

Ядерная физика

Научная статья

УДК 539.12

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17110>

ГЕНЕРАТИВНО-СОСТЯЗАТЕЛЬНАЯ СЕТЬ КАК ОСНОВА ГЕНЕРАТОРА ПОЛУИНКЛЮЗИВНОГО ГЛУБОКОНЕУПРУГОГО РАССЕЯНИЯ ЛЕПТОНА НА ПОЛЯРИЗОВАННОМ ПРОТОНЕ

А. А. Лобанов ✉, **Я. А. Бердников**, **Е. В. Музьяев**

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Санкт-Петербург, Россия

✉ lobanov2.aa@edu.spbstu.ru

Аннотация. В статье предложена разработанная нейронная сеть, позволяющая получать результаты полуинклюзивного глубоконеупругого рассеяния заряженных лептонов на поляризованных протонах с рождением пионов или странных K -мезонов. Рассмотрены состояния поляризации протона (поперечная и продольная). Выбран диапазон начальных энергий сталкивающихся частиц 20 – 100 ГэВ в системе центра масс, характерный для электрон-ионных коллайдеров, проектируемых в настоящее время. Показано, что с помощью предложенной разработки можно с высокой точностью предсказывать физические характеристики конечного лептона и адрона, а также различные варианты поляризации протона.

Ключевые слова: полуинклюзивное глубоконеупругое рассеяние, асимметрия, машинное обучение, нейронная сеть, генеративно-состязательная сеть

Для цитирования: Лобанов А. А., Бердников Я. А., Музьяев 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. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17110>

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.17110>

A GENERATIVE ADVERSARIAL NETWORK AS THE BASIS FOR A SEMI-INCLUSIVE DEEP INELASTIC LEPTON SCATTERING GENERATOR ON A POLARIZED PROTON

A. A. Lobanov ✉, **Ya. A. Berdnikov**, **E. V. Muzyaev**

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

✉ lobanov2.aa@edu.spbstu.ru

Abstract. A neural network, that allows someone to obtain results for semi-inclusive deep inelastic scattering of charged leptons on polarized protons, with the production of pions or strange K mesons, has been developed in this study. The research covered both transverse and longitudinal polarizations of the proton. A range of initial energies of colliding particles was chosen from 20 to 100 GeV in a central mass system. The range is typical for electron-ion colliders currently being designed. It has been shown that it is possible to predict the physical

characteristics of the final lepton and hadron with high accuracy as well as different variants of proton polarization using the proposed neural network.

Keywords: semi-inclusive deep inelastic scattering, asymmetries, machine learning, neural network, generative-adversarial network

For citation: 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. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17110>

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

Введение

Глубоконеупругое рассеяние (ГНР) заряженных лептонов на протонах представляет собой один из процессов, способствующих изучению внутренней структуры протона [1].

Хорошо известно, что в процессе ГНР рождается большое количество различных частиц.

Экспериментальное исследование и теоретические подходы к описанию таких процессов, как правило, сложны и требуют весьма непростых детекторных систем и привлечения для анализа экспериментальных результатов различных феноменологических моделей, связанных, например, с адронизацией [2]. Поэтому эксклюзивные исследования ГНР пока не проводятся.

Однако исследуются, как правило, инклюзивное (с регистрацией только рассеянного лептона) и полуинклюзивное (с регистрацией рассеянного лептона и одного из родившихся адронов) ГНР.

Изучение полуинклюзивного ГНР лептонов на протонах значительно усложняется, если взаимодействие лептона происходит с поляризованным (продольно либо поперечно) протоном [3].

В то же время эксперименты с поляризованными частицами существенно более информативны и позволяют вплотную подойти к решению проблем, связанных с формированием спина протона.

Учет поляризации протона в начальном состоянии полуинклюзивного ГНР дает доступ к различным спиновым асимметриям, которые возникают в конечном состоянии (после процесса полуинклюзивного ГНР) [3].

