

Вычисление эксклюзивных структурных функций канала однопионного электророждения на протоне

А. Г. Насртдинов^{1,*}, М. М. Давыдов¹, А. Д. Булгаков¹,
А. А. Голубенко², Е. Л. Исупов², В. И. Мокеев³, В. В. Чесноков²
¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра общей ядерной физики
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

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

³Национальная лаборатория Томаса Джефферсона, Ньюпорт-Ньюс, США
(Поступила в редакцию 05.06.2022; подписана в печать 06.09.2022)

В настоящей работе представлен подход для извлечения неполяризованных поперечных, продольных, поперечно–поперечных, продольно–поперечных структурных функций. Извлечение структурных функций производится из экспериментальных данных по дифференциальным сечениям однопионного рождения, полученных на детекторе CLAS (Лаборатория Джефферсона, США). Доступные данные покрывают широкий кинематический диапазон по инвариантной массе конечной адронной системы $W < 1.7$ ГэВ и виртуальности фотона $Q^2 < 5.0$ ГэВ². Извлечённые $N\pi$ эксклюзивные структурные функции играют значительную роль в изучении структуры возбуждённых состояний нуклона. В ходе работы были разработаны новые методы вычисления структурных функций. Результаты, полученные различными методами, хорошо согласуются друг с другом.

PACS: 13.60.Le

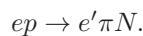
УДК: 539.126.34.

Ключевые слова: электророждение, дифференциальное сечение, структурная функция.

ВВЕДЕНИЕ

Измерения эксклюзивных каналов электророждения на протоне $\pi^0 p$ и $\pi^+ n$ с помощью ускорительного и детекторного комплекса (CLAS Hall B) Национальной Ускорительной Лаборатории им Т. Джефферсона (JLAB) составляют наибольшую часть известных на данный момент данных. Данные по эксклюзивным каналам электророждения — главный источник информации об амплитудах электровозбуждения нуклонных резонансов [1, 3–6]. Они предоставляют более глубокое понимание структуры нуклонов в основном и возбуждённых состояниях и динамики сильного взаимодействия, которое лежит в основе образования резонансов из кварков и глюонов. Вычисление всех наблюдаемых процесса является одной из первых задач при его исследовании.

В данной работе анализировалось дифференциальное сечение взаимодействия виртуального фотона с протоном $\left(\frac{d\sigma_\gamma}{d\Omega_\pi}\right)$ в реакции электророждения пионов



Связь между сечением рассеяния электронов и сечением под действием виртуальных фотонов может быть

выражена в следующем виде [7]

$$\frac{d^4\sigma_e}{dWdQ^2d\Omega_\pi} = \Gamma_\gamma \frac{d\sigma_{\gamma v}}{d\Omega_\pi},$$

$$\Gamma_\gamma = \frac{\alpha}{4\pi} \cdot \frac{1}{E_{beam}^2 m_p^2} \cdot \frac{W(W^2 - m_p^2)}{(1 - \varepsilon)Q^2},$$

$$\varepsilon = \left(1 + 2\left(1 + \frac{\nu^2}{Q^2}\right) \tan^2 \frac{\theta_e}{2}\right)^{-1},$$

где $\Gamma_\gamma(W, Q^2)$ — поток виртуальных фотонов, E_{beam} — энергия начального пучка электронов, Q^2 — виртуальность фотона, ε — поляризация виртуального фотона, W — инвариантная масса конечной адронной системы, m_p — масса протона в ГэВ, α — постоянная тонкой структуры, θ_e — полярный угол рассеяния электрона в лабораторной системе отсчета, ν — энергия виртуального фотона.

