413>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17413>

## THE CREATION OF DIRECT PHOTONS DURING INTERACTIONS OF DEUTERIUM NUCLEI AT ENERGIES OF 13.5 GeV AND 27.0 GeV

D. S. Shapaev <sup>□</sup>, Ya. A. Berdnikov

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

<sup>□</sup> [dima.shapaev@yandex.ru](mailto:dima.shapaev@yandex.ru)

**Abstract.** In this study, the invariant spectra and nuclear modification factors of direct photons produced in deuteron collisions at energies  $\sqrt{s_{NN}} = 13.5$  and  $27.0$  GeV/nucleon, relevant to the NICA project have been obtained by calculation. In doing this, both nuclear modified parton distribution functions and parton distribution ones found for free nucleons were used. Our analysis indicated that the predicted spectra of direct photons as a function of the transverse momentum, as well as the nuclear modification factors in these interactions were scarcely affected by accounting for the nuclear parton distribution function. It also turned out that the nuclear modification factors for direct photons generated in deuteron collisions at the specified energies depended slightly on the transverse momentum within the range from 1 to 5 GeV, differed from unity, exhibiting values around 0.8.

**Keywords:** direct photon, nuclear modification factor, SPD, NICA, parton distribution function



**Funding:** The reported study was carried out within the framework of the State Assignment for Fundamental Research (Subject Code FSEG-2024-0033).

**For citation:** 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. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17413>

## Введение

Одной из физических задач по спиновой физике в эксперименте Spin Physics Detector (SPD) [1] на коллайдере Nuclotron-based Ion Collider fAcility (NICA) [2] является изучение рождения прямых фотонов в протон-протонных столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{pp}} = 27,0$  ГэВ и дейтрон-дейтронных столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 13,5$  ГэВ/нуклон [3].

Основными источниками образования прямых фотонов служат жесткие процессы: глюонное комптоновское рассеяние  $qg \rightarrow q\gamma$  или  $\bar{q}g \rightarrow \bar{q}\gamma$  и кварк-антикварковая аннигиляция  $q\bar{q} \rightarrow g\gamma$  [4].

Здесь использованы следующие обозначения:  $q, \bar{q}, g, \gamma$  – кварк, антикварк, глюон и прямой фотон соответственно.

При энергии  $\sqrt{s} = 24$  ГэВ в столкновениях протонов, полное сечение процесса  $q\bar{q} \rightarrow g\gamma$  в 4 раза меньше такового для процессов глюонного комптоновского рассеяния  $qg \rightarrow q\gamma$  и  $\bar{q}g \rightarrow \bar{q}\gamma$ . Таким образом, комптоновское рассеяние является основным механизмом рождения прямых фотонов при энергиях SPD NICA [3].

Вместе с тем, еще одной задачей SPD является извлечение (и уточнение) неизвестных (малоизвестных) функций распределения партонов (*англ.* Parton Distribution Function (PDF)) [3]. Партоны – это частицы, входящие в состав протонов, нейтронов и других адронов, в рамках партонной модели, предложенной Ричардом Фейнманом в 1969 г.

Функция распределения партонов  $f_i(x; Q^2)$  применяется для описания вероятности нахождения в адроне  $i$ -го партона;  $x$  – параметр партона, 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].

Эксперименты по глубоконеупругому рассеянию, которые активно используются для изучения внутренней структуры нуклонов, показали, что PDF для нуклонов (протонов и нейтронов), которые связаны в ядрах – не такие же, как для функций распределения партонов, рассчитанных для свободных протонов, а модифицированы нетривиальным образом [6]. В ядерно-модифицированных функциях распределения партонов (*англ.* nuclear Parton Distribution Function, (nPDF)) учитывается и взаимодействие нуклона с окружающими его нуклонами, составляющими ядро.

Цель настоящей работы – сравнительный анализ особенностей рождения прямых фотонов в столкновениях ядер дейтерия.

При этом используются ядерно-модифицированные функции партонного распределения (nPDF) и результаты рождения прямых фотонов с применением функций распределения партонов, полученных для свободных протонов (PDF).

## Методика исследования

Расчетный анализ рождения прямых фотонов в дейтрон-дейтронных столкновениях проведен в данной работе на основе программного пакета Pythia8 [7], модифицированного нами, и рассматривает эти столкновения при энергиях 13,5 и 27,0 ГэВ/нуклон.