При поперечной поляризации протона возникают поперечные односпиновые асимметрии, которые могут быть описаны в рамках эффектов Сиверса [4] и Коллинза [3]. С помощью асимметрии Сиверса A_{Siv} можно получить доступ к функциям партонного распределения Сиверса, которые описывают корреляции между поперечными импульсами кварков и спином нуклона. Асимметрии Коллинза A_{Col} помогают измерять поперечные функции партонного распределения вместе с функциями фрагментации Коллинза [3]. Все эти функции имеют большое значение в описании внутренней структуры нуклона [3].

В случае продольной поляризации протона возникает продольная односпиновая асимметрия A_{ul} . Ее значения дают доступ к T -нечетным корреляционным функциям (партонным распределениям и фрагментационным функциям), которые возникают из-за обмена между кварками и продольно-поляризованными глюонами [5]. Относительно недавно было показано, что ненулевые T -нечетные распределения партонов совместимы с инвариантностью сильного взаимодействия относительно обращения времени [5].

Для исследования любой из вышеупомянутых асимметрий и связанных с ними механизмов их образования, которые определяют партонными функциями распределения и функциями фрагментации, требуются большие объемы данных, получаемых в каждом эксперименте. Помимо этого, необходимо выполнять экспериментальные исследования при большом наборе начальных энергий (опорные точки). Анализ результатов таких экспериментов позволяет извлекать информацию о функциях распределения партонов и функциях фрагментации [6].

В силу ограниченности (в том числе и финансовой) экспериментальных возможностей, нельзя получить достаточное количество опорных точек, на основе которых выполняется аппроксимация функций распределения. Вследствие этого возникает необходимость разработки программ, которые были бы способны к интерполяции или экстраполяции экспериментальных данных по выбранным параметрам. Повышение объемов данных (за счет интерполяции и экстраполяции) должно положительно сказываться на точности получаемых функций распределения.

Для решения проблем, связанных с необходимостью работы с большими массивами данных, можно использовать методы машинного обучения и, в частности, генеративно-состязательные сети (ГСС) [7].

Применение ГСС позволяет разрабатывать алгоритмы и создавать компьютерные программы (называемые генераторами событий), которые способны быстро получать нужные величины из первоисточника, без специального моделирования взаимодействия частиц и детектора. Также стоит отметить, что подобные программы позволяют избежать использования больших объемов дискового пространства, так как сохраняют в себе целевые распределения в виде небольшого числа параметров [9].

Методика исследования

Как было отмечено во введении, современное состояние развития техники эксперимента, финансовые возможности мирового научного сообщества и наличие большого количества конкурирующих физических задач не позволяют получать в экспериментальных исследованиях достаточное количество опорных точек, которые можно было бы использовать в процессе машинного обучения.

В силу этого обстоятельства (отсутствие достаточного количества экспериментальных данных) в настоящей работе опорные точки были получены в результате моделирования полуинклюзивного глубоконеупругого рассеяния лептонов на поляризованном протоне. Моделирование было проведено с помощью программы PYTHIA8 на основе генератора Монте-Карло [10], расширенной за счет использования программного пакета StringSpinner [11]. Последний включает реализацию модели string- 3P_0 [12], основанную на лундовской струнной модели [2], что дает возможность учитывать фрагментацию поляризованных кварков при адронизации.

Суть лундовской модели адронизации можно проиллюстрировать на упрощенной схеме (рис. 1) [12].

Будем полагать, что протон, с которым взаимодействует заряженный лептон, состоит из кварка A и остатка B (q_A и \bar{q}_B , соответственно, на рис. 1) [12].

