

## Интерполяция и экстраполяция сечений и структурных функций инклюзивного рассеяния электронов на протонах при $W < 4.0 \text{ ГэВ}$ и $2.0 < Q^2 < 7.0 \text{ ГэВ}^2$

А. А. Голубенко<sup>1,2,\*</sup>, Е. Н. Головач<sup>2,†</sup>, Е. Л. Исупов<sup>2</sup>,  
Б. С. Ишханов<sup>1,2</sup>, В. А. Клименко<sup>1</sup>, В. И. Мокеев<sup>3</sup>, В. В. Чесноков<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына МГУ имени М. В. Ломоносова  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

<sup>3</sup>Thomas Jefferson National Accelerator Facility, 12000 Jefferson Avenue, Suite 15, Newport News, VA 23606, USA  
(Статья поступила 30.06.2019; Подписана в печать 08.08.2019)

Изучение данных по электронному рассеянию на нуклонах дает доступ к детальной информации о распределении кварков всех цветов и глюонов в основном состоянии нуклона. Данные, полученные в лаборатории Джефферсона по инклюзивному электронному рассеянию в резонансной области, позволили получить данные по амплитудам электророждения для большинства нуклонных резонансов с массами  $< 1.8 \text{ ГэВ}$ . В статье описывается метод оценки наблюдаемых инклюзивного электронного рассеяния в резонансной области на основе экспериментальных данных. Предложенный метод позволяет оценить резонансные вклады в наблюдаемые в инклюзивном рассеянии амплитуды электророждения  $N^*$  в первый раз. Это открывает новые возможности для доступа к партонному распределению в основном состоянии нуклона в резонансной области по Бьёркиновской переменной  $x_B$ .

PACS: 13.60.Le

УДК: 539.126.34.

Ключевые слова: электророждение мезонов, нуклонные резонансы.

### ВВЕДЕНИЕ

Исследования рождения мезонов при взаимодействии электронов и протонов на детекторе CLAS в Национальной Лаборатории им. Т. Джефферсона значительно расширили знания о структуре основного и возбужденных нуклонных состояний [1, 2]. В настоящее время они являются единственным источником информации о многих аспектах КХД при возбуждении нуклонных состояний с различными квантовыми числами и с отчетливо различающимися структурными особенностями. Детектором CLAS получена основная часть имеющихся данных по всем каналам электророждения мезонов на нуклонах в резонансной области при  $Q^2$  до  $5.0 \text{ ГэВ}^2$ .

Подробная информация об амплитудах электророждений большинства возбужденных нуклонных состояний, полученная на детекторе CLAS, открывает новые возможности для объяснения структуры основного состояния нуклона из данных по инклюзивному электронному рассеянию. Данные по инклюзивному рассеянию электронов описываются в терминах структурных функций  $F_1(x_B, Q^2)$  и  $F_2(x_B, Q^2)$  и дают доступ к функциям партонных распределений для основного состояния нуклона. Функции партонного распределения определяют вероятность найти партон с долей  $x_B$  полного импульса нуклона. Поведение партонных

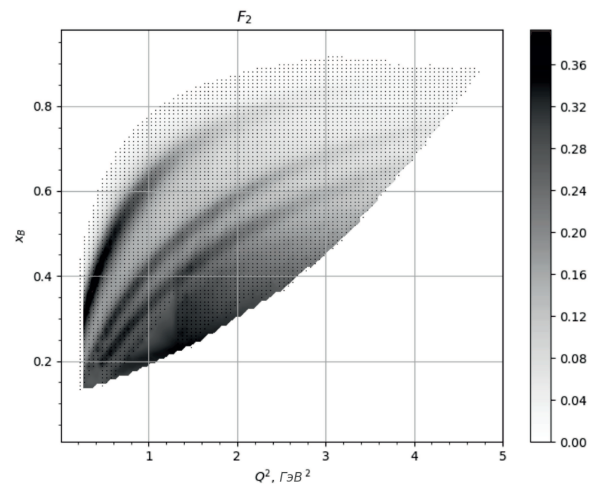


Рис. 1: Кинематическая область данных CLAS [5] для инклюзивных структурных функций  $F_2$  в зависимости от  $Q^2$  и  $x_B$ . Черные точки — значения экспериментальных данных. Отчетливо видно три полосы в двумерных распределениях, соответствующие первой, второй и третьей резонансной области. Структурные функции возрастают для малых  $x_B$ , соответствующих переходу в режим глубокого неупругого рассеяния

распределений при больших значениях  $x_B$ , соответствующим резонансной области, вызывает особый интерес. До сих пор партонные распределения оценивались либо вне области резонансного возбуждения, либо в теоретическом предположении о кварк-адронной дуальности [2, 3] в области возбуждения резонансов.