Выбраны варианты расчета, в которых используются два вида функций: функций распределения партонов, полученных для свободных нуклонов (PDF); ядерно-модифицированных (в данном случае в дейтроне) функций партонного распределения (nPDF).

© Shapaev D. S., Berdnikov Ya. A., 2024. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

Как хорошо известно, инвариантные спектры прямых фотонов вида

$$(1/2\pi p_T) \cdot d^2N_\gamma/dp_T dy$$

в столкновениях частиц  $a$  и  $b$  могут быть получены исходя из следующего выражения [8]:

$$\frac{1}{2\pi p_T} \cdot \frac{d^2N_\gamma}{dp_T dy} = \frac{1}{2\pi p_T} \cdot \frac{1}{N_{ab}} \cdot \frac{N_\gamma(\Delta p_T)}{\Delta p_T \Delta y},$$

где  $p_T$  – поперечный импульс прямых фотонов;  $y$  – быстрота;  $N_{ab}$  – число столкновений частиц  $a$  и  $b$ , в которых могут рождаться прямые фотоны;  $N_\gamma(\Delta p_T)$  – число рожденных прямых фотонов в диапазонах быстрот  $\Delta y$  и поперечного импульса  $\Delta p_T$  прямых фотонов.

По аналогии с работой [9], в данной статье рассмотрен диапазон быстрот  $|y| < 3$ .

Поскольку рассматриваемые нами энергии столкновений пучков дейтронов много больше энергии связи нуклонов в дейтроне (2,23 МэВ), в качестве модели дейтрона можно принять модель несвязанных (свободных) нуклонов, для которых в рамках партонной модели используются партонные функции распределения свободных нуклонов (PDF). На основе такой модели столкновения пучков дейтронов можно представить как взаимодействие каждого нуклона одного ядра с каждым нуклоном другого. При этом возможны четыре комбинации нуклон-нуклонных столкновений:  $pp$ ,  $pn$ ,  $np$ ,  $nn$ . Если учесть близкие значения полных сечений этих взаимодействий [10], то можно принять без существенной потери точности, что эти взаимодействия равновероятны. В таком случае спектр прямых фотонов в дейтронных столкновениях вычисляется как

$$\frac{d^2N_{dd \rightarrow \gamma X}}{dp_T dy} = (1/4) \cdot \left( \frac{d^2N_{pp \rightarrow \gamma X}}{dp_T dy} + \frac{d^2N_{pn \rightarrow \gamma X}}{dp_T dy} + \frac{d^2N_{np \rightarrow \gamma X}}{dp_T dy} + \frac{d^2N_{nn \rightarrow \gamma X}}{dp_T dy} \right), \quad (1)$$

где  $\gamma$  – прямые фотоны;  $X$  – все остальные частицы, которые могут рождаться в столкновениях дейтронов или нуклонов.

В процессе столкновения дейтронов разнообразные комбинации взаимодействующих нуклонов ( $pp$ ,  $pn$ ,  $np$ ,  $nn$ ) могут приводить к разному количеству прямых фотонов. Это объясняется тем, что вероятность образования прямых фотонов пропорциональна квадрату электрического заряда кварка, участвующего в процессе кварк-глюонного или кварк-антикваркового взаимодействия [9]:

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

$$|M_{q\bar{q} \rightarrow \gamma g}|^2 = \frac{128}{9} \pi^2 \alpha_{em} \alpha_s e_q^2 \frac{\hat{u}^2 + \hat{t}^2}{\hat{u}\hat{t}}, \quad (3)$$

где  $\hat{s}, \hat{t}, \hat{u}$  – переменные Мандельштама;  $\alpha_{em}, \alpha_s$  – константы электромагнитного и сильного взаимодействий, соответственно;  $e_q$  – электрический заряд кварка;  $|M_{qg \rightarrow \gamma q}|, |M_{q\bar{q} \rightarrow \gamma g}|$  – модули амплитуды для кварк-глюонного и кварк-антикваркового взаимодействий, соответственно.

Здесь следует учитывать различный кварковый состав протона ( $uud$ ) и нейтрона ( $udd$ ), где электрический заряд  $u$ -кварка равен  $+2/3$  элементарного заряда, а  $d$ -кварка равен  $-1/3$ , и тогда спектры прямых фотонов, рожденных в электромагнитном взаимодействии, должны отличаться в протон-протонных, протон-нейтронных и нейтрон-нейтронных столкновениях.

