

Эксклюзивное электророжение нейтрального пиона на протоне из данных CLAS12 при энергии пучка 6.535 ГэВ

В. Б. Рыжков^{1,*}, А. Н. Павлова¹, А. А. Русова^{1,2}, Е. Л. Исупов²

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра общей ядерной физики
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Научно-исследовательский Институт им. Д. В. Скобельцына,
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 10.06.2025; подписана в печать 25.11.2025)

В настоящей работе представлены первые результаты по отбору событий в реакции $ep \rightarrow e'p'\pi^0 \rightarrow e'p'\gamma\gamma$ из экспериментальных данных детектора CLAS12 в резонансной области для энергии пучка электронов $E_e = 6.535$ ГэВ. Проанализирована топология с двумя зарегистрированными фотонами в конечном состоянии; введены отборы для выделения событий реакции электророжения одиночного нейтрального пиона; получены распределения по инвариантной массе пары фотонов в различных кинематических ячейках по суммарной энергии конечных адронов в системе центра масс виртуальный фотон - протон W и виртуальности фотона Q^2 . Вычислены выходы реакции. Также рассмотрена топология с одним зарегистрированным фотоном; для этой топологии разработаны дополнительные кинематические отборы.

PACS: 13.60.Le.

УДК: 539.126.34.

Ключевые слова: электророжение мезонов.

ВВЕДЕНИЕ

Возбуждение нуклонных резонансов (N^*) реальными и виртуальными фотонами является важнейшим источником информации о структуре возбужденных состояний нуклона и динамике непертурбативного сильного взаимодействия, лежащего в основе формирования адронов из кварков и глюонов [1–3]. Данная информация может быть извлечена из амплитуд электровозбуждения N^* различной структуры и является ключом к пониманию механизмов формирования доминирующей части (>98%) массы адронов и природы конфайнмента кварков и глюонов [4, 5].

Таким образом, изучение амплитуд электровозбуждения N^* является актуальным направлением в современной физике адронов. Эти исследования направлены на решение открытых вопросов Стандартной модели о формировании доминирующей части видимой массы во Вселенной и природе конфайнмента. Большая часть хорошо установленных нуклонных резонансов вносит значительный вклад в процессы фото- и электророжения конечного состояния $\pi^0 p$ на протонах. Поэтому эксклюзивные каналы однопионного $N\pi$ и двухпионного $\pi^+\pi^-p$ электророжения на протонах являются основными источниками информации об амплитудах электровозбуждения N^* [1, 2, 6, 7].

Главным направлением исследований резонансов на детекторе CLAS12 в области виртуальностей фотонов $Q^2 < 2.0$ ГэВ² является поиск новых состояний адронной материи, т.н. гибридных барионов с одетыми

глюонами в качестве активной компоненты структуры кваркового кора, наряду с тремя одетыми кварками. Такие состояния предсказываются в вычислениях спектра нуклонных резонансов из лагранжиана КХД в рамках КХД на решетках [8].

В настоящей работе представлены первые результаты по отбору событий в реакции $ep \rightarrow e'p'\pi^0 \rightarrow e'p'\gamma\gamma$ из экспериментальных данных детектора CLAS12 в резонансной области, в рамках коллаборации между Лаботорией им. Т. Джефферсона и Московским государственным университетом им. М. В. Ломоносова. Детектор CLAS12 [9] — единственная в мире установка, способная изучить наблюдаемые эксклюзивных каналов электророжения мезонов в еще практически неисследованном диапазоне виртуальностей фотонов $Q^2 < 10$ ГэВ² и инвариантных масс конечных адронов $W < 3.5$ ГэВ.

