

# Поляризованная структурная функция электророждения нейтрального пиона на протоне в резонансной области (по материалам кандидатской диссертации)

Голубенко Анна Александровна

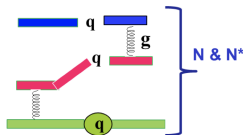
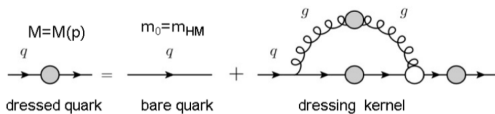
Специальность: 01.04.16

Науч. руководитель: к.ф.-м.н., с.н.с Исупов Е.Л.

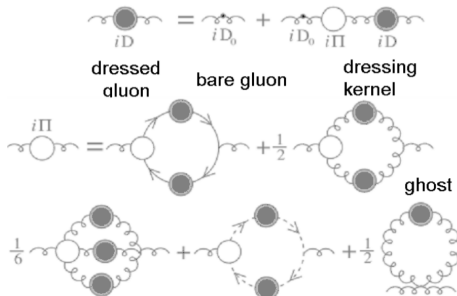
Научно-исследовательский институт ядерной физики  
имени Д.В.Скобельцына МГУ им. М.В.Ломоносова

Москва, 2022

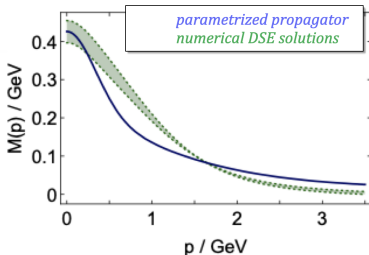
# Возбужденные состояния нуклонов как инструмент для изучения сильной КХД



**Dressed Quark Borromeo Binding in  $N/N^*$**   
 J. Segovia et al., arXiv:1908:0572 [nucl-th]

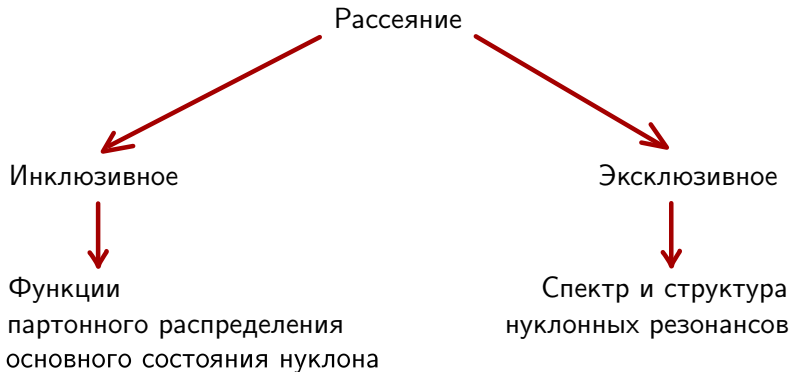


**Emergence of Dressed Quarks and Gluons**  
 D. Binosi et al., Phys. Rev. D95, 031501 (2017)

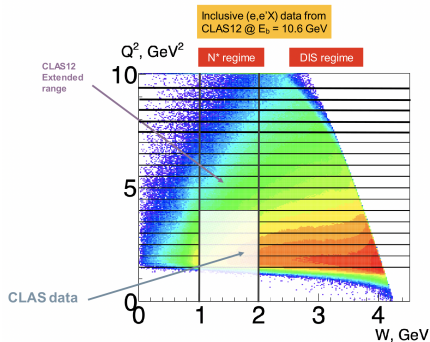
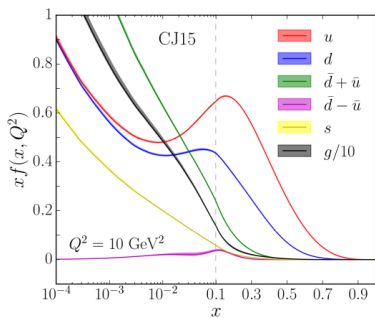


**Dressed Quark Mass Function**  
 C.D. Roberts, Few Body Syst. 58, 5 (2017)

# Методы исследования структуры нуклонов



# Исследование функций партонных распределений в резонансной области





CEBAF

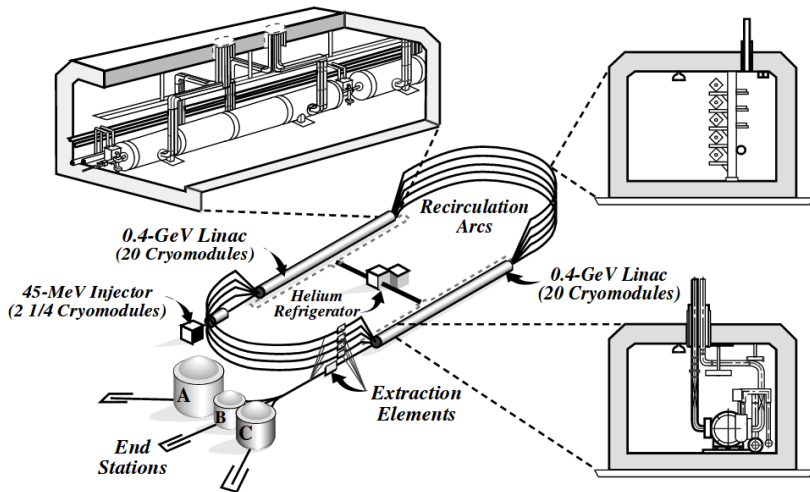


Рис. 1: Ускоритель CEBAF.

# Детектор CLAS

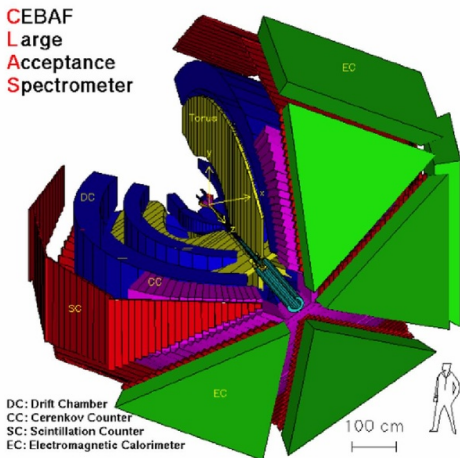
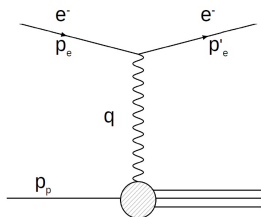


Рис. 2: Детектор CLAS.

