

Отбор событий реакции $ep \rightarrow e\pi^+\pi^-p$ из экспериментальных данных детектора CLAS12

А. С. Фролова^{1,*}, А. А. Голубенко², Е. Л. Исупов²

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

¹физический факультет, кафедра общей ядерной физики
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Научно-исследовательский институт им. Д. В. Скобельцына
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 06.06.2022; подписана в печать 09.06.2022)

В настоящей работе представлены первые результаты по отбору событий в реакции $ep \rightarrow e\pi^+\pi^-p$ из экспериментальных данных детектора CLAS12 в резонансной области для энергии пучка $E_e = 6.5$ ГэВ. Были получены распределения квадратов недостающих масс для четырёх топологий, соответствующих различным наборам детектированных частиц. Максимумы, отвечающие за выделение эксклюзивного канала были аппроксимированы суммой функции Гаусса и полинома второй степени, что позволило получить первичные критерии отбора, которые были использованы для построения распределений инвариантных масс различных пар частиц.

PACS: 13.60.Le. УДК: 539.126.34.

Ключевые слова: электророждение мезонов.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение структуры возбужденных состояний нуклона (N^*) является единственным источником информации о динамике сильного взаимодействия в области большой величины параметра кварк-глюонной связи (непертурбативный режим КХД), формирующей возбужденные состояния нуклона с различными квантовыми числами и различной структуры [1–3]. Успешное описание данных по упругим форм-факторам нуклона и амплитудам электровозбуждения нуклонных резонансов различной структуры продемонстрировало возможность доступа к механизмам формирования доминирующей части (>98%) массы адронов и природе конфайнмента кварков и глюонов из данных по амплитудам электровозбуждения N^* [6, 7]. Таким образом, изучение амплитуд электровозбуждения N^* является ключевым направлением в современной физике адронов. Эти исследования направлены на решение последних открытых вопросов Стандартной модели о формировании доминирующей части видимой массы во Вселенной и природе конфайнмента.

Доминирующая часть хорошо установленных нуклонных резонансов вносит значительный вклад в процессы фото- и электророждения конечного состояния $\pi^+\pi^-p$ на протонах. Эксклюзивные каналы электророждения одиночных пионов $N\pi$ и конечного состояния $\pi^+\pi^-p$ на протонах являются основными источниками информации об амплитудах электровозбуждения N^* на протоне [1, 2, 5]. В табл. 1 представлены нуклонные резонансы, для которых получены амплитуды электровозбуждения из анализа данных CLAS по эксклюзив-

ным каналам электророждения мезонов на протонах в резонансной области.

Основным 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 как активной компонентой структуры кваркового кора, наряду с тремя одетыми кварками. Такие состояния предсказываются в вычислениях спектра нуклонных резонансов из лагранжиана КХД в рамках Lattice КХД [8]. Исходя из предсказаний Lattice КХД гибридные барионы проявляют себя как дополнительные резонансы в N^* -спектре со спинами-четностями $J^P = 1/2^+$, $J^P = 3/2^+$ в области масс от 2.0 до 2.5 ГэВ. Поиск этих состояний будет выполнен в эксклюзивных каналах электророждения KY и $\pi^+\pi^-p$ на протоне [8]. Наличие одетых глюонов как активной компоненты структуры N^* будет идентифицировано по Q^2 -эволюции их амплитуд электровозбуждения. Изучение всего спектра N^* в области $W < 3.0$ ГэВ из совместного анализа данных эксклюзивных каналов фото- и электророждения мезонов на нуклонах при $Q^2 < 2.0$ ГэВ² завершит усилия по поиску т. н. «missing»-барионных состояний [4]. Успешное совместное описание данных по фото- и электророждению мезонов на нуклонах при различных величинах виртуальностей фотона с независимыми от Q^2 массами и ширинами адронных распадов «missing»-резонансов даст уверенность в существовании новых состояний в спектре барионов почти модельно независимым образом.