Альтернативным подходом к исследованию столкновений пучков дейтронов является применение ядерно-модифицированных функций партонного распределения (nPDF), полученных для дейтронов [11 – 13]. В этом случае мы учитывали, что эти функции получены из экспериментальных данных, где нуклоны, составляющие ядро дейтерия, связаны друг с другом.

Поскольку Pythia8 в процессе расчетов спектра прямых фотонов позволяет использовать только одну партонную функцию распределения (например, эту функцию в свободном протоне (PDF)), инвариантный спектр прямых фотонов для nPDF можно получить



через вычисление весового коэффициента  $w$  [14]. Последний характеризует отношение вероятностей обнаружения партона для двух различных функций распределения партонов при одинаковых значениях переменных  $x$  и  $Q^2$ .

В нашем случае мы рассчитываем отношение функций nPDF к функциям PDF. Тогда спектр прямых фотонов для функций nPDF можно получить, если умножить этот весовой коэффициент на выражение для спектра прямых фотонов, полученное с использованием функций PDF.

Вычисление весового коэффициента производится по следующей формуле [14]:

$$w = \frac{x_1 f_i^{p/d}(x_1; Q^2)}{x_1 f_i^p(x_1; Q^2)} \cdot \frac{x_2 f_i^{p/d}(x_2; Q^2)}{x_2 f_i^p(x_2; Q^2)}, \quad (4)$$

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

Таким образом, внедрение нашей модификации в программный пакет Pythia8 приводит к возрастанию скорости формирования спектров прямых фотонов. Это обусловлено возможностью получения спектров прямых фотонов как для функций PDF, так и для nPDF в рамках одного запуска симуляции вычислений спектров прямых фотонов.

В настоящей работе результаты, полученные для дейтрон-дейтронных столкновений с рождением прямых фотонов, рассчитаны с использованием генератора событий Монте-Карло, предусмотренного в пакете Pythia8. Функции партонного распределения были взяты из программного пакета LHAPDF6 [14], который подключается непосредственно к генератору событий. Компьютерный анализ включал применение следующих партонных функций распределения (далее их нумерация фигурирует 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), которые были сформулированы на основе разных экспериментальных данных.

Сравнительный анализ особенностей рождения прямых фотонов в дейтрон-дейтронных столкновениях с применением ядерно-модифицированных PDF и PDF, полученных для свободных протонов, проводился попарно между следующими функциями: FVI и FIII, FV и FII, FIV и FI.

Для количественной оценки спектров прямых фотонов в дейтрон-дейтронных столкновениях с применением ядерно-модифицированных функций распределения партонов (nPDF) и спектров, полученных с применением функций распределения партонов, взятых для свободных протонов (PDF), обычно используется фактор ядерной модификации  $R_{dd \rightarrow \gamma X}$  прямых фотонов [15 – 17].

Величина  $R_{dd \rightarrow \gamma X}$  описывается как следующее отношение:

$$R_{dd \rightarrow \gamma X} = \frac{1}{N_{coll}} \frac{d^2 N_{dd \rightarrow \gamma X} / dp_T dy}{d^2 N_{pp \rightarrow \gamma X} / dp_T dy}, \quad (5)$$

где в числителе стоит инвариантный спектр прямых фотонов в столкновениях ядер дейтерия, который нормируется на количество бинарных нуклон-нуклонных столкновений  $N_{coll}$  (для  $d + d$ ), а в знаменателе – инвариантный спектр прямых фотонов в протон-протонных столкновениях.

### Полученные результаты и их обсуждение

На рис. 1 сравниваются инвариантные спектры прямых фотонов в зависимости от поперечного импульса  $p_T$  при энергиях 13,5 и 27,0 ГэВ/нуклон, соответственно, для различных функций партонного распределения (см. функции FI – FVI).

Для большей наглядности на рис. 1,  $a - c$  и  $g - j$  один из спектров (черные гистограммы) умножен на коэффициент, равный 2. Систематические неопределенности получены в данной работе только для функций партонного распределения FIV – FVI с помощью метода, описанного в работе [18]. Для наборов функций FI – FIII определение систематических неопределенностей оказалось невозможным.

