

## БАЗА ДАННЫХ КОЛЛАБОРАЦИИ CLAS ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ АДРОНОВ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССАХ

*В. В. Чесноков*<sup>1,\*</sup>, *А. А. Голубенко*<sup>1</sup>, *Б. С. Ишханов*<sup>1,2</sup>,  
*В. И. Мокеев*<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына  
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

<sup>2</sup> Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

<sup>3</sup> Лаборатория Джефферсона, Ньюпорт-Ньюс, Вирджиния, США

Разработанная совместно Лабораторией Джефферсона (США) и НИИ ядерной физики им. Д. В. Скобельцына МГУ им. М. В. Ломоносова база данных коллаборации CLAS содержит большинство экспериментальных результатов по инклюзивным, полунклюзивным и эксклюзивным реакциям на протонах и ядрах, полученных с помощью детектора CLAS. Существенная часть этих результатов является уникальной. Размещенные в базе данных CLAS результаты экспериментов и инструменты их анализа представляют особый интерес для изучения структуры основного и возбужденных состояний адронов, проливают свет на динамику сильного взаимодействия в непертурбативной области, формирующую адроны как связанные системы кварков и глюонов.

CLAS Physics Database (CLAS DB) has been developed in collaboration between the SINP at MSU and the Hall B at Jefferson Lab. CLAS DB contains most experimental results on inclusive, semi-inclusive and exclusive reactions of proton and nuclei obtained with the CLAS detector. The substantial part of these experimental results represent the only available in the world data sets. The results and analysis tools stored in the CLAS DB are of particular importance for exploration of the spectrum/structure of the ground and excited hadron states, offering the insight into strong QCD dynamics which underlies their generation from quarks and gluons.

PACS: 13.60.Le

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в экспериментальном зале «В» (Hall B) Лаборатории Джефферсона (Thomas Jefferson National Accelerator Facility, JLab) в США (штат Вирджиния) осуществляется обширная программа исследований с целью изучения спектра и структуры основного и большинства

---

\* E-mail: chesn@depni.sinp.msu.ru

возбужденных состояний нуклона в реакциях фото- и электророжения мезонов в области инвариантных масс конечной системы адронов ( $W$ ) до 3,0 ГэВ и виртуальности фотона ( $Q^2$ ) до 5,0 ГэВ<sup>2</sup>. Исследования проводятся международной коллаборацией CLAS, включающей в себя в числе прочих организаций НИИ ядерной физики им. Д. В. Скобельцына МГУ им. М. В. Ломоносова. В этих исследованиях получена уникальная информация о динамике сильного взаимодействия в непертурбативной области, в которой формируются адроны как связанные системы кварков и глюонов.

Полученные с помощью детектора CLAS результаты позволили начать изучение механизмов формирования доминирующей части (> 98 %) массы адронов [1–3]. Впервые была продемонстрирована возможность доступа к компонентам тензора энергии-импульса для основного состояния нуклона из данных по распределению давления внутри протона [4]. Обнаружены новые состояния адронной материи — так называемые «missing» резонансы [5], поиск которых в течение последнего десятилетия являлся одной из наиболее актуальных задач физики адронов.

За время работы детектора CLAS в 1996–2012 гг. получен большой объем новых экспериментальных данных, многие из которых являются уникальной, единственной в мире экспериментальной информацией [1, 6]. С помощью детектора CLAS получена доминирующая часть мировых данных по большинству эксклюзивных каналов электророжения мезонов на нуклонах и ядрах [7] в области масс конечной системы адронов  $W < 3,0$  ГэВ, значительно расширена информация об инклюзивных и полуинклюзивных процессах рассеяния электронов на нуклонах [6].

Для хранения, обработки, научного анализа всего массива накопленных результатов исследований на детекторе CLAS и для осуществления доступа к ним создана база данных коллаборации CLAS, web-интерфейс к ней и пакет встроенных в интерфейс базы данных аналитических программ.

