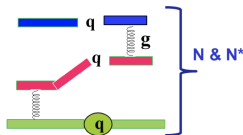
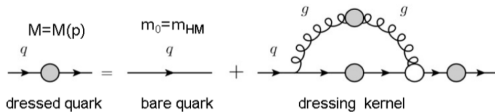


Извлечение поляризованной структурной функции в реакции электророждения нейтрального пиона из данных CLAS.

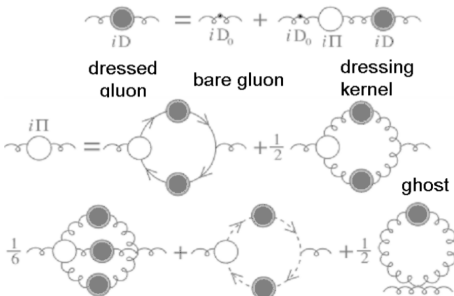
Голубенко Анна Александровна,
Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова

21 апреля 2022 г.

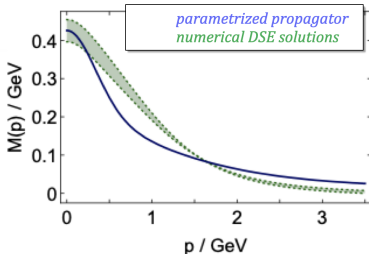
Возбужденные состояния нуклонов как инструмент для изучения сильной КХД



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

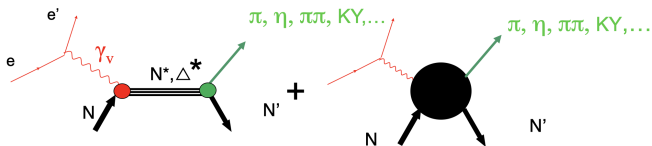


Emergence of Dressed Quarks and Gluons
 D. Binosi et al., Phys. Rev. D95, 031501 (2017)



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



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

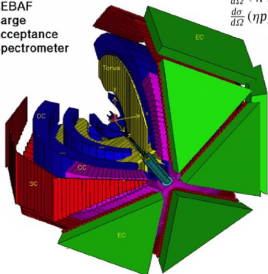
$$\Gamma_r^L(M_r, Q^2) = 2 \frac{q_{\gamma,r}^2(Q^2)}{\pi} \frac{2M_N}{(2J_r + 1)M_r} |S_{1/2}(Q^2)|^2. \quad (2)$$

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

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]

CEBAF
L
arge
A
cceptance
S
pectrometer



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

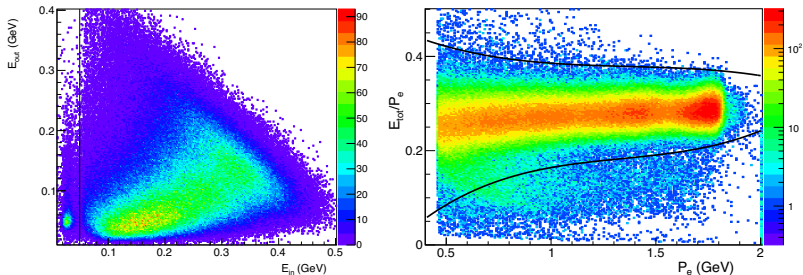


Рис. 1: Отбор электронов по сигналу электронного калориметра.

Идентификация протонов

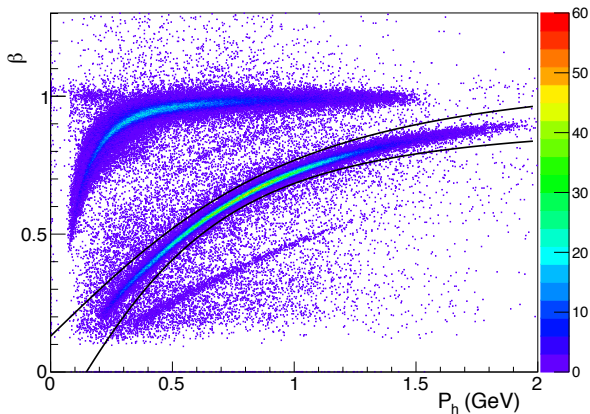


Рис. 2: β как функция импульса для положительно заряженных частиц. Ось цветов (z) представляет количество событий.

