Научная статья
УДК 539.12
DOI: https://doi.org/10.18721/JPM18112

АСИММЕТРИИ ПРЯМЫХ ФОТОНОВ В ПРОДОЛЬНО-ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ПРОТОН-ПРОТОННЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ ПРИ ЭНЕРГИИ 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 рассмотрено применение генеративно-состязательной сети (ГСС) для предсказания рождения прямых фотонов при столкновении неполяризованных либо продольно-поляризованных протонов при энергии $\sqrt{s}$ = 27 ГэВ. Установлено, что ГСС позволяет точно воспроизводить распределения физических характеристик рожденного прямого фотона. Показана возможность рассчитывать двойную продольную спиновую асимметрию A_{LL}, взяв за основу величины, предсказанные ГСС.

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

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

Для цитирования: 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. DOI: https://doi.org/10.18721/ JPM.18112

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.18112

DIRECT PHOTON ASYMMETRIES IN THE LONGITUDINALLY POLARIZED PROTON-PROTON COLLISIONS AT AN ENERGY OF 27 GeV

A. A. Lobanov ✉, **Ya. A. Berdnikov**

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

✉ lobanov2.aa@edu.spbstu.ru

Abstract. In this paper, we explore the potential of the generative-adversarial network (GAN) in order to predict the production of direct photons in the collision of unpolarized or longitudinally polarized protons at an energy of $\sqrt{s}$ = 27 GeV. Our findings demonstrate that the GAN has been established to be capable of accurately reproducing the distributions of the physical characteristics of the produced direct photons. Moreover, the possibility to calculate the double longitudinal spin asymmetry of ALL was shown taking the values predicted by the GAN as a basis.

Keywords: asymmetry, 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-2024-0033).

© Лобанов А. А., Бердников Я. А., 2025. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

For citation: 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. DOI: https://doi.org/10.18721/JPM.18112

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

Введение

Формирование спина протона является одной из проблем современной физики, не имеющей исчерпывающего решения [1]. На данный момент отсутствует полное теоретическое описание вкладов кварков и глюонов в суммарный спин протона. В связи с этим необходимы эксперименты, которые бы позволили объяснить, как и при каких условиях формируется спин нуклонов [1].

Одним из таких экспериментов, возможно, станет использование детектора SPD (Spin Physics Detector), регистрирующего столкновение пучков на коллайдере NICA [1]. Согласно физической программе, планируется изучение вклада глюонов в спин протона [1]. Для описания этого вклада используют спиральные функции распределения глюона $\Delta g(x)$ [1].

При столкновении продольно-поляризованных протонов при рождении частиц возникает двойная продольная спиновая асимметрия (Double Longitudinal Spin Asymmetry (DLSA)). Исследования DLSA проводились в процессах рождения заряженных пионов [2], (J/ψ)-мезонов [3], струй (jets) [4]. Однако их описание осложняется тем, что требует использования моделей адронизации.

Для того чтобы избежать использования сложных моделей адронизации при изучении DLSA, можно использовать реакцию рождения прямых фотонов (direct photons) [5].

Однако при изучении прямых фотонов возникают другие затруднения. Во-первых, число таких фотонов невелико в каждом событии столкновения протонов [5]. Во-вторых, есть сложности с выделением прямых фотонов в событии, связанные с наличием других источников фотонов, например, после распада нейтрального пиона π^0 [5].

Одним из возможных подходов к устранению перечисленных проблем является применение генеративных методов машинного обучения [6]. С их помощью появляется возможность предсказывать рождение прямых фотонов в результате протон-протонных столкновений.

Особый интерес представляет возможность такого предсказания в случае столкновений поляризованных протонов. Если иметь прогноз относительно этих столкновений, как отмечено выше, то открывается доступ к спиральной функции распределения глюона $\Delta g(x)$.

Для вышеописанных задач целесообразно использовать генеративно-состязательную сеть (ГСС) [7]. Последняя ранее была нами использована для построения генератора событий глубоконеупругого лептон-протонного рассеяния и показала хорошие результаты [8].

Методика исследования

Предварительные замечания. Рассмотрим более подробно рождение прямых фотонов в столкновениях протонов. Прямыми называют фотоны, которые рождаются при рассеянии партонов. Наибольший вклад в общее сечение процесса рождения прямых фотонов дают два явления: комптоновское рассеяние $gq(\bar{q}) \rightarrow \gamma q(\bar{q})$ (наибольший вклад) и кварк-антикварковая аннигиляция $q\bar{q} \rightarrow \gamma g$ [5]. Что касается рождения двух прямых фотонов в конечном состоянии, например по реакции $gg \rightarrow \gamma\gamma$, то оно характеризуется вкладом в указанное сечение процесса на уровне одного процента [5].

