

ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Оценка интегральных сечений реакции $\gamma p \rightarrow \pi^+ \pi^- p$ в резонансной области при виртуальностях фотонов от 5 до 12 ГэВ²В. Буркерт¹, Е. Н. Головач², Е. Л. Исупов², Б. С. Ишханов^{2,3}, В. И. Мокеев^{1,2}, Г. В. Петрунькин^{3,a}, Ю. А. Скородумина³, Г. В. Федотов⁴¹ *Национальная лаборатория имени Томаса Джефферсона, США, 23606, Вирджиния, Ньюпорт-Ньюс, Джефферсон-авеню, 12000.*² *Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ). Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*³ *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра общей ядерной физики. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*⁴ *Университет Южной Каролины. США, 29808, Южная Каролина, Колумбия, Мэйн-стрит, 712. E-mail: ^agrigorpetrunkin@mail.ru*

Статья поступила 23.11.2013, подписана в печать 13.12.2013.

Выполнена оценка проинтегрированных сечений электророжения пар заряженных пионов на протонах в области инвариантных масс конечной системы адронов $1.4 < W < 2.0$ ГэВ и виртуальностей фотона $5 < Q^2 < 12$ ГэВ². Оценка сечений была получена в рамках подхода, основанного на экстраполяции двухпионных составляющих инклюзивных структурных функций F_1 и F_2 из области виртуальностей фотона $Q^2 < 5$ ГэВ², где имеются экспериментальные данные по их вкладам, в область $5 < Q^2 < 12$ ГэВ². Экстраполяция выполнена с использованием Q^2 -параметризации вкладов канала $\pi^+ \pi^- p$, совместимой с ограничениями, накладываемыми операторным разложением. Полученные результаты будут использованы для извлечения сечений электророжения пар $\pi^+ \pi^-$ на протоне в будущих экспериментах на детекторе CLAS12.

Ключевые слова: электророжение пионов, нуклонные резонансы, структурные функции.

УДК: 539.126.34. PACS: 13.60.Le.

Введение

Изучение структуры возбужденных состояний нуклонов является одной из актуальных задач современной адронной физики. Сочетание непрерывного пучка электронов ускорителя CEBAF с 4π акцептансом детектора CLAS позволило впервые получить данные об амплитудах электровозбуждения большинства нуклонных резонансов (N^*) в области инвариантных масс конечной системы адронов (W) $1.4 < W < 2$ ГэВ при виртуальностях фотона¹ $Q^2 < 5$ ГэВ² из реакций эксклюзивного электророжения мезонов на протонах ($\pi^+ n$, $\pi^0 p$, ηp и $\pi^+ \pi^- p$) [1–5].

После завершения проекта модернизации JLAB энергия пучка электронов увеличится до 12 ГэВ. Новый детектор CLAS12 (Hall B) станет единственной в мире установкой, позволяющей исследовать структуру N^* в реакции электрон-протонного взаимодействия в резонансной области ($1.4 < W < 2$ ГэВ) при больших виртуальностях фотона ($5 < Q^2 < 12$ ГэВ²) [6, 7]. Эта область виртуальностей фотонов в эксклюзивном электророжении мезонов остается неисследованной. Впервые откроется возможность исследовать N^* на расстояниях меньших 10^{-14} см, отвечающих максимальным вкладам кварковых степеней свободы. Как следует из теоретических предсказаний, именно в этой

области происходит переход от режима конфайнмента к пертурбативной КХД.

Эксперимент по изучению N^* из реакций эксклюзивного электророжения одиночных пионов и $\pi^+ \pi^-$ -пар на протонах при $5 < Q^2 < 12$ ГэВ² запланирован на первые годы набора данных на CLAS12. Независимый анализ основных каналов эксклюзивного электророжения мезонов $N\pi$ и $N\pi\pi$, полностью различающихся нерезонансными вкладами, позволяет получить надежную информацию об амплитудах электровозбуждения большинства резонансов в области масс до 2 ГэВ и виртуальностях фотонов от 5 до 12 ГэВ². Запланированные эксперименты по исследованию структуры N^* на CLAS12 являются ключевым направлением в изучении природы кварк-глюонного конфайнмента в барионах. Они открывают доступ к механизмам формирования более чем 98% адронной массы Вселенной в непертурбативных процессах динамического нарушения киральной симметрии [8].