Геометрические отборы областей доверия

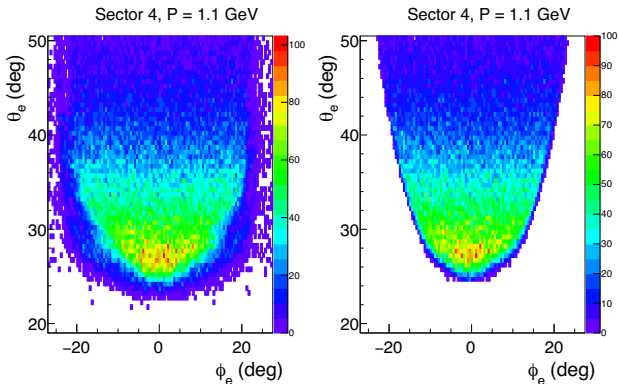


Рис. 3: Выбор доверительной области для электронов. Ось цветов (z) представляет количество событий.

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

Реакция

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

будет идентифицироваться методом "недостающей массы" в канале:

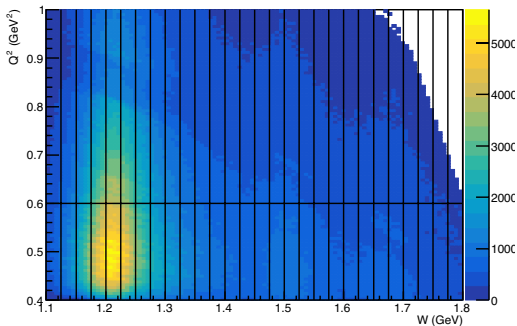
$$ep \rightarrow epX,$$

где сигнал от π^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 ²	0.2-0.4	2	0.4	1.0
$\cos\theta_{\pi^0}$	0.2	10	-1	1
ϕ_{π^0}	30°	12	0°	360°

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

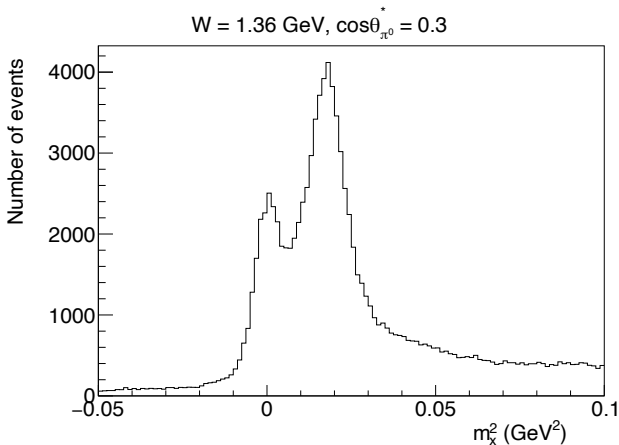


Рис. 4: Распределение недостающей массы в реакции $ep \rightarrow epX$.

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

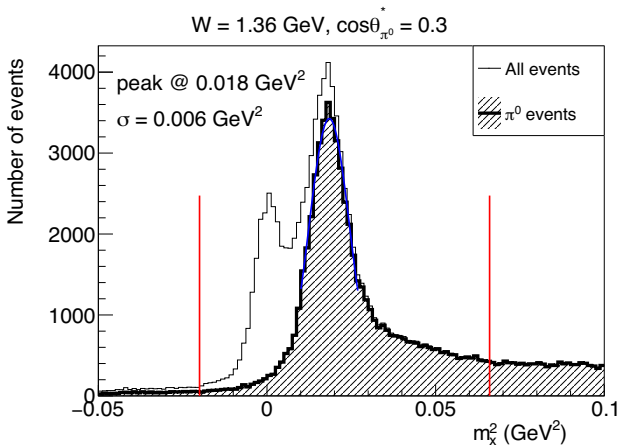


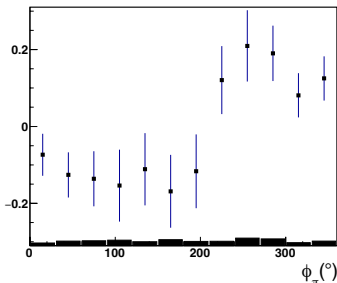
Рис. 5: Распределение недостающей массы в реакции $ep \rightarrow epX$.