В рамках теоремы о факторизации сечение процесса для прямых фотонов можно записать следующим образом [5]:

$$d\sigma_{AB\rightarrow\gamma X} = \sum_{a,b=q\bar{q},g} \int dx_a dx_b f_a^A\left(x_a, Q^2\right) f_b^B\left(x_b, Q^2\right) d\sigma_{ab\rightarrow\gamma x}\left(x_a, x_b, Q^2\right), \quad (1)$$

© Lobanov A. A., Berdnikov Ya. A., 2025. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

где f_a^A, f_b^B – функции распределения партонов для адронов A и B; x_a, x_b – доли импульсов адрона A либо B, которую несет партон a либо b; Q^2 – квадрат 4-импульса переданного импульса в процессе рассеяния партонов a и b; $\sigma_{ab\to\gamma x}(x_a, x_b, Q^2)$ – сечение рассеяния партонов a и b, которое можно рассчитать в рамках квантовой хромодинамики [5].

В случае столкновения продольно-поляризованных протонов $p^{\rightarrow}p^{\rightarrow(\leftarrow)}$ DLSA определяется как

$$A_{LL} = \frac{d\Delta\sigma}{d\sigma}, \tag{2}$$

где $\Delta\sigma$ – сечение рождения при столкновении продольно-поляризованных протонов; σ – сечение рождения в случае столкновения неполяризованных протонов.

Сечение рождения прямых фотонов $d\Delta\sigma$ в случае столкновения поляризованных протонов описывается с помощью PDF, но уже для поляризованных партонов [5]. На основе этих функций, аналогично выражению (1), сечение рождения прямых фотонов запишется как

$$d\Delta\sigma_{AB\to\gamma X} = \sum_{a,b=q\bar{q},g} \int dx_a dx_b \Delta f_a^A\left(x_a, Q^2\right)\Delta f_b^B\left(x_b, Q^2\right) d\Delta\sigma_{ab\to\gamma x}\left(x_a, x_b, Q^2\right), \tag{3}$$

где Δf_a^A, Δf_b^B – функции распределения поляризованных партонов для адронов A и B; $\Delta\sigma_{ab\to\gamma x}(x_a, x_b, Q^2)$ – сечение рассеяния поляризованных партонов a и b [5].

Описание методики. Для получения данных применялся генератор Монте-Карло PYTHIA8 [9]. Использование моделирования продиктовано отсутствием экспериментальных данных, так как на данный момент SPD находится еще на этапе строительства.

Для изучения реакции рождения прямых фотонов были использованы следующие параметры PYTHIA8;

PromptPhoton: qg2qgamma = on,

PromptPhoton: qqbar2ggamma = on,

MultipartonInteractions: pT0Ref = 2.2.

При расчете столкновений неполяризованных протонов использовался PDF NNPDF31_nlo_as_0118 [10].

При расчете столкновений поляризованных протонов был использован PDF NNPDFpol11_100 [11]. Этот PDF был измерен для продольно-поляризованных протон-протонных столкновений $p^{\rightarrow}p^{\rightarrow(\leftarrow)}$. Включение его в расчет PYTHIA8 позволяет учитывать вклад от поляризации протонов, что ранее применялось, например, в работе [3].

Были сгенерированы выборки по 500 тыс. столкновений протонов с использованием генератора PYTHIA8, настроенного с вышеописанными параметрами как с неполяризованным PDF (NNPDF31_nlo_as_0118), так и с поляризованным PDF (PDFpol11_100). Оба расчета проводились при энергии центра масс $\sqrt{s}$ = 27 ГэВ.

Из сгенерированных выборок получены следующие величины:

p_{zq1}, p_{zq2} – z-компоненты импульса первого и второго партонов, взаимодействие которых рождает фотон;

p_x-, p_y- и p_z-компоненты импульса рожденного прямого фотона.

Выбор такой совокупности величин обусловлен ее достаточностью для кинематического описания столкновения и расчета асимметрии A_{LL} по формуле (3). Использование только z-компонент импульса партонов продиктовано нулевыми значениями остальных компонент (x- и y-) в системе центра масс протонов, сталкивающихся вдоль оси z.

При обучении нейронной сети был использован другой набор величин, а именно

$$T(p_{z\,q1}) = \ln(p_{z\,q1}),\ T(p_{z\,q2}) = \ln(-p_{z\,q2}),\ p_x, p_y, p_z.$$

Преобразованные величины $T(p_{z\,q1})$ и $T(p_{z\,q2})$ применяются потому, что после преобразований распределение величин становится более гладким и оказывается ближе к нормальному распределению. Указанная особенность положительно сказывается на обучении ГСС [8].