\*E-mail: [aa.golubenko@physics.msu.ru](mailto:aa.golubenko@physics.msu.ru)

†E-mail: [golovach@jlab.org](mailto:golovach@jlab.org)

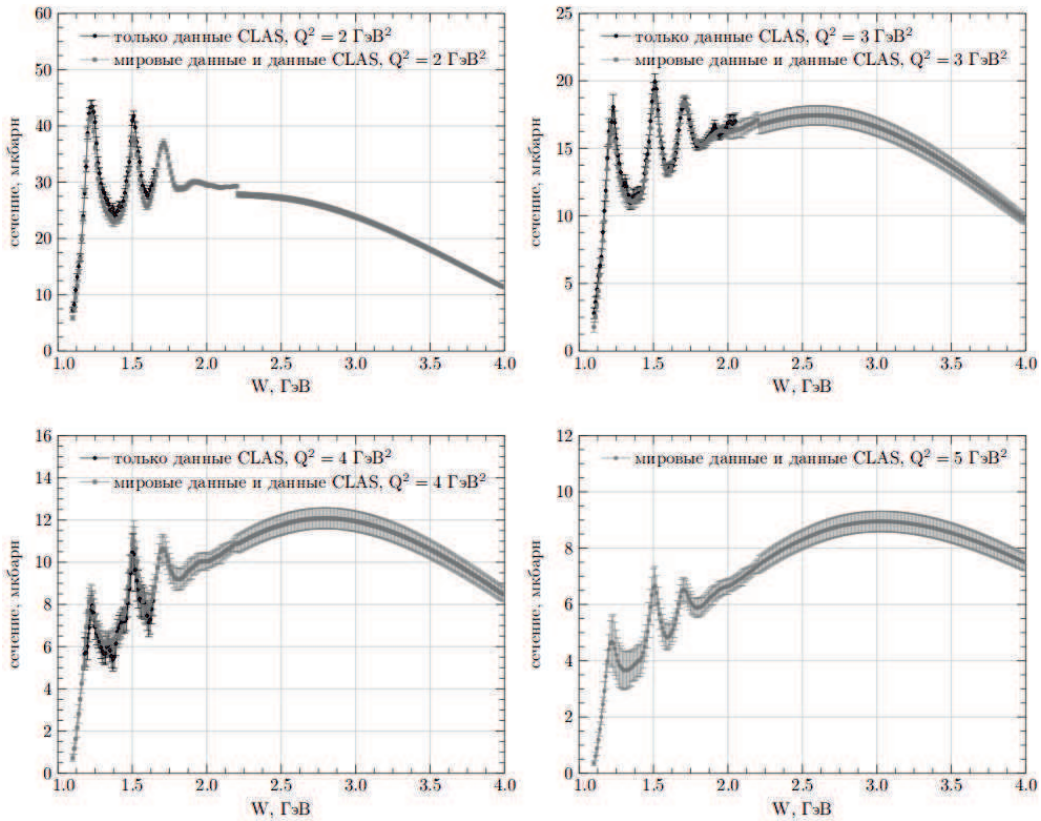


Рис. 2: Сравнение неполяризованных полных сечений взаимодействия виртуального фотона и протона для  $Q^2 = 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 \text{ GeV}^2$  для начальной энергии пучка  $E_e = 10.6 \text{ GeV}$ , оцененные с использованием двух наборов экспериментальных данных:  $a$  — только данные CLAS и  $b$  — комбинация данных CLAS и мировых данных

Результаты коллаборации CLAS впервые позволяют оценить резонансные вклады в инклюзивные структурные функции  $F_1(x_B, Q^2)$  и  $F_2(x_B, Q^2)$  на основе результатов эксперимента по электровозбуждению нуклонных резонансов и улучшить таким образом информацию о партонных распределениях основного состояния нуклона при больших  $x_B$ , соответствующих области резонансного возбуждения.

