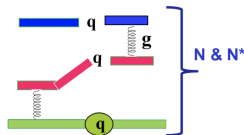
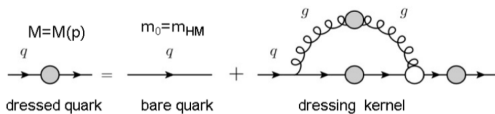


# Поляризованная структурная функция электророждения нейтрального пиона на протоне в резонансной области

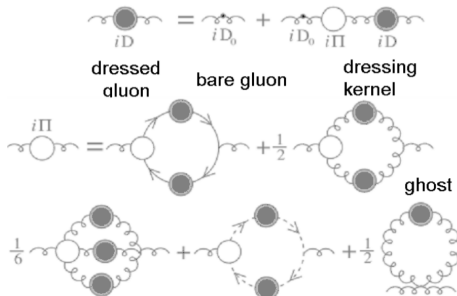
Голубенко Анна Александровна,  
Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова

19 апреля 2022 г.

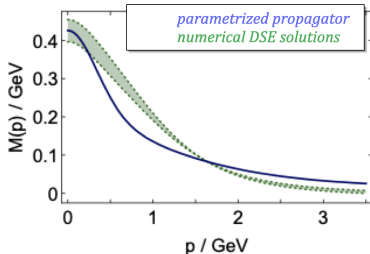
# Возбужденные состояния нуклонов как инструмент для изучения сильной КХД



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

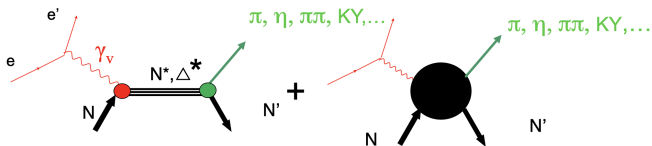


**Emergence of Dressed Quarks and Gluons**  
 D. Binosi et al., Phys. Rev. D95, 031501 (2017)



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

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

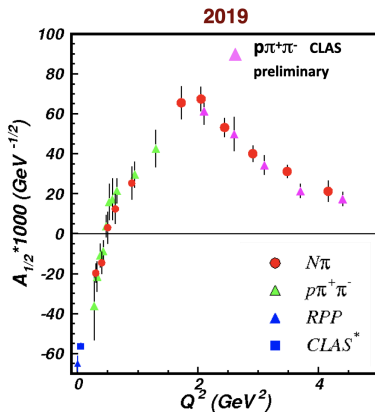
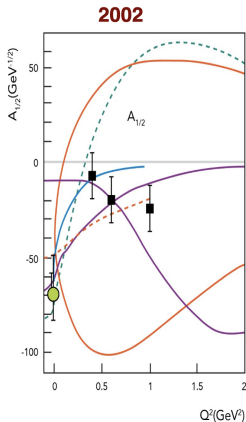


$$\Gamma_r^T(M_r, Q^2) = \frac{q_{\gamma,r}^2(Q^2)}{\pi} \frac{2M_N}{(2J_r + 1)M_r} (|A_{1/2}(Q^2)|^2 + |A_{3/2}(Q^2)|^2), \quad (1)$$

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

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

# Амплитуды электровозбуждения Роперовского резонанса

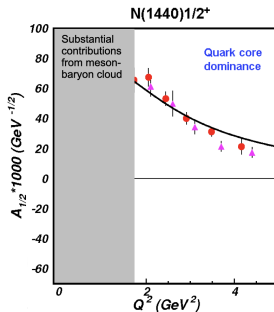
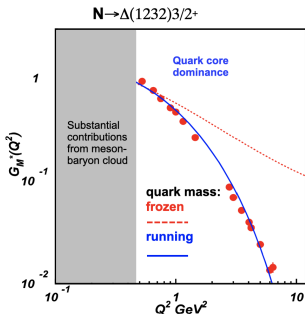