1. РАЗРАБОТКА ОТБОРОВ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ СОБЫТИЙ РЕАКЦИИ ЭЛЕКТРОРОЖДЕНИЯ ОДИНОЧНОГО НЕЙТРАЛЬНОГО ПИОНА НА ПРОТОНЕ

Реакция $ep \rightarrow e'p'\pi^0$ — одна из основных реакций электророжения мезонов на протонах, которая наряду с двухпионным каналом составляет набор независимых взаимодополняющих методов для нахождения амплитуд электровозбуждения N^* . Амплитуды электровозбуждения резонансов, извлеченные из анализа различных эксклюзивных каналов, должны быть согласованы между собой, т.к. они являются амплитудами переходов между начальным состоянием $\gamma_v p$ и конечным N^* и не зависят от способа распада нуклонного резонанса. Для анализа событий однопионного ка-

* vitalikryjkov@gmail.com

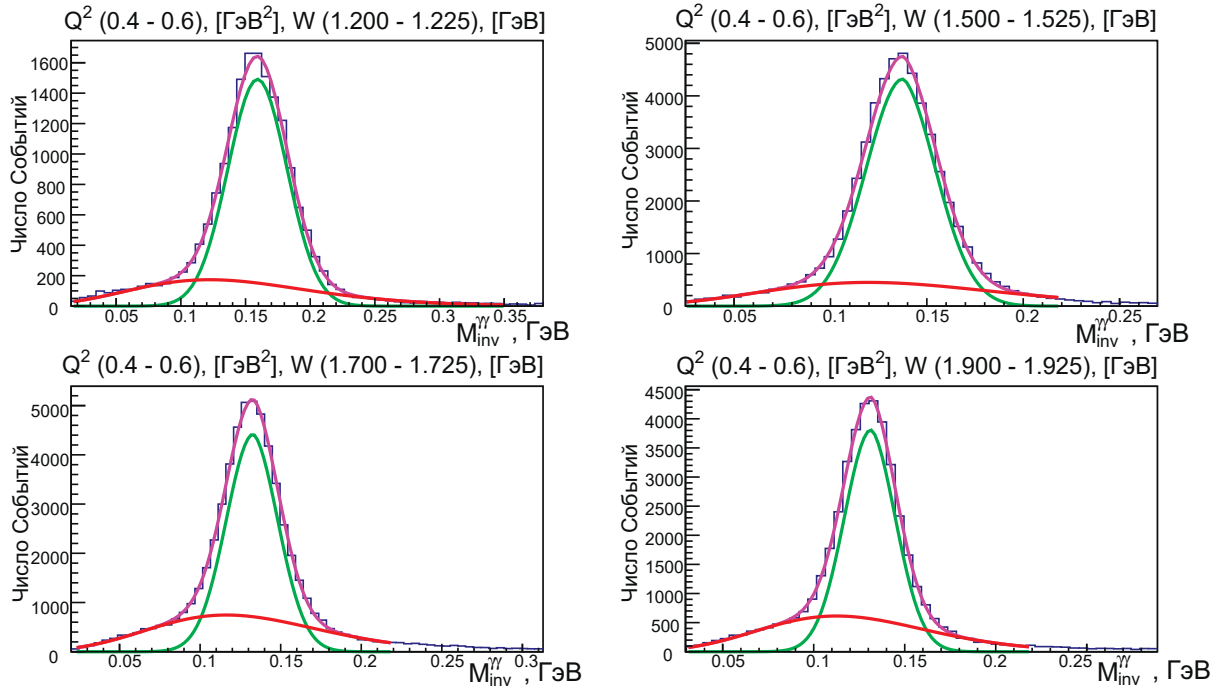


Рис. 1. $M_{inv}^{\gamma\gamma}$ распределения при Q^2 (0.4–0.6) ГэВ^2 для 1-го, 2-го и 3-го резонансных регионов, а также для $W \in [1.900, 1.925]$ ГэВ . Все распределения аппроксимированы суммой (пурпурная кривая, формула (3)) радиационного гаусса, описывающего сигнал (зелёная кривая, формула (1)), и логнормальной функции фона (красная кривая, формула (2))

нала использовались экспериментальные данные, полученные на детекторе CLAS12 при энергии пучка $E_e = 6.535$ ГэВ . Исследовался кинематический диапазон: $1.1 < W < 2.5$ ГэВ и $0.4 < Q^2 < 3.5$ ГэВ^2 .