Сечение эксклюзивного электророждения $N\pi$ на протонах виртуальными фотонами может быть [7] представлено в следующем виде

$$\frac{d\sigma_{\gamma v}}{d\Omega_\pi} = \frac{d\sigma_u}{d\Omega_\pi} + \varepsilon \cdot \frac{d\sigma_{tt}}{d\Omega_\pi} \cdot \cos 2\varphi + \sqrt{2\varepsilon(1 + \varepsilon)} \frac{d\sigma_{lt}}{d\Omega_\pi} \cdot \cos \varphi, \quad (1)$$

$$\frac{d\sigma_u}{d\Omega_\pi} = \frac{d\sigma_t}{d\Omega_\pi} + \varepsilon \frac{d\sigma_l}{d\Omega_\pi}, \quad (2)$$

где $\frac{d\sigma_u}{d\Omega_\pi}$, $\frac{d\sigma_t}{d\Omega_\pi}$, $\frac{d\sigma_l}{d\Omega_\pi}$, $\frac{d\sigma_{tt}}{d\Omega_\pi}$, $\frac{d\sigma_{lt}}{d\Omega_\pi}$ — неполяризованная, поперечная, продольная и поляризованная поперечно–поперечная, продольно–поперечная структурные функции, соответственно. Перечисленные структурные

* E-mail: nasrtdinov.ag17@physics.msu.ru

функции зависят от инвариантной массы конечной адронной системы W , полярного q и азимутального ϕ углов эмиссии конечного пиона в системе центра масс.

В работе представлены методы для извлечения перечисленных выше структурных функций из экспериментальных данных CLAS по дифференциальным сечениям $\pi^0 p$ и $\pi^+ n$ электроорождения на протонах содержащихся в CLAS Physics Data Base [2].

1. ОТБОР ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Перед началом работы из базы данных [2] были извлечены дифференциальные сечения реакций электроорождения $N\pi$ на протонах под действием виртуальных фотонов. При этом были отобраны экспериментальные данные, которые удовлетворяли следующим критериям:

1. Были исключены точки с относительной погрешностью более 0.7.
2. Был выполнен фит измеренных дифференциальных сечений в каждом интервале по (W, Q^2, θ) в зависимости от угла согласно (1). Угловое распределение (1) представляет собой модельно-независимое описание в приближении однофотонного обмена [7]. Строились распределения отклонений от фитированных значений по χ^2 . Наилучшее согласие значений с фитированными значениями происходит в том случае, если в зависи-

мостях с $\chi^2 > 1.3$ отбрасываются точки, отклоняющиеся от фитированных значений более чем 1.5 стандартных отклонения. (рис. 1).

3. Данные в интервалах по (W, Q^2, θ) , в которых содержится менее 4 точек по φ были исключены.

2. МЕТОДЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ ФУНКЦИЙ

В работе использовались различные методы [9] извлечения структурных функций, которые зависели от наличия в угловых распределениях по φ интервалов, где данные отсутствовали из-за ограничений налагаемых акцептансем детектора.

В нулевом методе предполагалось, что данные покрывают полный диапазон по углу $\varphi \in [0, 2\pi]$, в последующих методах предполагалось, что данные покрывают диапазон по углу $\varphi \in [\varphi_{min}, \varphi_{max}]$, в первом и втором методах вычисления были проведены без и с экстраполяцией соответственно. В методах 3 и 4 предполагалось, что имеются одна или две соответственно области, в которых данные отсутствуют из-за наличия мертвых зон детектора, вычисления были проведены без какой-либо экстраполяции в области, в которых данные отсутствовали.

Были получены [9] следующие выражения для неполяризованных структурных функций

$$\frac{d\sigma_{\gamma v}}{d\Omega_{\pi}} = \frac{d\sigma_u}{d\Omega_{\pi}} + \varepsilon \cdot \frac{d\sigma_{tt}}{d\Omega_{\pi}} \cdot \cos 2\varphi + \sqrt{2\varepsilon(1+\varepsilon)} \frac{d\sigma_{lt}}{d\Omega_{\pi}} \cdot \cos \varphi,$$

$$\frac{d\sigma_u}{d\Omega_{\pi} \text{ method 1}} = \frac{1}{\varphi_{max} - \varphi_{min}} \times \left[\int_{\varphi_{min}}^{\varphi_{max}} \frac{d\sigma_{\gamma v}}{d\Omega_{\pi_{exp}}} d\varphi - \varepsilon \frac{d\sigma_{tt}}{d\Omega_{\pi_0}} \int_{\varphi_{min}}^{\varphi_{max}} \cos 2\varphi d\varphi - \sqrt{\varepsilon(1+\varepsilon)} \frac{d\sigma_{lt}}{d\Omega_{\pi_0}} \int_{\varphi_{min}}^{\varphi_{max}} \cos \varphi d\varphi \right],$$