V. D. Burkert, Baryons 2016 and the recent update from the CLAS  $p+p$  electroproduction off protons data

# 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).

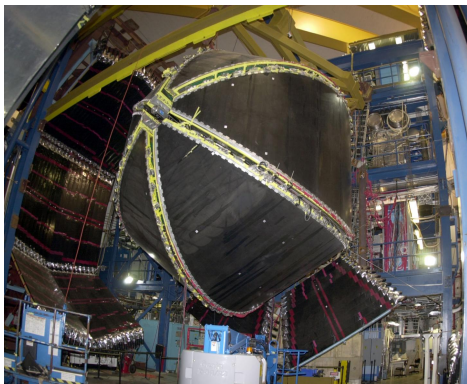


# Измеренные данные по электророждению одиночного псевдоскалярного мезона на нуклоне

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

# Идентификация электронов

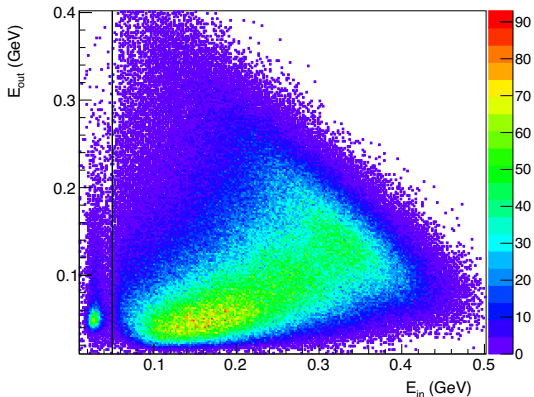


Рис. 1: Энергия, выделяемая отрицательно заряженными частицами во внутреннем калориметре, по сравнению с энергией, выделяемой во внешнем калориметре. Ось цветов ( $z$ ) представляет количество событий.



## Идентификация электронов

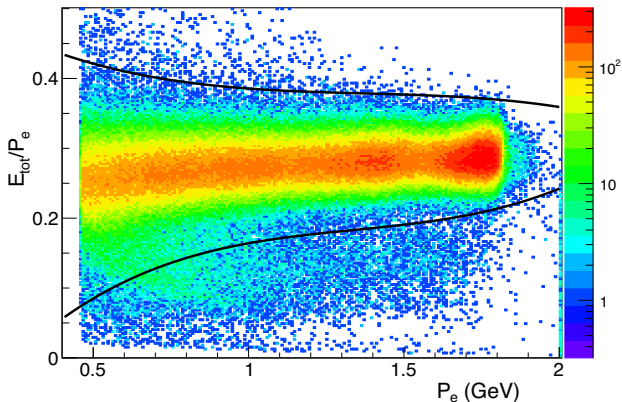


Рис. 2: Энергия, оставляемая отрицательно заряженными частицами в калориметре, деленная на импульс частиц в зависимости от импульса. Ось цветов ( $z$ ) показывает количество событий.

# Идентификация протонов

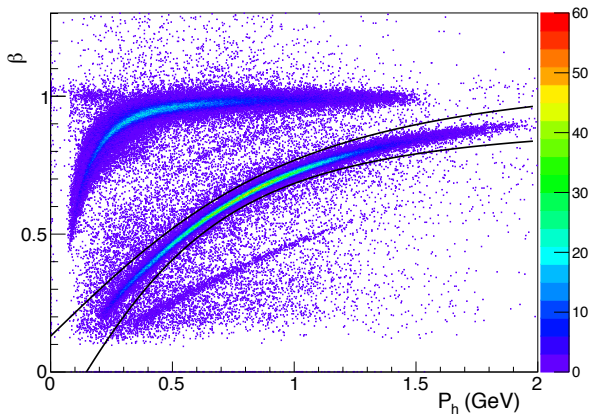


Рис. 3:  $\beta$  как функция импульса для положительно заряженных частиц. Ось цветов ( $z$ ) представляет количество событий.

# Геометрические отборы областей доверия

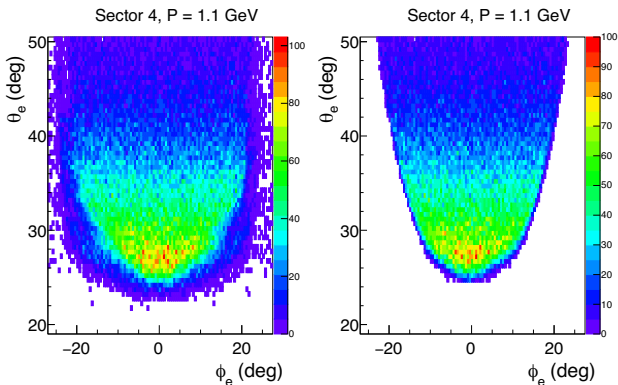


Рис. 4: Выбор доверительной области для электронов. Ось цветов ( $z$ ) представляет количество событий.