Виртуальный фотон γ^* , испущенный заряженным лептоном, поглощается одним из кварков неполяризованного протона (например, кварк q_A на рис. 1). Фотон γ^* передает

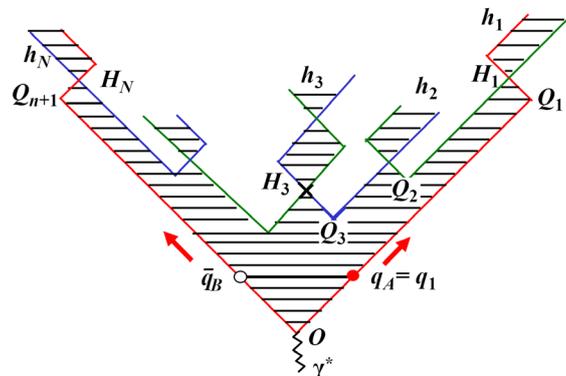


Рис. 1. Упрощенная схема процесса адронизации:

O – точка взаимодействия; Q_1, Q_2, \dots, Q_{n+1} – точки разрыва струны;
 H_1, H_2, \dots, H_N – точки рождения адронов h_1, h_2, \dots, h_N ; q_A, \bar{q}_B – провзаимодействовавший кварк A и остаток B , соответственно; γ^* – виртуальный фотон; стрелки указывают направления разлета q_A и \bar{q}_B

кварку A свой импульс, вследствие чего начинается разлет кварка A и остатка протона B . Между объектами A и B как результат цветового взаимодействия, согласно лундовской модели, натягивается релятивистская струна, энергия которой растет по мере разлета. Рост натяжения продолжается до тех пор, пока не будет достигнута возможность рождения кварк-антикварковой пары $q\bar{q}$. При этом происходит разрыв струны с рождением $q\bar{q}$ -пары в точках разрыва Q_1, Q_2, \dots, Q_{n+1} [12]. Данный процесс может происходить многократно, до тех пор, пока это допускает закон сохранения энергии-импульса. В некоторых случаях кварки и антикварки могут образовывать связанное состояние, рождая мезоны [2]. Это приводит к полуинклюзивному глубоконеупругому рассеянию заряженного лептона на неполяризованном протоне.

В случае когда рассматривается полуинклюзивное глубоконеупругое рассеяние заряженного лептона на поляризованном протоне, необходимо, как отмечено выше, использование программного пакета PYTHIA8+StringSpinner.

В данной работе использование PYTHIA8+StringSpinner позволило провести моделирование полуинклюзивного глубоконеупругого рассеяния лептона на поляризованном протоне в диапазоне начальных энергий $\sqrt{s_{IN}} = 20 - 100$ ГэВ. В качестве опорных начальных энергий были рассмотрены значения 20, 40, 60, 80 и 100 ГэВ.

При данных энергиях было сгенерировано по 100 тыс. событий для рассмотренных заряженных лептонов (e^+, e^-, μ^+, μ^-) и адронов ($\pi^0, \pi^+, \pi^-, K^+, K^-$) при опорных начальных энергиях и при различных поляризациях протона (продольная, поперечная, а также при ее отсутствии). Из каждого события были получены значения 4-импульсов конечного лептона p_l и адрона p_h . Эти данные будем называть эталонными. Использование эталонных данных позволяет получать при поперечной поляризации протона асимметрии Сиверса A_{Siv} , Коллинза A_{Col} и при продольной поляризации протона – A_{ul} .

В случае поперечной поляризации протона для асимметрии Коллинза A_{Col} распределение по множественности N_h пропорционально биному [14]:

$$\frac{dN_h}{dx_{Bj} dz dp_{Th} d\varphi_{Col}} \propto 1 + D_{NN} S_T A_{Col} \sin \varphi_{Col}, \quad (1)$$

где D_{NN} – деполяризационный фактор, $D_{NN} = 2(1-y)/[1+(1-y)^2]$.

В соотношении (1) величина φ_{Col} определяется как

$$\varphi_{Col} = \varphi_h + \varphi_S + \pi,$$

где φ_S – азимутальный угол между поперечной компонентой вектора спина \mathbf{S} и плоскостью рассеяния лептонов; φ_h – азимутальный угол между плоскостью вылета адрона и плоскостью рассеяния лептонов (рис. 2).

