



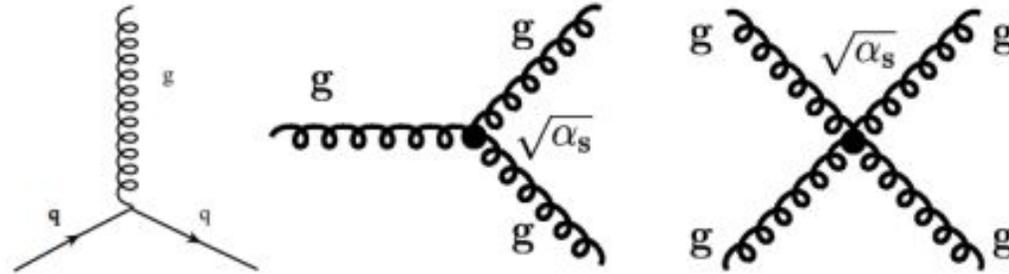
Физический факультет  
Московского  
государственного университета  
имени М.В.Ломоносова

# Вклады нуклонных резонансов в инклюзивное рассеяние электронов из данных CLAS

Фадееенко Б. А.  
к.ф.-м.н. Исупов Е.Л.  
к.ф.-м.н. Русова А.А.



# Сильное взаимодействие

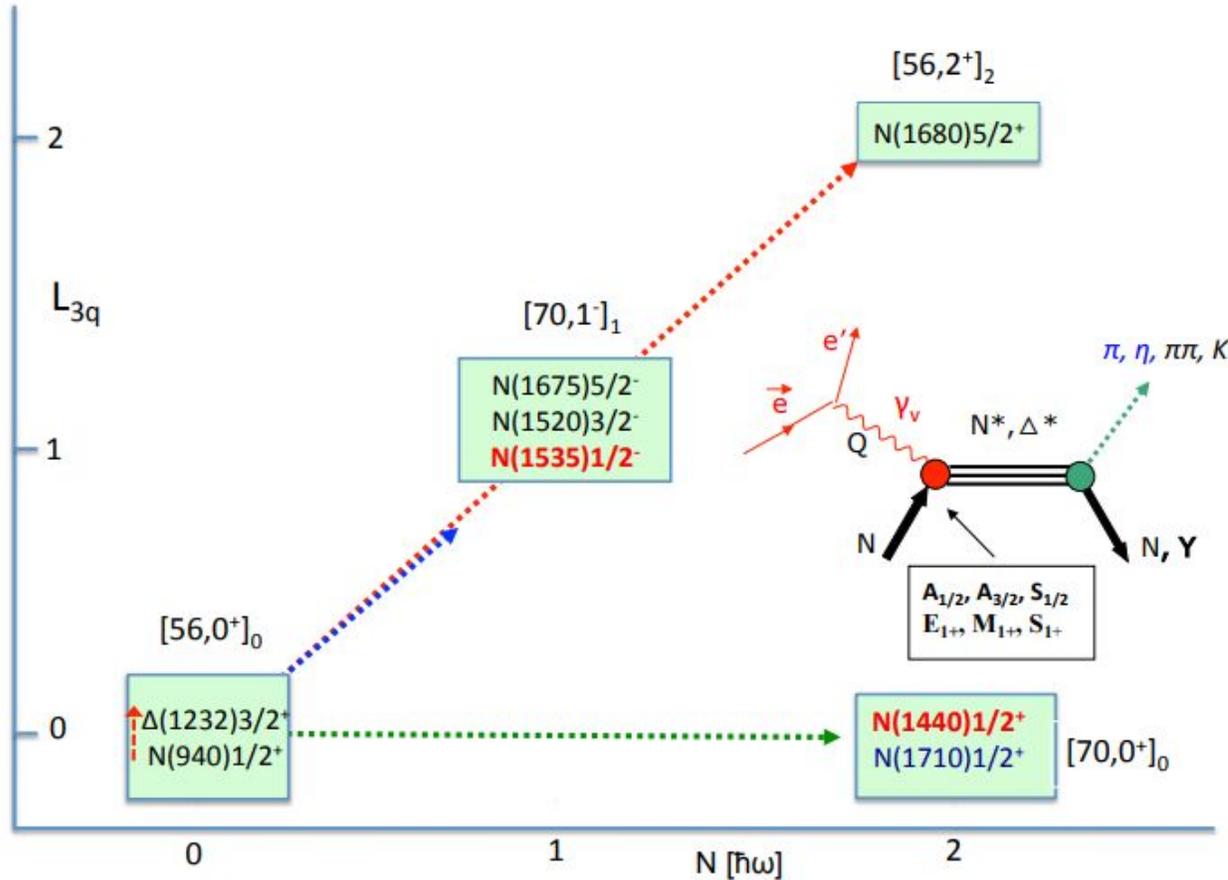


$$\alpha_s(Q^2) = \frac{4\pi}{(11 - 2n_F/3)\ln(Q^2/\Lambda^2)}$$

$\Lambda \sim 200$  МэВ/с - фундаментальная постоянная КХД



# Резонансные области

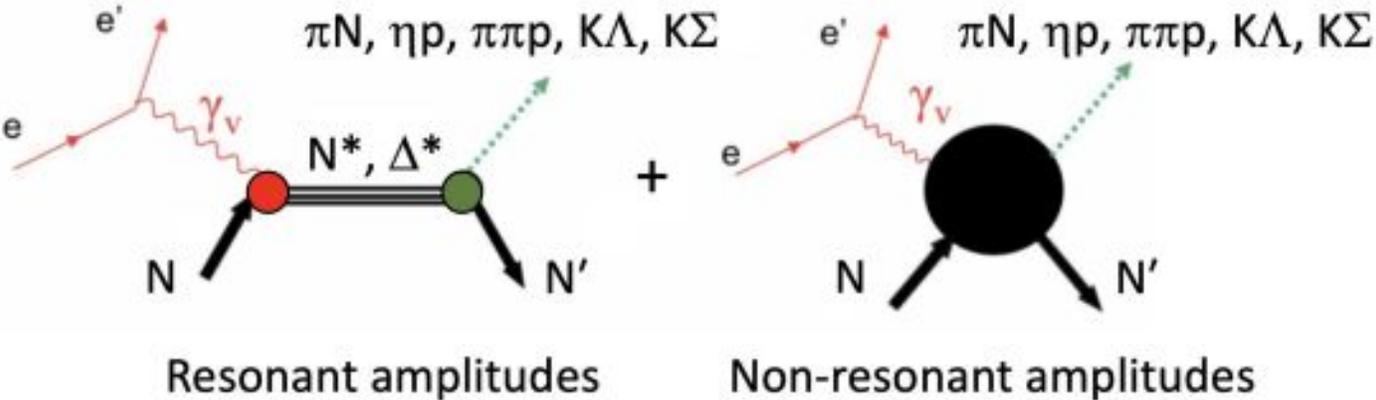