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

Реакция

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

будет идентифицироваться методом "недостающей массы" в канале:

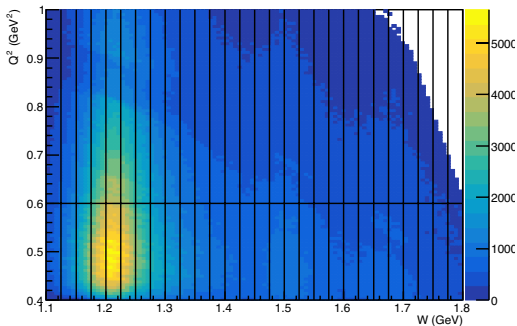
$$ep \rightarrow epX,$$

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

$$MM^2(\pi^0) = (P_e + P_p - P_{e'} - P_{p'})^2, \quad (3)$$

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 $ep \rightarrow ep\pi^0$

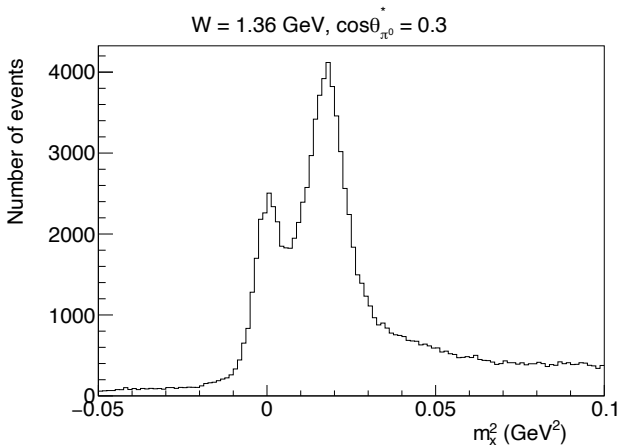


Рис. 5: Распределение недостающей массы в реакции  $ep \rightarrow epX$ .

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

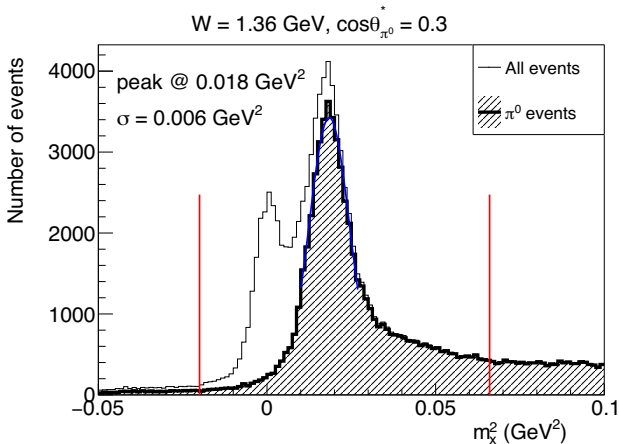


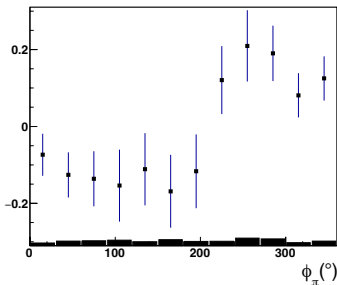
Рис. 6: Распределение недостающей массы в реакции  $ep \rightarrow epX$ .

## Извлечение спиновой асимметрии пучка

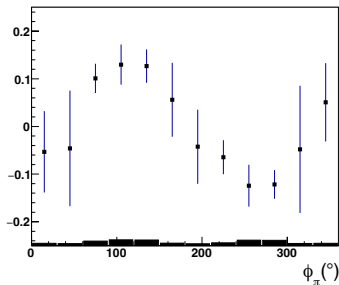
$$A_{LT} = \frac{1}{P_e} \frac{N^+ - N^-}{N^+ + N^-}, \quad (4)$$