В этой работе представлен метод оценки наблюдаемых инклюзивного рассеяния: инклюзивных электронных и виртуальных фотон-протонных сечений, и инклюзивных структурных функций  $F_1(x_B, Q^2)$  и  $F_2(x_B, Q^2)$  в области  $1.07 < W < 4.0 \text{ GeV}$  и  $0.5 < Q^2 < 7.0 \text{ GeV}^2$  из имеющихся экспериментальных данных. Вышеупомянутые наблюдаемые могут быть получены на веб-странице [4] с числовым или графическим результатом по запросу пользователя. Достоверная оценка наблюдаемых инклюзивного рассеяния электронов в области возбуждения резонансов представляет собой первый шаг к получению функции партонного распределения основного состояния нуклона в резонансной области и учету резонансных вкладов.

Данные CLAS обладают преимуществом в резонансной области. Из-за почти  $4\pi$  покрытия детектор CLAS способен получить инклюзивную функцию  $F_2(x_B, Q^2)$  в гораздо большем диапазоне  $W(x_B)$  по сравнению

с иными спектрометрами. Это преимущество имеет особое значение для оценки наблюдаемых инклюзивных электронных рассеяний в области резонансного возбуждения с ярко выраженными резонансными структурами, хорошо видимыми на рис. 1. Вне области данных CLAS и во всем  $W$ -диапазоне при  $Q^2 > 4.5 \text{ GeV}^2$  в качестве оценки экспериментальных результатов используется параметризация [6] инклюзивных структурных функций, полученных во всех научных центрах.

Интерполяция экспериментальных результатов производится независимо для каждого значения  $W$ .  $Q^2$  — эволюция инклюзивных структурных функций параметризована с использованием  $Q^2$ -зависимостей, ожидаемых от расширения операторного произведения для моментов инклюзивных структурных функций ( $j = 1, 2$ ):

$$F_j(W, Q^2) = C_{0,j}(W) + \frac{C_{1,j}(W)}{Q^2} + \frac{C_{2,j}(W)}{Q^4} + \dots$$

Значения  $C_{1,j}$  ( $i = 0, 1, 2, j = 1, 2$ ) получены из параметризации экспериментальных данных. Структурные функции  $F_1(W, Q^2)$  посчитаны из структурных функций  $F_2(W, Q^2)$  в предположении параметризации [7] для отношения продольной и поперечной компонент

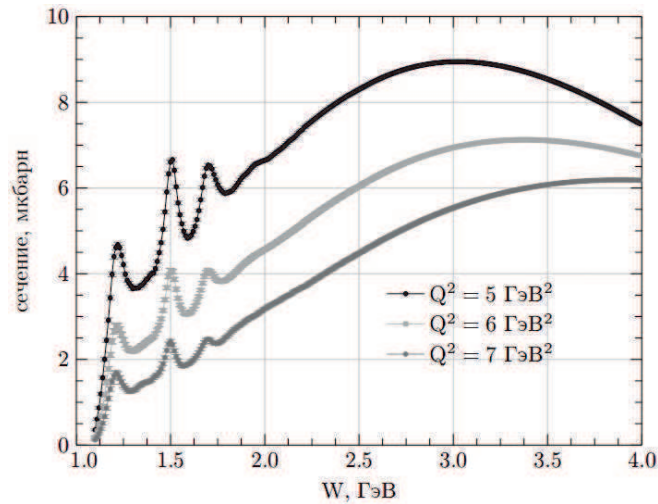


Рис. 3: Прогнозируемые результаты CLAS12 по измерению полного инклюзивного сечения взаимодействия виртуального фотона и протонов при  $W < 2.0$  ГэВ и начальной энергии пучка  $E_e = 10.6$  ГэВ. Величины ошибок отражают статистические погрешности, оцененные для интегрированной светимости  $12.8 \cdot 10^{10}$  мкбн<sup>-1</sup>, полученной весной 2018 г. на детекторе CLAS12