Извлечение спиновой асимметрии пучка

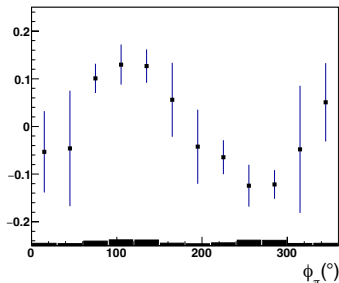
$$A_{LT} = \frac{1}{P_e} \frac{N^+ - N^-}{N^+ + N^-}, \quad (4)$$

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

BSA $W = 1.56$ GeV, $Q^2 = 0.5$ GeV², $\cos \theta_\pi = -0.9$



BSA $W = 1.71$ GeV, $Q^2 = 0.5$ GeV², $\cos \theta_\pi = 0.9$



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_π^* обозначает абсолютное значение импульса π^0 в системе центра масс, а k_γ^* - 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 θ_e - абсолютные значения трехимпульса виртуального фотона и угла рассеяния в лабораторной системе отсчета, ω_γ^* - 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,^{8, 36,*} K. Joo,⁸ V.D. Burkert,³⁶ V.I. Mokeev,³⁶ L. C. Smith,⁴¹ M. Ungaro,³⁶ S. Adhikari,¹¹

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

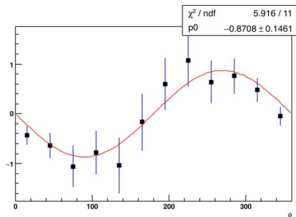


Рис. 6: Спиновая асимметрия пучка, умноженная на σ_0 , как функция угла ϕ при $W = 1.66 \text{ ГэВ}$, $0.4 < Q^2 < 0.6 \text{ ГэВ}^2$, $\cos \theta = -0.9$.

Извлечение σ_{LT}'

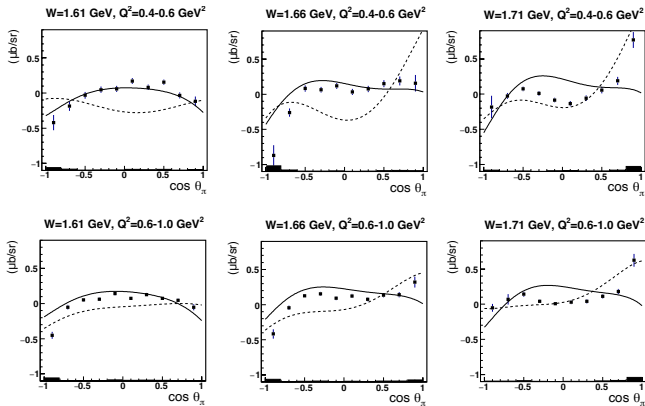


Рис. 7: Структурная функция σ_{LT}' для электророждения $\pi^0 p$ на протоне в третьей резонансной области. Линиями показаны оценки в модели реакции MAID с использованием амплитуд электровозбуждения $\gamma_v PN^*$ из MAID (сплошная линия) и из анализа мезонного электророждения CLAS (пунктирная линия)

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 π^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