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

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>,  $\cos \theta_\pi = 0.9$





## Извлечение $\sigma_{LT'}$

$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega_\pi^*} = \frac{p_\pi^*}{k_\gamma^*} (\sigma_0 + h\sqrt{2\epsilon_L(1-\epsilon)} \sigma_{LT'} \sin \theta_\pi^* \sin \phi_\pi^*), \quad (5)$$

$$\sigma_0 = \sigma_T + \epsilon_L \sigma_L + \epsilon \sigma_{TT} \sin^2 \theta_\pi^* \cos 2\phi_\pi^* + \sqrt{2\epsilon_L(1+\epsilon)} \sigma_{LT} \sin \theta_\pi^* \cos \phi_\pi^*, \quad (6)$$

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

$$k_\gamma^* = \frac{W^2 - M_N^2}{2W}. \quad (7)$$

$$\epsilon = (1 + 2|\vec{q}|^2 \tan^2(\theta_e/2)/Q^2)^{-1}, \quad \epsilon_L = \frac{Q^2}{\omega_\gamma^{*2}} \epsilon, \quad (8)$$

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 $\sigma_{LT'}$

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. Mokeev,<sup>36</sup> L. C. Smith,<sup>41</sup> M. Ungaro,<sup>36</sup> S. Adhikari,<sup>11</sup>

$$A_{LT'} = \frac{\sqrt{2\varepsilon_L(1-\varepsilon)} \sigma_{LT'} \sin \theta_\pi^* \sin \phi_\pi^*}{\sigma_0}. \quad (9)$$

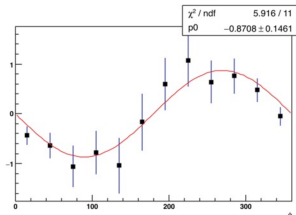


Рис. 7: Спиновая асимметрия пучка, умноженная на  $\sigma_0$ , как функция угла  $\phi$  при  $W = 1.66 \text{ ГэВ}$ ,  $0.4 < Q^2 < 0.6 \text{ ГэВ}^2$ ,  $\cos \theta = -0.9$ .

## Извлечение $\sigma_{LT}'$

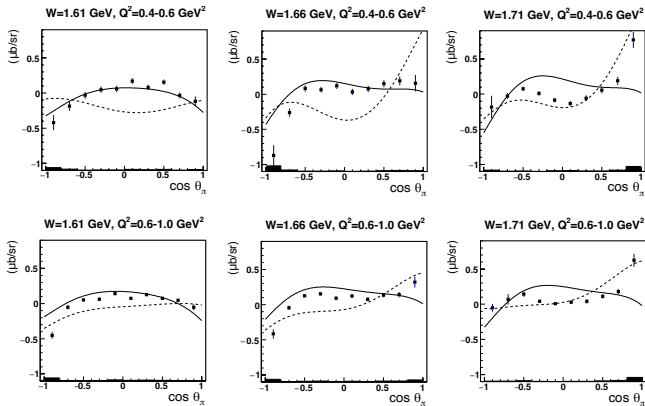


Рис. 8: Структурная функция  $\sigma_{LT}'$  для электророждения  $\pi^0 p$  на протоне в третьей резонансной области. Линиями показаны оценки в модели реакции MAID с использованием амплитуд электровозбуждения  $\gamma_v PN^*$  из MAID (сплошная линия) и из анализа мезонного электророждения CLAS (пунктирная линия)

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

$$\sigma_{LT'} = \sum_{l=0}^{l_{max}=3} D_l P_l(\cos\theta_{\pi}^*), \quad (10)$$