## 1. СОДЕРЖИМОЕ И ИНТЕРФЕЙС БАЗЫ ДАННЫХ ДЕКТОРА CLAS

В базе данных CLAS (CLAS Physics Database) [8, 9] собрана численная информация о наблюдаемых, измеренных в экспериментах на детекторе CLAS в период 1996–2012 гг. В ней содержатся все наблюдаемые, которые не зависят от специфических характеристик экспериментальной установки, таких как эффективность регистрации событий и аксептанс. Поэтому эти данные могут сравниваться с результатами любых других экспериментов, в которых получены такие же наблюдаемые, как и с помощью детектора CLAS. База содержит данные по дифференциальным, интегральным сечениям и различным поляризационным асимметриям для большинства эксклюзивных каналов электророжения мезонов на нуклонах, а также данные по инклюзивным и полуинклюзивным се-

чениям/структурным функциям рассеяния электронов на нуклонах при  $W < 3,0$  ГэВ и виртуальности фотонов  $Q^2 < 5,0$  ГэВ<sup>2</sup>. Кроме того, в ней содержатся наблюдаемые, измеренные в процессах взаимодействия электронов и фотонов с атомными ядрами в указанной выше кинематической области  $W$  и  $Q^2$ .

База данных снабжена web-интерфейсом [8], который обеспечивает доступ к данным через сеть интернет по всему миру, предоставляет возможность поиска данных по множеству параметров. Среди них исследуемая реакция: тип пучка (электронный или фотонный), мишень и конечное состояние, состояние поляризации пучка, мишени и конечного состояния; кинематические переменные — инвариантная масса конечного состояния  $W$ , виртуальность фотона  $Q^2$ , переменная Бьёркена  $x_B$ , энергия реального фотона  $E_\gamma$  (для случая фоторождения мезонов). Возможно задать одну или несколько из около 200 наблюдаемых, данные по которым присутствуют в базе. Возможен поиск по совокупности параметров, по диапазону значений или по средним значениям переменных. Есть поиск по названию, авторам и году проведения эксперимента.

Выдача данных обеспечивает визуализацию в виде таблиц и интерактивных двумерных и трехмерных графиков, существует возможность загрузить данные в текстовом виде для дальнейшей компьютерной обработки. Доступны также библиографическая информация о публикациях, связанных с экспериментальными данными, ссылки на полные тексты публикаций.

**Диапазоны кинематических переменных  $W$ ,  $Q^2$  и конечные состояния, для которых в базе присутствуют данные по электророждению**

Конечное состояние	$W_{\min}$ , ГэВ	$W_{\max}$ , ГэВ	$Q^2_{\min}$ , ГэВ <sup>2</sup>	$Q^2_{\max}$ , ГэВ <sup>2</sup>
Инклюзивное	1,1	4,91	0,01021	6,545
Полуинклюзивное	1,63	4,24	1,36	3,26
$\pi^+n$	0,0	1,985	0,0023	4,845
$\pi^0p$	1,08	2,968	0,187	6,0
$\pi^-p$	1,153	3,107	0,021	4,67
$\pi^+\pi^-p$	1,3	2,8	0,2	5,353
$K^+\Lambda$	1,6	2,7	0,65	3,2
$K^+\Sigma^0$	1,65	2,35	0,65	2,55
$\eta p$	1,49	2,31	0,13	3,3
$\varphi(1020)p$	2,0	2,6	0,7	3,8
$\rho^0p$	1,8	2,8	1,57	5,6
$\omega p$	1,85	2,77	1,725	4,85
$ppN$	0,95	1,05	0,5	1,0
$pn$	0,0	1,095	0,985	5,5
$p + X$	0,94	2,9	0,18	4,2
$ppn$	0,3	3,9	0,8	4,9
$\pi^+ + X$	1,15	3,33	0,0	7,7
$\gamma p$	2,0	2,0	1,0	4,6

Диапазоны кинематических переменных  $W$ ,  $Q^2$  и конечные состояния, для которых в базе присутствуют данные по электророждению, представлены в таблице.

Пользовательский интерфейс позволяет авторам самостоятельно загружать данные в базу, обеспечивает разделение доступа к данным.