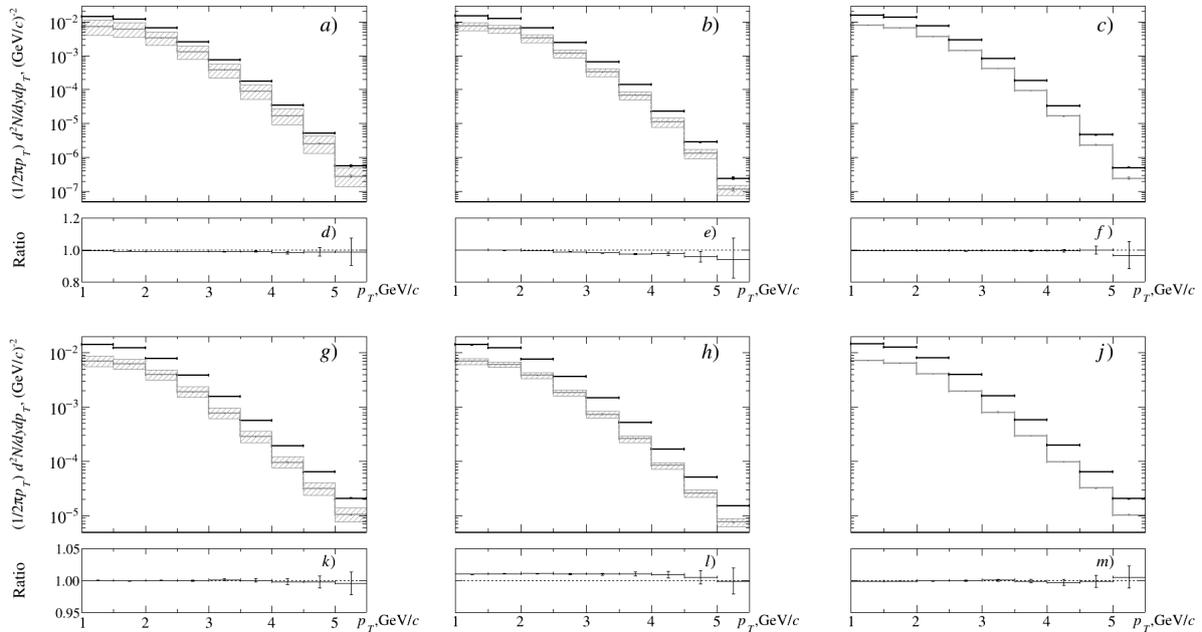


Рис. 1. Инвариантные спектры прямых фотонов (см. ф-лу (1)) в  $(d + d)$ -столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 13,5$  ( $a - f$ ) и  $27,0$  ( $g - m$ ) ГэВ/нуклон, в области быстрот  $|y| < 3$ , для различных функций партонного распределения:

$a, g$  – функции FIV, FI;  $b, h$  – FV, FII;  $c, j$  – FVI, FIII (нумерацию см. в тексте); гистограммы серого цвета относятся к FIV – FVI, черного – к FI – FIII;  $d-f, k-m$  – отношения спектров серых гистограмм к черным (вертикальными отрезками показаны статистические погрешности). Систематические неопределенности показаны заштрихованными областями

Как следует из рис. 1, инвариантные спектры, полученные с использованием партонных функций распределения свободных протонов (PDF) и с использованием ядерно-модифицированных партонных функций распределения (nPDF), совпадают в пределах неопределенностей на всем диапазоне поперечного импульса, что указывает на незначительное влияние ядерной модификации функций распределения партонов на результаты предсказания инвариантных спектров прямых фотонов.

На рис. 2 представлены факторы ядерной модификации прямых фотонов в зависимости от поперечного импульса при энергиях 13,5 и 27,0 ГэВ/нуклон, соответственно, для различных функций партонного распределения FI – FVI.

Факторы ядерной модификации с использованием всех функций распределения партонов FI – FVI оказываются меньше единицы, что объясняется зависимостью сечения рождения прямых фотонов (в соответствии с процессами (2) и (3)) от квадрата электрического заряда кварков, входящих в состав взаимодействующих нуклонов.

Анализ данных, представленных на рис. 2, приводит к заключению, что результаты расчетов факторов ядерной модификации прямых фотонов в дейтрон-дейтронных столкновениях практически совпадают с таковыми, полученными на основе партонных функций распределения, взятых как для свободных протонов (PDF), так и ядерно-модифицированных функций партонного распределения (nPDF).

Сравнение полученных данных на рис. 2 показывает практически одинаковую зависимость (по величине и форме) факторов ядерной модификации от поперечного импульса.