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

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

# Анализ чувствительности моментов Лежандра к резонансным вкладам

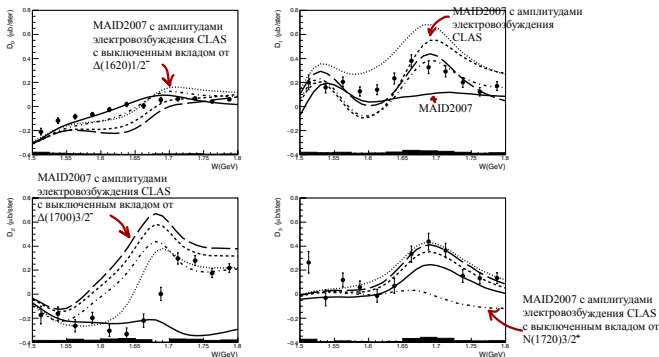


Рис. 9: Моменты Лежандра  $D_l(Q^2, W)$  ( $l=0,1,2,3$ ) структурной функции  $\sigma_{LT'}$  из данных электро рождения  $\pi^0 p$  при  $Q^2=0.4-0.6$  ГэВ<sup>2</sup>:  $D_0(Q^2, W)$  (вверху слева),  $D_1(Q^2, W)$  (вверху справа),  $D_2(Q^2, W)$  (внизу слева),  $D_3(Q^2, W)$  (внизу справа).

## 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  $1.5 < W < 1.8 \text{ ГэВ}$ .

Спасибо за внимание!

# Детектор CLAS

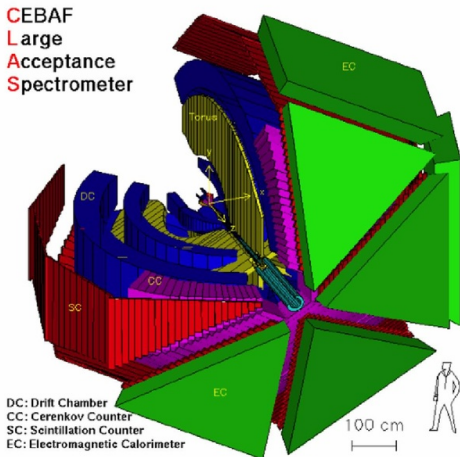


Рис. 1: Детектор CLAS.



## Ограничения на вершину электрона

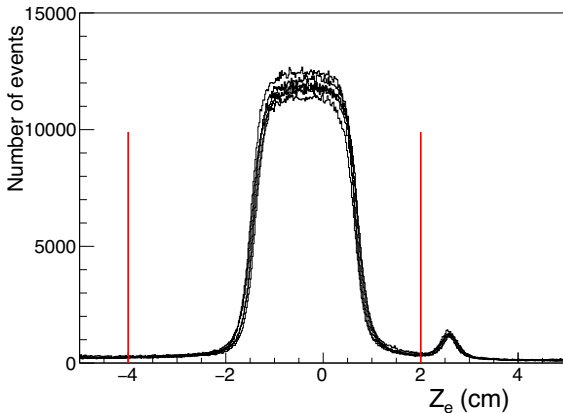
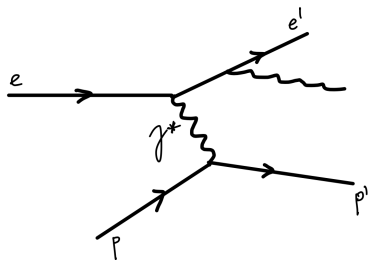
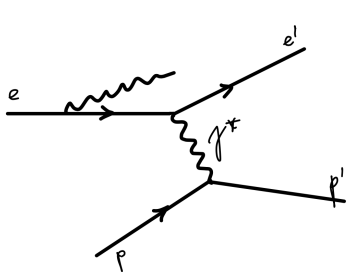


Рис. 2:  $Z$  координата вершины для электронов в разных секторах (разные кривые).