- Для  $Q^2 < 8 \text{ ГэВ}^2$  нуклонные резонансы можно разделить на три области:
  1.  $\Delta(1232)3/2^+$
  2.  $N(1440)1/2^+$ ,  $N(1520)3/2^-$  и  $N(1535)1/2^-$
  3. остальные при  $W \geq 1600 \text{ МэВ}$
- Исследование резонансной области используется в изучении кварк-адронной дуальности, а также в объяснении образования массы адронов

Ref: Volker D. Burkert. Nucleon Resonance Physics. Few-Body Systems, Volume 57



# Электронное рассеяние на протоне

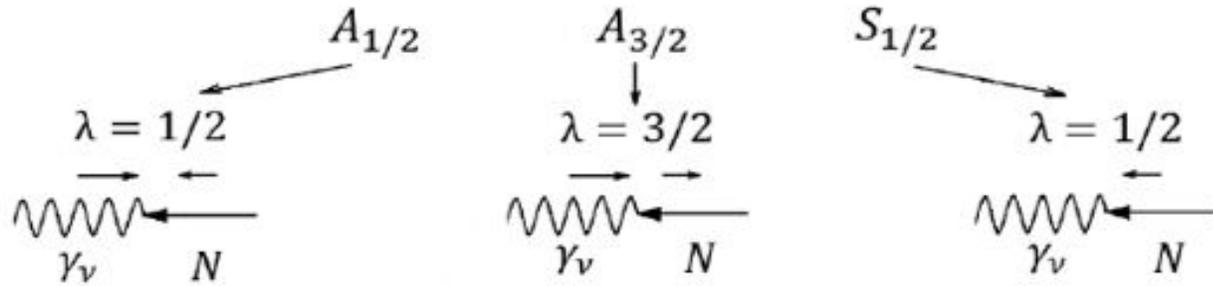


В данном анализе используется параметры резонансов, полученные преимущественно из каналов πN и π-π+p

