

Научная статья

УДК 539.12


DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18308>

АСИММЕТРИИ ПРЯМЫХ ФОТОНОВ В ПРОДОЛЬНО-ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ПРОТОН-ПРОТОННЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ ПРИ ЭНЕРГИЯХ 9 – 27 ГэВ

А. А. Лобанов , Я. А. Бердников

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Санкт-Петербург, Россия

 lobanov2.aa@edu.spbstu.ru

Аннотация. В работе представлено развитие модели генеративно-сопоставительной сети (ГСС) для изучения характеристик прямых фотонов, образующихся при столкновениях протонов. Исследование направлено на расширение возможностей ранее разработанной нами модели путем введения параметра начальной энергии столкновения $\sqrt{s_{NN}}$ в диапазоне 9 – 27 ГэВ. Модель обучена на данных, сгенерированных с помощью PYTHIA8, и протестирована как при энергиях обучения, так и при промежуточных значениях энергии. Особое внимание уделено способности модели сохранять кинематические зависимости и воспроизводить двойную продольную спиновую асимметрию A_{LL} . Результаты доказали возможность использования ГСС для интерполяции характеристик прямых фотонов по энергии столкновения.

Ключевые слова: асимметрия, прямые фотоны, нейронная сеть, генеративно-сопоставительная сеть

Финансирование: Государственное задание на проведение фундаментальных исследований (код темы FSEG-2025-0009).

Для цитирования: Лобанов А. А., Бердников Я. А. Асимметрии прямых фотонов в продольно-поляризованных протон-протонных столкновениях при энергиях 9 – 27 ГэВ // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2025. Т. 18. № 3. С. 91–97. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18308>

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.18308>

DIRECT PHOTON ASYMMETRIES IN THE LONGITUDINALLY POLARIZED PROTON-PROTON COLLISIONS AT ENERGIES FROM 9 TO 27 GeV

A. A. Lobanov , Ya. A. Berdnikov

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

 lobanov2.aa@edu.spbstu.ru

Abstract. This paper presents the development of the Generative Adversarial Network (GAN) model to study the properties of direct photons produced in proton-proton collisions. The study aims to extend the capabilities of our model (developed previously) by introducing the initial collision energy parameter $\sqrt{s_{NN}}$ in the range from 9 to 27 GeV. The model has been trained on the data generated using PYTHIA8 and tested both at training energies and at intermediate energy values. Special attention was paid to the ability of the model to preserve kinematic dependencies and to reproduce the double longitudinal spin asymmetry A_{LL} . The results proved the possibility of using the GAN to interpolate the characteristics of direct photons in terms of collision energy.

Keywords: asymmetries, direct photons, neural network, generative-adversarial network

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

For citation: Lobanov A. A., Berdnikov Ya. A., Direct photon asymmetries in the longitudinally polarized proton-proton collisions at energies from 9 to 27 GeV, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 18 (3) (2025) 91–97. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18308>

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

Введение

Изучение структуры протона и формирование его спина остается одной из ключевых задач современной физики [1]. Для решения этой задачи создаются различные экспериментальные установки, среди которых особое место занимает детектор SPD на строящемся коллайдере NICA [1].

Важную роль в формировании суммарного спина протона играют глюоны [1]. Их вклад описывается спиральными функциями распределения глюона $\Delta g(x)$, интегрирование которых дает полный вклад в спин протона. Одним из эффективных способов получения значений $\Delta g(x)$ является измерение двойной продольной спиновой асимметрии (DLSA) A_{LL} , возникающей при столкновении продольно-поляризованных протонов [1].

Асимметрию DLSA можно измерить для различных частиц, включая заряженные и нейтральные пионы [2], а также (J/ψ) -мезоны [3]. Однако особый интерес представляют прямые фотоны, рожденные при электромагнитном взаимодействии партонов протона, в частности, в реакции комптоновского рассеяния $gq(\bar{q}) \rightarrow \gamma q$ [4]. Преимущество измерения прямых фотонов заключается в более простом теоретическом описании, не требующем использования моделей адронизации.

Несмотря на это преимущество, измерение прямых фотонов сопряжено с рядом трудностей, включая малую статистику событий и сложность выделения прямых фотонов на фоне распадных фотонов, например, от распада мезона π^0 [4].