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_u}{d\Omega_{\pi} \text{ method 2}} &= \\ &= \frac{1}{2\pi} \cdot \left[\int_{\varphi_{min}}^{\varphi_{max}} \frac{d\sigma_{\gamma v}}{d\Omega_{\pi_{exp}}} d\varphi + \int_0^{\varphi_{min}} \left[\frac{d\sigma_u}{d\Omega_{\pi_0}} + \varepsilon \frac{d\sigma_{tt}}{d\Omega_{\pi_0}} \cdot \cos 2\varphi + \sqrt{\varepsilon(1+\varepsilon)} \frac{d\sigma_{lt}}{d\Omega_{\pi_0}} \cdot \cos \varphi \right] d\varphi + \right. \\ &\quad \left. + \int_{\varphi_{max}}^{2\pi} \left[\frac{d\sigma_u}{d\Omega_{\pi_0}} + \varepsilon \frac{d\sigma_{tt}}{d\Omega_{\pi_0}} \cdot \cos 2\varphi + \sqrt{\varepsilon(1+\varepsilon)} \frac{d\sigma_{lt}}{d\Omega_{\pi_0}} \cdot \cos \varphi \right] d\varphi \right], \end{aligned}$$

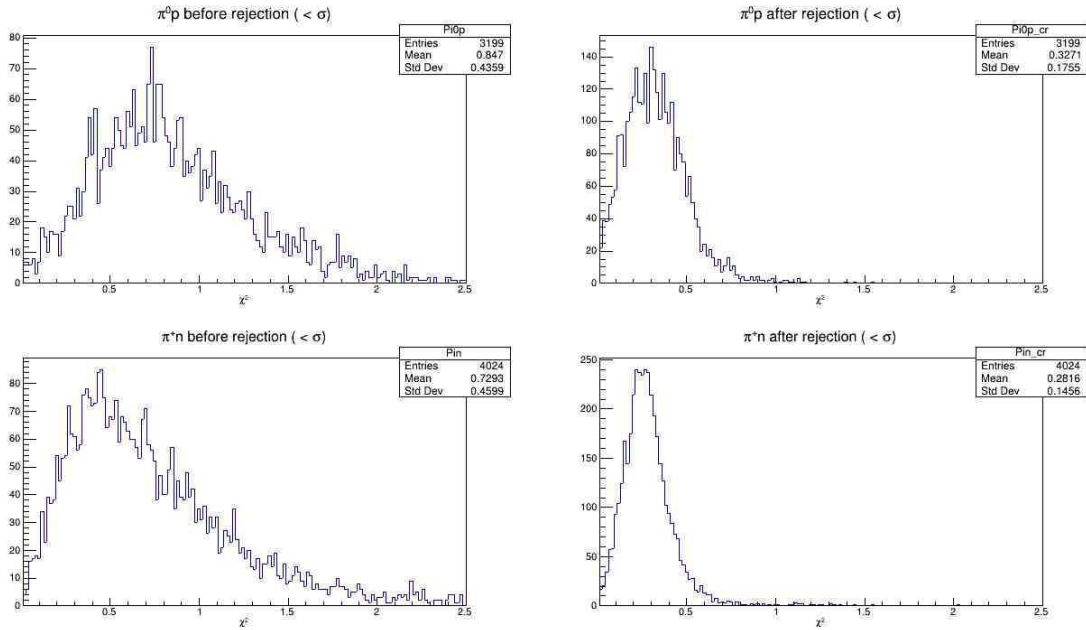


Рис. 1. χ^2 распределения отклонений от фитированных значений до отбора и после отбора для каналов $\pi^0 p$ и $\pi^+ n$ соответственно