D.S. Carman et al., Particles 6, 416 (2023)



# Амплитуды электровозбуждения $N^*$



$Q^2$  - виртуальность фотона

$W$  - инвариантная масса системы фотон-протон

$q_\gamma$  - импульс виртуального фотона

$M_r$  - масса резонанса

$J_r$  - спин нуклонного резонанса

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

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

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



# Резонансные спиральные вклады

$$G_m^R(Q^2) = \frac{1}{2M} \left\langle R(\lambda_R) \left| \epsilon_{(m)}^\mu \cdot J_\mu(0) \right| N(\lambda = 1/2) \right\rangle$$

$$G_+^R = C \frac{\sqrt{M_R \Gamma_R(W)}}{M_R^2 - W^2 - i\Gamma_R(W)M_R} A_{1/2}^R(Q^2),$$

$$G_-^R = C \frac{\sqrt{M_R \Gamma_R(W)}}{M_R^2 - W^2 - i\Gamma_R(W)M_R} P A_{3/2}^R(Q^2),$$

$$G_0^R = C \frac{\sqrt{M_R \Gamma_R(W)}}{M_R^2 - W^2 - i\Gamma_R(W)M_R} P S_{1/2}^R(Q^2),$$

$\eta$  - четность

$\alpha$  - константа  
электромагнитного  
взаимодействия

$$C = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{W^2 - M^2}{\alpha M}} \frac{q_{\gamma,R}}{q_\gamma}, \quad P = \eta (-1)^{J-1/2}$$



# Структурные функции

$$\left(1 + \frac{Q^2}{\nu^2}\right) g_1^{\text{res}} = M^2 \sum_{IJ\eta} \left\{ \left| \sum_{R^{IJ\eta}} G_+^{R^{IJ\eta}} \right|^2 - \left| \sum_{R^{IJ\eta}} G_-^{R^{IJ\eta}} \right|^2 + \frac{\sqrt{2}Q^2}{\nu} \Re \left[ \left( \sum_{R^{IJ\eta}} G_0^{R^{IJ\eta}} \right) \left( \sum_{R^{IJ\eta}} (-1)^{J_{R^{IJ\eta}} - \frac{1}{2}} \eta_{R^{IJ\eta}} G_+^{R^{IJ\eta}} \right)^* \right] \right\},$$

$$\left(1 + \frac{Q^2}{\nu^2}\right) g_2^{\text{res}} = -M^2 \sum_{IJ\eta} \left\{ \left| \sum_{R^{IJ\eta}} G_+^{R^{IJ\eta}} \right|^2 - \left| \sum_{R^{IJ\eta}} G_-^{R^{IJ\eta}} \right|^2 - \frac{\nu\sqrt{2}}{\sqrt{Q^2}} \Re \left[ \left( \sum_{R^{IJ\eta}} G_0^{R^{IJ\eta}} \right) \left( \sum_{R^{IJ\eta}} (-1)^{J_{R^{IJ\eta}} - \frac{1}{2}} \eta_{R^{IJ\eta}} G_+^{R^{IJ\eta}} \right)^* \right] \right\},$$

$$F_1^{\text{res}} = M \sum_{IJ\eta} \left\{ \left| \sum_{R^{IJ\eta}} G_+^{R^{IJ\eta}} \right|^2 + \left| \sum_{R^{IJ\eta}} G_-^{R^{IJ\eta}} \right|^2 \right\},$$

$$\left(1 + \frac{\nu^2}{Q^2}\right) F_2^{\text{res}} = M\nu \sum_{IJ\eta} \left\{ \left| \sum_{R^{IJ\eta}} G_+^{R^{IJ\eta}} \right|^2 + \left| \sum_{R^{IJ\eta}} G_-^{R^{IJ\eta}} \right|^2 + 2 \left| \sum_{R^{IJ\eta}} G_0^{R^{IJ\eta}} \right|^2 \right\},$$