Формирование архитектуры ГСС осуществлялось на основе результатов, достигнутых нами в работе [8]. Использовался тип ГСС с функцией потерь вида, характерного для метода наименьших квадратов [12].

Процесс обучения ГСС длился 1 тыс. эпох. Величина батча была выбрана равной 500. RMSProp [13] использовался в качестве оптимизатора градиентного спуска, шаги

обучения для генератора и дискриминатора составляли $2 \cdot 10^{-4}$ и 10^{-4}, соответственно.

Архитектура генератора в ГСС основана на обработке 128-мерного вектора, элементы которого распределены по нормальному закону с нулевым средним и единичным стандартным отклонениями. Этот вектор дополняется информацией о типе поляризации события, что позволяет генератору предсказывать данные с нужной поляризацией. Генератор обладает семью скрытыми слоями, каждый из которых содержит 512 нейронов. В качестве активационной функции в каждом слое применяется функция "Leaky ReLU" с коэффициентом 0,2 [14]. На выходе генератора находится шесть нейронов, каждый из которых соответствует определенной физической величине: $T(p_{z\,q1})$, $T(p_{z\,q2})$, p_x, p_y, p_z. Дискриминатор принимает в свою очередь на вход данные, предсказанные генератором, и информацию о типе поляризации. Архитектура дискриминатора аналогична архитектуре генератора, но с добавлением нормализации спектра (Spectral Normalization) для каждого скрытого слоя [14]. Выход дискриминатора представляет собой единственный нейрон с линейной функцией активации.