$$\frac{d\sigma_u}{d\Omega}_{\pi \text{ method 3}} = \left[\int_{\varphi_{1 \min}}^{\varphi_{1 \max}} \frac{d\sigma_{\gamma v}}{d\Omega_{\pi \text{exp}}} d\varphi + \int_{\varphi_{2 \min}}^{\varphi_{2 \max}} \frac{d\sigma_{\gamma v}}{d\Omega_{\pi \text{exp}}} d\varphi \right] \times$$

$$\times \left([(\varphi_{1 \max} - \varphi_{1 \min}) + (\varphi_{2 \max} - \varphi_{2 \min})] + r_{tt} \cdot \left[\int_{\varphi_{1 \min}}^{\varphi_{1 \max}} \cos 2\varphi d\varphi + \int_{\varphi_{2 \min}}^{\varphi_{2 \max}} \cos 2\varphi d\varphi \right] + \right.$$

$$\left. + r_{tt} \cdot \left[\int_{\varphi_{1 \min}}^{\varphi_{1 \max}} \cos \varphi d\varphi + \int_{\varphi_{2 \min}}^{\varphi_{2 \max}} \cos \varphi d\varphi \right] \right)^{-1}.$$

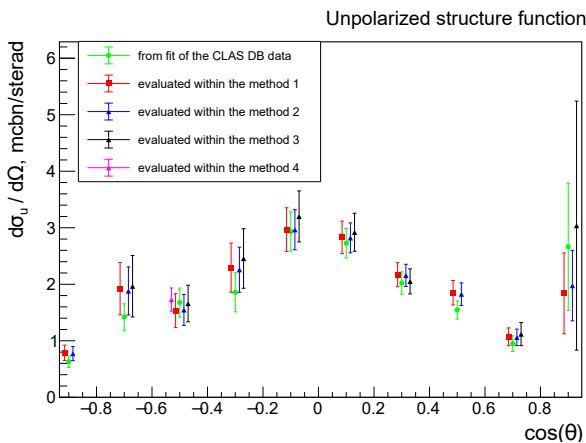


Рис. 2. зависимость неполяризованной структурной функции от $(\cos \theta)$ для канала $\pi^0 p$ при $W = 1.4 \text{ GeV}$, $Q^2 = 0.65 \text{ GeV}^2$

Четвертый метод является модификацией метода 3 в случае, когда данные по дифференциальным сечени-

ям отсутствуют в двух интервалах по φ . Формула для метода 3 обобщалась добавлением к двум еще и третьего интервала по φ , где имеются экспериментальные данные по дифференциальным сечениям.

Согласно приведенным выше выражениям и методам [9] были вычислены неполяризованные структурные функции (рис. 2).

Известные соотношения для неполяризованных структурных функций позволили провести разделение структурных функций, были получены [9] продольные, поперечные, поперечно-поперечные, продольно-поперечные структурные функции (рис. 3).

3. САЙТ И ИНСТРУКЦИЯ

В рамках описанных выше методов из данных CLAS для реакций электророжения $\pi^0 p$ и $\pi^+ n$ в области $W < 1.7 \text{ ГэВ}$ и $0.2 \text{ ГэВ}^2 < Q^2 < 5 \text{ ГэВ}^2$ были получены