В настоящей работе представлены первые результаты по отбору событий в реакции $ep \rightarrow e\pi^+\pi^-p$ из экспериментальных данных детектора CLAS12 в резонансной области, в рамках коллаборации между Лабораторией им. Т. Джефферсона и Московским государственным университетом им. М. В. Ломоносова. Ис-

* E-mail: frolova.as17@physics.msu.ru

Таблица 1. Нуклонные резонансы, для которых получены амплитуды электровозбуждения из анализа данных CLAS по эксклюзивным каналам электророждения мезонов на протонах

| Эксклюзивные каналы реакции | Возбужденные состояния протона | Диапазон квадратов переданных импульсов Q^2 в реакции электророждения $\gamma_{\nu}pN^*$, ГэВ ² |
|-----------------------------|---|---|
| π^+n, π^0 | $\Delta(1232)3/2^+$, $N(1440)1/2^+$, $N(1520)3/2^-$, $N(1535)1/2^-$ | 0.16–6.00 0.30–4.16 |
| π^+n, π^0 | $N(1675)5/2^-$, $N(1680)5/2^+$, $N(1710)1/2^+$ | 1.60–4.50 |
| ηp | $N(1535)1/2^-$ | 0.20–2.90 |
| $\pi^+\pi^-p$ | $N(1440)1/2^+$, $N(1520)3/2^-$ | 0.25–1.50 |
| | $\Delta(1620)1/2^-$, $N(1650)1/2^-$, $N(1680)5/2^+$, $\Delta(1700)3/2^-$, $N(1720)3/2^+$, $N'(1720)3/2^+$ | 0.50–1.50 |

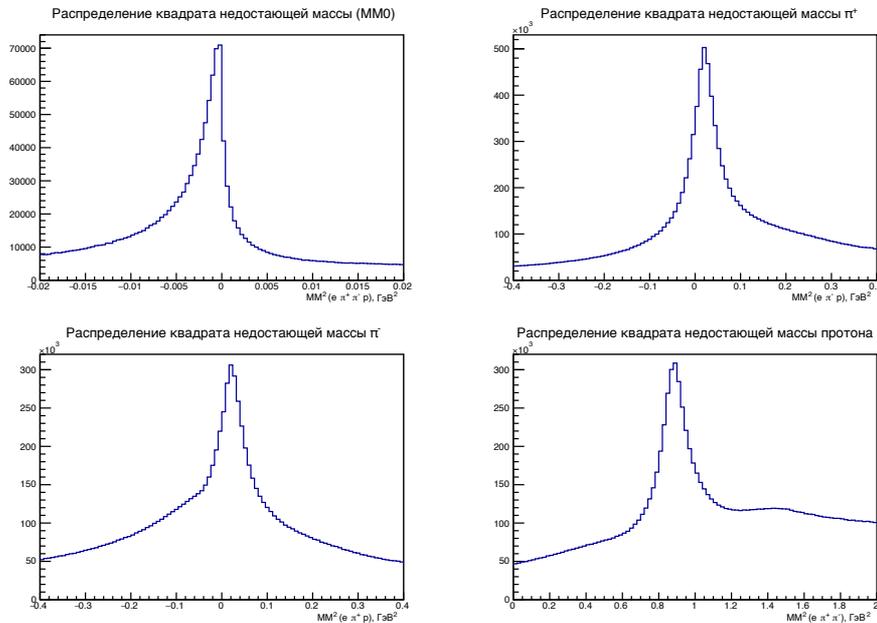


Рис. 1. Графики распределения квадратов недостающих масс для четырёх топологий: слева сверху – распределение квадрата недостающей массы в случае регистрации всех конечных частиц, справа сверху – распределение квадрата недостающей массы π^+ -мезона, слева внизу – распределение квадрата недостающей массы π^- -мезона, справа внизу – распределение квадрата недостающей массы протона

следования на детекторе CLAS12, обладающим светимостью до $10^{35} \text{см}^{-2} \text{сек}^{-1}$, почти полным угловым перекрытием и энергией непрерывного пучка электронов до 11 ГэВ, открывают наилучшие в мире возможности для изучения структуры основных и возбужденных состояний нуклона [4].