$\nu$  - переданная протону энергия в лабораторной системе



# Исходные данные

$Q^2$ , Gev <sup>2</sup>	$A_{1/2} * 1000$ , GeV <sup>-1/2</sup>	$S_{1/2} * 1000$ , GeV <sup>-1/2</sup>
0.	-65±15.	
0.	-56.4±1.7	
0.275	-36.3±17.0	37.8±6.3
0.300	-19.8±4.8	34.7±3.8
0.325	-21.5±7.7	35.8±4.7
0.375	-10.9±5.9	32.7±5.3
0.400	-14.6±5.6	32.5±3.4
0.425	-8.8±5.4	33.8±3.8
0.475	3.7±5.9	37.4±5.9
0.500	3.0±8.0	33.8±4.0
0.525	15.8±9.1	26.8±3.5
0.575	17.2±10.4	22.2±6.8
0.625	12.4±7.5	31.4±4.6
0.650	21.4±6.2	25.7±5.9
0.900	25.3±8.3	33.4±5.5
0.950	29.9±6.5	25.6±6.2

[https://userweb.jlab.org/~mokeev/resonance\\_electrocouplings23/](https://userweb.jlab.org/~mokeev/resonance_electrocouplings23/)

## CLAS Physics Database

[JLab](#) | [Search](#) | [Overview](#) | [Login](#) | [Edit](#) | [Register](#)

Search form for the data related to the CLAS physics

You are not logged in. [Login](#).

Select reaction:

Beam: any <input type="text"/>	Target: any <input type="text"/>	Final state: any <input type="text"/>
polarization: any <input type="text"/>	polarization: any <input type="text"/>	polarization: any <input type="text"/>

Select kinematics range:

Search for average values

$Q^2_{min}$ [GeV] <sup>2</sup> : <input type="text"/>	$Q^2_{max}$ [GeV] <sup>2</sup> : <input type="text"/>
$W_{min}$ [GeV]: <input type="text"/>	$W_{max}$ [GeV]: <input type="text"/>
$x_{min}$ : <input type="text"/>	$x_{max}$ : <input type="text"/>
$EY_{min}$ [GeV]: <input type="text"/>	$EY_{max}$ [GeV]: <input type="text"/>

Select observables:

Quantity measured:

- dσ/dΩ (exclusive)
- dσ/dΩ (quasi-free)
- σ (exclusive)
- sigma
- sigma (quasi-free)
- σ
- ...