## Пре- и пострадиационные упругие события



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

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

## Пре- и пострadiaционные упругие события

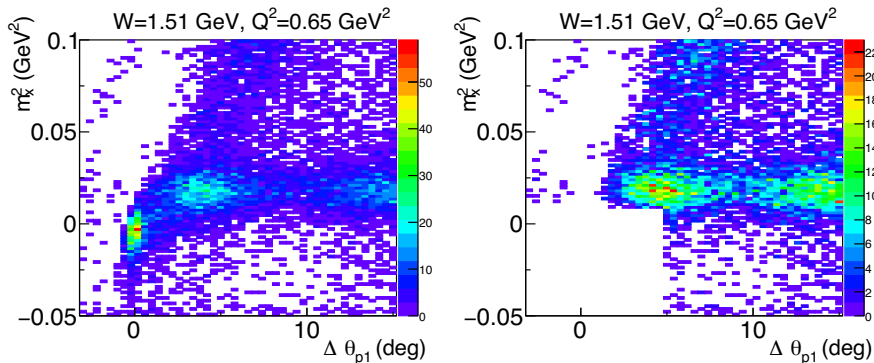


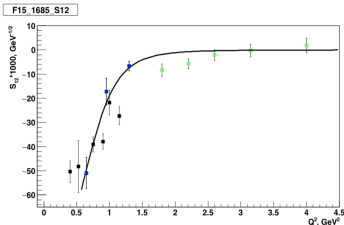
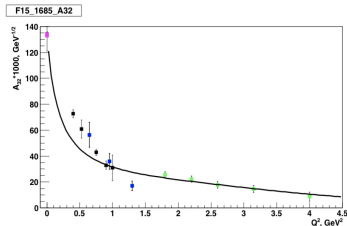
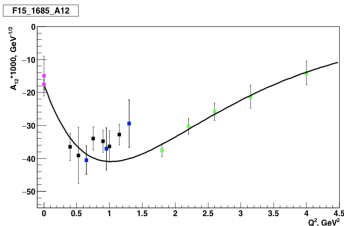
Рис. 3: Отделение событий Бете-Гайтлера. Ось цветов ( $z$ ) представляет количество событий.

## 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



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:

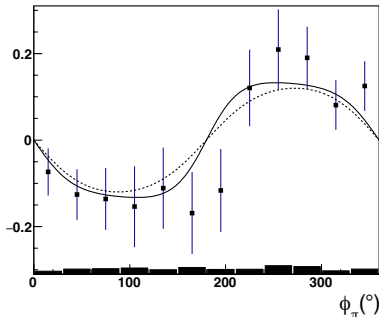
- L. Tiator et al., Eur. Phys. J. ST 198, 141 (2011)

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  $W= 1.56$  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>,  $\cos \theta_\pi = 0.9$

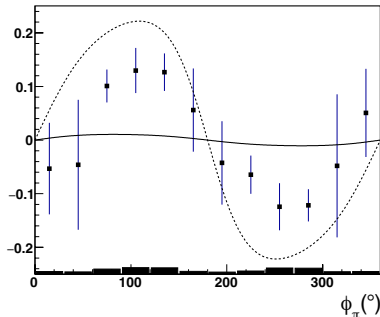


Рис. 4: Спиновая асимметрия пучка как функция азимутального угла пиона в системе центра масс  $\phi_\pi$  для реакции  $ep \rightarrow e'\pi^0 p$ .

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

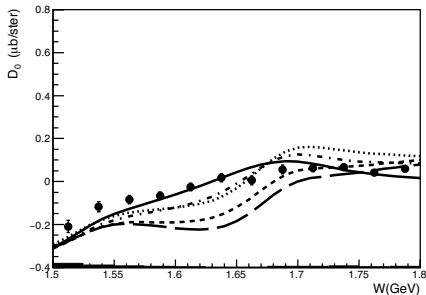


Рис. 5: Момент Лежандра  $D_0(Q^2, W)$  структурной функции  $\sigma_{LT'}$  из данных электророждения  $\pi^0 p$  при  $Q^2=0,4-0,6$  ГэВ<sup>2</sup>.

$$D_0 \sim (5E_{3+}^* - 2E_{3-}^* + M_{1-}^* + M_{1+}^*)S_{0+} + E_{0+}^*(S_{3-} - S_{3+}). \quad (3)$$

## 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

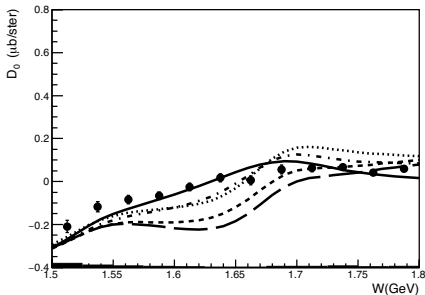


Рис. 6: Момент Лежандра  $D_0(Q^2, W)$  структурной функции  $\sigma_{LT'}$  из данных электророждения  $\pi^0 p$  при  $Q^2=0,4-0,6$  ГэВ<sup>2</sup>.

$$D_0 \sim (5E_{3+}^* - 2E_{3-}^* + M_{1-}^* + M_{1+}^*)S_{0+} + E_{0+}^*(S_{3-} - S_{3+}). \quad (4)$$