Для извлечения сечений электророжения мезонов на протонах из экспериментальных данных необходимо создание реалистичного генератора событий электророжения пар заряженных пионов в соответствующей кинематической области. Нами выполнена оценка интегральных сечений электророжения пар заряженных пионов на протоне в области $1.4 < W < 2.0$ ГэВ и $5 < Q^2 < 12$ ГэВ².

¹ Виртуальность фотона — квадрат 4-импульса виртуального фотона, взятый с обратным знаком.

Для оценки сечений двухпионного электророжения при больших виртуальностях фотона в настоящей работе развита процедура экстраполяции вкладов канала $\pi^+\pi^-p$ в структурные функции $F_1(W, Q^2)$ и $F_2(W, Q^2)$ в область высоких виртуальностей фотона. Процедура Q^2 -экстраполяции совместима с ограничениями налагаемыми операторным разложением «Operator Product Expansion» (ОРЕ) [9] на моменты структурных функций F_1 и F_2 .

1. Описание метода оценки сечений реакции $\gamma\nu p \rightarrow \pi^+\pi^-p$ при Q^2 от 5 до 12 ГэВ²

В качестве исходных данных для оценки интегральных сечений электророжения $\pi^+\pi^-$ -пар при $5 < Q^2 < 12$ ГэВ² были использованы предварительные данные по интегральным сечениям этой реакции в области $Q^2 < 5$ ГэВ², полученные в экспериментах на детекторе CLAS [10]. Из этих данных были получены вклады эксклюзивного канала электророжения $\pi^+\pi^-$ -пар на протонах в структурные функции F_1 и F_2 и проведена их экстраполяция в область Q^2 от 5 до 12 ГэВ² в рамках подхода, описанного в части 2.2. Из экстраполированных величин вкладов $\pi^+\pi^-p$ -канала предсказаны интегральные сечения этой реакции при Q^2 от 5 до 12 ГэВ².

1.1. Связь между структурными функциями F_1 , F_2 и интегральными сечениями электророжения мезонов

В приближении однофотонного обмена интегральное сечение взаимодействия виртуального фотона с протоном представляет собой суперпозицию двух членов [11]

$$\sigma = \sigma_T + \varepsilon\sigma_L, \quad (1)$$

первый из которых соответствует поперечной поляризации виртуальных фотонов, а второй — продольной. Параметр поляризации ε определяется энергией E пучка электронов, а также энергией E' и углом θ рассеянного электрона в лабораторной системе

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + 2 \left(1 + \frac{\nu^2}{Q^2}\right) \text{tg}^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}, \quad (2)$$

где $\nu = E - E'$ — энергия виртуального фотона. При этом σ_T и σ_L однозначно определяются по Q^2 и W .

Поперечное и продольное сечения связаны со структурными функциями $W_1(W, Q^2)$ и $W_2(W, Q^2)$ следующими соотношениями:

$$W_1 = \frac{K}{4\pi^2\alpha} \cdot \sigma_T, \quad (3)$$

$$W_2 = \frac{(\sigma_L + \sigma_T)}{4\pi^2\alpha} \cdot \frac{(2\nu M_p - Q^2) \cdot (-Q^2)}{2M_p(-Q^2 - \nu^2)}, \quad (4)$$

где $K = \frac{2\nu M_p - Q^2}{2M_p}$, M_p — масса протона и $\alpha = \frac{e^2}{4\pi\hbar c}$ — постоянная тонкой структуры.

Безразмерные структурные функции F_1 и F_2 связаны с функциями W_1 и W_2 при помощи соотношений

$$F_1 = M_p \cdot W_1, \quad (5)$$

$$F_2 = \nu \cdot W_2. \quad (6)$$

Соотношения (1)–(6) позволяют определить инклюзивные структурные функции F_1 , F_2 и вклады в них раз-

личных каналов электророжения мезонов из данных по сечениям σ_T и σ_L . Измеренные в эксперименте инклюзивные и эксклюзивные сечения представляют собой совместный вклад сечений σ_T и σ_L , определяемый (1). Для разделения вкладов σ_T и σ_L необходима дополнительная информация о связи σ_T с σ_L . Имеющиеся экспериментальные данные CLAS по сечениям электророжения мезонов свидетельствуют о том, что в качестве такой связи может быть использовано соотношение

$$\frac{\sigma_L}{\sigma_T} = 0.2. \quad (7)$$

На рис. 1 изображены рассчитанные из данных CLAS по формулам (1)–(7) инклюзивные структурные функции F_2 и вклады в них эксклюзивного $\pi^+\pi^-p$ -канала.