Распределение по множественности адрона N_h для асимметрии Сиверса A_{Siv} определяется как [14]:

$$\frac{dN_h}{dx_{Bj} dz dp_{Th} d\varphi_{Siv}} \propto 1 + S_T A_{Siv} \sin \varphi_{Siv}, \quad (2)$$

где $\varphi_{Siv} = \varphi_h - \varphi_S$.

В выражениях (1), (2) S_T – вектор спина нуклона, перпендикулярный как к виртуальному фотону, так и к вылетающему адрону.

При продольной поляризации протона значения асимметрии A_{ul} можно получить из распределения по множественности адрона N_h , которое определяется как [14]:

$$\frac{dN_h}{dx_{Bj} dz dp_{Th} d\varphi_h} \propto 1 + (1-y) A_{ul} \sin 2\varphi_h. \quad (3)$$

В выражениях (1) – (3) использовались следующие величины:

$x_{Bj} = \frac{Q^2}{2Pq}$ – переменная Бьёркена [13], описывающая долю импульса протона, которую

несет партон (P – 4-импульс протона, q – 4-импульс виртуального фотона, $Q^2 = -q^2$);



$$z = \frac{P \cdot p_h}{P \cdot q} \quad \text{— доля 4-импульса виртуального фотона, переданная вылетающему адрону}$$

[13] (p_h — 4-импульс рожденного адрона);

p_{Th} — проекция импульса адрона, перпендикулярная виртуальному фотону;

$$y = \frac{P \cdot q}{P \cdot p'_l} \quad \text{— доля энергии налетающего лептона, передаваемая виртуальному фотону}$$

[13] (p'_l — 4-импульс лептона до взаимодействия).

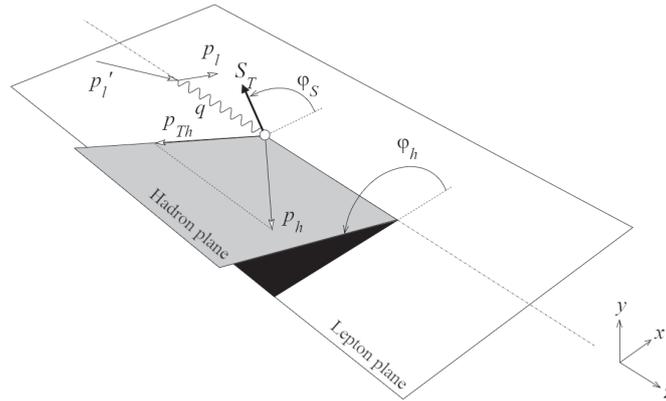


Рис. 2. Кинематика полуинклюзивного глубоконеупругого рассеяния [13];
показаны плоскости адронов и лептонов
(использованные обозначения см. в тексте)

Описанный способ расчета асимметрий был успешно протестирован путем сравнения с экспериментальными данными, полученными в экспериментах HERMES и COMPASS [12, 13], и показал хорошее согласие предсказаний с экспериментальными результатами. Такой успех служит хорошим основанием для выбора и использования в настоящей работе методики расчетов полуинклюзивного рассеяния лептонов на поляризованном протоне. Взят диапазон начальных энергий, характерный для будущих электрон-ионных коллайдеров [16].

Как уже отмечено выше, конкретные вычисления можно выполнять на основе использования программного пакета PYTHIA8+StringSpinner.

Детали дальнейшего использования PYTHIA8 для применения генеративно-состязательной сети (ГСС) для создания генератора полуинклюзивного глубоконеупругого рассеяния заряженных лептонов на поляризованных протонах можно найти в работе [17] (см. там раздел «Методика исследования»).

В данной работе в качестве еще одного входного параметра генератора (дополнительно к использованным в работе [17]) был добавлен тип поляризации протона. Кроме того, увеличено до 6 число скрытых слоев генератора и дискриминатора ГСС.

Результаты разработки нейронной сети и их обсуждение

На рис. 3 представлены значения асимметрии Коллинза в зависимости от переменной Бьёркена x_{Bj} для адронов π^- и π^+ при рассеянии электрона e^- и мюона μ^- на поперечно-поляризованном протоне при начальной энергии 40 ГэВ. Видно, что асимметрии, полученные на основе предсказаний ГСС, с точностью до погрешностей совпадают с предсказаниями, полученными на основе данных PYTHIA8+StringSpinner.