<https://clas.sinp.msu.ru/cgi-bin/jlab/db.cgi>

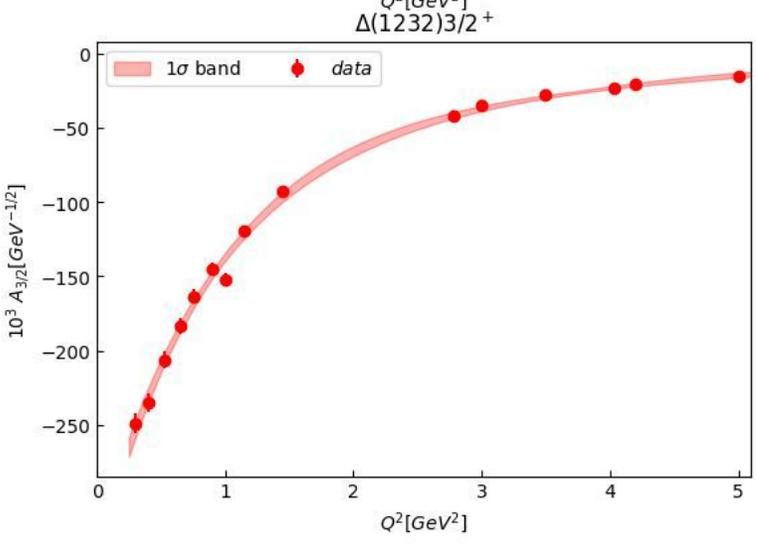
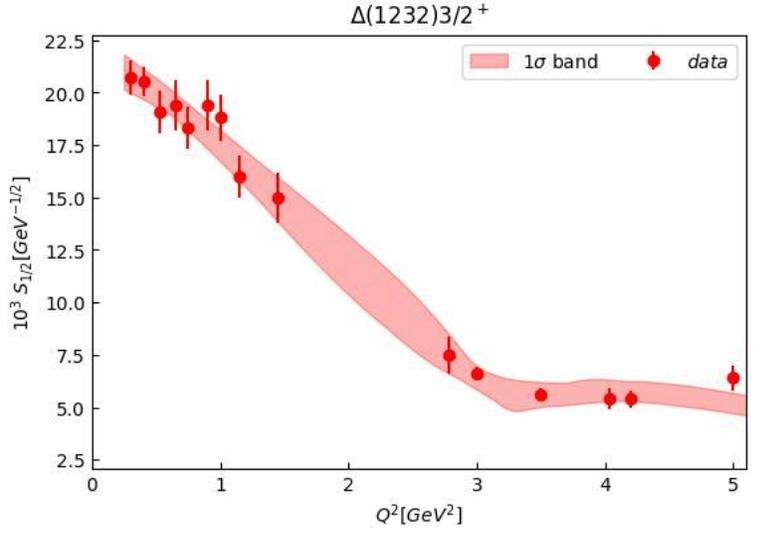
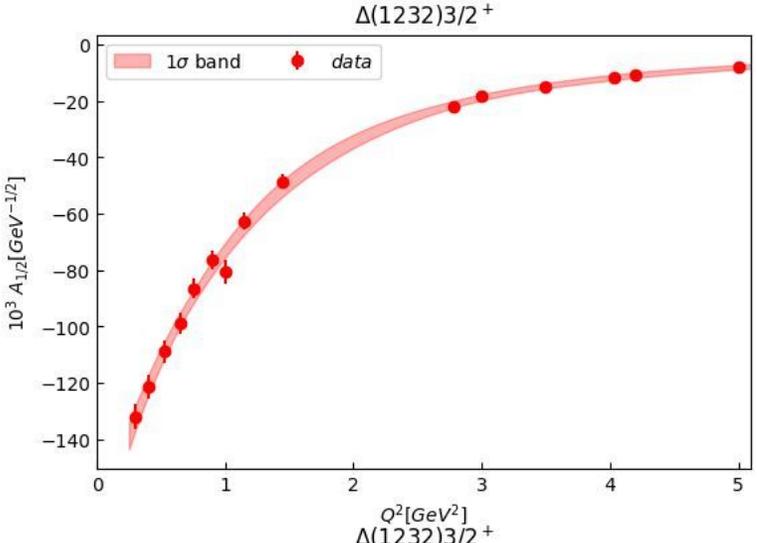