# Кинематика электрон-протонного рассеяния



$$q = p_e - p'_e \quad (1)$$

$$W = \sqrt{(q + p_p)^2} \quad (2)$$

$$Q^2 = -q^2 = 4E_e E'_e \sin^2 \frac{\theta_{ee'}}{2} \quad (3)$$

$$\nu = \frac{qp_p}{M_N} = \frac{W^2 + Q^2 - M_N^2}{2M_N} = (E_e - E'_e) \quad (4)$$

$$x_B = \frac{Q^2}{2M_N \nu} \quad (5)$$

## Структурные функции инклюзивного электрон-протонного рассеяния

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

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

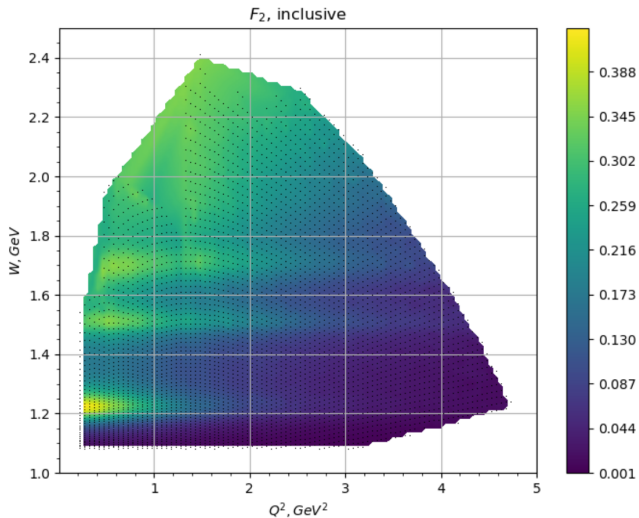
$$F_1 = M_p \frac{K}{4\pi^2\alpha} \sigma_T(W, Q^2), \quad (8)$$

$$F_2 = \nu \frac{\sigma_T(W, Q^2) + \sigma_L(W, Q^2)}{4\pi^2\alpha} \frac{(2\nu M_p - Q^2)Q^2}{2M_p(Q^2 + \nu^2)}, \quad (9)$$

где  $M_p$  – масса протона,  $\nu$  – переданная электроном энергия,

$$K = \frac{2\nu M_p - Q^2}{2M_p}.$$

# Данные, доступные из экспериментов CLAS

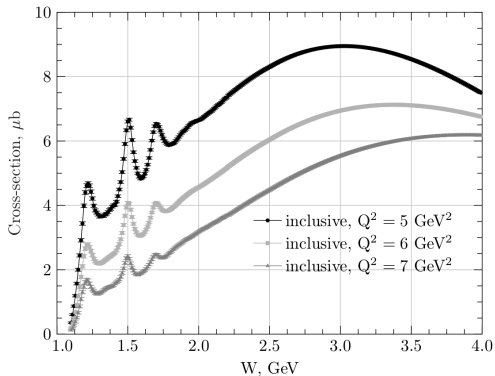


## Интерполяция и экстраполяция структурных функций $F_1$ , $F_2$

- Для интерполяции инклюзивных структурных функций и сечений были использованы данные CLAS
- Для экстраполяции были использованы данные параметризации М.Е. Christy and Р.Е. Bosted, arXiv:0711.0159
- Комбинация данных, полученных из интерполяции и экстраполяции, была параметризована при помощи подхода Operator Product Expansion:

$$\begin{aligned} F_1(W, Q^2) &= C_{0,1}(W) + \frac{C_{1,1}(W)}{Q^2} + \frac{C_{2,1}(W)}{Q^4} + \dots \\ F_2(W, Q^2) &= C_{0,2}(W) + \frac{C_{1,2}(W)}{Q^2} + \frac{C_{2,2}(W)}{Q^4} + \dots \end{aligned} \quad (10)$$

# Экстраполированные инклюзивные сечения рассеяния электрона на протоне



- $E_b = 10.6 \text{ GeV}$
- Интегр. светимость:  
 $12.8 \cdot 10^{10} \text{ мбарн}^{-1}$
- $\Delta W = 0.01 \text{ GeV}$   
 $\Delta Q^2 = 0.1 \text{ GeV}^2$
- Стат. неопред.:  
 $0.2 - 2.0\%$

CLAS Physics Database  
<http://clasweb.jlab.org/physicsdb>

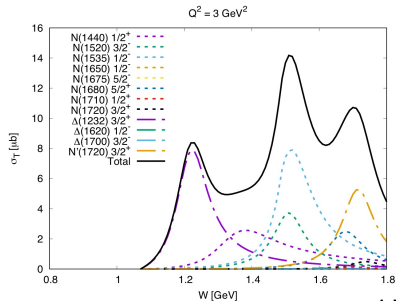
# Оценка резонансных вкладов в инклюзивные сечения электрон-протонного рассеяния

$$\sigma_{L,T}^R(W, Q^2) = \frac{\pi}{q_7^2} \sum_{N^*, \Delta^*} (2J_r + 1) \frac{M_r^2 \Gamma_{tot}(W) \Gamma_7^{T,L}(M_r)}{(M_r^2 - W^2)^2 + M_r^2 \Gamma_{tot}^2(W)} \frac{q_7}{K}. \quad (11)$$

$$\Gamma_r^T(M_r, Q^2) = \frac{q_{7,r}^2(Q^2)}{\pi} \frac{2M_N}{(2J_r + 1)M_r} (|A_{1/2}(Q^2)|^2 + |A_{3/2}(Q^2)|^2); \quad (12)$$

$$\Gamma_r^L(M_r, Q^2) = 2 \frac{q_{7,r}^2(Q^2)}{\pi} \frac{2M_N}{(2J_r + 1)M_r} |S_{1/2}(Q^2)|^2; \quad (13)$$

где  $q_{7,r} = q_7|_{W=M_r}$ .

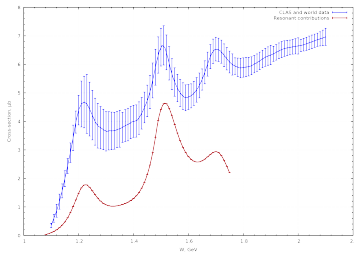
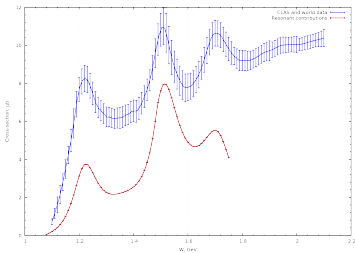
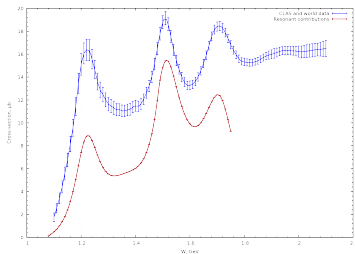
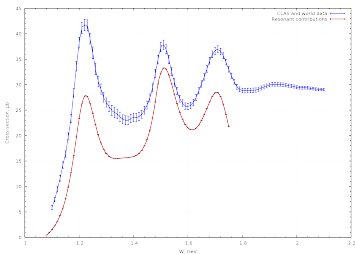


$N^*$	$M_r$ [MeV]	$\Gamma_r$ [MeV]	$L_r$	$\beta_{\pi N}$	$\beta_{\eta N}$	$\beta_r$	$X$ [GeV]
$\Delta(1232) 3/2^+$	1232	117	1	1.00	0	0	—
$N(1440) 1/2^+$	1430	350	1	0.65	0	0.35	0.3
$N(1520) 3/2^-$	1515	115	2	0.60	0	0.40	0.1
$N(1535) 1/2^-$	1535	150	0	0.45	0.42	0.13	0.5
$\Delta(1620) 1/2^-$	1630	140	0	0.25	0	0.75	0.5
$N(1650) 1/2^-$	1655	140	0	0.60	0.18	0.22	0.5
$N(1675) 5/2^-$	1675	150	2	0.40	0	0.60	0.5
$N(1680) 5/2^+$	1685	130	3	0.68	0	0.32	0.2
$\Delta(1700) 3/2^-$	1700	293	2	0.10	0	0.90	0.22
$N(1710) 1/2^+$	1710	100	1	0.13	0.30	0.57	0.5
$N(1720) 3/2^+$	1748	114	1	0.14	0.04	0.82	0.5
$N'(1720) 3/2^+$	1725	120	1	0.38	0	0.62	0.5