1. РЕАКЦИЯ $ep \rightarrow e\pi^+\pi^-p$

Реакция $ep \rightarrow e\pi^+\pi^-p$ — одна из основных реакций электророждения мезонов на протонах, которая наряду с однопионными каналами составляет набор незави-

симых 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 виртуальный фотон–протон и конечным N^* и не зависят от способа распада нуклонного резонанса. Для анализа событий двухпионного канала использовались данные при энергии пучка $E_e = 6.5$ ГэВ. Были получены распределения квадратов недостающих масс для четырёх топологий (рис. 1), соответствующих различным наборам детектированных частиц. В случае первой тополо-

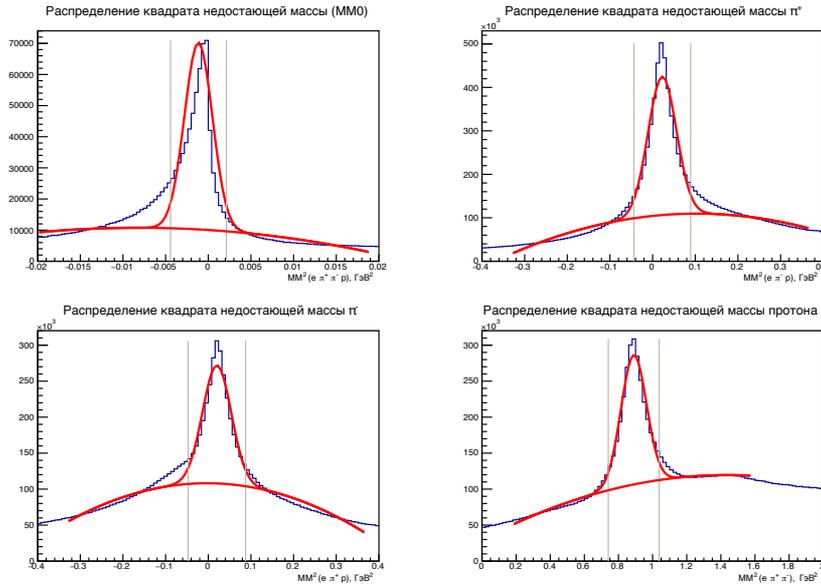


Рис. 2. Графики распределения квадратов недостающих масс для четырёх топологий, аппроксимированные функцией гауссиан + полином 2-й степени. Для топологии в случае регистрации всех конечных частиц применён «гибридный фит». Серыми вертикальными линиями обозначены границы $\pm 2\sigma$ от положения пика

гии (MM0) в конечном состоянии регистрировались электрон, протон и оба заряженных пиона. Во второй топологии в конечном состоянии регистрировались электрон, протон и отрицательный пион (MM π^+), положительный пион восстанавливался по методу недостающей массы. В третьей топологии в конечном состоянии регистрировались электрон, протон и положительный пион (MM π^-). В четвертой в конечном состоянии регистрировались электрон, положительный и отрицательный пионы (MM p).

Максимумы в распределениях квадратов недостающих масс находятся при ожидаемых значениях, соответствующих квадратам масс недостающих частиц, что даёт нам возможность аппроксимировать имеющиеся распределения гауссианом для отыскания более точных критериев отбора.

На рис. 2 представлены распределения квадратов недостающих масс в четырёх топологиях, аппроксимированные функцией $h \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} + a_0 + a_1x + a_2x^2$ (гауссиан + полином 2-й степени). Для топологии в случае регистрации всех конечных частиц (MM0) для более качественного выделения пика был применён «гибридный фит»: на широком диапазоне (-0.02, 0.02) была выполнена аппроксимация гауссианом + полиномом 2-й степени, на узком диапазоне (-0.0025, 0.0025) была проведена аппроксимация гауссианом $h \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$. Гибридный фит — сумма полинома 2-й степени $a_0 + a_1x + a_2x^2$ из аппроксимации на широком диапазоне и гауссиана из аппроксимации на узком диапазоне.