Для достоверного разделения событий реакции $e p \rightarrow e' p' \pi^0$ и фоновых событий (в том числе событий других реакций) была исследована топология с двумя зарегистрированными фотонами из распада π^0 в конечном состоянии. Для всех имеющихся событий были применены следующие отборы:

- требуется наличие ровно одного электрона в событии,
- требуется наличие ровно одного протона в событии,
- требуется наличие ровно двух фотонов с $E_\gamma > 50$ МэВ в событии,
- исключаются события, в которых присутствуют любые другие частицы в конечном состоянии (кроме фотонов с $E_\gamma < 50$ МэВ , если они есть в событии, такие фотоны далее просто игнорируются),
- обусловленные геометрией детектора стандартные отборы, разработанные RunGroup-K [10],

- для исключения событий с радиационными фотонами были разработаны следующие отборы: углы между фотонами и пучком больше 7° , углы между фотонами и рассеянным электроном больше 7° и угол между самими фотонами больше 6° .

Конкретный вид отборов на углы определялся исходя из сравнения данных и Монте-Карло моделирования. Были получены распределения по инвариантной массе пары фотонов $M_{inv}^{\gamma\gamma}$ в различных кинематических ячейках по W и Q^2 . В дальнейшем также будет проведено разбиение по $\cos \theta_{\pi^0}^*$ и $\phi_{\pi^0}^*$, где $\cos \theta_{\pi^0}^*$ - косинус полярного угла нейтрального пиона в СЦИ и $\phi_{\pi^0}^*$ - азимутальный угол нейтрального пиона в СЦИ. На рис. 1 представлены распределения в первой ячейке по Q^2 для первого, второго и третьего резонансных регионов, а также для $W \in [1.900, 1.925]$ ГэВ .

Максимумы в распределениях по инвариантной массе пары фотонов находятся при ожидаемых значениях, соответствующих массе нейтрального пиона, что даёт нам возможность аппроксимировать имеющиеся распределения для оценки выхода реакции. Для аппроксимации использовалась сумма (формула (3)) так называемого «радиационного» гаусса, описывающего сигнал (формула (1)), и логнормальной функции фона (формула (2)). В качестве выхода реакции в каждой ячейке бралось общее количество событий под сигнальной кривой.

$$\text{rad_gaus}(x, A_g, \text{mean}_g, \sigma_g, R) = \begin{cases} \text{gaus}(x, A_g, \text{mean}_g, \sigma_g) \cdot e^{-R(x-\text{mean}_g)}, & x \geq \text{mean}_g \\ \text{gaus}(x, A_g, \text{mean}_g, \sigma_g), & x < \text{mean}_g \end{cases}, \quad (1)$$

$$\text{LN_bg}(x, A_{bg}, \text{mean}_{bg}, \sigma_{bg}) = \frac{A_{bg}}{\sqrt{2\pi\sigma_{bg}^2}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x+0.2) - \text{mean}_{bg}}{\sigma_{bg}}\right)^2}, \quad (2)$$

$$\text{sum_fit}(x, A_g, \text{mean}_g, \sigma_g, R, A_{bg}, \text{mean}_{bg}, \sigma_{bg}) = \text{rad_gaus}(x, A_g, \text{mean}_g, \sigma_g, R) + \text{LN_bg}(x, A_{bg}, \text{mean}_{bg}, \sigma_{bg}), \quad (3)$$

где x — координата по оси абсцисс, A_g, mean_g и σ_g — амплитуда, среднее и дисперсия радиационного гаусса, R — параметр радиационного хвоста, A_{bg}, mean_{bg} и σ_{bg} — амплитуда, среднее и дисперсия логнормальной функции фона.