A.N. Hiller Blin, ..., A.A. Golubenko et al. Phys.Rev. C100, 035201 (2019)



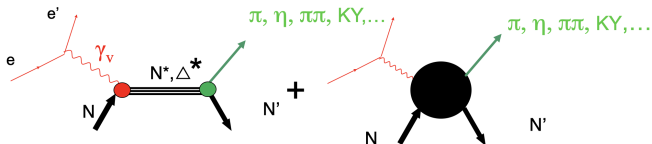
# Оценка резонансных вкладов в инклюзивные сечения электрон-протонного рассеяния



# Извлечение амплитуд электророждения $\gamma_v NN^*$ из эксклюзивного мезонного электророждения на нуклонах

• Real  $A_{1/2}(Q^2)$ ,  $A_{3/2}(Q^2)$ ,  $S_{1/2}(Q^2)$

I.G. Aznauryan and V.D. Burkert,  
Prog. Part. Nucl. Phys. 67, 1 (2012)



$$\Gamma_\gamma = \frac{k_{\gamma N^*}^2}{\pi} \frac{2M_N}{(2J_\gamma + 1)M_{N^*}} (|A_{1/2}(Q^2)|^2 + |A_{3/2}(Q^2)|^2) \quad (14)$$

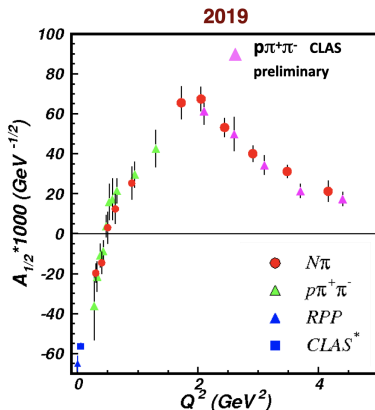
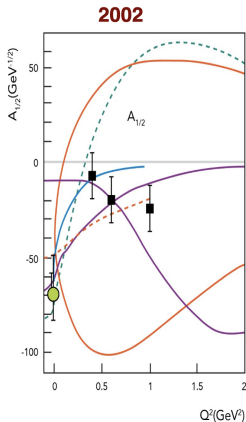
I.G. Aznauryan and V.D. Burkert, Prog. Part. Nucl. Phys. 67, 1 (2012)

# Измеренные данные по электророждению одиночного псевдоскалярного мезона на нуклоне

	$Q^2$	$W$	
JLab/Hall B	$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\pi^0 p, \pi^+ n)$	0.16–0.36	1.1–1.38 [8]
	$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\pi^0 p)$	0.4–1.8	1.1–1.68 [9]
	$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\pi^0 p)$	3.0–6.0	1.1–1.39 [10]
	$A_{LT'}(\pi^0 p)$	0.4, 0.65	1.1–1.66 [11]
	$A_T, A_{ET}(\pi^0 p)$	0.252, 0.385, 0.611	1.12–1.55 [12]
	$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\pi^+ n)$	0.3–0.6	1.1–1.55 [13]
	$\frac{d\sigma}{d\Omega}, A_{LT'}(\pi^+ n)$	1.7–4.5	1.11–1.69 [14]
	$A_{LT'}(\pi^+ n)$	0.4, 0.65	1.1–1.66 [15]
	$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\eta p)$	0.375–1.385	1.5–1.86 [16]
	$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\eta p)$	0.17–3.1	1.5–2.3 [17]

Progress in Particle and Nuclear Physics 67 (2012) 1 I.G. Aznauryan, V.D. Burkert

# Амплитуды электровозбуждения Роперовского резонанса

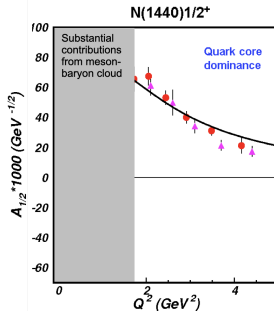
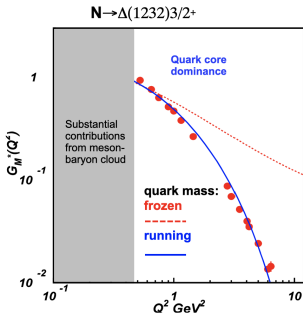


V. D. Burkert, *Baryons 2016* and the recent update from the CLAS  $p+p$  electroproduction off protons data

# Изучение Роперовского резонанса в подходе Дайсона-Швингера

Уравнения Дайсона-Швингера:

- J. Segovia et al., Phys. Rev. Lett. 115, 171801 (2015).
- J. Segovia et al., Few Body Syst. 55, 1185 (2014).

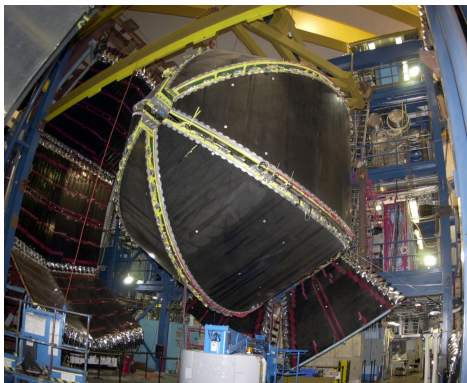


# Измеренные данные по электророждению одиночного псевдоскалярного мезона на нуклоне

	$Q^2$	$W$	
JLab/Hall B	$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\pi^0 p, \pi^+ n)$	0.16–0.36	1.1–1.38 [8]
	$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\pi^0 p)$	0.4–1.8	1.1–1.68 [9]
	$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\pi^0 p)$	3.0–6.0	1.1–1.39 [10]
	$A_{LT'}(\pi^0 p)$	0.4, 0.65	1.1–1.66 [11]
	$A_T, A_{ET}(\pi^0 p)$	0.252, 0.385, 0.611	1.12–1.55 [12]
	$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\pi^+ n)$	0.3–0.6	1.1–1.55 [13]
	$\frac{d\sigma}{d\Omega}, A_{LT'}(\pi^+ n)$	1.7–4.5	1.11–1.69 [14]
	$A_{LT'}(\pi^+ n)$	0.4, 0.65	1.1–1.66 [15]
	$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\eta p)$	0.375–1.385	1.5–1.86 [16]
	$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\eta p)$	0.17–3.1	1.5–2.3 [17]

Progress in Particle and Nuclear Physics 67 (2012) 1 I.G. Aznauryan, V.D. Burkert

## Набор данных $e1e$



- Энергия пучка:  
2.036 ГэВ
- $0.4 < Q^2 < 1 \text{ GeV}^2$
- $1.1 < W < 1.8 \text{ GeV}$

# Доступ к третьей резонансной области

Exclusive  $\pi^0 p$  electroproduction off protons in the resonance region at photon virtualities  $0.4 \text{ GeV}^2 \leq Q^2 \leq 1 \text{ GeV}^2$

N. Markov,<sup>8,36,\*</sup> K. Joo,<sup>8</sup> V.D. Burkert,<sup>36</sup> V.I. Moiseev,<sup>36</sup> L. C. Smith,<sup>41</sup> M. Ungaro,<sup>36</sup> S. Adhikari,<sup>11</sup>

Набор данных e1e:

Доступная кинематическая область:

- $0.4 < Q^2 < 1 \text{ GeV}^2$ ;
- $1.1 < W < 1.8 \text{ GeV}$ .