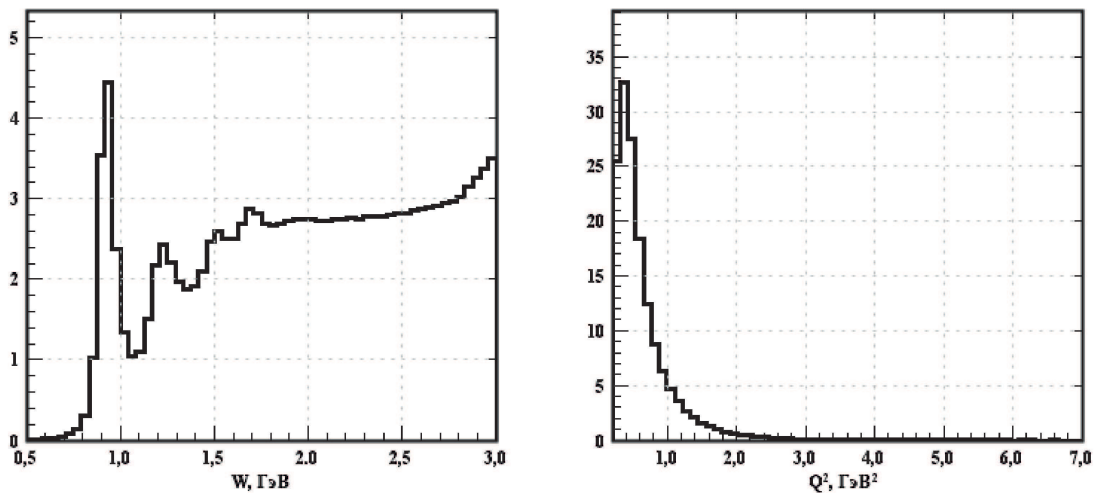


Рис. 4:  $W$ -распределение (слева) и  $Q^2$ -распределение (справа) событий инклюзивного рассеяния электронов, полученные на основе анализа данных CLAS12. Начальная энергия пучка  $E_e = 6.535$  ГэВ

сечений. Вычисленные таким образом структурные функции  $F_1(W, Q^2)$  и  $F_2(W, Q^2)$  пересчитываются в поперечную и продольную компоненту полного сечения взаимодействия виртуального фотона с протоном, используя известные соотношения между этими величинами [8–10].

Инклюзивные электронные сечения рассеяния могут быть вычислены из сечения взаимодействия виртуального фотона и протона как:

$$\frac{d^2\sigma_{ep \rightarrow X}}{dW dQ^2} = \Gamma_\nu \sigma_{incl},$$

где  $\Gamma_\nu$  — поток виртуальных фотонов.

На рис. 2 производится сравнение неполяризованных полных сечений взаимодействия виртуального фотона

и протона, оцененных с использованием двух наборов экспериментальных данных: *a* — только данные CLAS и *b* — комбинация данных CLAS и параметризации мировых данных. Для сравнения приведены несколько репрезентативных примеров. Результаты полных сечений взаимодействия виртуального фотона и протона, оцененных только с помощью данных CLAS и параметризации данных CLAS и мировых данных, совпадают в рассматриваемой нами кинематической области. Хорошее совпадение двух оценок показывает высокую достоверность метода оценки наблюдаемых в процессах инклюзивного рассеяния электронов.

Первыми ожидаемыми результатами в дальнейших экспериментах будут измерения инклюзивной структурной функции в резонансной области при высоких

виртуальностях фотонов  $Q^2 > 5.0 \text{ ГэВ}^2$ . В данной работе были предсказаны значения полного инклюзивного сечения взаимодействия виртуального протона и фотона, которое будет измерено на CLAS12 в области виртуальностей фотона  $4.0 < Q^2 < 7.0 \text{ ГэВ}^2$ . Прогнозируемое сечение и ожидаемые статистические неопределенности показаны на рис. 3. Статистические неопределенности оцениваются при интегральной светимости  $12.8 \cdot 10^{10} \text{ мкбн}^{-1}$ , полученной весной 2018 г. на CLAS12 и для величины шага по  $W$  и  $Q^2 \Delta W = 0.01 \text{ ГэВ}$  и  $\Delta Q^2 = 0.1 \text{ ГэВ}^2$ .

На рис. 4 представлены распределения по  $W$  и  $Q^2$ , полученные на основе новых данных CLAS12. На  $W$ -распределении отчетливо видны пики первой, второй и третьей резонансной области. Для расчета сечения инклюзивного электронного рассеяния и его сравнения с предсказанным требуется оценка эффективности детектора.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный в данной работе метод оценки представляет интерес для анализа данных CLAS и будущих данных CLAS12. Оценочные значения наблюдаемых инклюзивных рассеяний электронов позволяют проверить нормализацию всех полуинклюзивных и эксклюзивных процессов, изучаемых с помощью CLAS/CLAS12, и подтвердить достоверность оценки эффективности электронного детектирования, используемой при анализе экспериментальных данных. Прогнозируемые значения наблюдаемых в процессе инклюзивного рассеяния электронов при  $Q^2 > 5.0 \text{ ГэВ}^2$  полезны при планировании будущих экспериментов на детекторе CLAS12 по исследованию структуры адрона.