Для решения проблемы малой статистики, в предыдущей работе [5] был предложен подход с использованием генеративно-сопоставительной сети (ГСС). Было показано, что ГСС способна с высокой точностью воспроизводить характеристики прямых фотонов, рождающихся в столкновениях продольно-поляризованных протонов и сохранять возможность расчета асимметрий.

В данной работе представлено развитие предложенного подхода, направленное на расширение возможностей разработанной нами модели ГСС [5].

Для этой цели предлагается ввести параметр начальной энергии столкновения $\sqrt{s_{NN}}$, что должно обеспечивать получение результатов для произвольных значений энергии в заданном диапазоне. Такая интерполяция позволит более точно определять значения $\Delta g(x)$ и, как следствие, правильно оценивать вклад глюонов в спин протона.

Методика исследования

Для подтверждения возможности расширения ГСС для предсказания рождения прямых фотонов при разных значениях энергии $\sqrt{s_{NN}}$ и в силу отсутствия на данный момент экспериментальных данных, обучение модели велось на предварительно смоделированных данных. В качестве генератора Монте-Карло была использована программа PYTHIA8 [5, 6].

Основные параметры программы Pythia8, использованные нами в данной работе, были следующими [5]:

PromptPhoton: qg2qgamma = on,
 PromptPhoton: qqbar2ggamma = on,
 MultipartonInteractions: pT0Ref = 2.2,
 NNPDF31_nlo_as_0118 [7] (для неполяризованных столкновений),
 NNPDFpol11_100 [8] (для поляризованных событий).



В качестве диапазона значений начальной энергии столкновений $\sqrt{s_{NN}}$ была рассмотрена энергетическая область 9 – 27 ГэВ. Выбор диапазона диктовался экспериментальными условиями SPD на коллайдере NICA [4]. Для обучения модели были сгенерированы выборки при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 9, 15, 21$ и 27 ГэВ, причем для столкновений как неполяризованных, так и поляризованных протонов (далее будет использован термин «события»). Размер каждой выборки составлял 500 тыс. событий (столкновений).

По аналогии с методикой предыдущей работы [5], из сгенерированных выборок были извлечены z -компоненты импульса p_{zq1} (первого) и p_{zq2} (второго) партонов, а также p_x -, p_y - и p_z -компоненты импульса рожденного прямого фотона. При этом для обучения ГСС были использованы не сами компоненты p_{zq1} и p_{zq2} , а их преобразованные версии – $T(p_{zq1})$ и $T(p_{zq2})$ в соответствии с результатами работы [5].

Функция потерь ГСС оставалась неизменной и представляла собой функцию наименьших квадратов [5]. Число эпох для обучения было увеличено до 2 тыс. Величина батча также была увеличена до 2 тыс. Оптимизатор градиентного спуска был заменен на Adam с такими значениями параметров:

шаг обучения $2 \cdot 10^{-4}$ был взят для генератора и дискриминатора, коэффициенты забывания для градиентов и вторых моментов градиентов $\beta_1 = 0,9$ и $\beta_2 = 0,5$, соответственно [9].

Архитектура генератора основана на результатах предыдущей работы [5]. На вход генератора поступает 128-мерный вектор с элементами из нормального распределения. В качестве условных переменных использованы начальная энергия $\sqrt{s_{NN}}$ и тип поляризации события. Условные переменные объединяются со 128-мерным вектором, чтобы генератор мог учитывать различные условия для генерации. Число скрытых слоев было увеличено до 8. Каждый скрытый слой обладает 512 нейронами и активационной функцией "Leaky ReLU" с коэффициентом 0,2 [10]. Дополнительно к каждому скрытому слою применяется процедура ResidualAdd [11], чтобы сделать процесс обучения более стабильным при большом числе скрытых слоев. Процедура ResidualAdd заключается в том, что выход каждого слоя после функции активации суммируется с выходом предыдущего слоя. Такой подход позволяет решить проблему затухающих градиентов при большом числе слоев [11]. Выход генератора содержит 5 генерируемых величин:

$$T(p_{zq1}), T(p_{zq2}), p_x, p_y, p_z.$$

Дискриминатор обладает почти такой же архитектурой, как у генератора. На вход дискриминатор принимает 6 сгенерированных генератором величин, а также условные переменные. Параметры скрытых слоев дискриминатора повторяют параметры скрытых слоев генератора за одним исключением: к каждому скрытому слою применяется нормализация спектра (Spectral Normalization) [12]. Выход с дискриминатора содержит один нейрон, который отражает степень уверенности дискриминатора в том, что на вход ему поданы реальные данные, а не полученные с помощью генератора.