## 2. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИНСТРУМЕНТЫ, ИНТЕГРИРОВАННЫЕ В ИНТЕРФЕЙС БАЗЫ ДАННЫХ CLAS

**2.1. Извлечение структурных функций из дифференциальных сечений взаимодействия виртуальный фотон – протон.** Программное обеспечение базы данных детектора CLAS [8] предоставляет также ряд инструментов для анализа данных в режиме онлайн. Для дифференциальных сечений эксклюзивного или полуинклюзивного электророждения мезонов на нуклонах разработан инструмент, позволяющий извлекать структурные функции процессов рассеяния электронов на нуклонах.

Дифференциальные сечения реакций рассеяния электронов на нуклонах в зависимости от азимутального угла вылета мезона  $\varphi$  могут быть представлены следующим образом (в приближении однофотонного обмена) [10]:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = A + B \cos 2\varphi + C \cos \varphi, \quad (1)$$

где параметры  $A$ ,  $B$  и  $C$  зависят от всех других переменных, помимо  $\varphi$ , описывающих кинематику начального состояния виртуальный фотон – протон – мишень и состояния конечных адронов. В случае конечного состояния мезон–барион такими переменными являются  $W$ ,  $Q^2$  и полярный угол эмиссии мезона  $\theta$  в системе центра масс начальный виртуальный фотон – протон – мишень. Угловые зависимости (1) являются наиболее общим описанием  $\varphi$ -зависимостей дифференциальных сечений. Они выполняются при любом подходе для моделирования динамики реакций, проявляющейся в зависимостях параметров  $A$ ,  $B$  и  $C$  от кинематических переменных начального и конечного состояний  $W$ ,  $Q^2$  и угла  $\theta$  в случае конечного состояния мезон–барион.

Параметры  $A$ ,  $B$  и  $C$  следующим образом связаны со структурными функциями  $R_T$  и  $R_L$ , описываемыми произведением амплитуд реакций под действием поперечно- ( $T$ ) и продольно- ( $L$ ) поляризованных фотонов, а также произведением амплитуд для фотонов различной поляризации: поперечно-поперечной со спиральностями фотонов  $+1$  и  $-1$  ( $R_{TT}$ ) и поперечно-продольной ( $R_{TL}$ ) [10, 11]:

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{4K_L M_N} \{R_T + \varepsilon_L R_L\} d\Phi, \\ B &= \frac{1}{4K_L M_N} \{R_{TT}\} d\Phi, \\ C &= \frac{1}{4K_L M_N} \{R_{TL}\} d\Phi, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $d\Phi$  является фазовым объемом для конечного состояния адронов, фактор  $4K_L M_N$  есть инвариантный поток виртуальных фотонов, где  $K_L$  и  $M_N$  — модуль волнового вектора виртуального фотона и масса нуклона соответственно. Наличие в (1) второго и третьего членов, описываемых произведениями амплитуд реакции под действием виртуальных фотонов различных поляризаций, связано с формированием продольно-поляризованного виртуального фотона в процессах рассеяния электронов со степенью поляризации  $\varepsilon_L$ , однозначно определяемой кинематикой рассеяния электрона [10, 11].

Разработанное программное обеспечение базы данных детектора CLAS позволяет методами регрессионного анализа автоматически подобрать коэффициенты  $A$ ,  $B$  и  $C$  таким образом, чтобы зависимость, заданная выражением (1), аппроксимировала хранящиеся в базе данных экспериментальные  $\varphi$ -зависимости дифференциального сечения рассеяния электронов с минимальным значением критерия  $\chi^2$ , и оценить погрешность этих коэффициентов, что, в свою очередь, позволяет оценить значения структурных функций  $R_T$ ,  $R_L$ ,  $R_{TT}$  и  $R_{TL}$ . Кроме значения критерия  $\chi^2$  есть возможность также визуально контролировать на графиках, как кривая (1) с вычисленными значениями  $A$ ,  $B$ ,  $C$  ложится на экспериментальные данные (рис. 1).