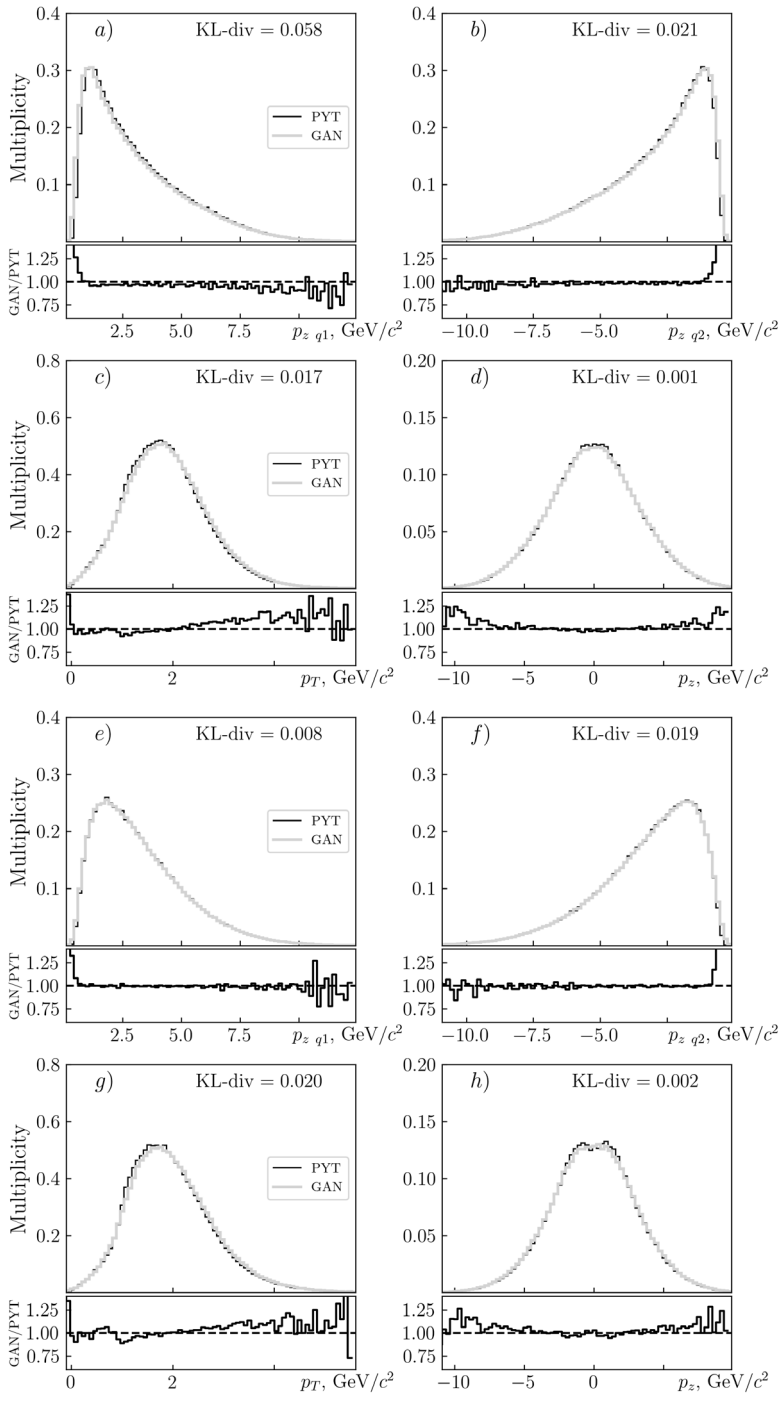

Рис. 1. Сравнение результатов предсказаний ГСС и моделирования с помощью PYTHIA8 (серые и черные кривые, соответственно) для импульсов партонов p_{zq1} и p_{zq2} (*a*, *b*, *e*, *f*) и прямых фотонов p_T и p_z (*c*, *d*, *g*, *h*) для случаев неполяризованных (*a* – *d*) и продольно-поляризованных (*e* – *h*) протонов

Результаты моделирования

На рис. 1 представлены результаты моделирования PYTHIA8 и предсказания ГСС для распределений импульсов партонов p_{zq1} и p_{zq2}, а также прямых фотонов $p_T = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$ и p_z при столкновениях между неполяризованными и между продольно-поляризованными протонами с энергией центра масс $\sqrt{s} = 27$ ГэВ. Импульсы выражены в единицах ГэВ/c^2. По вертикальным осям отложена множественность (Multiplicity), которая определяется как количество отсчетов в каждом бине гистограммы, нормированное на общее число событий. Для каждой гистограммы приведены отношения предсказаний ГСС к PYTHIA8 (GAN/PYT). Кроме того, в качестве численной

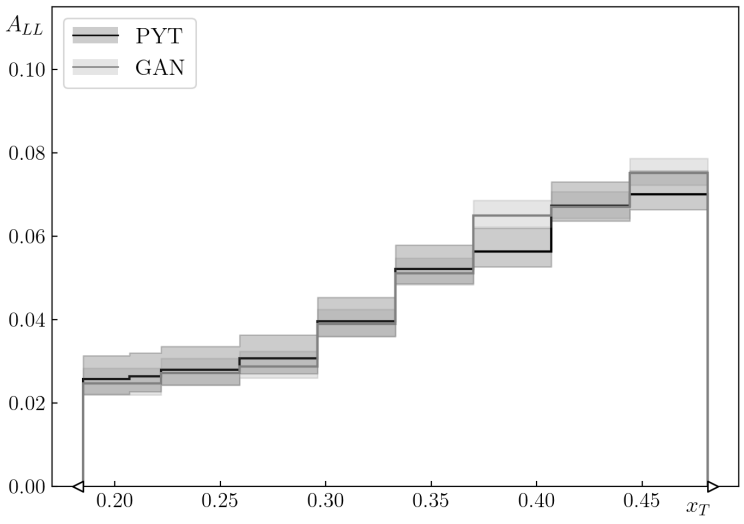

Рис. 2. График зависимости асимметрий A_{LL} от доли импульса x_T прямого фотона при столкновении продольно-поляризованных протонов, при энергии центра масс $\sqrt{s} = 27$ ГэВ.

Закрашенная область отражает неопределенность, связанную с выбором масштаба сильного взаимодействия $(p_T/2)^2 < Q^2 < (2p_T)^2$. Данные получены с помощью ГСС и PYTHIA8 (кривые серого и черного цветов, соответственно)

оценки сходства распределений величин представлены значения расстояния Кульбака – Лейблера (KL-div) [16] для каждого распределения.

Сравнение результатов моделирования и предсказания ГСС показывает, что распределения, полученные с помощью ГСС, практически не отличаются от результатов моделирования PYTHIA8, о чем свидетельствуют графики отношений предсказаний ГСС и PYTHIA8. Что же касается случая продольно-поляризованных протон-протонных столкновений, то и для него не нарушаются предсказания ГСС.

На рис. 2 представлена зависимость асимметрий A_{LL} (получена по формуле (2)) от доли импульса $x_T = \frac{2p_T}{\sqrt{s}}$ прямого фотона, рассчитанных 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 неопределенностей. Эти неопределенности связаны с выбором масштаба сильного взаимодействия в диапазона $(p_T/2)^2 < Q^2 < (2pT)^2$.