Результаты моделирования

Для демонстрации качества работы ГСС при различных начальных энергиях $\sqrt{s_{NN}}$ ниже приведена только часть из полного набора величин; это p_{zq1} и $p_T = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$, а также значения DLSA. Остальные величины не представлены ввиду подобия их распределений.

На рис. 1, а представлены распределения по импульсу партона p_{zq1} при столкновениях неполяризованных протонов. Сравнение результатов моделирования с помощью PYTHIA8 и предсказаний ГСС проводилось для энергий $\sqrt{s_{NN}}$, ГэВ: 9, 15, 21 и 27, на которых происходило обучение модели, а также для промежуточных значений (ГэВ): 12, 18, 24 и 30. При построении графиков на рис. 1 каждое следующее распределение для наглядности смещено на 10 ГэВ (чтобы разделить распределения). Анализ графиков показывает, что модель ГСС обеспечивает хорошую точность предсказаний как для значений энергии, при которых проводилось обучение, так и при интерполированных значениях.

Аналогичная картина наблюдается на рис. 1, б, где представлены распределения по поперечному импульсу фотона p_T при столкновениях поляризованных протонов. Стоит отметить, что модель сохраняет точность предсказаний и в этом случае.

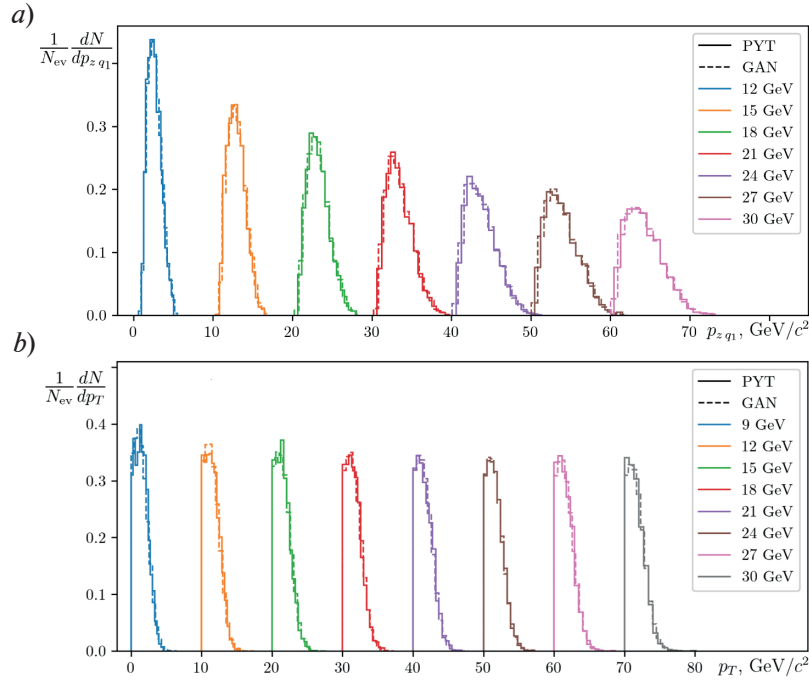


Рис. 1. Сравнение результатов предсказаний ГСС (сплошные линии) и моделирования (пунктиры) для распределений по импульсам партонов p_{zq1} (a) и прямых фотонов p_T (b) при столкновениях неполяризованных (a) и поляризованных (b) протонов при различных значениях начальных энергий $\sqrt{s_{NN}}$.