Для контроля самосогласованности экспериментальных данных предусмотрена также процедура автоматической аппроксимации диффе-

Select data slice:  
 $\cos(\theta_\pi) = -0.9$  dimensionless

Fit  $\varphi$  dependence:

$A + B \cos 2\varphi + C \cos \varphi$   
 $\chi^2 = 0.2397$

Value	Uncert
A 9.6295	0.51923
B -1.5829	0.73168
C 0.64516	0.69222

$A + B \cos 2\varphi + C \cos \varphi + D \cos 3\varphi$   
 $\chi^2 = 0.3306$

Value	Uncert
A 9.5956	0.45046
B -1.6552	0.63569
C 0.67137	0.59065
D -0.39885	0.63024

$\frac{1}{\varphi_{\max} - \varphi_{\min}} \int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}} \frac{d\sigma}{d\Omega} d\varphi$   

Value	Uncert
A 9.775	0.34

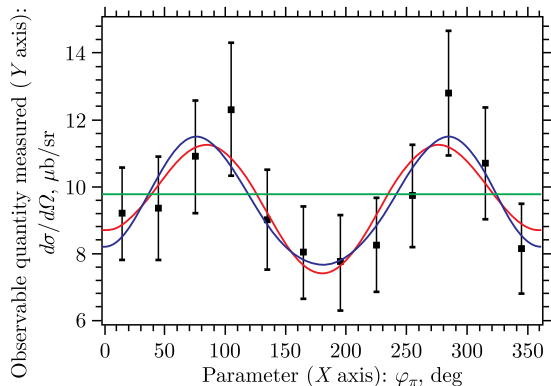


Рис. 1. Пример автоматической аппроксимации дифференциального сечения электророжения  $\pi^0$  на протоне для извлечения структурных функций [12] при  $W = 1,18$  ГэВ и  $Q^2 = 0,4$  ГэВ<sup>2</sup> и  $\cos \theta_\pi = -0,9$  функцией  $A + B \cos 2\varphi + C \cos \varphi$

ренциальных сечений функцией

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = A + B \cos 2\varphi + C \cos \varphi + D \cos 3\varphi. \quad (3)$$

В этом случае близкое к нулю вычисленное значение коэффициента  $D$  указывает на надежность полученных экспериментальных данных.

Интерфейс базы данных предоставляет также возможность интегрировать дифференциальные сечения по углу  $\varphi$ . Полученный интеграл, деленный на  $2\pi$ , должен совпадать (в пределах погрешности) с вычисленным значением коэффициента  $A$  в (1).

Пример извлечения структурных функций из данных CLAS по дифференциальным сечениям реакции электророжения конечного состояния  $\pi^0 p$  на протонах [12] для  $W = 1,18$  ГэВ,  $Q^2 = 0,4$  ГэВ<sup>2</sup> и  $\cos \theta_\pi = -0,9$  с использованием web-интерфейса базы данных коллаборации CLAS приведен на рис. 1.

**2.2. Интерполяция инклюзивных структурных функций  $F_1$  и  $F_2$  и расчет инклюзивного сечения  $(e, e'X)$  для заданной энергии пучка.** Еще один интегрированный с базой данных детектора CLAS инструмент анализа данных [13] позволяет интерполировать хранящиеся в базе данных  $W$ - и  $Q^2$ -зависимостей инклюзивных структурных функций  $F_1$  и  $F_2$  в области кинематических переменных  $Q^2$  и  $W$ , показанной на рис. 3, и вычислять по ним инклюзивное сечение рассеяния электронов на протоне для заданной энергии пучка  $E_b$ , а также резонансный вклад в инклюзивное сечение.

Для взаимодействия виртуального фотона с протоном структурные функции  $F_1$  и  $F_2$  связаны с продольным ( $\sigma_L$ ) и поперечным ( $\sigma_T$ ) сечениями соотношениями [14]

$$F_1 = M_p \frac{K}{4\pi^2\alpha} \sigma_T(W, Q^2), \quad (4)$$

$$F_2 = \nu \frac{\sigma_T(W, Q^2) + \sigma_L(W, Q^2)}{Q^2 + \nu^2} \frac{KQ^2}{4\pi^2\alpha}, \quad (5)$$

где  $M_p$  — масса протона;  $\nu = (W^2 + Q^2 - M_p^2)/(2M_p)$  — энергия, переданная электроном в лабораторной системе отсчета;  $\alpha = 1/137$  — постоянная тонкой структуры;  $K = (2\nu M_p - Q^2)/(2M_p)$ . Непolarизованное инклюзивное сечение виртуальный фотон – протон  $\sigma(W, Q^2)$  рассчитывается как

$$\sigma(W, Q^2) = \sigma_T(W, Q^2) + \varepsilon \sigma_L(W, Q^2), \quad (6)$$

$$\varepsilon = \left(1 + 2 \frac{\nu^2 + Q^2}{Q^2} \operatorname{tg}^2 \frac{\theta_e}{2}\right)^{-1}, \quad (7)$$

где  $\theta_e$  — угол рассеяния электрона в лабораторной системе отсчета.