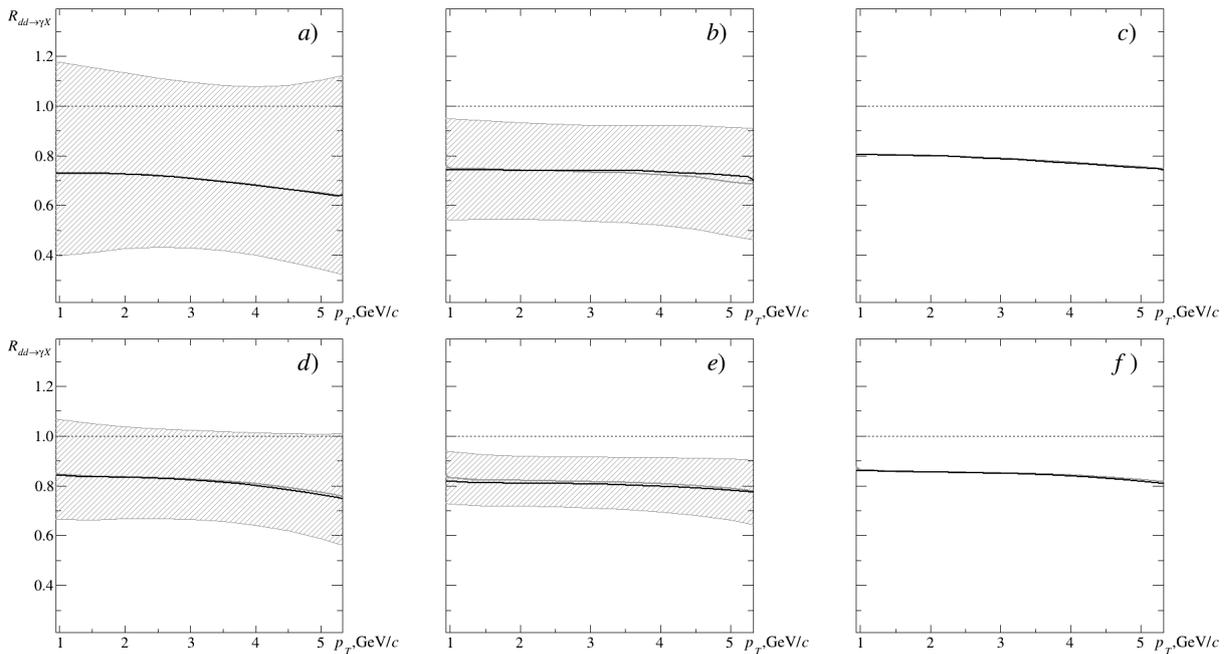


Рис. 2. Зависимости факторов ядерной модификации прямых фотонов от поперечного импульса (см. ф-лу (5)) в  $(d + d)$ -столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 13,5$  ( $a - c$ ) и  $27,0$  ( $d - f$ ) ГэВ/нуклон. Представлены графики для той же области быстрот ( $|y| < 3$ ) и тех же функций партонного распределения (FI – FVI), что на рис. 1; серый и черный цвета кривых соответствуют цветам гистограмм на рис. 1,  $a - c$  и  $1, g - j$ , однако здесь результаты расчетов практически совпадают. Систематические неопределенности также показаны заштрихованными областями

### Заключение

В настоящей работе рассчитаны инвариантные спектры и факторы ядерной модификации прямых фотонов в  $(d + d)$ -столкновениях при энергиях  $\sqrt{s_{NN}} = 13,5$  и  $\sqrt{s_{NN}} = 27,0$  ГэВ/нуклон в зависимости от поперечного импульса в области быстрот  $|y| < 3$  с использованием ядерно-модифицированных PDF и с использованием PDF, полученных для свободных протонов.

Применение весового коэффициента (см. формулу (4)) в расчетах спектров прямых фотонов позволило ускорить процесс в два раза.

Показано, что инвариантные спектры и факторы ядерной модификации прямых фотонов практически не зависят от влияния ядра на партонные функции распределения в дейтроне.

Полученные результаты могут быть полезны для проверки в эксперименте SPD на коллайдере NICA.