На начальном этапе были выбраны границы $\pm 2\sigma$ от положения пика гауссиана как критерий отбора, в этих

Таблица 2. Отношения сигнала к сумме сигнала и фона (ratio) и сигнала к фону (signal/background) для четырёх топологий

| Топология | MM0 | MM π^+ | MM π^- | MM p |
|-------------------|------|------------|------------|--------|
| ratio | 0.77 | 0.64 | 0.49 | 0.51 |
| signal/background | 3.37 | 1.79 | 0.95 | 1.37 |

границах были получены одномерные и двумерные распределения инвариантных масс различных пар частиц для топологии MM0 (рис. ??). Также, исходя из площадей под аппроксимирующими кривыми, для четырёх топологий были рассчитаны отношения (ratio) сигнала к сумме сигнала и фона (табл. 2).

На рис. 3 в распределении инвариантных масс пары π^+, π^- мезонов (центральный график в первой строке) виден пик, соответствующий рождению ρ -мезона; в распределении инвариантных масс пары π^+, p (правый график в верхней строке) присутствует пик, соответствующий рождению Δ^{++} -резонанса. Данные результаты демонстрируют надежность процедур по отбору событий канала $e p \rightarrow e \pi^+ \pi^- p$. В дальнейшем планируется исследовать природу пика на 1.7 ГэВ в распределении инвариантных масс пары π^-, p (левый график во второй строке) путем введения ограничений по W : $W < 2$ ГэВ, $W < 1$ ГэВ.

Планируется получить подобные рис. ?? распределения для остальных топологий (MM π^+ и MM π^-), изучить для них поведение фона.