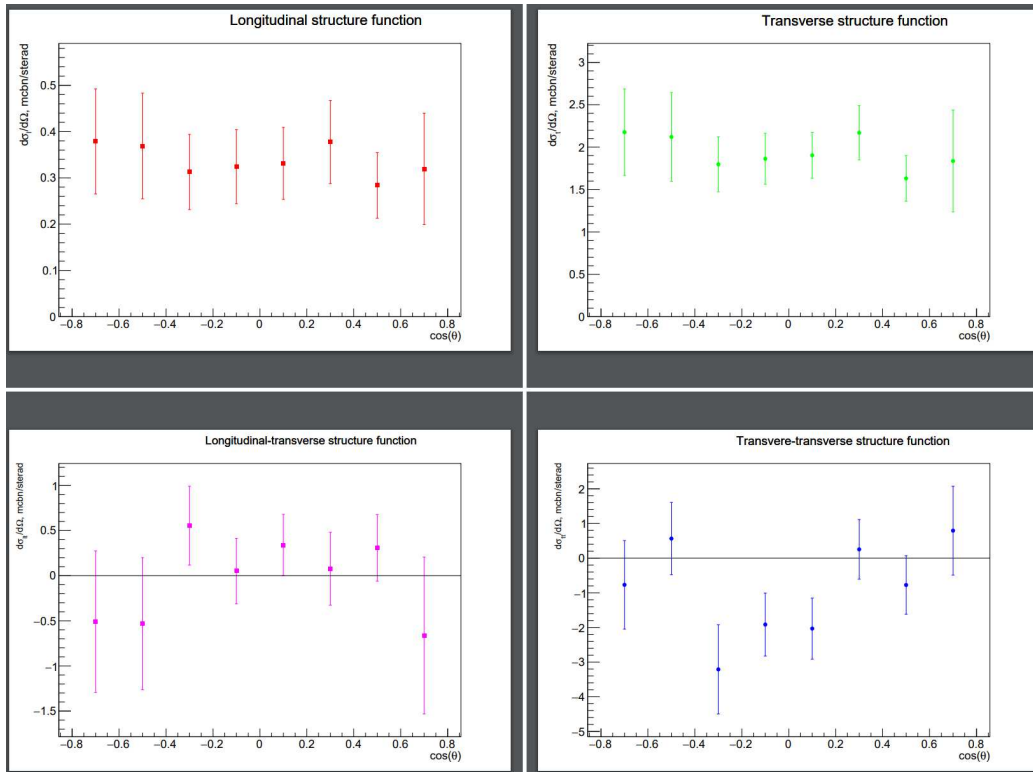


Рис. 3. Зависимость продольных, поперечных, продольно–поперечных, поперечно–поперечных структурных функций от $(\cos \theta)$ для канала $\pi^0 p$ при $W = 1.4 \text{ GeV}$, $Q^2 = 0.65 \text{ GeV}^2$

экслюзивные структурные функции $\frac{d\sigma_u}{d\Omega\pi}$, $\frac{d\sigma_t}{d\Omega\pi}$, $\frac{d\sigma_l}{d\Omega\pi}$, $\frac{d\sigma_{tt}}{d\Omega\pi}$, $\frac{d\sigma_{lt}}{d\Omega\pi}$.

Для удобства визуализации большого количества информации, полученной при обработке экспериментальных данных, был создан сайт, расположенный по адресу <https://clas.sinp.msu.ru/almaz/>

На данном сайте в свободном доступе находятся как результаты (графики и таблицы), полученные в работе, так и информация о методах, согласно которым проводились вычисления.

Инструкция по сайту:

Evaluation methods — содержит информацию о всех методах вычислений, использованных в работе.

Evaluated exclusive structure functions — содержит информацию о полученных структурных функциях:

- Вкладка *METHOD COMPARISON*

содержит сравнение различных методов извлечения неполяризованных $\frac{d\sigma_u}{d\Omega}$, поперечно–поперечных $\frac{d\sigma_{tt}}{d\Omega}$, продольно–поперечных $\frac{d\sigma_{lt}}{d\Omega}$ структурных функций.

- Вкладка *FINAL RESULTS*

содержит извлеченные поперечные $\frac{d\sigma_t}{d\Omega}$, про-

дольные $\frac{d\sigma_l}{d\Omega}$, поперечно–поперечные $\frac{d\sigma_{tt}}{d\Omega}$, продольно–поперечные $\frac{d\sigma_{lt}}{d\Omega}$ структурные функции.

Для получения необходимых данных нужно перейти по одной из вышеуказанных вкладок. Далее необходимо выбрать канал реакции, а также ввести кинематический диапазон по W и Q^2 .

Веб-сайт выдаст список всех данных, имеющихся на сайте и принадлежащих выбранной кинематической области. Для получения подробной информации нужно выбрать из списка необходимый эксперимент.

Разработанный веб-сайт представляет функциональность для вычисления структурных функций даже в случае неполного перекрытия данных по азимутальному углу мезона.

4. ПЛАНЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАБОТЫ

Предполагается, что полученные неполяризованные, продольные, поперечные, поперечно–поперечные, продольно–поперечные структурные функции в дальнейшем будут использованы для интерполяции в рассматриваемой кинематической области. Эта интерполяция позволит сравнивать различные экспериментальные данные, соотносить экспериментальные дан-

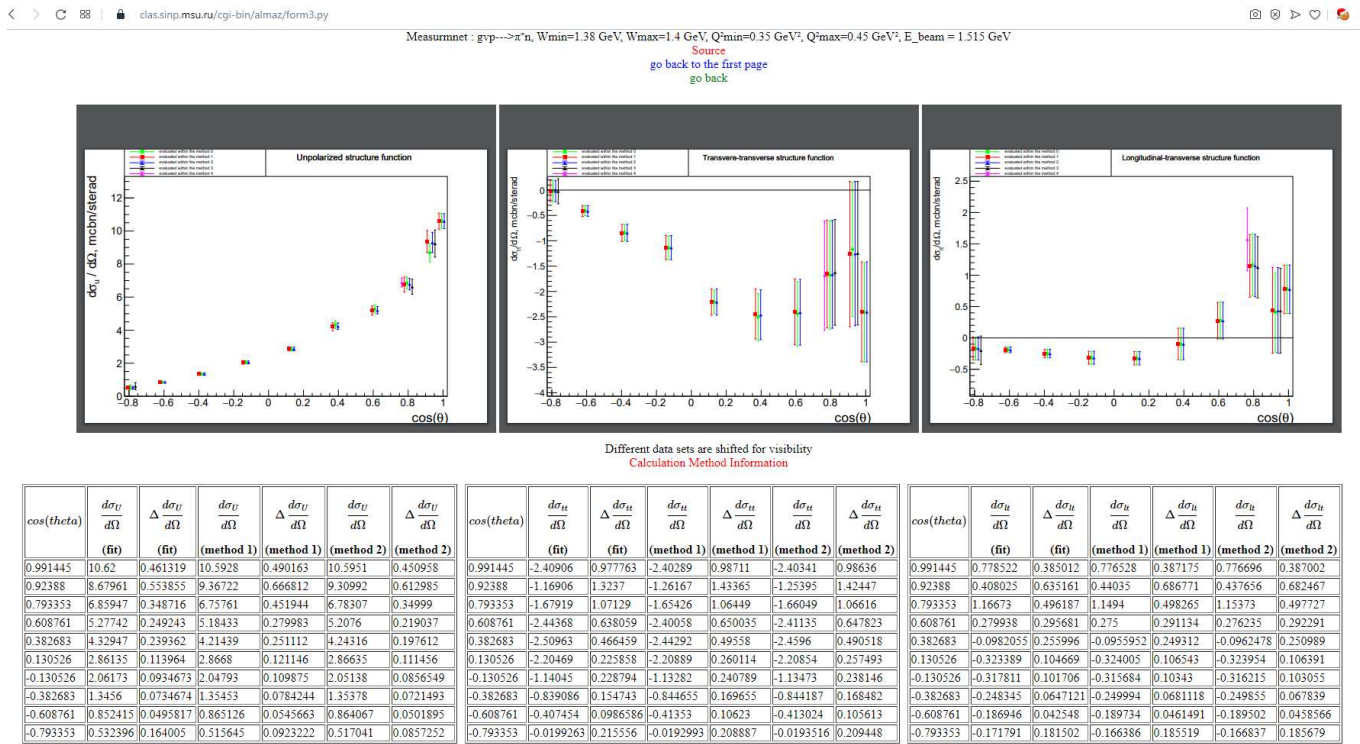


Рис. 4. отображение полученных данных на сайте

ные с различными теоретическими моделями.