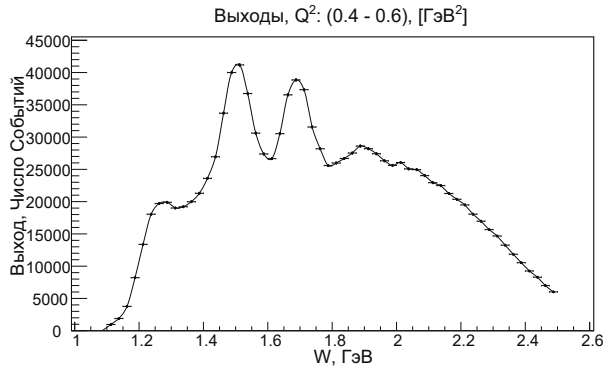


Рис. 2. Зависимость $\pi^0 p$ -выходов как функция W при Q^2 (0.4–0.6 ГэВ²)

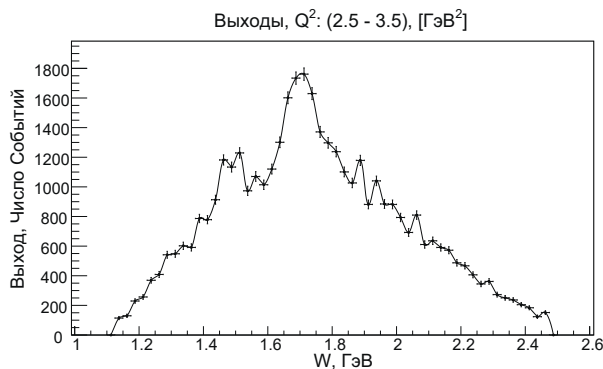


Рис. 3. Зависимость $\pi^0 p$ -выходов как функция W при Q^2 (2.5–3.5) ГэВ²

На рис. 2 представлена зависимость вычисленных выходов от W в первой ячейке по Q^2 . Видны выраженные максимумы во втором и третьем резонансных регионах. Однако в области первого резонансного региона наблюдается дефицит событий, связанный с ограниченным аксептансом детектора CLAS12: для фотонов от распада нейтрального пиона при энергиях, соответствующих рождению резонанса $\Delta(1232)$, характерен

большой угол разлета, что уменьшает вероятность зарегистрировать в событии оба γ -кванта.

С ростом Q^2 наблюдается существенное падение статистики. На рис. 3 приведена зависимость выходов реакции как функция W для последней ячейки по Q^2 : (2.5–3.5) ГэВ². Нами была произведена оценка минимального необходимого количества событий в ячейке для корректной аппроксимации данных по формуле (3) — около 250 событий. Если будет использовано 8 ячеек по $\cos\theta_{\pi^0}^*$ и 5 ячеек по $\phi_{\pi^0}^*$, то (считая распределение событий по ячейкам равномерным для численной оценки) потребуется $250 \cdot 8 \cdot 5 = 10000$ событий на одну двухмерную ячейку как необходимый для корректной аппроксимации данных минимум. Если при малых Q^2 это ограничение ещё позволяет захватить большую часть кинематической области, то с ростом Q^2 эта область уменьшается. При значениях виртуальности фотона $Q^2 \in [2.5, 3.5]$ ГэВ² (рис. 3) невозможно выделить выходы в четырехмерном фазовом пространстве.

Таким образом, топология с двумя зарегистрированными фотонами имеет две существенных проблемы: срезание первого резонансного региона относительно остальных, а также сильное падение статистики с ростом Q^2 , делающее невозможным корректную аппроксимацию данных в части ячеек.

С целью увеличения статистики была рассмотрена другая топология: с одним зарегистрированным фотоном. Для выделения событий реакции использовались те же отборы, что и в двухфотонной топологии, за тем исключением, что теперь требовалось наличие ровно одного фотона с $E_\gamma > 50$ МэВ в событии, а 4-вектор второго фотона восстанавливался из законов сохранения. Аналогично зарегистрированному, к восстановленному фотону также были применены отборы на углы между ним и пучком и между ним и рассеянным электроном, а также проверялся угол между зарегистрированным и восстановленным фотонами.