На рис. 4 представлены значения асимметрии Сиверса в зависимости от переменной Бьёркена x_{Bj} для каонов K^- и пионов π^0 при рассеянии позитрона e^+ и антимюона μ^+ на поперечно-поляризованном протоне при интерполированной начальной энергии 70 ГэВ; результаты получены на основе ГСС и PYTHIA8+StringSpinner. Из представленных на рис. 4 данных следует, что генератор на основе ГСС сохраняет точность предсказания при другой конфигурации рассеяния и для асимметрий Сиверса, в том числе и при энергиях, которые не участвовали в процессе обучения.

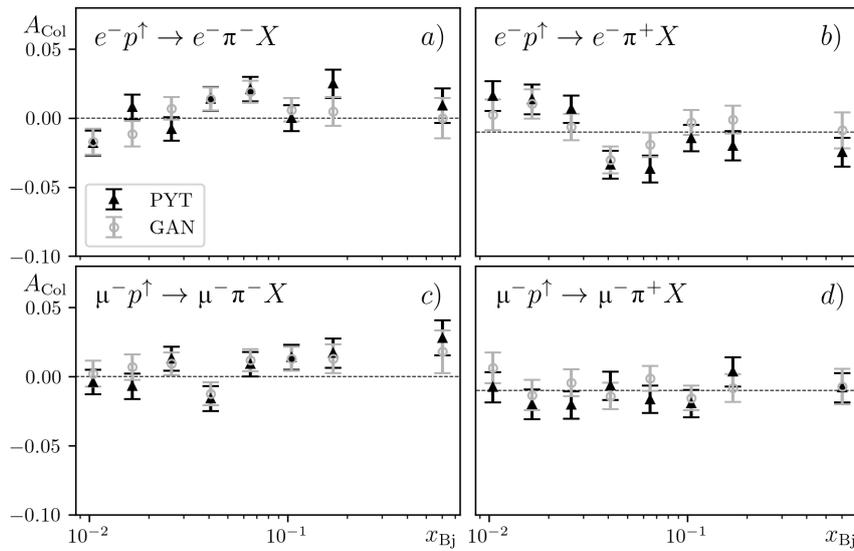


Рис. 3. Графики зависимостей асимметрии Коллинза A_{Col} от переменной Бёркена x_{Bj} при рассеянии электронов e^- (a, b) и мюонов μ^- (c, d) на поперечно-поляризованных протонах с рождением отрицательных (π^-) (a, c) и положительных (π^+) (b, d) пионов.

Начальная энергия частиц – 40 ГэВ.

Данные получены с помощью ГСС (точки серого цвета) и РYТНIA8+StringSpinner (треугольники черного цвета)