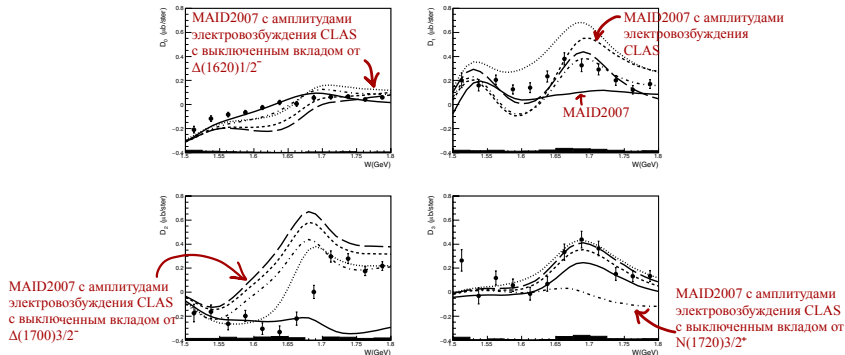


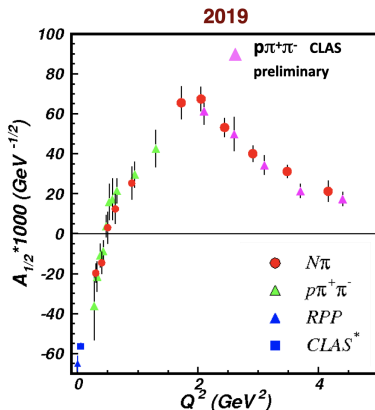
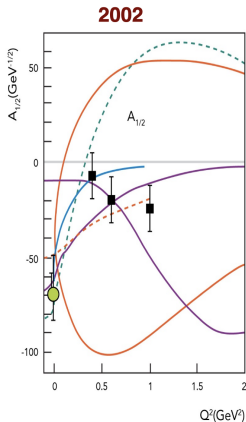
Рис. 8: Моменты Лежандра $D_l(Q^2, W)$ ($l=0,1,2,3$) структурной функции $\sigma_{LT'}$ из данных электро рождения $\pi^0 p$ при $Q^2=0.4-0.6$ ГэВ²: $D_0(Q^2, W)$ (вверху слева), $D_1(Q^2, W)$ (вверху справа), $D_2(Q^2, W)$ (внизу слева), $D_3(Q^2, W)$ (внизу справа).

Основные результаты работы

- Получена спиновая асимметрия пучка при значении кинематических переменных, соответствующей второй и третьей резонансным областям, при $0.4 < Q^2 < 1.0$ ГэВ², 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 $0.4 < Q^2 < 1.0$ ГэВ² и $1.5 < W < 1.8$ ГэВ.

Спасибо за внимание!

Амплитуды электровозбуждения Роперовского резонанса

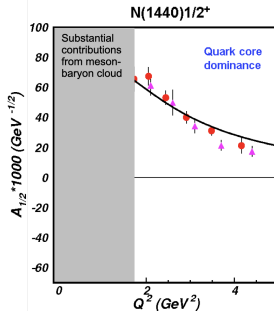
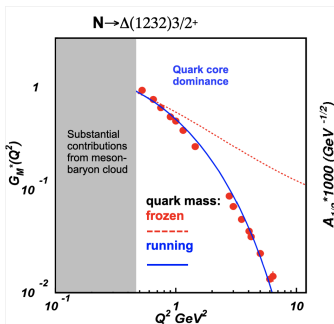


V. D. Burkert, Baryons 2016 and the recent update from the CLAS $p+p$ electroproduction off protons data

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).



Детектор CLAS

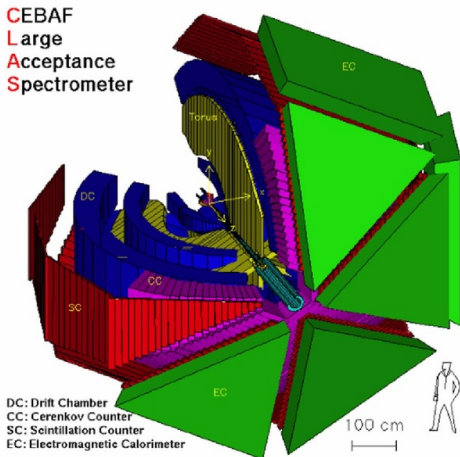


Рис. 1: Детектор CLAS.

Ограничения на вершину электрона

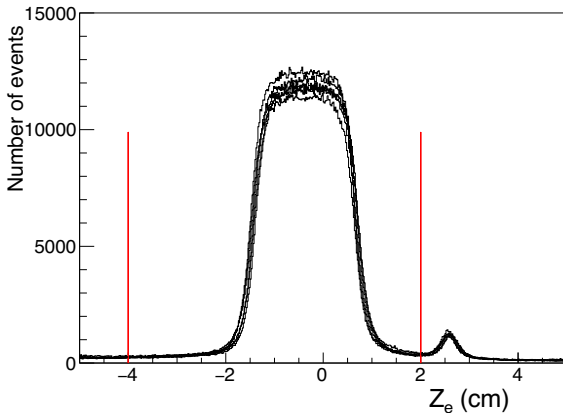
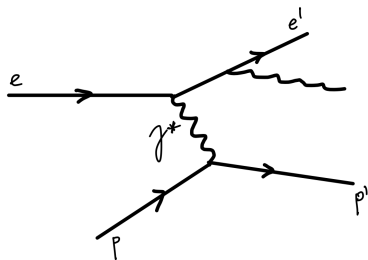
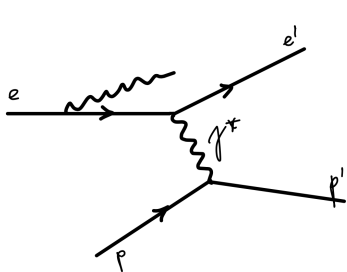


Рис. 2: Z координата вершины для электронов в разных секторах (разные кривые).