1.2. Экстраполяция сечений реакции $\gamma\nu p \rightarrow \pi^+\pi^-p$ в область $5 < Q^2 < 12$ ГэВ²

Для описания поведения структурной функции F_2 с ростом виртуальности фотонов использовалась следующая параметризация [9]:

$$F_2 = C_0 + \sum_{\tau} C_{\tau} \left(\frac{\Lambda_{\text{QCD}}^2}{Q^2} \right)^{\tau/2}, \quad \tau = 2, 4, 6, \dots, \quad (8)$$

где Λ_{QCD} — масштабный параметр КХД. Вид параметризации был выбран таким образом, чтобы обеспечить соответствие Q^2 -эволюции структурных функций операторному разложению моментов структурных функций ОРЕ [9]. Параметры разложения (8) определялись из условия наилучшего описания Q^2 -эволюции эксклюзивной структурной функции $F_2^{2\pi}$. Каждому значению W соответствует свой набор параметров C_{τ} . Число параметров C_{τ} и ограничения на их величины определялись исходя из следующих требований:

1) функция F_2 должна монотонно спадать с ростом Q^2 ;

2) при любых Q^2 функция F_2 должна оставаться положительной;

3) относительный вклад двухпионной составляющей $R(W, Q^2) = \frac{F_2^{2\pi}}{F_2}$ в инклюзивную структурную функцию F_2 должен лежать в диапазоне от 0 до 1.

Аппроксимация инклюзивной структурной функции F_2 осуществлялась в диапазоне Q^2 от 2 до 10 ГэВ². При этом в области $Q^2 < 4.5$ ГэВ² использовались данные, полученные в ходе экспериментов на детекторе CLAS [12], а в области $Q^2 > 4.5$ ГэВ² функция рассчитывалась из параметризации [13]. Ограничение аппроксимации данных условием $Q^2 > 2$ ГэВ² связано с тем, что ОРЕ, а следовательно, и разложение (8) справедливы лишь при $Q^2 \gg \Lambda_{\text{QCD}}^2$.

Экстраполяция $F_2^{2\pi}$ в область $5 < Q^2 < 12$ ГэВ² осуществлялась согласно (8) с коэффициентами C_{τ} , извлеченными из аппроксимации данных CLAS [10]. Оцененная таким образом двухпионная составляющая структурной функции F_2 может быть использована для расчета сечений электророжения пар заряженных пионов на протонах в области Q^2 до 10 ГэВ² с помощью соотношений (1)–(7).