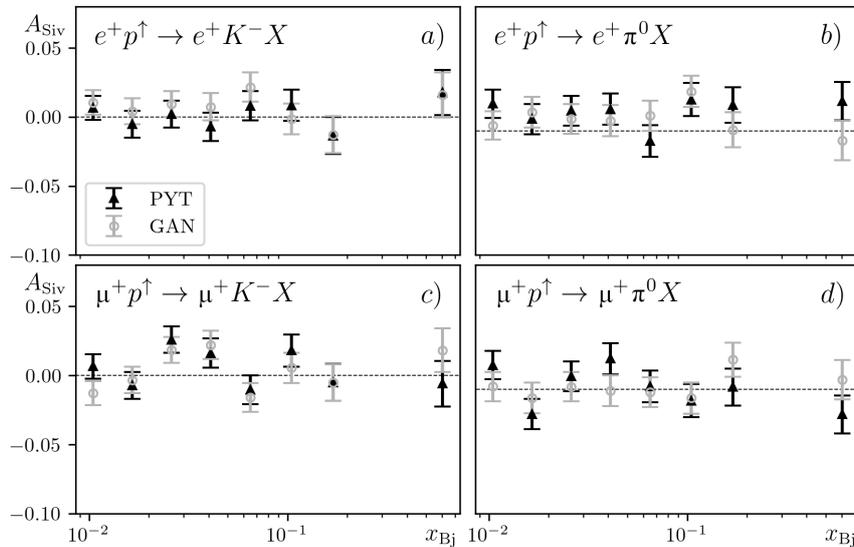


Рис. 4. Графики зависимостей значений асимметрии Сиверса A_{Siv} от переменной Бёркена x_{Bj} при рассеянии позитронов e^+ (a, b) и антимюонов μ^+ (c, d) на поперечно-поляризованных протонах с рождением отрицательных каонов K^- (a, c) и нейтральных пионов π^0 (b, d).

Данные получены с помощью ГСС (точки серого цвета) и РYТНIA8+StringSpinner (треугольники черного цвета)

На рис. 5 представлены значения асимметрий A_{ul} в зависимости от значений переменной Бёркена x_{Bj} для каонов K^+ и пионов π^- при рассеянии электронов e^- и антимюонов μ^+ на поперечно-поляризованных протонах при начальной энергии 120 ГэВ, полученные на основе ГСС и РYТНIA8+StringSpinner. Анализ этих данных показывает, что модель ГСС способна работать с продольной поляризацией протона, а также при энергиях, превышающих рассмотренный энергетический диапазон при обучении (экстраполированные значения).

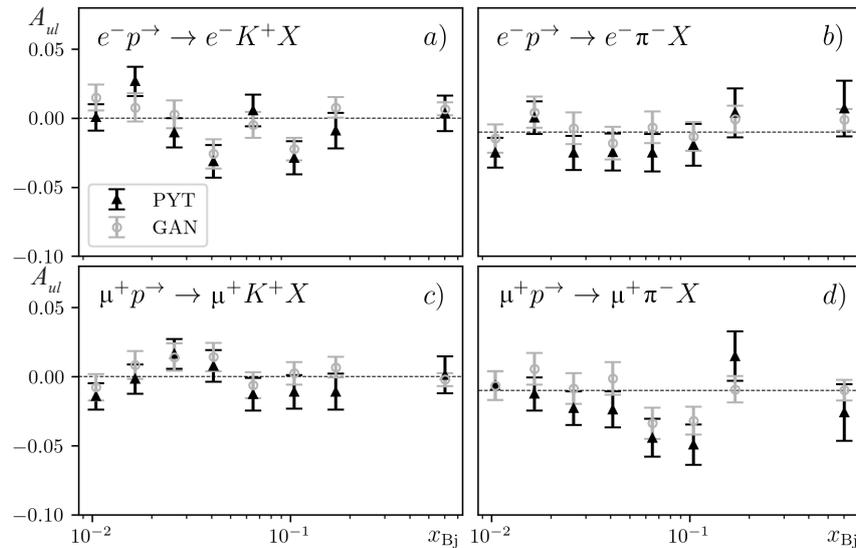


Рис. 5. Графики зависимостей асимметрии A_{ul} от переменной Бёркена x_{Bj} при рассеянии электронов e^- (a, b) и антимюонов μ^+ (c, d) на продольно-поляризованных протонах с рождением положительных каонов K^+ (a, c) и отрицательных пионов π^- (b, d).

Начальная энергия – 120 ГэВ.

Данные получены с помощью ГСС (точки серого цвета) и PYTHIA8+StringSpinner (треугольники черного цвета)

Заключение

В представленном исследовании разработан программный пакет (генератор событий) на основе модели генеративно-состязательной сети с целью предсказания характеристик конечного состояния лептона и дополнительного адрона в результате полуинклюзивного глубоконеупругого рассеяния лептона на поляризованном протоне.