Пре- и пострadiaционные 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

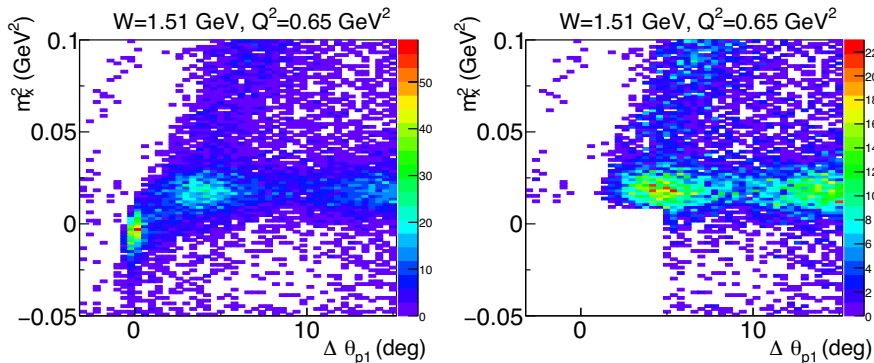


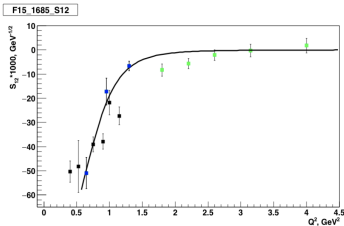
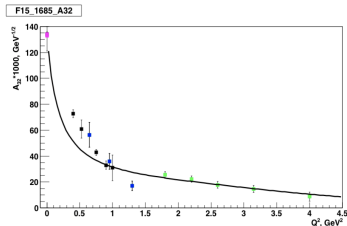
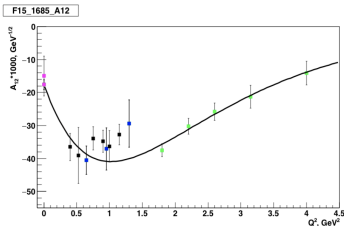
Рис. 3: Отделение событий Бете-Гайтлера. Ось цветов (z) представляет количество событий.

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 $r\pi\pi$ 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:

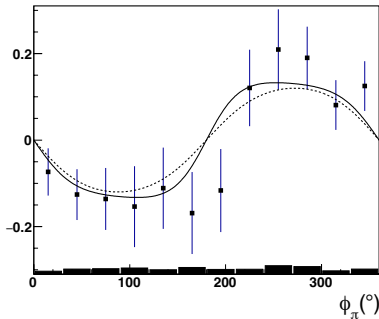
- L. Tiator et al., Eur. Phys. J. ST 198, 141 (2011)

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, $Q^2= 0.5$ GeV², $\cos \theta_\pi = -0.9$



BSA $W= 1.71$ GeV, $Q^2= 0.5$ GeV², $\cos \theta_\pi = 0.9$

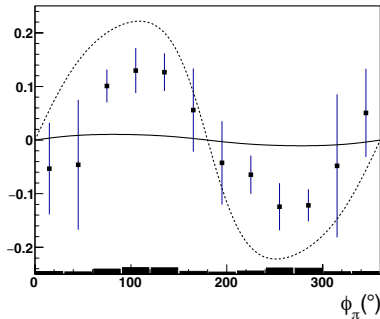


Рис. 4: Спиновая асимметрия пучка как функция азимутального угла пиона в системе центра масс ϕ_π для реакции $ep \rightarrow e'\pi^0 p$.

Анализ чувствительности момента Лежандра D_0 к резонансным вкладам

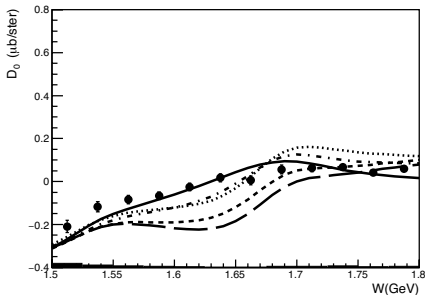


Рис. 5: Момент Лежандра $D_0(Q^2, W)$ структурной функции $\sigma_{LT'}$ из данных электророждения $\pi^0 p$ при $Q^2=0,4-0,6$ ГэВ².