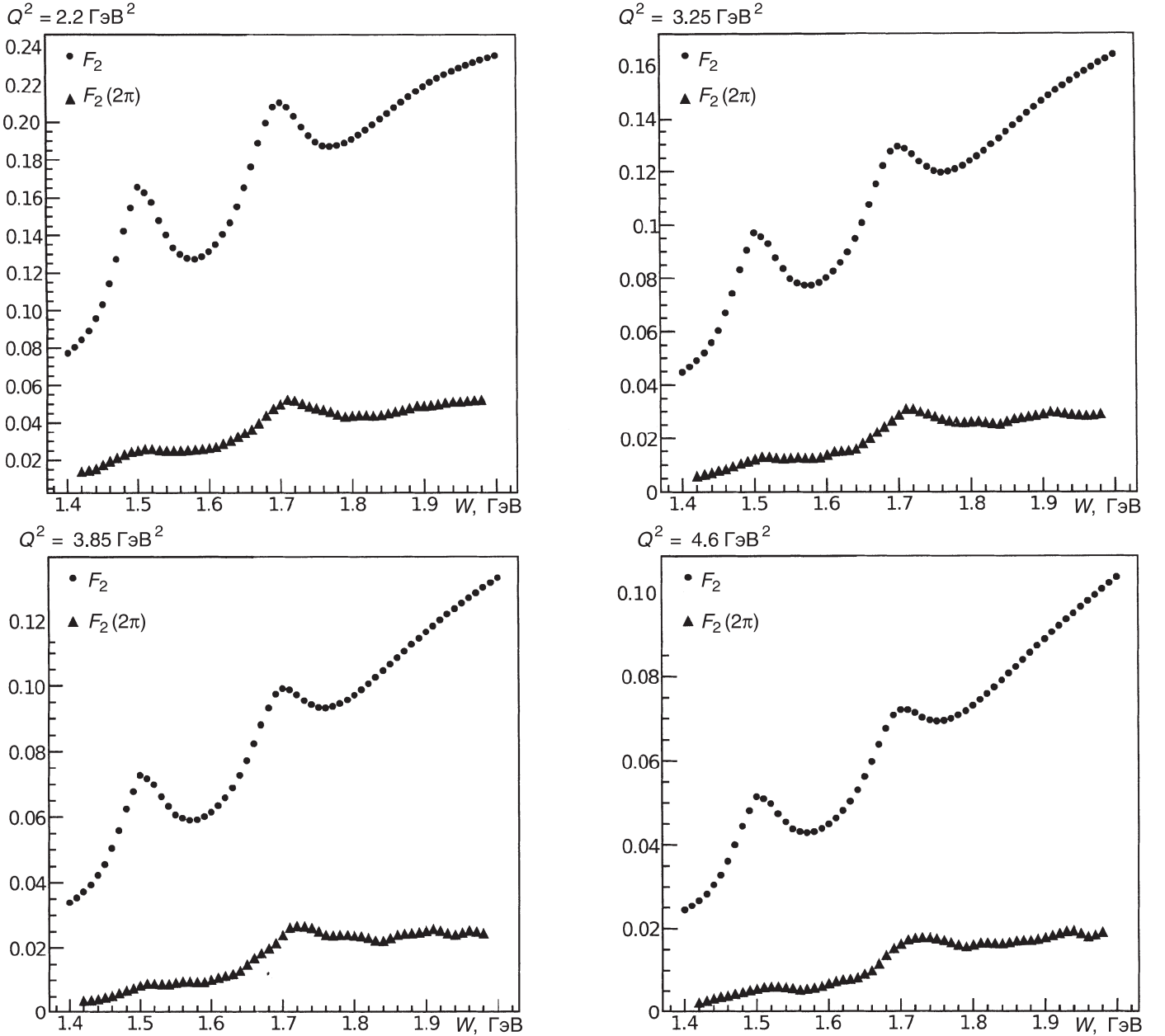


Рис. 1. Структурная функция F_2 и вклады в нее эксклюзивного канала электророждения пар заряженных пионов в области $Q^2 < 5 \text{ GeV}^2$

1.3. Оценка неопределенностей экстраполяции

Для оценки неопределенностей экстраполяции структурных функций сравнивались результаты двух экстраполяций в область $5 < Q^2 < 12 \text{ GeV}^2$ отношений $R(W, Q^2)$ для относительных вкладов $\pi^+\pi^-p$ канала в инклюзивную структурную функцию F_2 . Две экстраполяции $R_1(W, Q^2)$ и $R_2(W, Q^2)$ используют параметризацию экспериментальных данных в двух различных областях виртуальностей фотонов: $2 < Q^2 < 5 \text{ GeV}^2$ и $2.5 < Q^2 < 5 \text{ GeV}^2$ соответственно. В качестве примера на рис. 2 показаны результаты этих экстраполяций для различных значений W . Неопределенности вкладов $\delta F^{2\pi}$ электророждения $\pi^+\pi^-$ -пар оценивались следующим образом:

$$\frac{\delta F^{2\pi}}{F^{2\pi}} = \left(\frac{R_1}{R_2} - 1 \right). \quad (9)$$

Данные по $\delta F^{2\pi}$ позволяют рассчитать неопределенности экстраполированных сечений, используя стандартную процедуру переноса неопределенностей (9) на соотношения (1)–(7).

1.4. Результаты

На рис. 3 показаны полученные в рамках описанного выше подхода W -зависимости полных сечений электророждения $\pi^+\pi^-$ -пар на протоне в области виртуальности фотона от 5 до 12 GeV^2 . Результаты получены для энергии пучка электронов равной 11 GeV , запланированной для экспериментов по исследованию эксклюзивного электророждения мезонов в резонансной области на детекторе CLAS12.