## Набор данных $e1e$



- Энергия пучка:  
2.036 ГэВ
- $0.4 < Q^2 < 1 \text{ GeV}^2$
- $1.1 < W < 1.8 \text{ GeV}$
- Поляризация пучка:  
 $\sim 80\%$
- Мишень:  
 $H_2$ , толщина 2 см
- Количество триггеров:  
 $\sim 1.5 \cdot 10^9$

# Идентификация электронов

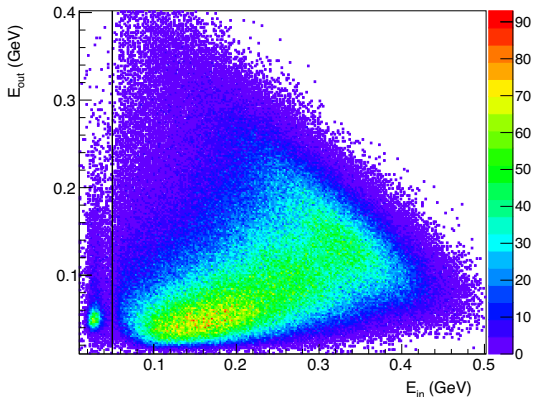


Рис. 3: Энергия, выделяемая отрицательно заряженными частицами во внутреннем калориметре, по сравнению с энергией, выделяемой во внешнем калориметре. Ось цветов ( $z$ ) представляет количество событий.

## Идентификация электронов

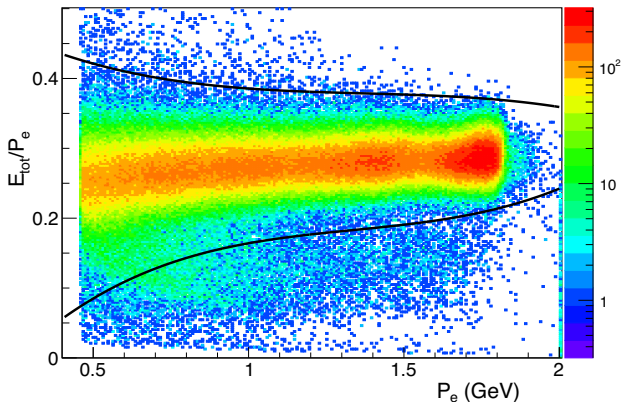


Рис. 4: Энергия, оставляемая отрицательно заряженными частицами в калориметре, деленная на импульс частиц в зависимости от импульса. Ось цветов ( $z$ ) показывает количество событий.

# Идентификация протонов

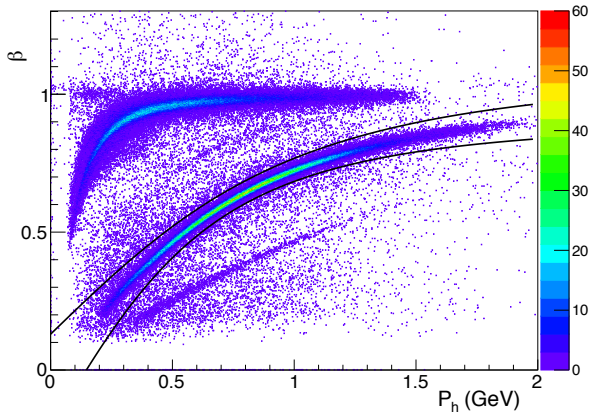


Рис. 5:  $\beta$  как функция импульса для положительно заряженных частиц. Ось цветов ( $z$ ) представляет количество событий.

# Геометрические отборы областей доверия

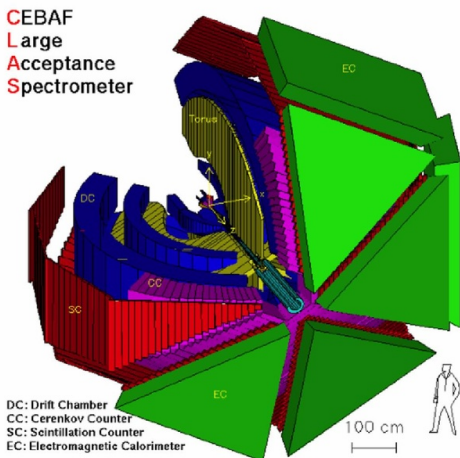


Рис. 6: Детектор CLAS.

# Геометрические отборы областей доверия

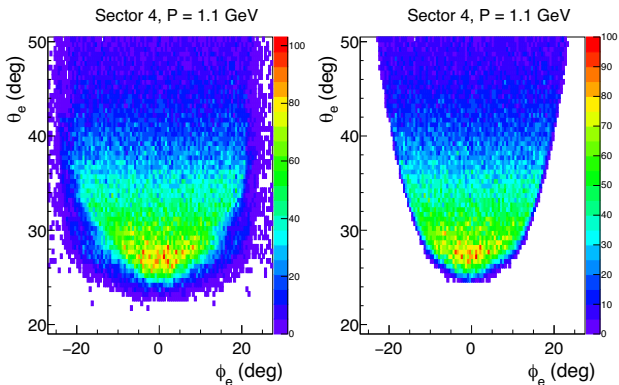


Рис. 7: Выбор доверительной области для электронов. Ось цветов ( $z$ ) представляет количество событий.

## Ограничения на вершину электрона

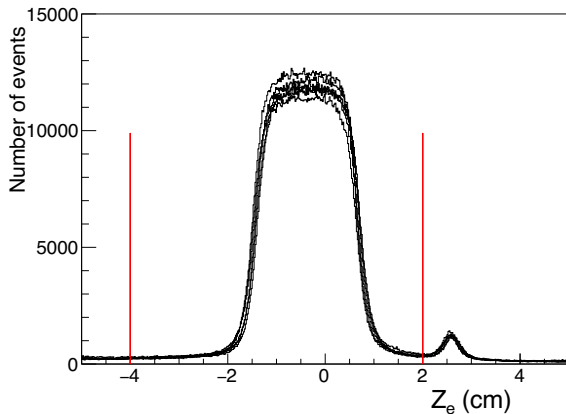


Рис. 8:  $Z$  координата вершины для электронов в разных секторах (разные кривые).

## Идентификация реакции $ep \rightarrow ep\pi^0$

Реакция

$$ep \rightarrow ep\pi^0 \rightarrow ep\gamma\gamma$$

будет идентифицироваться методом "недостающей массы" в канале:

$$ep \rightarrow epX,$$

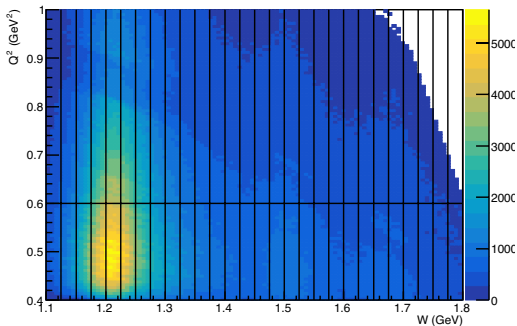
где сигнал от  $\pi^0$  будет выделяться при помощи недостающей массы частицы X:

$$MM^2(\pi^0) = (P_e + P_p - P_{e'} - P_{p'})^2, \quad (15)$$

где  $P_e, P_{e'}, P_p, P_{p'}$  - четырехвектора начального и конечного электронов и начального и конечного протонов соответственно.