Установлено, что созданный генератор событий способен точно работать при различных конфигурациях рассеяния: налетающих лептонах (e^+ , e^- , μ^+ , μ^-), адронах (π^0 , π^+ , π^- , K^+ , K^-), состояниях поляризации протона (продольная, поперечная, ее отсутствие) и значениях начальной энергии (изучен диапазон 20 – 100 ГэВ). Кроме того, генератор функционирует как при значениях начальной энергии, на которых было предварительно проведено обучение (20, 40, 60, 80, 100 ГэВ), так и при интерполированных энергиях (между опорными значениями) и экстраполированных (значения выше рассмотренного диапазона).

Исследования показали, что генератор событий может точно (с учетом погрешностей) предсказывать различные виды асимметрии (A_{Col} , A_{Siv} , A_{ul}), возникающие при наличии поляризации у протона. При этом точность предсказания сохраняется при различных конфигурациях рассеяния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Blümlein J.** The theory of deeply inelastic scattering // Progress in Particle and Nuclear Physics. 2013. Vol. 69. March. Pp. 28–84.
2. **Ferrerres-Solé S., Sjöstrand T.** The space–time structure of hadronization in the Lund model // The European Physical Journal C. 2018. Vol. 78. No. 11. P. 983.
3. **Airapetian A. Akopov N., Akopov Z., et al.** (Hermes Collaboration). Effects of transversity in deep-inelastic scattering by polarized protons // Physics Letters B. 2010. Vol. 693. No. 1. Pp. 11–16.
4. **Airapetian A. Akopov N., Akopov Z., et al.** (Hermes Collaboration). Observation of the naive- T -odd Sivers effect in deep-inelastic scattering // Physical Review Letters. 2009. Vol. 103. No. 15. P. 152002.
5. **Metz A., Schlegel M.** Twist-3 single-spin asymmetries in semi-inclusive deep-inelastic scattering // The European Physical Journal A. 2004. Vol. 22. No. 3. Pp. 489–494.

6. **Barone V., Bradamante F., Bressan A., Kerbizi A., Martin A., Moretti A., Matousek J., Sbrizzai G.** Transversity distributions from difference asymmetries in semi-inclusive DIS // *Physical Review D*. 2019. Vol. 99. No. 11. P. 114004.
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. **Clark A., Donahue J., Simonyan K.** Adversarial video generation on complex datasets. arXiv:1907.06571v2, 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.06571>.
9. **Hashemi B., Amin N., Datta K., Olivito D., Pierini M.** LHC analysis-specific datasets with Generative Adversarial Networks. arXiv:1901.05282, 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1901.05282>.
10. **Sjöstrand T., Mrenna S., Skands P.** A brief introduction to PYTHIA 8.1 // *Computer Physics Communications*. 2008. Vol. 178. No. 11. Pp. 852–867.
11. **Kerbizi A., Lönnblad L.** StringSpinner-adding spin to the PYTHIA string fragmentation // *Computer Physics Communications*. 2022. Vol. 272. March. P. 108234.
12. **Kerbizi A., Artux X., Belghobsi Z., Martin A.** Simplified recursive 3P_0 model for the fragmentation of polarized quarks // *Physical Review D*. 2019. Vol. 100. No. 1. P. 014003.
13. **Whitehill R. M., Zhou Y., Sato N., Melnitchouk W.** Accessing gluon polarization with high- P_T hadrons in SIDIS // *Physical Review D*. 2023. Vol. 107. No. 3. P. 034033.
14. **Anselmino M., Boglione M., D’Alesia U., Melis S., Nocera ER., Prokudin A.** General helicity formalism for semi-inclusive deep inelastic scattering // *Physical Review D*. 2011. Vol. 83. No. 11. P. 114019.
15. **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.
16. **Accardi A., Albacete J. L., Anselmino M., et al.** Electron-ion collider: The next QCD frontier. Understanding the glue that binds us all // *The European Physical Journal A*. 2016. Vol. 52. No. 9. P. 268.
17. **Лобанов А. А., Бердников Я. А.** Моделирование полукклюзивного, глубоконеупругого рассеяния лептона на протоне при энергиях 20–100 ГэВ на основе генеративно-состязательной нейронной сети // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. 2023. Т. 16. № 4. С. 189–197.