Данные CLAS по инклюзивным структурным функциям  $F_2$  были ранее извлечены из измеренных дифференциальных сечений с использо-

ванием параметризации [15] для отношения  $R_{LT} = \sigma_L/\sigma_T$ . С использованием значения  $F_2$  были пересчитаны новые экспериментальные данные по отношению  $R_{LT}$ , как описано в работе [16].

Инклюзивное сечение электронного рассеяния рассчитывается из сечения виртуальный фотон – протон следующим образом:

$$\frac{d^2\sigma_{ep\rightarrow X}}{dW dQ^2} = \Gamma_v \sigma_{\text{incl}}, \tag{8}$$

где  $\Gamma_v$  – поток виртуальных фотонов, определенный в работе [15].

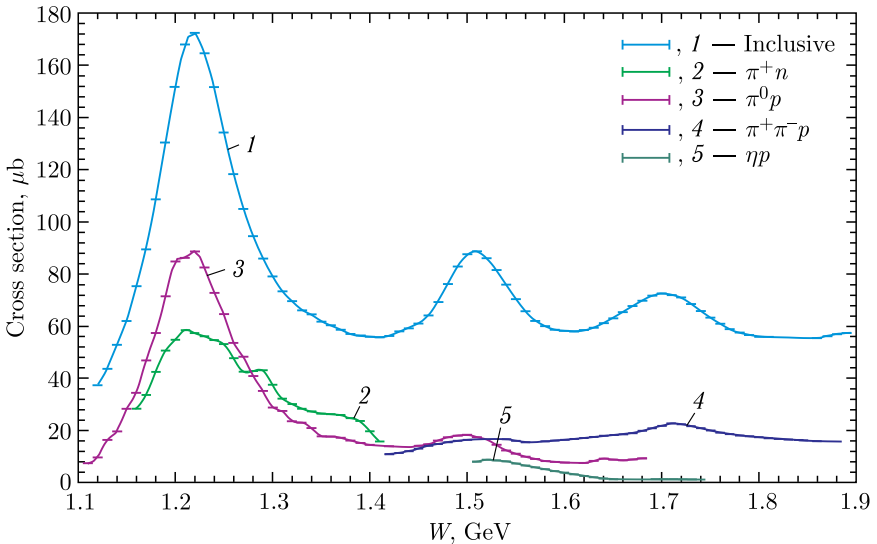
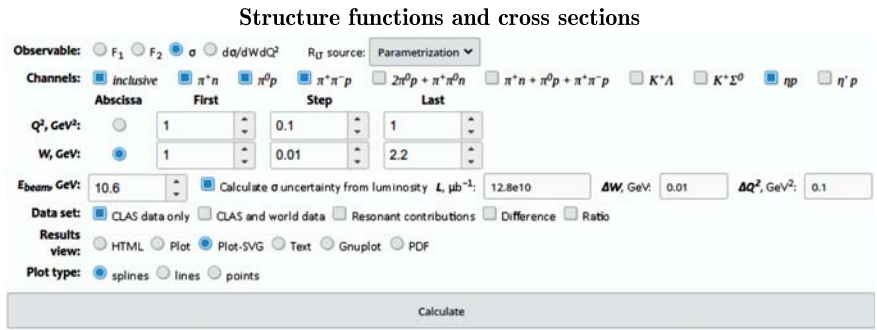


Рис. 2. Пример расчета с помощью интерфейса базы данных CLAS вклада эксклюзивных каналов электророждения мезонов на протоне в инклюзивное сечение взаимодействия виртуальный фотон – протон при виртуальности фотона  $Q^2 = 1,0 \text{ ГэВ}^2$  и энергии пучка  $E_b = 10,6 \text{ ГэВ}$

Также есть возможность визуально сравнить на графике данные CLAS с данными, полученными с помощью других экспериментальных установок [17].