## Разбиение кинематической области



Переменная	Размер ячейки	Количество ячеек	Нижняя граница	Верхняя граница
$W$ , ГэВ	0.025	28	1.1	1.7-1.8
$Q^2$ , ГэВ <sup>2</sup>	0.2-0.4	2	0.4	1.0
$\cos\theta_{\pi^0}$	0.2	10	-1	1
$\phi_{\pi^0}$	30°	12	0°	360°

## Идентификация реакции $ep \rightarrow ep\pi^0$

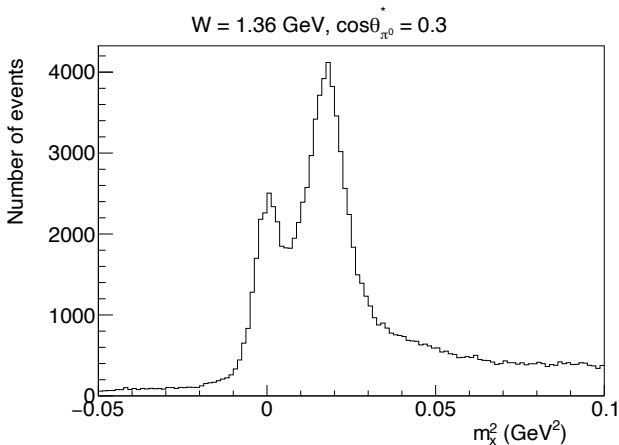
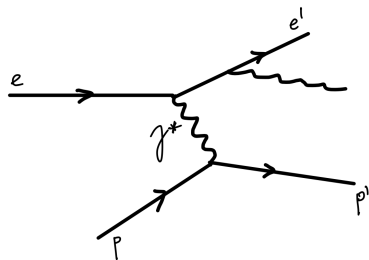
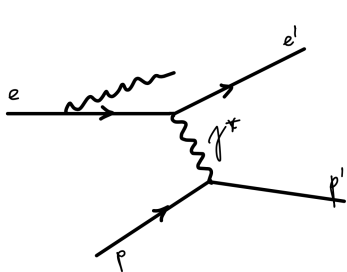


Рис. 9: Распределение недостающей массы в реакции  $ep \rightarrow epX$ .

## Пре- и пострадиационные упругие события



$$\operatorname{tg}\theta_1 = \frac{1}{\left(1 + \frac{E_f}{M_p - E_f + E_f \cos\theta_{e'}}\right) \operatorname{tg}\frac{\theta_{e'}}{2}} \quad (16)$$

$$\operatorname{tg}\theta_2 = \frac{1}{\left(1 + \frac{E}{M_p}\right) \operatorname{tg}\frac{\theta_{e'}}{2}} \quad (17)$$

## Пре- и пострadiaционные упругие события

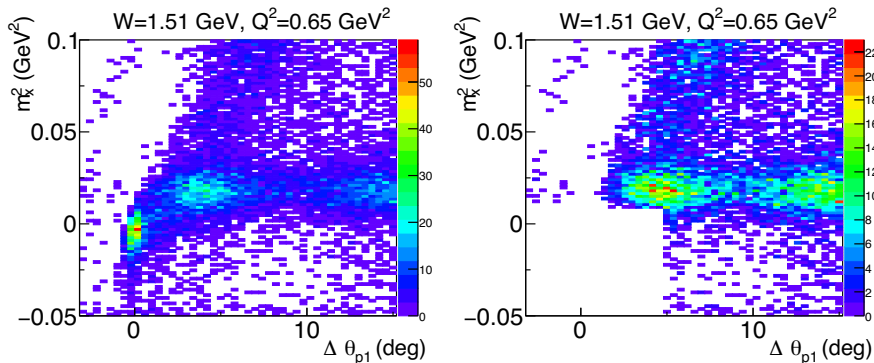


Рис. 10: Отделение событий Бете-Гайтлера. Ось цветов ( $z$ ) представляет количество событий.

# Идентификация реакции $e p \rightarrow e p \pi^0$

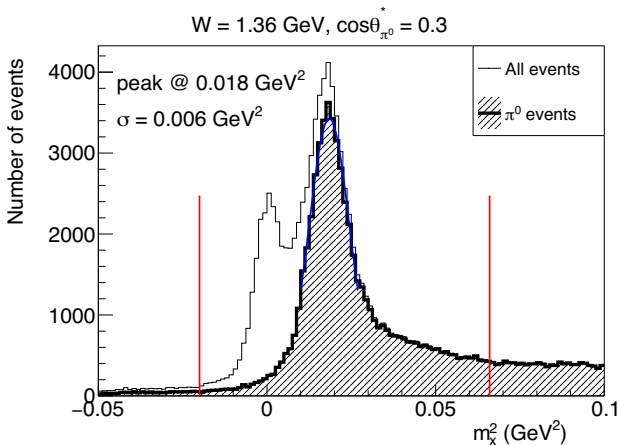


Рис. 11: Распределение недостающей массы в реакции  $e p \rightarrow e p X$ .

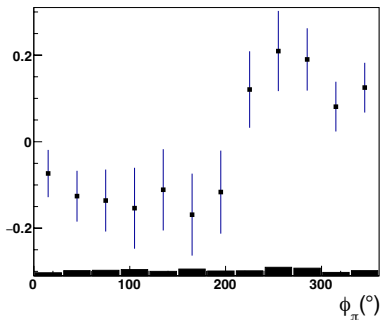
## Извлечение спиновой асимметрии пучка

$$A_{LT} = \frac{1}{P_e} \frac{N^+ - N^-}{N^+ + N^-}, \quad (18)$$

где  $P_e$  - поляризация пучка,  $N^\pm$  - количество событий с спиральностью электрона  $\pm 1$ .

# Извлечение спиновой асимметрии пучка

BSA  $W= 1.56$  GeV,  $Q^2= 0.5$  GeV<sup>2</sup>,  $\cos \theta_\pi = -0.9$



BSA  $W= 1.71$  GeV,  $Q^2= 0.5$  GeV<sup>2</sup>,  $\cos \theta_\pi = 0.9$

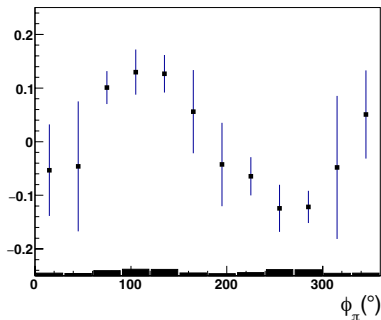


Рис. 12: Спиновая асимметрия пучка как функция азимутального угла пиона в системе центра масс  $\phi_\pi$  для реакции  $ep \rightarrow e' \pi^0 p$ .