Заключение

В работе рассмотрено применение генеративно-состязательной сети (ГСС) для предсказания характеристик рожденного прямого фотона в столкновении протонов при энергии центра масс $\sqrt{s} = 27$ ГэВ.

Установлено, что разработанная модель ГСС обладает высокой точностью в предсказании компонент импульса прямого фотона, а также p_z-компонент импульса партонов, которые породили прямой фотон при своих взаимодействиях в случаях столкновения как неполяризованных $(p + p)$, так и продольно-поляризованных $(p^{\rightarrow}p^{\rightarrow(\leftarrow)})$ протонов.

Кроме того, показано, что на основе предсказаний ГСС можно точно предсказывать значения двойной продольной спиновой асимметрии A_{LL}.

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. **Djawotho P. and (forthe STAR Collaboration).** Gluon polarization and jet production at STAR // Journal of Physics: Conference Series. 2011. Vol. 295. P. 012061.

5. **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.

6. **Harshvardhan G. M., Mahendra K. G., Manjusha P., Siddharth S. R.** A comprehensive survey and analysis of generative models in machine learning // Computer Science Review. 2020. Vol. 38. November. P. 100285.

7. **Goodfellow I., Pouget-Abadie J., Mirza M., Xu B., Warde-Farley D., Ozair S., Courville A., Bengio Y.** Generative adversarial networks // Communications of the ACM. 2020. Vol. 63. No. 11. Pp. 139–144.

8. **Лобанов А. А., Бердников Я. А., Музяев Е. В.** Генеративно-состязательная сеть как основа генератора полуинклюзивного глубоконеупругого рассеяния лептона на поляризованном протоне // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2024. Т. 17. № 1. С 93–102.

9. **Sjöstrand T., Mrenna S., Skands P.** A brief introduction to PYTHIA 8.1 // Computer Physics Communications. 2008. Vol. 178. No. 11. Pp. 852–867.

10. **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.

11. **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.

12. **Mao X., Li Q., Xie H., Lau R. Y. K., Wang Zh., Smolley S. P.** On the effectiveness of least squares generative adversarial networks // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2019. Vol. 41. No. 12. Pp. 2947–2960.

13. **Xu D., Zhang Sh., Zhang H., Mandic D. P.** Convergence of the RMSProp deep learning method with penalty for nonconvex optimization // Neural Networks. 2021. Vol. 139. July. Pp. 17–23.

14. **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.

15. **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.

16. **Shlens J.** Notes on Kullback – Leibler divergence and likelihood. arXiv: 1404.2000, 2014. https://doi.org/10.48550/arXiv.1404.2000.

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, Progr. 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. **Djawotho P. and (forthe STAR Collaboration),** Gluon polarization and jet production at STAR, J. Phys. Conf. Ser. 295 (2011) 012061.

5. **Guskov A. and on behalf of the SPD working group.** Physics with prompt photons at SPD, J. Phys. Conf. Ser. 1435 (2020) 012035.

6. **Harshvardhan G. M., Mahendra K. G., Manjusha P., Siddharth S. R.,** A comprehensive survey and analysis of generative models in machine learning, Comp. Sci. Rev. 38 (Nov) (2020) 100285.

7. **Goodfellow I., Pouget-Abadie J., Mirza M., et al.,** Generative adversarial networks, Commun. ACM. 63 (11) (2020) 139–144.

8. **Lobanov A. A., Berdnikov Ya. A., Muzyaev E. V.,** A generative adversarial network as the basis for a semi-inclusive deep inelastic lepton scattering generator on a polarized proton, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 17 (1) (2024) 93–102 (in Russian).

9. **Sjöstrand T., Mrenna S., Skands P.,** A brief introduction to PYTHIA 8.1, Comput. Phys. Commun. 178 (11) (2008) 852–867.

10. **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.

11. **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.

12. **Mao X., Li Q., Xie H., et al.,** On the effectiveness of least squares generative adversarial networks, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. 41 (12) (2019) 2947–2960.

13. **Xu D., Zhang Sh., Zhang H., Mandic D. P.,** Convergence of the RMSProp deep learning method with penalty for nonconvex optimization, Neur. Net. 139 (July) (2021) 17–23.

14. **Sharma O.,** A new activation function for deep neural network, Proc. Int. Conf. Machine Learn., Big Data, Cloud and Parallel Comput. (COMITCon). IEEE, Faridabad, India, Febr. 14–16 (2019) 84–86.

15. **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.

16. **Shlens J.,** Notes on Kullback – Leibler divergence and likelihood, arXiv: 1404.2000, 2014. https://doi.org/10.48550/arXiv.1404.2000.

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 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.

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2025