Развитый в настоящей работе подход позволяет получить предсказания о поведении интегральных сече-

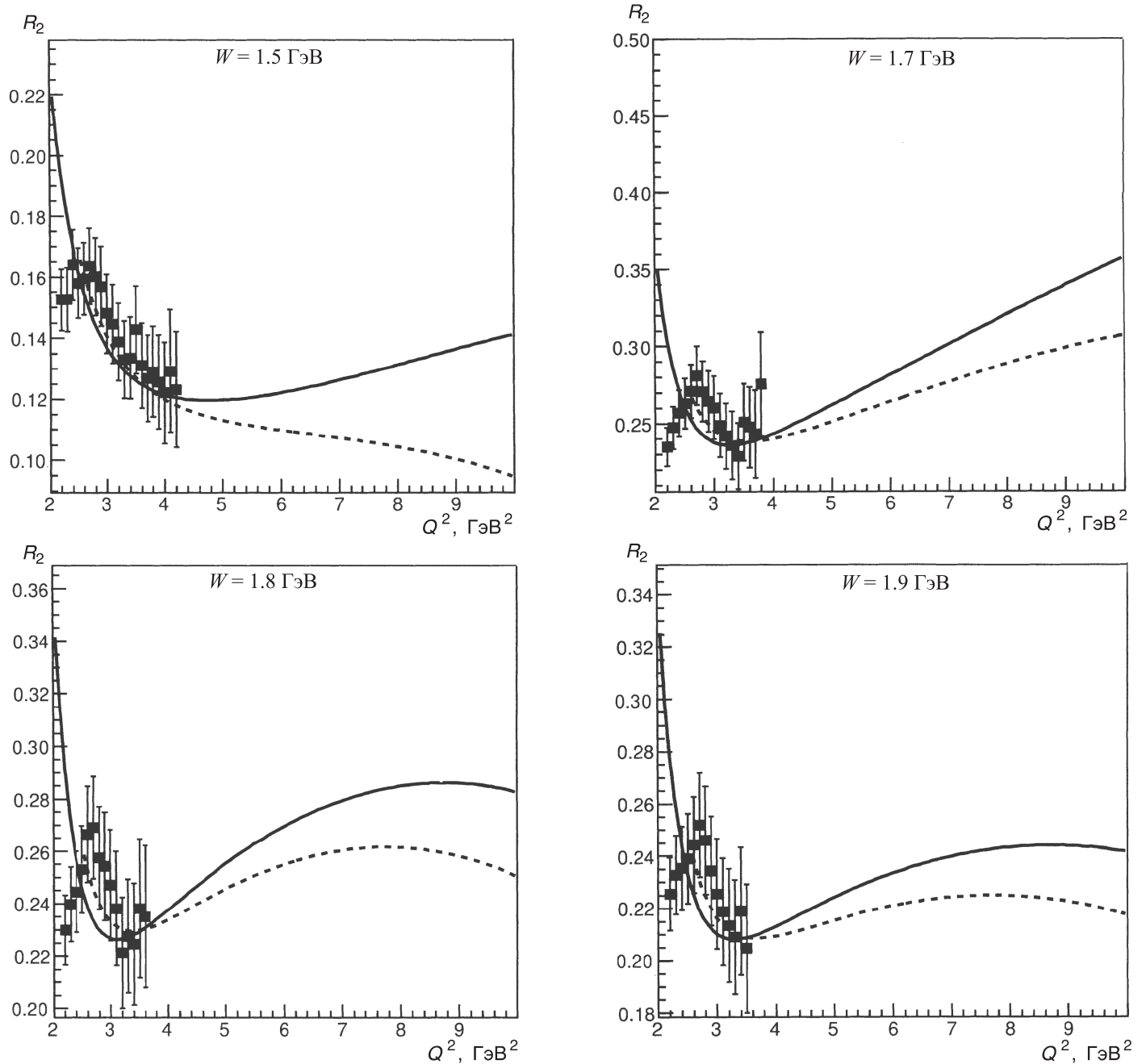


Рис. 2. Относительные вклады двухпионного электророждения $R(W, Q^2)$ в инклюзивную структурную функцию $F_2(W, Q^2)$. Сплошные линии соответствуют $R_1(W, Q^2)$, пунктирные — $R_2(W, Q^2)$ (см. (9))

ний эксклюзивного $\pi^+\pi^-p$ -канала в зависимости от W и Q^2 для произвольной энергии пучка и поляризации виртуальных фотонов.