- 
- [1] Burkert V. D., Roberts C. D. // Rev. Mod. Phys. 2019. in press arXiv:1710.02549.  
[2] Aznauryan I. G., Burkert V. D. // Progr. Part. Nucl. Phys. 2012. **67**. P. 1. arXiv:1109.1720 [hep-ph].  
[3] Melnitchouk W., Ent R., Keppel C. // Phys. Rept. 2005. **406**. P. 127. arXiv:hep-ph/0501217.  
[4] Malace S. P. et al. [Jefferson Lab E00-115 Collaboration] // Phys. Rev. C. 2009. **80**. P. 035207. arXiv:0905.2374[nucl-ex].  
[5] Structure functions and cross sections. <http://clas.sinp.msu.ru/strfun/>  
[6] Christy M. E., Bosted P. B. // Phys. Rev. C. arXiv:0712.3731 [hep-ph].  
[7] Ricco G., Simula S., Battaglieri M. // Nucl. Phys. B. 1999. **555**. P. 306. arXiv:hep-ph/9901360.  
[8] Accardi A., Brady L. T., Melnitchouk W., Owens J. F., Sato N. // Phys. Rev. D. 2016. **93**, N 11. P. 114017. arXiv:1602.03154  
[9] Lin H. W. et al. // Prog. Part. Nucl. Phys. 2018. **100**. P. 107. ArXiv:1711.07916.  
[10] Osipenko M. et al. [CLAS Collaboration] // Phys. Rev. D. 2003. **67**. P. 092001. arXiv:hep-ph/0301204.

---

## Interpolation and extrapolation cross sections and structure functions of inclusive electron scattering on protons at $W < 4.0 \text{ GeV}$ и $2.0 < Q^2 < 7.0 \text{ GeV}^2$

A. A. Golubenko<sup>1,2,a</sup>, E. N. Golovach<sup>2,b</sup>

<sup>1</sup>Department of General Nuclear Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University  
Moscow 119991, Russia

<sup>2</sup>Skobeltsyn Nuclear Physics Institute Lomonosov Moscow State University  
Moscow 119991, Russia

E-mail: <sup>a</sup>aa.golubenko@physics.msu.ru, <sup>b</sup>golovach@jlab.org

The studies of inclusive electron scattering data on nucleons provided detailed information on the distributions for all quark flavors and gluons in ground state of nucleon. The Jefferson Lab inclusive electron scattering data in the resonance region allow us to obtain the data on the electrocouplings of the most nucleon resonances with masses  $< 1.8 \text{ Ge}$ . The report presents the method for evaluation of inclusive electron scattering observables in the resonance region from the experimental data. The developed approach allowed us to estimate the resonance contributions at the observed inclusive electron scattering on protons from the experimental data of the electrocouplings  $N^*$  at the first time. Its opens up new possibilities of access to the parton distributions of the ground state of the nucleon in the resonance region of the Bjorken variable  $x_B$ .

PACS:

Keywords: meson electroproduction, nucleon resonances.

Received 30 June 2019.

### Сведения об авторах

1. Голубенко Анна Александровна — вед. инженер; тел.: (495) 939-16-97, e-mail: aa.golubenko@physics.msu.ru.

2. Головач Евгений Николаевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-50-95, e-mail: golovach@jlab.org.
  3. Исупов Евгений Леонидович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник.
  4. Ишханов Борис Саркисович — доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой общей ядерной физики, заведующий отделом электромагнитных процессов и взаимодействия атомных ядер; тел.: (495) 939-50-95, e-mail: BSI@depni.sinp.msu.ru.
  5. Мокеев Виктор Иванович — доктор физ.-мат. наук, staff scientist; тел.: +1 (757) 269-69-90, e-mail: mokeev@jlab.org.
  6. Чесноков Виталий Владимирович — программист, тел. (495) 939-34-83, e-mail: chesn@depni.sinp.msu.ru.
-