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

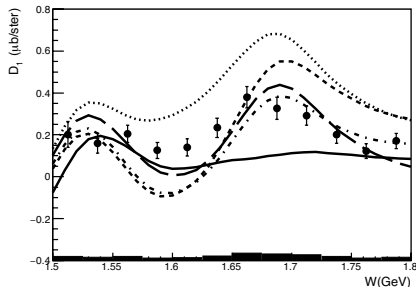


Рис. 7: Момент Лежандра  $D_1(Q^2, W)$  структурной функции  $\sigma_{LT'}$  из данных электророждения  $\pi^0 p$  при  $Q^2=0,4-0,6$  ГэВ<sup>2</sup>.

$$\begin{aligned}
 D_1 \sim & -6E_{2-}^* S_{2-} - 6M_{2-}^* S_{2-} \\
 & + 6E_{1+}^* S_{1+} - 6M_{1+}^* S_{1+}.
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

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

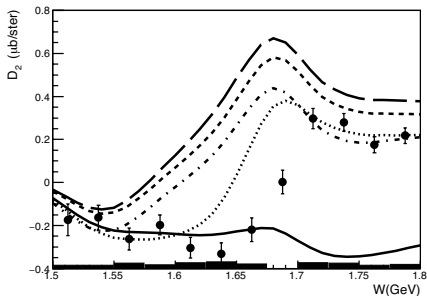


Рис. 8: Момент Лежандра  $D_2(Q^2, W)$  структурной функции  $\sigma_{LT'}$  из данных электророждения  $\pi^0 p$  при  $Q^2=0,4-0,6$  ГэВ<sup>2</sup>.

$$\begin{aligned}
 D_2 \sim & 12(M_{2+}^* - E_{2-}^*)S_{1+} + 6(3E_{2+}^* + 2M_{2+}^*)S_{1+} - 15M_{1+}^*S_{2-} \\
 & + 5(5E_{3+}^* - 2E_{3-}^* + M_{3-}^* - M_{3+}^*)S_{0+} + 5E_{0+}^*(3S_{3-} - 4S_{3+}).
 \end{aligned} \tag{6}$$

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

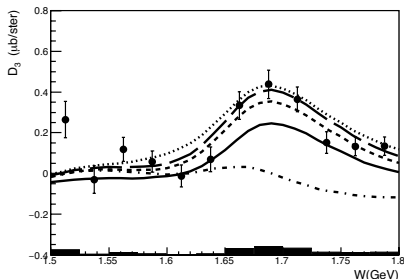


Рис. 9: Момент Лежандра  $D_3(Q^2, W)$  структурной функции  $\sigma_{LT'}$  из данных электроорождения  $\pi^0 p$  при  $Q^2=0,4-0,6$  ГэВ<sup>2</sup>.

$$\begin{aligned}
 D_3 \sim & 18(M_{3-}^* - E_{3+}^*)S_{1+} \\
 & + (34E_{3+}^* - 36E_{3-}^*)S_{1+} - 28M_{1+}^*S_{3+}.
 \end{aligned} \tag{7}$$

# Анализ чувствительности моментов Лежандра к резонансным вкладам

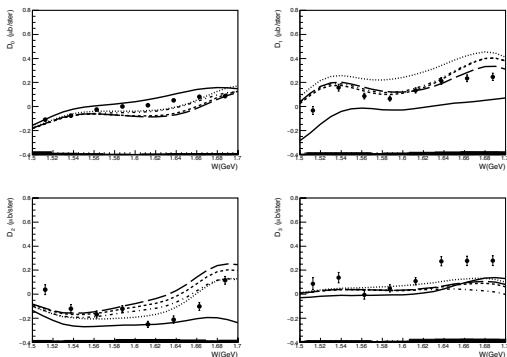


Рис. 10: Моменты Лежандра  $D_l(Q^2, W)$  ( $l=0,1,2,3$ ) структурной функции  $\sigma_{LT'}$  из данных электророждения  $\pi^0 p$  при  $Q^2=0.6-1.0$  ГэВ<sup>2</sup>:  $D_0(Q^2, W)$  (вверху слева),  $D_1(Q^2, W)$  (вверху справа),  $D_2(Q^2, W)$  (внизу слева),  $D_3(Q^2, W)$  (внизу справа).