## Извлечение спиновой асимметрии пучка

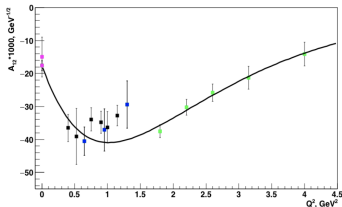
Было проведено сравнение полученных спиновых асимметрий пучка  $A_{LT'}(W, Q^2, \cos \theta, \phi)$  и структурных функций  $\sigma_{LT'}(W, Q^2, \cos \theta)$  с предсказаниями модели MAID2007 с использованием двух различных наборов амплитуд электровозбуждения  $N^*$ :

- исходные данные по амплитудам электровозбуждения  $N^*$ , заложенным в модель MAID2007;
- амплитуды, полученные из анализа данных CLAS по однопионному и двухпионному электророждению на протоне.

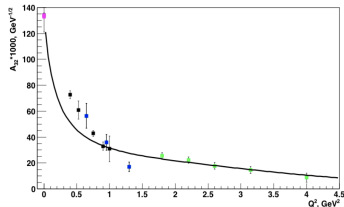


# Амплитуды электровозбуждения нуклонных резонансов из данных CLAS

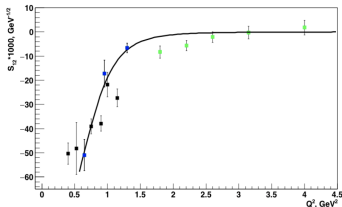
F15\_1685\_A12



F15\_1685\_A32



F15\_1685\_S12



Magenta lower point for A12 and upper for A32 — CLAS analysis of  $N\pi$  photoproduction off protons:

- M. Dugger et al., (CLAS Collaboration), Phys. Rev. C79, 065206 (2009)

Magenta upper point for A12 and lower for A32 — PDG14

Blue points — CLAS analysis of  $\rho\pi\pi$  electroproduction off protons:

- V.I. Mokeev and I.G. Aznauryan, Int. J. of Modern Phys: Conf. Ser 26, 1460080 (2014)

Black points — MAID analysis of  $N\pi$  electroproduction data:

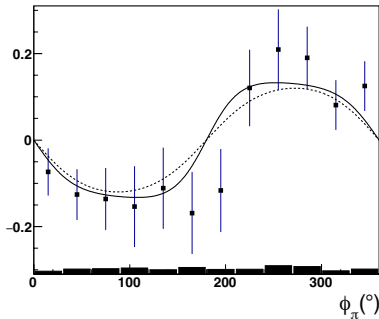
- L. Tiator et al., Eur. Phys. J. ST 198, 141 (2011)

Green points — CLAS analysis of  $N\pi$  electroproduction off protons:

- K. Park et al, (CLAS Collaboration), Phys. Rev. C 91, 045203 (2015)

# Извлечение спиновой асимметрии пучка

BSA  $W= 1.56 \text{ GeV}$ ,  $Q^2= 0.5 \text{ GeV}^2$ ,  $\cos \theta_\pi = -0.9$



BSA  $W= 1.71 \text{ GeV}$ ,  $Q^2= 0.5 \text{ GeV}^2$ ,  $\cos \theta_\pi = 0.9$

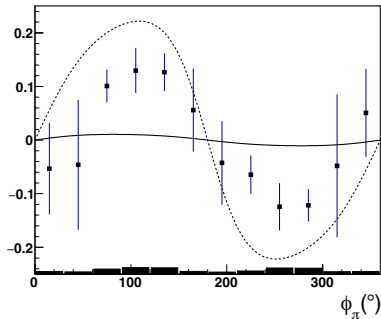


Рис. 13: Спиновая асимметрия пучка как функция азимутального угла пиона в системе центра масс  $\phi_\pi$  для реакции  $e p \rightarrow e' \pi^0 p$ .

## Извлечение $\sigma_{LT'}$

$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega_\pi^*} = \frac{p_\pi^*}{k_\gamma^*} (\sigma_0 + h\sqrt{2\epsilon_L(1-\epsilon)} \sigma_{LT'} \sin \theta_\pi^* \sin \phi_\pi^*), \quad (19)$$

$$\sigma_0 = \sigma_T + \epsilon_L \sigma_L + \epsilon \sigma_{TT} \sin^2 \theta_\pi^* \cos 2\phi_\pi^* + \sqrt{2\epsilon_L(1+\epsilon)} \sigma_{LT} \sin \theta_\pi^* \cos \phi_\pi^*, \quad (20)$$

где  $p_\pi^*$  обозначает абсолютное значение импульса  $\pi^0$  в системе центра масс, а  $k_\gamma^*$  - эквивалентная энергия реального фотона:

$$k_\gamma^* = \frac{W^2 - M_N^2}{2W}. \quad (21)$$

$$\epsilon = (1 + 2|\vec{q}|^2 \tan^2(\theta_e/2)/Q^2)^{-1}, \quad \epsilon_L = \frac{Q^2}{\omega_\gamma^{*2}} \epsilon, \quad (22)$$

где  $|\vec{q}|$  и  $\theta_e$  - абсолютные значения трехимпульса виртуального фотона и угла рассеяния в лабораторной системе отсчета,  $\omega_\gamma^*$  - энергия виртуального фотона в системе центра масс.

## Извлечение $\sigma_{LT'}$

$$A_{LT'} = \frac{\sqrt{2\varepsilon_L(1-\varepsilon)} \sigma_{LT'} \sin \theta_\pi^* \sin \phi_\pi^*}{\sigma_0}. \quad (23)$$

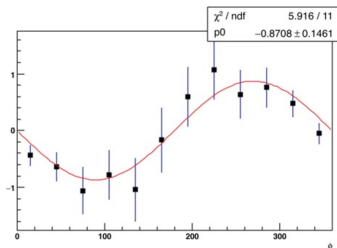


Рис. 14: Спиновая асимметрия пучка как функция угла  $\phi$  при  $W = 1.66$  ГэВ  $0.4 < Q^2 < 0.6$  ГэВ<sup>2</sup>  $\cos \theta = -0.9$ .

## Извлечение $\sigma_{LT'}$

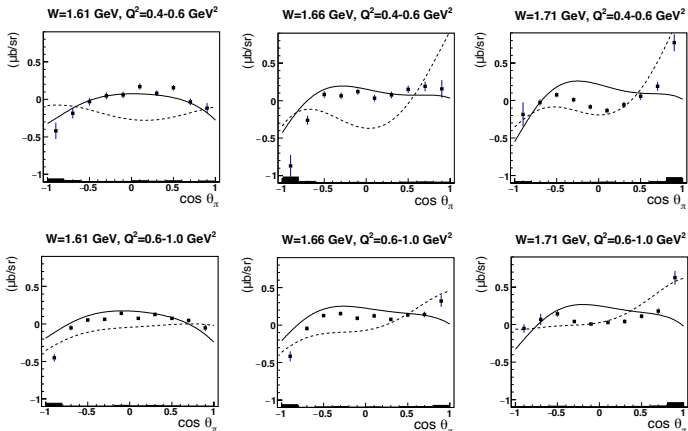


Рис. 15: Структурная функция  $\sigma_{LT'}$  для электророждения  $\pi^0 p$  на протоне в третьей резонансной области.

## Моменты Лежандра структурной функции $\sigma_{LT'}$

$$\sigma_{LT'} = \sum_{l=0}^{l_{max}=3} D_l P_l(\cos\theta_{\pi}^*), \quad (24)$$

где  $l$  - орбитальный момент  $\pi^0$ .