REFERENCES

1. **Blümlein J.**, The theory of deeply inelastic scattering, *Prog. Part. Nucl. Phys.* 69 (March) (2013) 28–84.
2. **Ferrerres-Solé S., Sjöstrand T.**, The space–time structure of hadronization in the Lund model, *Eur. Phys. J. C*. 78 (11) (2018) 983.
3. **Airapetian A. Akopov N., Akopov Z., et al.** (Hermes Collaboration), Effects of transversity in deep-inelastic scattering by polarized protons, *Phys. Lett. B*. 693 (1) (2010) 11–16.
4. **Airapetian A. Akopov N., Akopov Z., et al.** (Hermes Collaboration), Observation of the naive- T -odd Sivers effect in deep-inelastic scattering, *Phys. Rev. Lett.* 103 (15) (2009) 152002.
5. **Metz A., Schlegel M.**, Twist-3 single-spin asymmetries in semi-inclusive deep-inelastic scattering, *Eur. Phys. J. A*. 22 (3) (2004) 489–494.
6. **Barone V., Bradamante F., Bressan A., et al.**, Transversity distributions from difference asymmetries in semi-inclusive DIS, *Phys. Rev. D*. 99 (11) (2019) 114004.
7. **Goodfellow I., Pouget-Abadie J., Mirza M., et al.**, Generative adversarial networks, *Commun. ACM*. 63 (11) (2020) 139–144.
8. **Clark A., Donahue J., Simonyan K.**, Adversarial video generation on complex datasets; arXiv:1907.06571v2, 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.06571>.
9. **Hashemi B., Amin N., Datta K., et al.**, LHC analysis-specific datasets with Generative Adversarial Networks. arXiv:1901.05282, 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1901.05282>.
10. **Sjöstrand T., Mrenna S., Skands P.**, A brief introduction to PYTHIA 8.1, *Comp. Phys. Commun.* 178 (11) (2008) 852–867.
11. **Kerbizi A., Lönnblad L.**, StringSpinner-adding spin to the PYTHIA string fragmentation, *Comp. Phys. Commun.* 272 (March) (2022) 108234.



12. Kerbizi A., Artux X., Belghobsi Z., Martin A., Simplified recursive 3P_0 model for the fragmentation of polarized quarks, Phys. Rev. D. 100 (1) (2019) 014003.
13. Whitehill R. M., Zhou Y., Sato N., Melnitchouk W., Accessing gluon polarization with high- P_T hadrons in SIDIS, Phys. Rev. D. 107 (3) (2023) 034033.
14. Anselmino M., Boglione M., D'Alesia U., et al., General helicity formalism for semi-inclusive deep inelastic scattering, Phys. Rev. D. 83 (11) (2011) 114019.
15. Mao X., Li Q., Xie H., et al., On the effectiveness of least squares generative adversarial networks, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 41 (12) (2019) 2947–2960.
16. Accardi A., Albacete J. L., Anselmino M., et al., Electron-ion collider: The next QCD frontier. Understanding the glue that binds us all, Eur. Phys. J. A. 52 (9) (2016) 268.
17. Lobanov A. A., Berdnikov Ya. A., Simulation of semi-inclusive deep inelastic lepton scattering on a proton at energies of 20–100 GeV on the basis of the Generative-Adversarial Neural Network, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 16 (4) (2023) 189–197 (in Russian).

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

МУЗЯЕВ Евгений Валерьевич – студент Физико-механического института Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
muzyaev.ev@edu.spbstu.ru
ORCID: 0009-0005-7144-4746

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

MUZYAEV Evgeniy V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
muzyaev.ev@edu.spbstu.ru
ORCID: 0009-0005-7144-4746

*Статья поступила в редакцию 28.11.2023. Одобрена после рецензирования 19.12.2023.
Принята 19.12.2023.*

Received 28.11.2023. Approved after reviewing 19.12.2023. Accepted 19.12.2023.