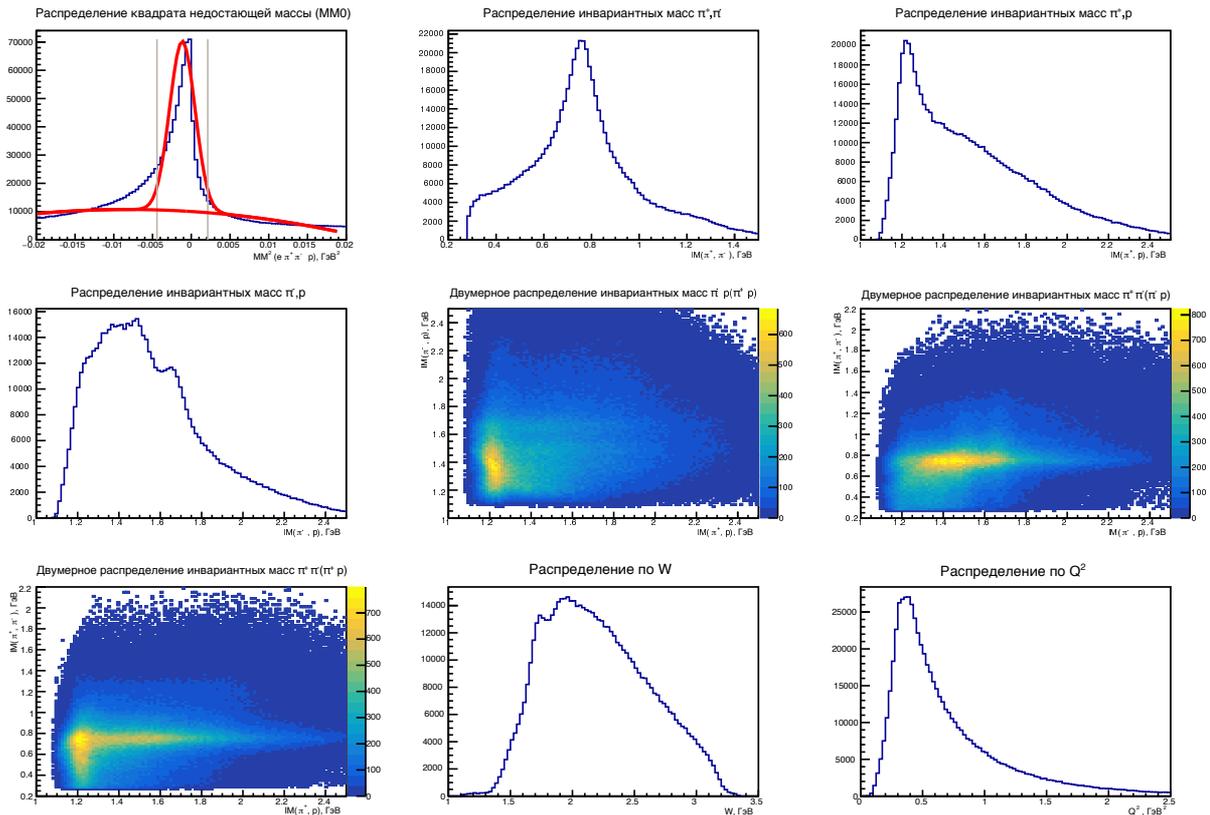


Рис. 3. *a* — Распределение квадратов недостающих масс в топологии MM0, *б* — распределение инвариантных масс пары π^+, π^- мезонов, *в* — распределение инвариантных масс пары π^+, p ; *г* — распределение инвариантных масс пары π^-, p , *д* — двумерное распределение инвариантных масс пар π^-, p Vs π^+, p , *е* — двумерное распределение инвариантных масс пар π^+, π^- Vs π^-, p ; *ж* — двумерное распределение инвариантных масс пар π^+, π^- Vs π^+, p , *з* — распределение по W , *и* — распределение по Q^2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были проанализированы данные CLAS12 с энергией пучка $E_e = 6.5$ ГэВ. Для реакции $ep \rightarrow e\pi^+\pi^-p$ двухпионного электророждения

отобраны события, соответствующие различным топологиям, получены начальные критерии отбора и построены распределения инвариантных масс различных пар частиц. Полученные распределения демонстрируют надежность процедур восстановления конечных частиц в реакциях эксклюзивного электророждения пар заряженных пионов.

[1] Aznauryan I.G., Burkert V.D. // Prog. Part. Nucl. Phys. 2012. **1**, P. 671.
 [2] Burkert V. D., Roberts C. D. // Rev. Mod. Phys. (in press), arXiv:1710.02549 [nucl-ex].
 [3] Roberts C. D. // Few Body Syst. 2018. **59**. P. 72.
 [4] Burkert V. D. // Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 2018. **68**. P. 405.

[5] Mokeev V. I. // Few Body Syst. 2018. **59**. P. 46.
 [6] Segovia J. et al. // Few Body Syst. 2015. **55**. P. 1185.
 [7] Segovia J. et al. // Phys. Rev. Lett. 2015. **115**. 171801.
 [8] Angelo A. D., Burkert V. D., Carman D. S. et al. // A Search for Hybrid Baryons in Hall B with CLAS12. JLab Experiment E12-09-003.

Selecting the events of $ep \rightarrow e\pi^+\pi^-p$ exclusive electroproduction from the CLAS12 detector experimental data

A. S. Frolova^{1,a}, A. A. Golubenko², 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, Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

E-mail: ^afrolova.as17@physics.msu.ru

The first results on the selection of events of $ep \rightarrow e\pi^+\pi^-p$ exclusive electroproduction from the CLAS12 detector experimental data in the resonance area for the beam energy $E_e = 6.5\text{GeV}$ are presented in this report.

For the $ep \rightarrow e\pi^+\pi^-p$ reaction the missing mass distributions were obtained for four topologies corresponding to different sets of detected particles. The primary selection criteria were worked out and the invariant mass for the various pairs of particles were obtained. The obtained distributions demonstrate the reliability of the algorithms reconstructing the final particles in exclusive electroproduction reactions.

PACS: 13.60.Le

Keywords: meson electroproduction.

Received 06 June 2022.

Сведения об авторах

1. Фролова Анна Сергеевна — студентка; e-mail: frolova.as17@physics.msu.ru.
2. Голубенко Анна Александровна — ведущий инженер; тел.: (495) 939-16-97, e-mail: anya@jlab.org.
3. Исупов Евгений Леонидович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-25-58, e-mail: e.l.isupov@gmail.com.