В предсказанных сечениях электророждения $\pi^+\pi^-$ -пар на протоне при $5 < Q^2 < 12$ ГэВ² отчетливо проявляются две резонансные структуры с максимумами при W , равном 1.5 и 1.7 ГэВ (рис. 3). Структура при $W \approx 1.5$ ГэВ формируется вкладами резонансов $P_{11}(1440)$, $S_{11}(1535)$ и $D_{13}(1520)$. В нее также вносит вклад резонансное состояние $S_{31}(1600)$. Резонансная структура при $W \approx 1.7$ ГэВ формируется вкладами высоколежащих нуклонных резонансов $F_{15}(1680)$, $D_{33}(1700)$ и $P_{13}(1720)$. В эту структуру также может вносить вклад состояние-кандидат $\frac{3}{2}^+(1720)$. Сигналы

от этого возможного нового барионного состояния наблюдались в анализе экспериментальных данных CLAS по реакции эксклюзивного электророждения $\pi^+\pi^-$ -пар на протоне в резонансной области [14].

С ростом виртуальностей фотонов Q^2 наблюдается увеличение относительного вклада резонансного максимума при $W \approx 1.7$ ГэВ, что создает хорошие перспективы для исследования высоколежащих возбужденных состояний протона при больших Q^2 . Поведение сечений при $W > 1.8$ ГэВ содержит указание на возможные вклады высоколежащих N^* . Таким образом, область высоких Q^2 обеспечивает оптимальные условия для исследования спектра и структуры высоколежащих нуклонных резонансов.

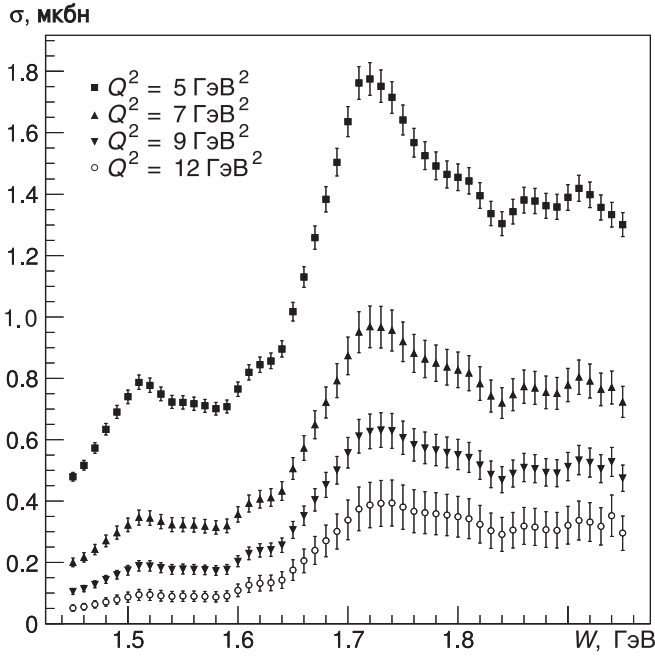


Рис. 3. Проинтегрированные сечения двухпионного электророждения в области Q^2 от 5 до 12 ГэВ², полученные для энергии пучка электронов 11 ГэВ

Заключение

В работе развита модель, позволяющая оценить проинтегрированные сечения электророждения пар заряженных пионов на протоне при виртуальностях фотонов $5 < Q^2 < 12$ ГэВ². Модель основана на использовании экспериментальных данных детектора CLAS по вкладам $\pi^+\pi^-p$ -канала реакции электрон-протонного взаимодействия в инклюзивные структурные функции $F_1(W, Q^2)$ и $F_2(W, Q^2)$ в области $Q^2 < 5$ ГэВ². Эти экспериментальные данные экстраполируются в область виртуальностей Q^2 фотона от 5 до 12 ГэВ². Развитый метод экстраполяции совместим с ограничениями налагаемыми на моменты структурных функций

операторным разложением. Экстраполированные величины вкладов $\pi^+\pi^-p$ в F_1 и F_2 позволяют получить предсказания о проинтегрированных сечениях электророждения $\pi^+\pi^-$ -пар на протоне при $5 < Q^2 < 12$ ГэВ² для произвольной энергии пучка и поляризации виртуальных фотонов.