## Анализ чувствительности момента Лежандра $D_0$ к резонансным вкладам

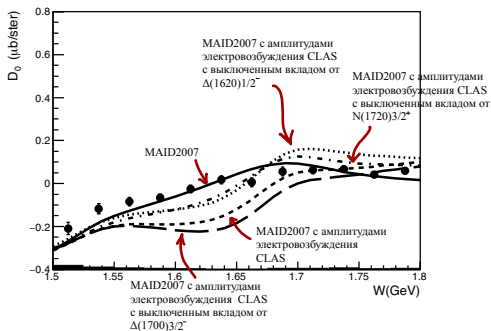


Рис. 16: Момент Лежандра  $D_0(Q^2, W)$  структурной функции  $\sigma_{LT'}$  из данных электророзпада  $\pi^0 p$  при  $Q^2=0,4-0,6$  ГэВ<sup>2</sup>.

$$\begin{aligned}
 D_0 \sim & (5E_{3+}^* - 2E_{3-}^* + M_{1-}^* + M_{1+}^*)S_{0+} \\
 & + E_{0+}^* (S_{3-} - S_{3+}).
 \end{aligned} \tag{25}$$

## Анализ чувствительности момента Лежандра $D_0$ к резонансным вкладам

$P_{11}$	$P_{31}$	$\frac{1}{2}^+$	$1^+$	$L_{1-}$
$S_{11}$	$S_{31}$	$\frac{1}{2}^+$	$0^-$	$L_{0+}, E_{0+}$
$D_{13}$	$D_{33}$	$\frac{1}{2}^+$	$2^-$	$L_{2-}, E_{2-}$
$P_{11}$	$P_{31}$	$\frac{1}{2}^+$	$1^+$	$M_{1-}$
$P_{13}$	$P_{33}$	$\frac{1}{2}^+$	$1^+$	$M_{1+}$
$P_{13}$	$P_{33}$	$\frac{1}{2}^+$	$1^+$	$L_{1+}, E_{1+}$
$F_{15}$	$F_{35}$	$\frac{1}{2}^+$	$3^+$	$L_{3-}, E_{3-}$
$D_{13}$	$D_{33}$	$\frac{1}{2}^+$	$2^-$	$M_{2-}$
$D_{15}$	$D_{35}$	$\frac{1}{2}^+$	$2^-$	$M_{2+}$



## Анализ чувствительности момента Лежандра $D_0$ к резонансным вкладам

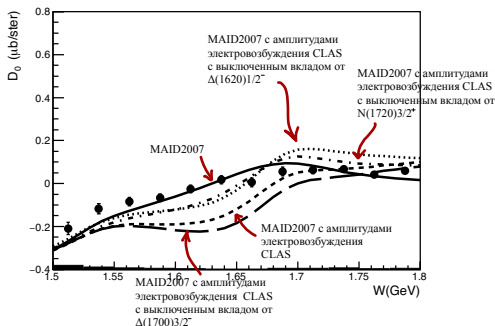


Рис. 17: Момент Лежандра  $D_0(Q^2, W)$  структурной функции  $\sigma_{LT'}$  из данных электророзпада  $\pi^0 p$  при  $Q^2=0,4-0,6$  ГэВ<sup>2</sup>.

$$\begin{aligned}
 D_0 \sim & (5E_{3+}^* - 2E_{3-}^* + M_{1-}^* + M_{1+}^*)S_{0+} + \\
 & + E_{0+}^* (S_{3-} - S_{3+}).
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

## Анализ чувствительности момента Лежандра $D_1$ к резонансным вкладам

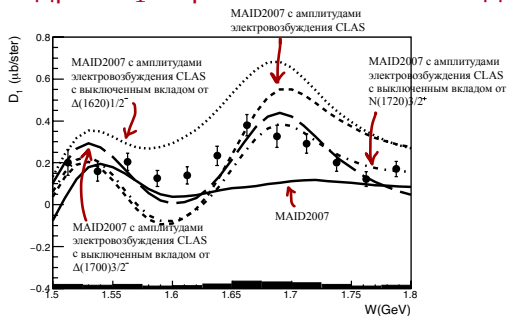


Рис. 18: Момент Лежандра  $D_1(Q^2, W)$  структурной функции  $\sigma_{LT'}$  из данных электро рождения  $\pi^0 p$  при  $Q^2=0,4-0,6$  ГэВ<sup>2</sup>.

$$\begin{aligned}
 D_1 \sim & -6E_{2-}^* S_{2-} - 6M_{2-}^* S_{2-} \\
 & + 6E_{1+}^* S_{1+} - 6M_{1+}^* S_{1+}.
 \end{aligned}
 \tag{27}$$

## Анализ чувствительности момента Лежандра $D_2$ к резонансным вкладам

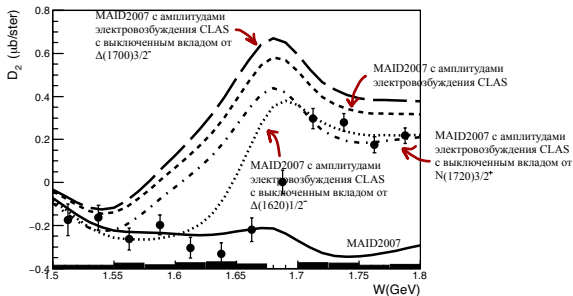


Рис. 19: Момент Лежандра  $D_2(Q^2, W)$  структурной функции  $\sigma_{LT}^0$  из данных электророждения  $\pi^0 p$  при  $Q^2=0,4-0,6$  ГэВ<sup>2</sup>.

$$D_2 \sim 12(M_{2+}^* - E_{2-}^*)S_{1+} + 6(3E_{2+}^* + 2M_{2+}^*)S_{1+} - 15M_{1+}^*S_{2-} \quad (28)$$

$$+ 5(5E_{3+}^* - 2E_{3-}^* + M_{3-}^* - M_{3+}^*)S_{0+} + 5E_{0+}^*(3S_{3-} - 4S_{3+}).$$

## Анализ чувствительности момента Лежандра $D_3$ к резонансным вкладам

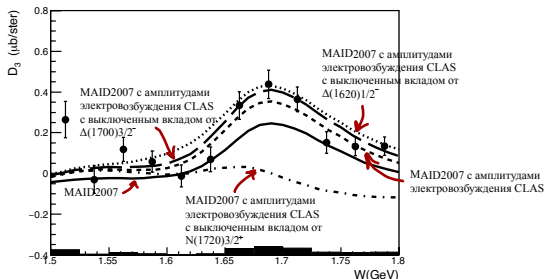


Рис. 20: Момент Лежандра  $D_3(Q^2, W)$  структурной функции  $\sigma_{LT'}$  из данных электроорождения  $\pi^0 p$  при  $Q^2=0,4-0,6$  ГэВ<sup>2</sup>.

$$\begin{aligned}
 D_3 \sim & 18(M_{3-}^* - E_{3+}^*)S_{1+} + & (29) \\
 & + (34E_{3+}^* - 36E_{3-}^*)S_{1+} - 28M_{1+}^*S_{3+}.
 \end{aligned}$$

# Анализ чувствительности моментов Лежандра к резонансным вкладам

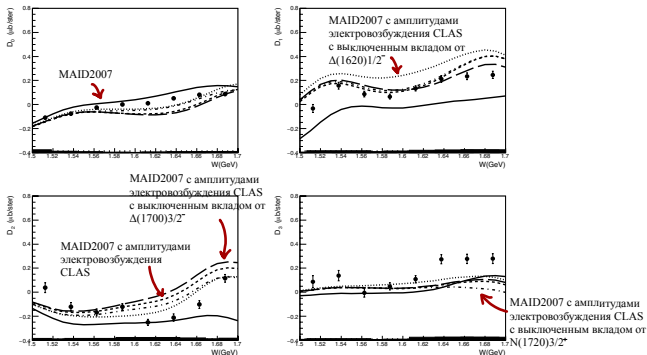


Рис. 21: Моменты Лежандра  $D_l(Q^2, W)$  ( $l=0,1,2,3$ ) структурной функции  $\sigma_{LT'}$  из данных электро рождения  $\pi^0 p$  при  $Q^2=0.6-1.0$  ГэВ<sup>2</sup>:  $D_0(Q^2, W)$  (вверху слева),  $D_1(Q^2, W)$  (вверху справа),  $D_2(Q^2, W)$  (внизу слева),  $D_3(Q^2, W)$  (внизу справа).