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

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

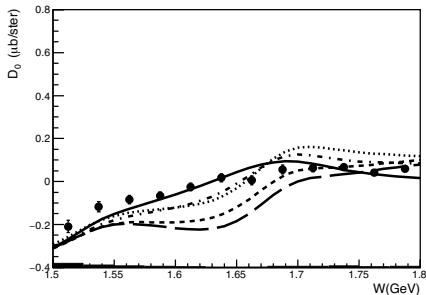


Рис. 6: Момент Лежандра $D_0(Q^2, W)$ структурной функции $\sigma_{LT'}$ из данных электророждения $\pi^0 p$ при $Q^2=0,4-0,6$ ГэВ².

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

Анализ чувствительности момента Лежандра D_1 к резонансным вкладам

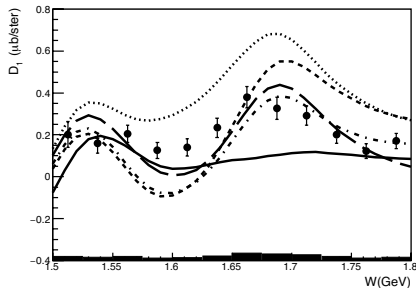


Рис. 7: Момент Лежандра $D_1(Q^2, W)$ структурной функции $\sigma_{LT'}$ из данных электророждения $\pi^0 p$ при $Q^2=0,4-0,6$ ГэВ².

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

Анализ чувствительности момента Лежандра D_2 к резонансным вкладам

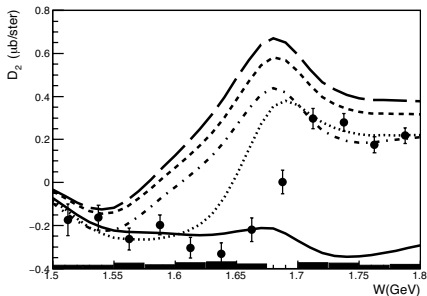


Рис. 8: Момент Лежандра $D_2(Q^2, W)$ структурной функции $\sigma_{LT'}$ из данных электророждения $\pi^0 p$ при $Q^2=0,4-0,6$ ГэВ².

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

Анализ чувствительности момента Лежандра D_3 к резонансным вкладам

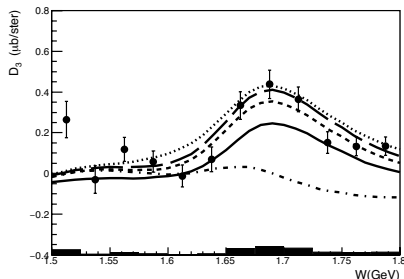


Рис. 9: Момент Лежандра $D_3(Q^2, W)$ структурной функции $\sigma_{LT'}$ из данных электроорождения $\pi^0 p$ при $Q^2=0,4-0,6$ ГэВ².

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

Анализ чувствительности моментов Лежандра к резонансным вкладам

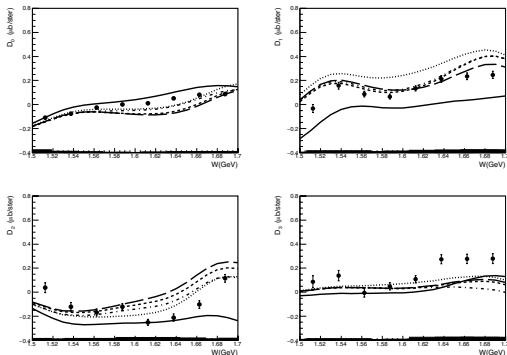


Рис. 10: Моменты Лежандра $D_l(Q^2, W)$ ($l=0,1,2,3$) структурной функции $\sigma_{LT'}$ из данных электророждения $\pi^0 p$ при $Q^2=0.6-1.0$ ГэВ²: $D_0(Q^2, W)$ (вверху слева), $D_1(Q^2, W)$ (вверху справа), $D_2(Q^2, W)$ (внизу слева), $D_3(Q^2, W)$ (внизу справа).