На рис. 4, а и 4, б приведены распределения по W и $MM_{ep \rightarrow e'p'X}^2 = (e + p - e' - p')^2$ в топологии $ep \rightarrow e'p'\gamma X$. Кроме сигнала от нейтрального пиона присутствуют и другие максимумы, соответствующие рождению η и ρ мезонов. Для подавления фона от других каналов были введены дополнительные кинематические отборы на основе сравнения экспериментальных распределений с распределением событий Монте-Карло моделирования: энергия рассеянного

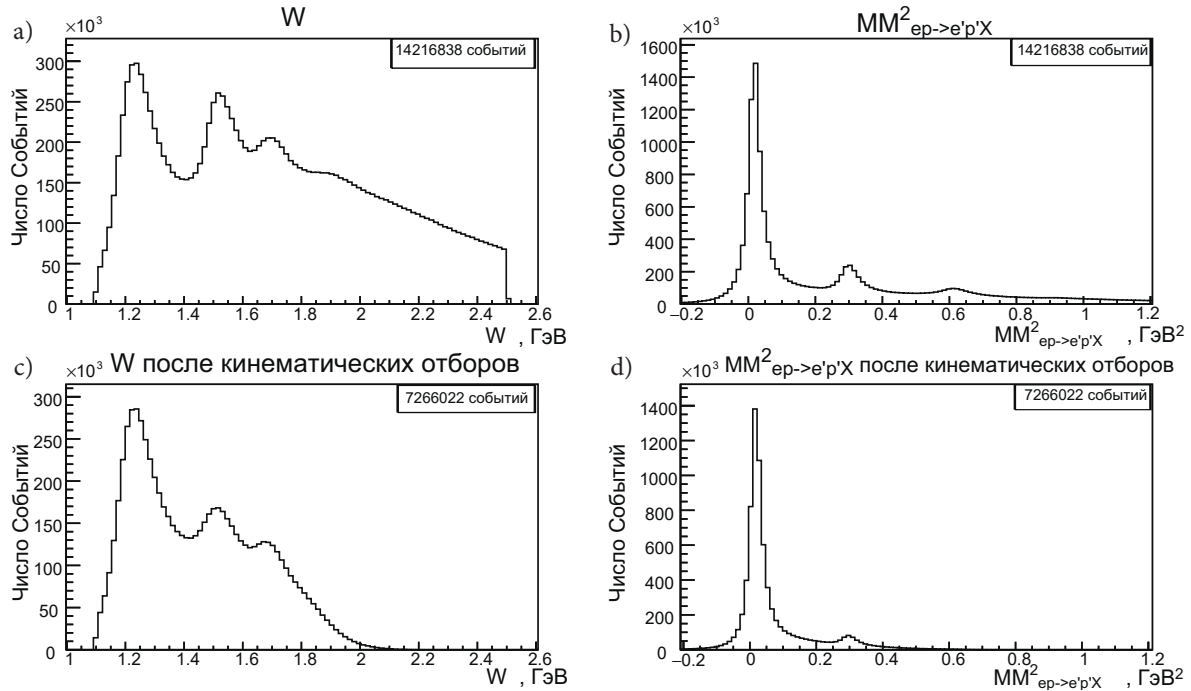


Рис. 4. а — Распределение событий как функция W в однофотонной топологии; б — распределение событий как функция $MM^2_{ep \rightarrow e'p'X}$ в однофотонной топологии; с — распределение событий как функция W в однофотонной топологии после дополнительных кинематических отборов; д — распределение событий как функция $MM^2_{ep \rightarrow e'p'X}$ в однофотонной топологии после дополнительных кинематических отборов

электрона $E_e > 3.5$ ГэВ, полярный угол рассеянного электрона $\theta_e < 13$ град, энергия протона в конечном состоянии $E_p < 1.8$ ГэВ, полярный угол протона в конечном состоянии $\theta_p > 40$ град, энергия нейтрального пиона (восстановленного из законов сохранения) $E_{\pi^0} < 1.5$ ГэВ, энергия второго незарегистрированного фотона (восстановленного из законов сохранения) $E_{\gamma_2} < 1.2$ ГэВ.