## Основные результаты работы

- Получена спиновая асимметрия пучка при значении кинематических переменных, соответствующей второй и третьей резонансным областям, при  $0.4 < Q^2 < 1.0 \text{ ГэВ}^2$ , где мировые данные до этого отсутствовали или были ограничены.
- Поляризованная структурная функция  $\sigma_{LT'}$  электророждения нейтрального пиона на протоне впервые получена в кинематической области при  $0.4 < Q^2 < 1.0 \text{ ГэВ}^2$  и  $1.5 < W < 1.8 \text{ ГэВ}$ .
- Найден вклад нуклонных резонансов в инклюзивные структурные функции  $F_1$  и  $F_2$  на основе новейших данных CLAS по амплитудам электровозбуждения  $N^*$ .

# Публикации

1. Polarized structure function  $\sigma_{LT}$  from  $\pi^0 p$  electroproduction data in the resonance region at  $0.4 \text{ GeV}^2 \leq Q^2 \leq 1.0 \text{ GeV}^2$  / A. A. Golubenko [et al.] // Phys. Rev. C. — 2022. — Feb. — Vol. 105, issue 2. — P. L022201.
2. Nucleon resonance contributions to unpolarized inclusive electron scattering / Hiller Blin A. N., Mokeev V.I., Albaladejo M., Fern'andez-Ram'irez C., Mathieu V., Pilloni A., Szczepaniak A., Burkert V. D., Chesnokov V. V., Golubenko A. A., Vanderhaeghen. M. // Phys. Rev. C. — 2019. — Sept. — Vol. 100, issue 3. — P. 035201.
3. Evaluation of the Inclusive Electron Scattering Observables in the Resonance Region from the Experimental Data / A.A. Golubenko [et al.] // Phys. Part. Nuclei. — 2019. — Sept. — Vol. 50. — P. 587–592.
4. А.А. Голубенко. Экстраполяция структурных функций  $F_1$  и  $F_2$  в область виртуальностей фотона от 2 до 7 ГэВ<sup>2</sup> // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. — 2018. — No 2.
5. А.А. Голубенко, Е.Н. Головач. Интерполяция и экстраполяция сечений и структурных функций инклюзивного рассеяния электронов на протонах при  $W < 4.0 \text{ ГэВ}$  и  $2.0 < Q^2 < 7.0 \text{ ГэВ}^2$  // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. — 2019. — No 3.
6. Electromagnetic form factors of nucleon resonances from CLAS / A.A. Golubenko [et al.] // EPJ Web Conf. — 2019. — Vol. 222. — P. 02003.

Спасибо за внимание!



# Апробация

Основные результаты работы докладывались автором на следующих конференциях:

- XV International Seminar on Electromagnetic Interactions of Nuclei (Москва – 2018 г.)
- CLAS Collaboration Meeting (Ньюпорт-Ньюс, США – 2019)
- International conference "NUCLEUS" (Дубна – 2019 г., Санкт-Петербург – 2020 г.)
- Научная конференция «Ломоносовские чтения» (Москва – 2019 г.)

## Цели и задачи

Данная работа посвящена экспериментальному измерению спиновых асимметрий пучка и извлечению поляризованных структурных функций. Существенной частью работы является оценка резонансного вклада в инклюзивные структурные функции.

# Цели и задачи

Для достижения поставленных целей необходимо было решить следующие задачи:

- Произвести надежную идентификацию электронов и протонов, необходимую для предварительного отбора событий, принадлежащих исследуемым каналам реакции, содержащих только один электрон и протон.
- Вычитание фона различного происхождения в событиях, в том числе от Бете-Гайтлеровских процессов, значительно подавляющих сигнал реакции, и окончательный отбор событий методом недостающей массы для экспериментальных событий  $ep \rightarrow epX$
- Вычисление спиновой асимметрии пучка и применение коррекций на центр ячеек при четырехмерном разбиении кинематического пространства и радиационных поправок.
- Извлечение поляризационных структурных функций  $\sigma_{LT'}$  из спиновых асимметрий пучка.
- Сравнение измеренных асимметрий и вычисленных  $\sigma_{LT'}$  с феноменологической моделью MAID2007 с различными предположениями об амплитудах электровозбуждения нуклонных резонансов.
- Интерполяция и экстраполяция инклюзивных структурных функций  $F_1$  и  $F_2$  из мировых данных и данных CLAS в кинематической области по  $W$  до 4 ГэВ и по  $Q^2$  до 7 ГэВ<sup>2</sup>.
- Вычисление резонансного вклада в инклюзивные структурные функции  $F_1$  и  $F_2$  на основе данных по спиральным амплитудам электровозбуждения  $N^*$ .

## Основные положения, выносимые на защиту

- Значения структурных функций  $F_1$  и  $F_2$  в инклюзивном электрон-протонном рассеянии в кинематической области по  $W$  до 4 ГэВ и по  $Q^2$  до 7 ГэВ<sup>2</sup> и вычисление вклада нуклонных резонансов в инклюзивные структурные функции.
- Набор значений спиновых асимметрий пучка в реакциях  $ep \rightarrow ep\pi^0$  в фазовом пространстве четырех переменных  $W$ ,  $Q^2$ ,  $\cos\theta$ ,  $\phi$ .
- Поляризованные структурные функции  $\sigma_{LT'}(W, Q^2, \cos\theta)$ .
- Значения моментов Лежандра для поляризованных структурных функций  $\sigma_{LT'}$ . Анализ чувствительности моментов Лежандра к вкладам резонансных состояний  $S_{31}(1620)$ ,  $P_{13}(1720)$  и  $D_{33}(1700)$ .

## Новизна работы

- Получена спиновая асимметрия пучка при значении кинематических переменных, соответствующей третьей резонансной области, при  $0.4 < Q^2 < 1.0$  ГэВ<sup>2</sup>, где мировые данные до этого отсутствовали или были ограничены.
- Поляризованная структурная функция  $\sigma_{LT'}$  электророждения нейтрального пиона на протоне впервые получена в кинематической области при  $0.4 < Q^2 < 1.0$  ГэВ<sup>2</sup> и  $1.5 < W < 1.8$  ГэВ.
- Найден вклад нуклонных резонансов в инклюзивные структурные функции  $F_1$  и  $F_2$  на основе новейших данных CLAS по амплитудам электровозбуждения  $N^*$ .