Оценка интегральных сечений $\pi^+\pi^-p$ -канала является необходимым этапом в развитии методов извлечения сечений этой реакции в экспериментах по изучению структуры нуклонных резонансов при высоких Q^2 на детекторе CLAS12.

Список литературы

1. Aznauryan I., Burkert V.D., Lee T.-S.H., Mokeev V. // J. Phys. Conf. Ser. 2011. **299**. P. 012008.
2. Mokeev V. // The 8th Intern. Workshop on the Physics of Excited Nucleons, NSTAR2011. May 17-20, 2011, Newport News, VA, USA / Ed. by V. Burkert, M. Jones, M. Pennington, D. Richards. AIP Conf. Proc. 2011. P. 1432.
3. Mokeev V. et al. (CLAS Collaboration) // Phys. Rev. C. 2012. **86**. 035203.
4. Aznauryan I. et al. (CLAS Collaboration) // Phys. Rev. C. 2009. **80**. 055203.
5. Aznauryan I., Burkert V.D. // Prog. Part. Nucl. Phys. 2012. **67**. P. 1.
6. McKeown R.D. // J. Phys. Conf. Ser. 2011. **312**. 032014.
7. Gothe R.W., Mokeev V., Burkert V.D. et al. // JLab experiment E12-09-003, «Nucleon Resonance Studies with CLAS12».
8. Aznauryan I.G. et al. // Int. J. Mod. Phys. E. 2013. **22**. 1330015.
9. Roberts R.G. // The Structure of the Proton. Deep Inelastic Scattering. Cambridge Univ. Press, 1990.
10. <http://clasweb.jlab.org/physicsdb/>.
11. Хелзен Ф., Мартин А. // Кварки и лептоны. М., 1987.
12. Osipenko M. et al. (CLAS Collaboration) // 10.1103/PhysRevD.67.092001.
13. Christy M.E., Bosted P.B. // Empirical Fit to Precision Inclusive Electron-Proton Cross Sections in the Resonance Region.
14. Ripani M. et al. // Phys. Rev. Lett. 2003. **91**. 022002.

Evaluation of fully integrated $\gamma_v + p \rightarrow \pi^+ + \pi^- + p$ cross sections in the resonance region at photon virtualities $5 < Q^2 < 10$ GeV²

V. Burkert¹, E.N. Golovatch², E.L. Isupov², B.S. Ishkanov^{2,3}, V.I. Mokeev^{1,2}, G.V. Petrun'kin^{3,a}, J.A. Skorodumina³, G.V. Fedotov⁴

¹ Thomas Jefferson National Accelerator Facility, Newport News, Virginia 23606, USA.

² D. V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

³ Department of General Nuclear Physics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

⁴ University of South Carolina, Columbia, South Carolina 29808, USA.

E-mail: ^agrigorpetrunkin@mail.ru.

Evaluation of fully integrated double pion electroproduction cross sections of protons was carried out at $1.4 < W < 2.0$ GeV, $5 < Q^2 < 12$ GeV². The cross-section evaluation was obtained from an approach based on extrapolation of the double pion component of inclusive structure functions F_1 and F_2 from photon virtualities $Q^2 < 5$ GeV² towards $5 < Q^2 < 12$ GeV². Q^2 -parameterization compatible with restrictions from the Operator Product Expansion was used to conduct the extrapolation. The results will be used to extract double pion electroproduction cross sections of protons in future experiments with the new CLAS12 detector.

Keywords: pion electroproduction, nucleon resonances, structure functions.

PACS: 13.60.Le.

Received 23 November 2013.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 2(2014).

Сведения об авторах

1. Буркерт Волкер — PhD, зав. экспериментальным залом «В».
2. Головач Евгений Николаевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-25-58.
3. Исупов Евгений Леонидович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-25-58.
4. Ишханов Борис Саркисович — доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой; тел.: (495) 939-50-95.
5. Мокеев Виктор Иванович — доктор физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-25-58.
6. Петрунькин Григор Викторович — аспирант; e-mail: grigorpetrunkin@mail.ru.
7. Скородумина Юлия Андреевна — аспирант.
8. Федотов Глеб Викторович — канд. физ.-мат. наук.