В ограниченной области по  $Q^2$  возможны также расчет и визуализация вклада эксклюзивных каналов электророждения мезонов в инклюзивные структурные функции и сечения [18]. Пример расчета вклада эксклюзивных каналов при  $Q^2 = 1,0 \text{ ГэВ}^2$  приведен на рис. 2.

**2.3. Расчет резонансных вкладов в инклюзивное сечение.** Полученные с помощью детектора CLAS данные по амплитудам электророзбуждения нуклонных резонансов позволили впервые определить резонансные вклады в инклюзивное сечение рассеяния электронов на протоне [16]. Интерфейс базы данных CLAS позволяет рассчитать резонансный вклад в инклюзивное сечение и структурные функции  $F_1$  и  $F_2$  для  $0 < Q^2 < 5 \text{ ГэВ}^2$  и  $W$  до  $1,7 \text{ ГэВ}$ .

Резонансные вклады в поперечное ( $\sigma_T^R$ ) и продольное ( $\sigma_L^R$ ) инклюзивное сечение взаимодействия виртуальный фотон – протон от резонанса массой  $M_r$ , полной шириной  $\Gamma_r = \Gamma_{\text{tot}} (W = M_r)$  и спином  $J_r$  описываются формулой Брейта–Вигнера [19]

$$\sigma_{T,L}^R(W, Q^2) = \frac{\pi}{q_\gamma^2} \sum_{N^*} (2J_r + 1) \frac{M_r^2 \Gamma_{\text{tot}}(W) \Gamma_\gamma^{T,L}(M_r, Q^2)}{(M_r^2 - W^2)^2 + M_r^2 \Gamma_{\text{tot}}^2(W)} \quad (9)$$

со следующими кинематическими переменными:

$$q_\gamma = \sqrt{Q^2 + E_\gamma^2}, \quad E_\gamma = \frac{W^2 - Q^2 - M_N^2}{2W}, \quad K = \frac{W^2 - M_N^2}{2W}, \quad (10)$$

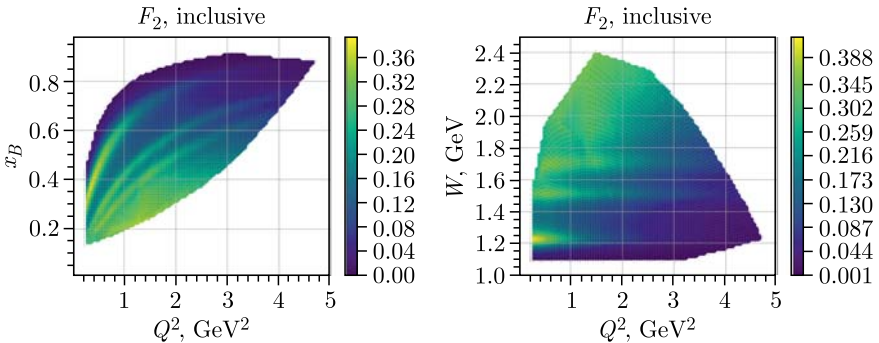


Рис. 3. Кинематическая область, покрываемая данными [15] по инклюзивной структурной функции  $F_2$ . Три полосы, отчетливо видимые в 2D-распределениях, соответствуют первой, второй и третьей резонансным областям. Рост структурных функций при малых  $x_B$  (больших  $W$ ) соответствует переходу к режиму глубоконеупругого рассеяния (DIS)



где  $J_r$ ,  $M_r$  — спин и масса резонанса;  $E_\gamma$  и  $q_\gamma$  — соответственно энергия виртуального фотона и величина его 3-момента импульса в системе центра масс.