(см. легенды: энергии указаны в ГэВ, причем нечетные значения — это величины при процедуре обучения, а четные — интерполированные величины). Число событий $N_{ev} = 500$ тыс.; для моделирования использована программа PYTHIA8

На рис. 2 представлены зависимости асимметрий A_{LL} от доли импульса $x_T = \frac{2p_T}{\sqrt{s_{NN}}}$ прямого фотона, рассчитанные на основе предсказания ГСС и моделирования с помощью PYTHIA8. Из этого рисунка следует, что предсказания ГСС позволяют получать значения асимметрий A_{LL} , совпадающие со значениями PYTHIA8 (с точностью до погрешностей), во всем рассмотренном диапазоне значений начальной энергии $\sqrt{s_{NN}}$.

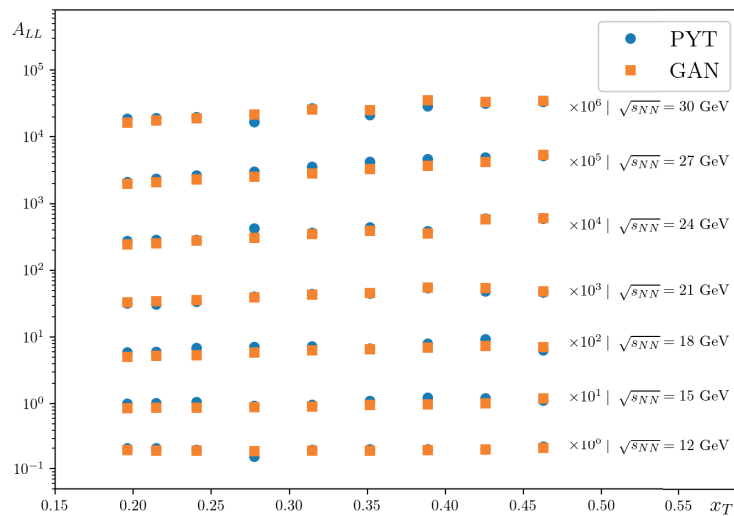


Рис. 2. График зависимости асимметрии A_{LL} от доли импульса x_T прямого фотона при столкновениях продольно-поляризованных протонов при различных начальных энергиях $\sqrt{s_{NN}}$ в диапазоне 12 — 30 ГэВ. Данные получены с помощью ГСС и PYTHIA8 (оранжевые квадратики и синие кружки соответственно).

Уровень погрешностей имеет порядок размера маркеров



Заключение

В работе продолжено развитие ранее разработанной модели генеративно-состязательной сети (ГСС) для предсказания характеристик рожденного прямого фотона в столкновениях протонов. Рассмотрена возможность более широкого применения модели для предсказания событий, и теперь ее использование позволяет предсказывать характеристики прямого фотона при различных начальных энергиях $\sqrt{s_{NN}}$ в диапазоне 9 – 27 ГэВ.

Показано, что модель с высокой точностью предсказывает результаты протонных столкновений как при значениях энергии, при которых проводилось обучение, так и при ее промежуточных значениях. Отсюда можно сделать вывод о способности модели к интерполяции рассмотренных величин по значениям начальной энергии $\sqrt{s_{NN}}$. Точность предсказаний сохраняется как в случае столкновений неполяризованных протонов, так и при столкновениях продольно-поляризованных ($p \rightarrow p^{(*)}$).