### Благодарности

Авторы выражают благодарности кандидату физико-математических наук Котову Д. О. (доцент Высшей школы фундаментальных физических исследований СПбПУ), Ларионовой Д. М. (ассистент той же школы), Лобанову А. А. (студент Физико-механического института СПбПУ), кандидату физико-математических наук Митранкову Ю. М. (ассистент Высшей школы фундаментальных физических исследований СПбПУ), за полезное обсуждение работы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ladygin V. P.** Spin physics detector at NICA // JPS Conference Proceedings. Proc. 24th International Spin Symposium (SPIN2021) 2022. Vol. 37. P. 011012.
2. **Trubnikov G., Butenko A., Golovatyuk V., Guskov A., Kapishin M., Kekelidze V., Lednicky 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.
3. **Savin I., Efremov A., Peshekhonov D., Kovalenko A., Teryaev O., Shevchenko O., Nagajcev A., Guskov A., Kukhtin 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.
4. **Adler S. S., Afanasiev S., Aidala C., et al.** (PHENIX Collaboration). Measurement of direct photon production in  $p + p$  collisions at  $\sqrt{s} = 200$  GeV // Physical Review Letters. 2007. Vol. 98. No. 1. P. 012002.
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. **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>.
8. **Adare A., Afanasiev S., Aidala C., et al.** (PHENIX Collaboration). Nuclear modification factors of  $\phi$  mesons in  $d + Au$ ,  $Cu + Cu$  and  $Au + Au$  collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV // Physical Review C. 2011. Vol. 83. No. 2. P. 024909.
9. **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.
10. **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.
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., Schönherr M., Watt G.** LHAPDF6: parton density access in the LHC precision era // European Physics Journal C. 2015. Vol. 75. No. 3. P. 132.
15. **Afanasiev S., Aidala C., Ajitanand N. N., et al.** (PHENIX Collaboration). Measurement of direct photons in  $Au + Au$  collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV // Physical Review Letters. 2012. Vol. 109. No. 15. P. 152302.
16. **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.
17. **Arleo F.** Hard pion and prompt photon at RHIC, from single to double inclusive production // Journal of High Energy Physics. 2006. Vol. 2006. No. 09. P. 015.
18. **Gao J., Nadolsky P.** A meta-analysis of parton distribution functions // Journal of High Energy Physics. 2014. Vol. 2014. No. 7. P. 35.

## REFERENCES

1. **Ladygin V. P.**, Spin physics detector at NICA, JPS Conf. Proc. Proc. 24th Int. Spin Symp. (SPIN2021). 37 (2022) 011012.
2. **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.
3. **Savin I., Efremov A., Peshekhonov D., et al.**, Spin physics experiments at NICA-SPD with polarized proton and deuteron beams, EPJ Web of Conf. 85 (23 Jan) 02039.



4. Adler S. S., Afanasiev S., Aidala C., et al. (PHENIX Collaboration), Measurement of direct photon production in  $p + p$  collisions at  $\sqrt{s} = 200$  GeV, Phys. Rev. Lett. 98 (1) (2007) 012002.
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. Bierlich C., Chakraborty S., Desai N., et al., A comprehensive guide to the physics and usage of PYTHIA 8.3, SciPost Phys. 2022. Adv. online publ. <https://inspirehep.net/literature/2056998>.
8. Adare A., Afanasiev S., Aidala C., et al. (PHENIX Collaboration), Nuclear modification factors of  $\phi$  mesons in  $d + Au$ ,  $Cu + Cu$  and  $Au + Au$  collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, Phys. Rev. C. 83 (2) (2011) 024909.
9. 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.
10. 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.
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. Afanasiev S., Aidala C., Ajitanand N. N., et al., (PHENIX Collaboration), Measurement of direct photons in  $Au + Au$  collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, Phys. Rev. Lett. 109 (15) (2012) 152302.
16. 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.
17. Arleo F., Hard pion and prompt photon at RHIC, from single to double inclusive production, J. High Energ. Phys. 2006 (09) (2006) 015.
18. Gao J., Nadolsky P., A meta-analysis of parton distribution functions, J. High Energ. Phys. 2014 (7) (2014) 35.

#### 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](mailto: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](mailto:berdnikov@spbstu.ru)

ORCID: 0000-0003-0309-5917

## THE AUTHORS

**SHAPAEV Dmitry S.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*  
29 Politechnicheskaya 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 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia  
berdnikov@spbstu.ru  
ORCID: 0000-0003-0309-5917

*Статья поступила в редакцию 25.07.2024. Одобрена после рецензирования 07.08.2024.  
Принята 07.08.2024.*

*Received 25.07.2024. Approved after reviewing 07.08.2024. Accepted 07.08.2024.*