Ширины электромагнитных распадов резонансов на конечные состояния с поперечно- ( $\Gamma_\gamma^T$ ) и продольно- ( $\Gamma_\gamma^L$ ) поляризованными фотонами определяются соотношениями

$$\Gamma_\gamma^T(W = M_r, Q^2) = \frac{q_{\gamma,r}^2(Q^2)}{\pi} \frac{2M_N}{(2J_r + 1)M_r} (|A_{1/2}(Q^2)|^2 + |A_{3/2}(Q^2)|^2), \quad (11)$$

$$\Gamma_\gamma^L(W = M_r, Q^2) = 2 \frac{q_{\gamma,r}^2(Q^2)}{\pi} \frac{2M_N}{(2J_r + 1)M_r} |S_{1/2}(Q^2)|^2, \quad (12)$$

где  $q_{\gamma,r} = q_\gamma|_{W=M_r}$ . Амплитуды электровозбуждения  $A_{1/2}(Q^2)$ ,  $A_{3/2}(Q^2)$  и  $S_{1/2}(Q^2)$  получены из данных CLAS.

Расчет энергетической зависимости полной ширины резонанса  $\Gamma_{\text{tot}}(W)$  и таблица использованных параметров резонансов приведены в работе [16].

Пример расчета вкладов отдельных нуклонных резонансов с помощью интерфейса базы данных CLAS для виртуальности фотона  $Q^2 = 2,0 \text{ ГэВ}^2$  и энергии пучка  $E_b = 10,6 \text{ ГэВ}$  приведен на рис. 4.

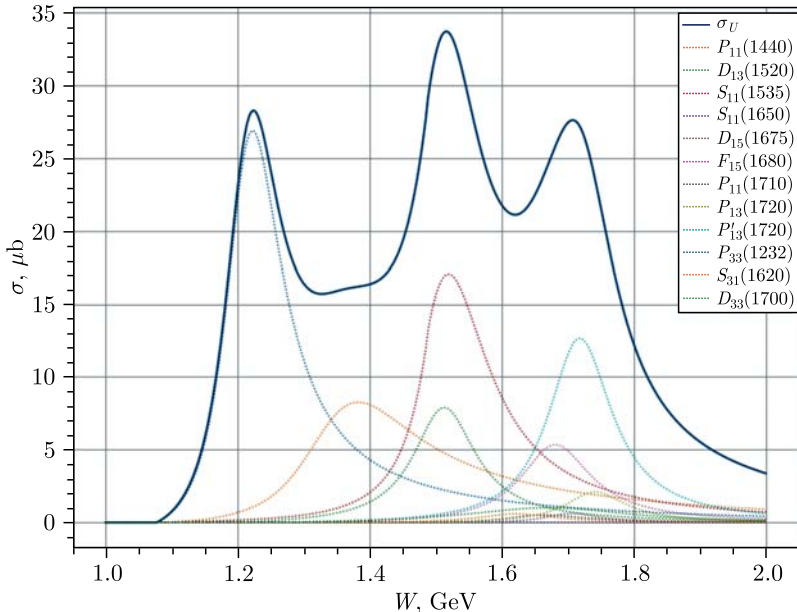


Рис. 4 (цветной в электронной версии). Резонансные вклады в инклюзивное сечение взаимодействия виртуальный фотон – протон при виртуальности фотона  $Q^2 = 2,0 \text{ ГэВ}^2$  и энергии пучка  $E_b = 10,6 \text{ ГэВ}$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В международной коллаборации CLAS, включающей в себя Лабораторию Джефферсона (JLab, США) и НИИ ядерной физики им. Д. В. Скобельцына МГУ им. М. В. Ломоносова, создана и развивается база данных коллаборации CLAS, содержащая численные данные экспериментов по изучению реакций инклюзивного, полуинклюзивного и эксклюзивного рассеяния электронов на протонах и ядрах, полученных с помощью детектора CLAS в области  $W < 3,0$  ГэВ и  $Q^2 < 4,0$  ГэВ<sup>2</sup>. База содержит доминирующую часть мировых данных по большинству каналов электроорождения мезонов на нуклонах в указанной выше кинематической области по  $W$  и  $Q^2$  и на постоянной основе пополняется новыми данными. Хранимые в базе данных наблюдаемые не зависят от специфических характеристик детектора и могут использоваться для сравнения с результатами аналогичных экспериментов на других экспериментальных установках.