На рис. 4, с и 4, d представлены распределения событий по W и $MM^2_{ep \rightarrow e'p'X}$ после применения разработанных кинематических отборов. Можно заметить, что фон заметно уменьшился по отношению к сигналу. Из недостатков данных отборов можно отметить сильное подавление событий с $W > 2$ ГэВ. Объединение событий однофотонной топологии и событий с двумя фотонами в конечном состоянии, где максимум смещен в область высоких W , может позволить решить эту проблему.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе были проанализированы экспериментальные данные детектора CLAS12 при энергии пучка электронов $E_e = 6.535$ ГэВ для реакции $ep \rightarrow e'p'\pi^0$. Исследована топология с двумя зарегистрированными фотонами; разработаны отборы для выделения событий реакции $ep \rightarrow e'p'\pi^0$; рассчитаны графики выхода в ячейках по W и Q^2 . Обнаружены следующие проблемы при использовании данной топологии: недостаточная для корректной аппроксимации данных статистика в части ячеек и сильное падение выходов в первом резонансном регионе, связанное с ограниченным аксептансом детектора CLAS12. Рассмотрена топология с одним зарегистрированным фотоном в конечном состоянии; для этой топологии разработаны кинематические отборы, позволившие значительно уменьшить фон в сравнении с сигналом.

- [1] Aznauryan I.G., Burkert V.D. // Prog. Part. Nucl. Phys. **1**. 671.(2012).
- [2] Burkert V. D., Roberts C. D. // Rev. Mod. Phys. **91**. 011003. (2019).
- [3] Roberts C. D. // Few Body Syst. **59**. 72. (2018).
- [4] Segovia J. et al. // Few Body Syst. **55**. 1185. (2015).
- [5] Segovia J. et al. // Phys. Rev. Lett. **115**. 171801. (2015).

- [6] Mokeev V. I. // Few Body Syst. **59**. 46. (2018).
- [7] N.Markov et al. // Phys. Rev. **101**. 015208. (2020).
- [8] A. D'Angelo, Burkert V. D., Carman D. S. et al. // A Search for Hybrid Baryons in Hall B with CLAS12. JLab Experiment E12-09-003.
- [9] Burkert V. D. // Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. **68**. 405. (2018).

[10] D.S. Carman, A. D'Angelo, L.Lanza. // CLAS12 RG-K
Analysis Note Overview and Procedures. [https://](https://clasweb.jlab.org/wiki/images/3/34/Rgk_analysis_document_April_22_2022.pdf)

[clasweb.jlab.org/wiki/images/3/34/Rgk_](https://clasweb.jlab.org/wiki/images/3/34/Rgk_analysis_document_April_22_2022.pdf)
[analysis_document_April_22_2022.pdf](https://clasweb.jlab.org/wiki/images/3/34/Rgk_analysis_document_April_22_2022.pdf)

Exclusive neutral pion electroproduction off protons from CLAS12 data at beam energy 6.535 GeV

V. B. Ryzhkov^{1,a}, A. N. Pavlova¹, A. A. Rusova^{1,2}, E. L. Isupov²

¹*Department of Nuclear Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia*

²*Skobeltsyn Research Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia*

E-mail: ^avitalikryjkov@gmail.com

The first results on the selection of $ep \rightarrow e'p'\pi^0$ events from the CLAS12 detector experimental data in the resonance area for the electron beam energy $E_e = 6.535$ GeV are presented in this report. The topology with two detected photons in the final state is analyzed; selections are introduced to isolate events of the single neutral pion electroproduction reaction; the invariant mass of photon pair distributions in various kinematic bins are obtained for the total energy of final hadrons in the $\gamma_v p$ center of mass system W and the photon virtuality Q^2 . The reaction yields are calculated. The topology with one detected photon is also considered; additional kinematic selections are introduced for this topology.

PACS: 13.60.Le.

Keywords: meson electroproduction.

Received 10 June 2025.

Сведения об авторах

1. Рыжков Виталий Борисович — студент; e-mail: vitalikryjkov@gmail.com
2. Павлова Анастасия Николаевна — студент; e-mail: nastyaalisa108@gmail.com
3. Русова Анна Александровна — канд. физ.-мат. наук, ассистент; тел.: (495) 939-16-97, e-mail: anya@jlab.org
4. Исупов Евгений Леонидович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-25-58, e-mail: e.l.isupov@gmail.com.