Кроме того, показано, что модель ГСС сохраняет кинематические зависимости между генерируемыми величинами, что позволяет рассчитывать значения двойной продольной спиновой асимметрии A_{LL} . Значения A_{LL} также можно получать при любых значениях энергии $\sqrt{s_{NN}}$ в рассмотренном диапазоне 9 – 30 ГэВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arbuzov A., Bacchetta A., Butenschoen M., et al. 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.
2. 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 $\sqrt{s} = 510$ GeV // Physical Review D. 2020. Vol. 102. No. 3. P. 032001.
3. Adare A., Aidala C., Ajitanand N. N., et al. (PHENIX Collaboration), Measurements of double-helicity asymmetries in inclusive J/ψ production in longitudinally polarized $p + p$ collisions at $\sqrt{s} = 510$ GeV // Physical Review D. 2016. Vol. 94. No. 11. P. 112008.
4. Guskov A. and on behalf of the SPD working group. Physics with prompt photons at SPD // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1435. P. 012035.
5. Лобанов А. А., Бердников Я. А. Асимметрии прямых фотонов в продольно-поляризованных протон-протонных столкновениях при энергии 27 ГэВ // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2025. Т. 18. № 1. С. 142–148.
6. Sjöstrand T., Mrenna S., Skands P. A brief introduction to PYTHIA 8.1 // Computer Physics Communications. 2008. Vol. 178. No. 11. Pp. 852–867.
7. Ball R. D., Bertone V., Carrazza S., et al. Parton distributions from high-precision collider data // The European Physical Journal C. 2017. Vol. 77. 04 October. P. 663.
8. Nocera E. R., Ball R. D., Forte S., Ridolfi G., Rojo J. A first unbiased global determination of polarized PDFs and their uncertainties // Nuclear Physics B. 2014. Vol. 887. October. Pp. 276–308.
9. Imran Khan M. J., Ismail R. A., Syed Qamrun N. A. Optimization algorithm for wide and deep neural network // Knowledge Engineering and Data Science. 2019. Vol. 2. No. 1. Pp. 41–46.
10. Sharma O. A new activation function for deep neural network // Proceedings of the International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (COMITCon); IEEE, Faridabad, India, February 14–16, 2019. Pp. 84–86.
11. Fengxiang H., Liu T., Tao D. Why ResNet works? Residuals Generalize. arXiv: 1904.01367, 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.01367>.
12. Miyato T., Kataoka T., Koyama M., Yoshida Y. Spectral normalization for Generative Adversarial Networks. arXiv: 1802.05957/v1, 2018. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1802.05957>.

REFERENCES

1. Arbuzov A., Bacchetta A., Butenschoen M., et al., On the physics potential to study the gluon content of proton and deuteron at NICA SPD, Prog. Part. Nucl. Phys. 119 (July) (2021) 103858.
2. 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 $\sqrt{s} = 510$ GeV, Phys. Rev. D. 102 (3) (2020) 032001.
3. Adare A., Aidala C., Ajitanand N. N., et al. (PHENIX Collaboration), Measurements of double-helicity asymmetries in inclusive J/ψ production in longitudinally polarized $p + p$ collisions at $\sqrt{s} = 510$ GeV, Phys. Rev. D. 94 (11) (2016) 112008.
4. Guskov A. and on behalf of the SPD working group, Physics with prompt photons at SPD, J. Phys.: Conf. Ser. 1435 (2020) 012035.
5. Lobanov A. A., Berdnikov Ya. A., Direct photon asymmetries in the longitudinally polarized proton-proton collisions at an energy of 27 GeV, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 18 (1) (2025) 142–148 (in Russian).
6. Sjöstrand T., Mrenna S., Skands P., A brief introduction to PYTHIA 8.1 Comput. Phys. Commun. 178 (11) (2008) 852–867.
7. Ball R. D., Bertone V., Carrazza S., et al., Parton distributions from high-precision collider data, Eur. Phys. J. C. 77 (04 Oct.) (2017) 663.
8. Nocera E. R., Ball R. D., Forte S., et al., A first unbiased global determination of polarized PDFs and their uncertainties, Nucl. Phys. B. 887 (Oct) (2014) 276–308.
9. Imran Khan M. J., Ismail R. A., Syed Qamrun N. A., Optimization algorithm for wide and deep neural network, Knowl. Eng. Data Sci. 2 (1) (2019) 41–46.
10. Sharma O., A new activation function for deep neural network, Proc. Int. Conf. on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (COMITCon); IEEE, Faridabad, India, Febr. 14–16 (2019) 84–86.
11. Fengxiang H., Liu T., Tao D., Why ResNet works? Residuals Generalize. arXiv: 1904.01367, 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.01367>.
12. Miyato T., Kataoka T., Koyama M., Yoshida Y., Spectral normalization for Generative Adversarial Networks, arXiv: 1802.05 957/v1, 2018. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1802.05957>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЛОБАНОВ Андрей Александрович — студент Физико-механического института Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
lobanov2.aa@edu.spbstu.ru
ORCID: 0000-0002-8910-4775

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****LOBANOV Andrey A.**

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
lobanov2.aa@edu.spbstu.ru
ORCID: 0000-0002-8910-4775

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 18.03.2025. Одобрена после рецензирования 24.03.2025.
Принята 24.03.2025.*

Received 18.03.2025. Approved after reviewing 24.03.2025. Accepted 24.03.2025.