Web-интерфейс базы данных снабжен рядом инструментов для визуализации и научного анализа хранимых данных. Эти инструменты могут быть использованы в числе прочего для планирования будущих экспериментов на новом детекторе CLAS12. Результаты этих будущих экспериментов (в области  $W < 4,0$  ГэВ и  $Q^2 < 12$  ГэВ<sup>2</sup>) также планируется включить в базу данных. Эксперименты на детекторе CLAS12 успешно начались весной 2018 г. Утвержденная программа экспериментов на детекторе CLAS12 охватывает десятилетний период.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Burkert V.D., Roberts C.D.* // *Rev. Mod. Phys.* 2019. V.91. P.011003; arXiv:1710.02549.
2. *Roberts C.D.* // *Few Body Syst.* 2018. V. 59, No. 4. P. 72; arXiv:1801.08562.
3. *Moiseev V.I., Burkert V.D., Carman D.S., Fedotov G.V., Golovatch E.N., Gothe R.W., Hicks K., Ishkhanov B.S., Skorodumina Iu.* // *Phys. Rev. C.* 2016. V. 93. P. 025206; arXiv:1509.05460.
4. *Burkert V.D., Elouadrhiri L., Girod F.X.* // *Nature.* 2018. V.557, No.7705. P.396–399.
5. *Anisovich A.V. et al.* // *Phys. Rev. Lett.* 2017. V. 119, No.6. P.062004; arXiv:1712.07549.
6. *Burkert V.* // *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* 2018. V. 68. P. 405–428; <https://doi.org/10.1146/annurev-nucl-101917-021129>.
7. *Moiseev V.I.* // *Few Body Syst.* 2018. V. 59. P. 46; arXiv:1801.09750.
8. *Chesnokov V., Moiseev V., Ishkhanov B.* CLAS Physics Database. <https://clas.sinp.msu.ru>.
9. *Chesnokov V., Moiseev V., Ishkhanov B.* *Memoirs of the Faculty of Physics.* 2019. P. 1930403.
10. *Amaldi E., Fubini S., Furlan G.* // *Springer Tracts Mod. Phys.* 1979. V.83. P. 1–162.

11. *Moiseev V. I., Burkert V. D., Lee T. S. H., Elouadrhiri L., Fedotov G. V., Ishkhanov B. S.* // Phys. Rev. C. 2009. V. 80. P. 045212; arXiv:0809.4158 [hep-ph].
12. *Joo K. et al. (CLAS Collab.)* // Phys. Rev. Lett. 2002. V. 88. P. 122001.
13. *Chesnokov V., Moiseev V., Ishkhanov B.* Structure Functions and Cross Sections. <https://clas.sinp.msu.ru/strfun>.
14. *Drechsel D., Pasquini B., Vanderhaeghen M.* // Phys. Rep. 2003. V. 378, No. 2. P. 99–205;  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370157302006361>.
15. *Osipenko M. et al. (CLAS Collab.)* // Phys. Rev. D. 2003. V. 67. P. 092001; arXiv:hep-ph/0301204.
16. *Hiller Blin A. N., Moiseev V., Albaladejo M., Fernández-Ramírez C., Mathieu V., Pilloni A., Szczepaniak A., Burkert V. D., Chesnokov V. V., Golubenko A. A., Vanderhaeghen M.* // Phys. Rev. C. 2019. V. 100. P. 035201; arXiv:1902.02900.
17. *Golubenko A. A., Chesnokov V. V., Ishkhanov B. S., Moiseev V. I.* // Phys. Part. Nucl. 2019. V. 50, No. 5. P. 587–592; arXiv:1902.02900.
18. *Chesnokov V. V., Moiseev V. I., Golovach E. N., Ishkhanov B. S., Stepanov M. E., Fedotov G. V.* // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2009. V. 73, No. 6. P. 712–715.
19. *Moiseev V. I., Burkert V. D., Elouadrhiri L., Fedotov G. V., Golovatch E. N., Gothe R. W., Ishkhanov B. S., Isupov E. L., Adhikari K. P., Aghasyan M. et al.* // Phys. Rev. C. 2012. V. 86, No. 3. P. 035203.