Также планируется получить зависимости всех структурных функций в виде трехмерных графиков с осями W и Q^2 , что позволит проводить более подробный анализ наблюдаемых зависимостей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из данных CLAS по дифференциальным сечениям электророжения $\pi^0 p$ и $\pi^+ n$ на протонах были получены эксклюзивные структурные функции $\frac{d\sigma_u}{d\Omega_\pi}$, $\frac{d\sigma_t}{d\Omega_\pi}$, $\frac{d\sigma_l}{d\Omega_\pi}$, $\frac{d\sigma_{lt}}{d\Omega_\pi}$, $\frac{d\sigma_{tt}}{d\Omega_\pi}$ в области $W < 1.7$ ГэВ и $0.2 < Q^2 < 5.0$ ГэВ². Полная информация об из-

влеченных структурных функциях доступна на веб-сайте [8]. Полученные результаты по эксклюзивным структурным функциям представляют значительный интерес для исследования структуры возбужденных состояний нуклона во второй и третьей резонансных областях. В будущем данные об эксклюзивных структурных функциях будут использованы для предсказания дифференциальных сечений каналов электророжения $\pi^0 p$ и $\pi^+ n$ из данных полученных на детекторе CLAS в качестве первой модельно-независимой оценки этих сечений всюду в кинематической области $W < 1.7$ ГэВ и $Q^2 < 5.0$ ГэВ².

[1] Aznauryan I.G., Burkert V.D. // Prog. Part. Nucl. Phys. 2012. **1**. P. 671.
 [2] CLAS Physics Database // <http://clasweb.jlab.org/physicsdb>
 [3] Carman D.S., Joo K., Mokeev V.I. et al. // Few Body Syst. 2020. **61**. P. 29.
 [4] Brodsky S.J. et al. // Strong QCD from Hadron Structure Experiments, e-Print:2006.06802 [hep-ph], in print in Int.J.Mod.Phys.E. 2020.

[5] Burkert V.D., Roberts C.D. et al. // Rev. Mod. Phys. 2019. P. 91.
 [6] Burkert V.D., Roberts C.D. et al. // Moscow Univ. Phys. Bull. (2019). **74**. P. 243.
 [7] Amaldi E., Fubini S., Furlan G. // Pion-Electroproduction: Electroproduction at Low Energy and Hadron Form Factors. Springer Tracts in Modern Physics. 1979.
 [8] <https://clas.sinp.msu.ru/almaz/>
 [9] Булгаков А.Д., Голубенко А.А., Давыдов М.М. и др. // Известия РАН. 2021. **85**, № 5.

Calculation of the exclusive structural functions of the channel of one-pion electroproduction on a proton

A. G. Nasrtdinov^a, M. M. Davydov¹, A. D. Bylgakov¹, A. A. Golubenko², E. L. Isupov², V. I. Mokeev³,
V. V. Chesnokov²

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*

³*Thomas Jefferson National Accelerator Facility, Newport News, Virginia, USA
E-mail: ^anasrtdinov.ag17@physics.msu.ru*

This article presents an approach for extracting unpolarized transverse, longitudinal, transverse-transverse, longitudinal-transverse structural functions. The extraction of structure functions is performed from experimental data on the differential cross sections of one-pion production obtained with the CLAS detector (Jefferson Laboratory, USA). The available data cover a wide kinematic range for the invariant mass of the final hadronic system $W < 1.7$ GeV and the virtuality of the photon $Q^2 < 5.0 \text{ GeV}^2$.

The extracted $N\pi$ exclusive structure functions play a significant role in the study of the structure of the excited states of the nucleon. In the course of the work, new methods for calculating structure functions were developed. The results obtained by various methods are in good agreement with each other.

PACS: 13.60.Le

Keywords: electroproduction, differential cross section, structure function.

Received 05 June 2022.

Сведения об авторах

1. Насртдинов Алмаз Газинурович — студент; e-mail: nasrtdinov.ag17@physics.msu.ru.
2. Давыдов Максим Михайлович — студент.
3. Булгаков Александр Дмитриевич — студент.
4. Голубенко Анна Александровна — ведущий инженер; тел.: (495) 939-16-97, e-mail: anya@jlab.org.
5. Исупов Евгений Леонидович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-25-58, e-mail: e.l.isupov@gmail.com.
6. Мокеев Виктор Иванович — доктор физ.-мат. наук, staff scientist; e-mail: mokeev@jlab.org.
7. Чесноков Виталий Владимирович — программист, тел. (495) 939-34-83, e-mail: chesn@depni.sinp.msu.ru