# Метод

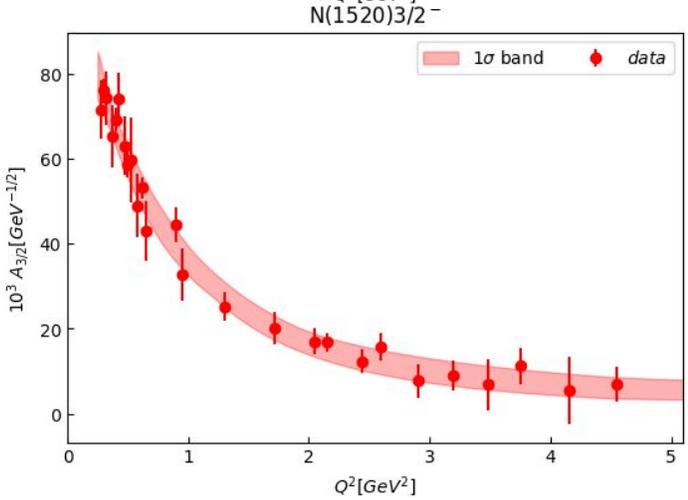
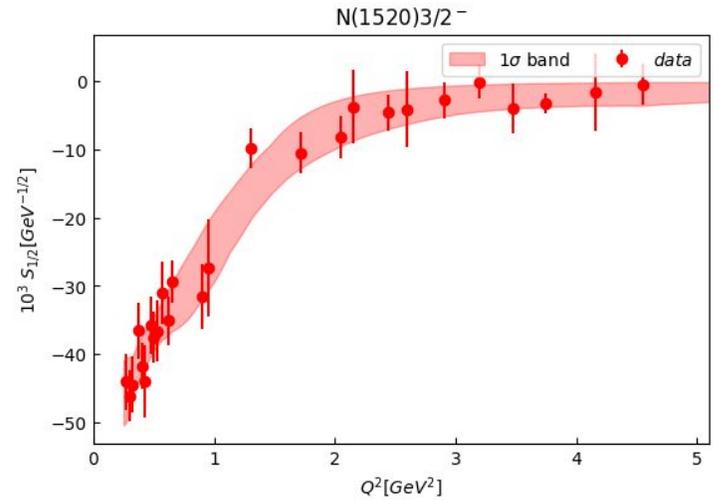
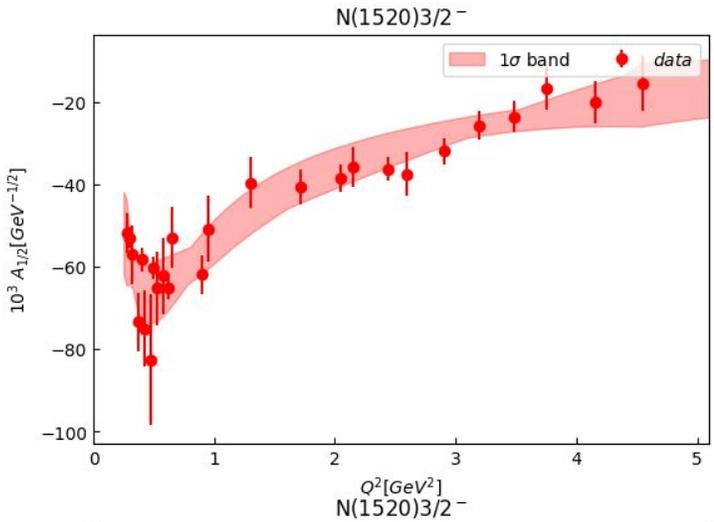
1. Для интерполяции амплитуд электровозбуждения  $N^*$  используется метод бутстрэпа: генерируется выборка из 10000 наборов рандомизированных в рамках погрешности значений, после чего рассчитываются статистические параметры по выборке, а именно среднее значение и стандартное отклонение.
2. Для расчета структурных функций применяется та же процедура к интерполированным амплитудам электровозбуждения  $N^*$ .

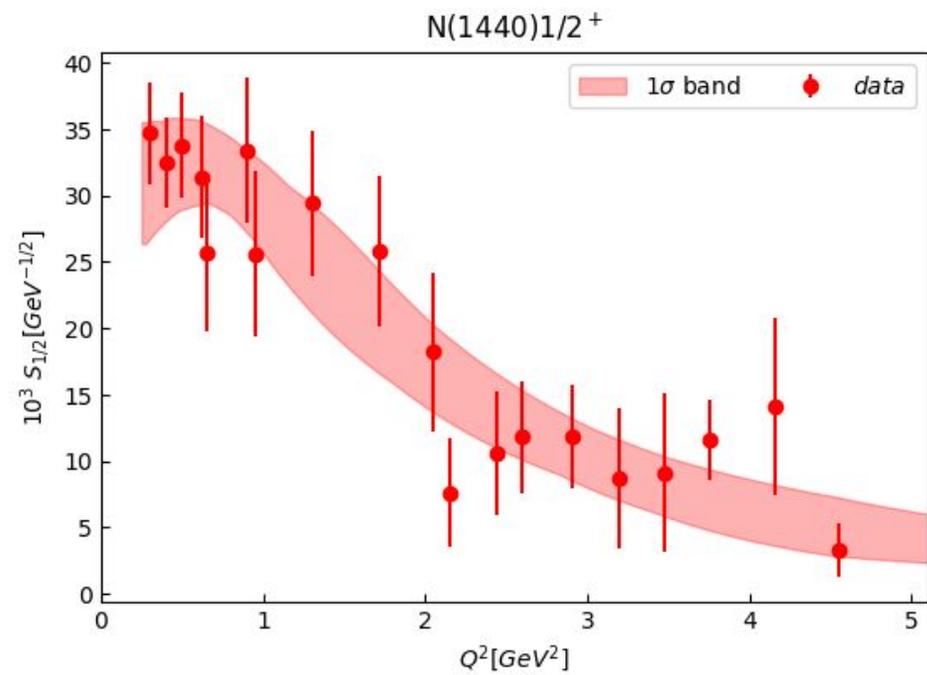
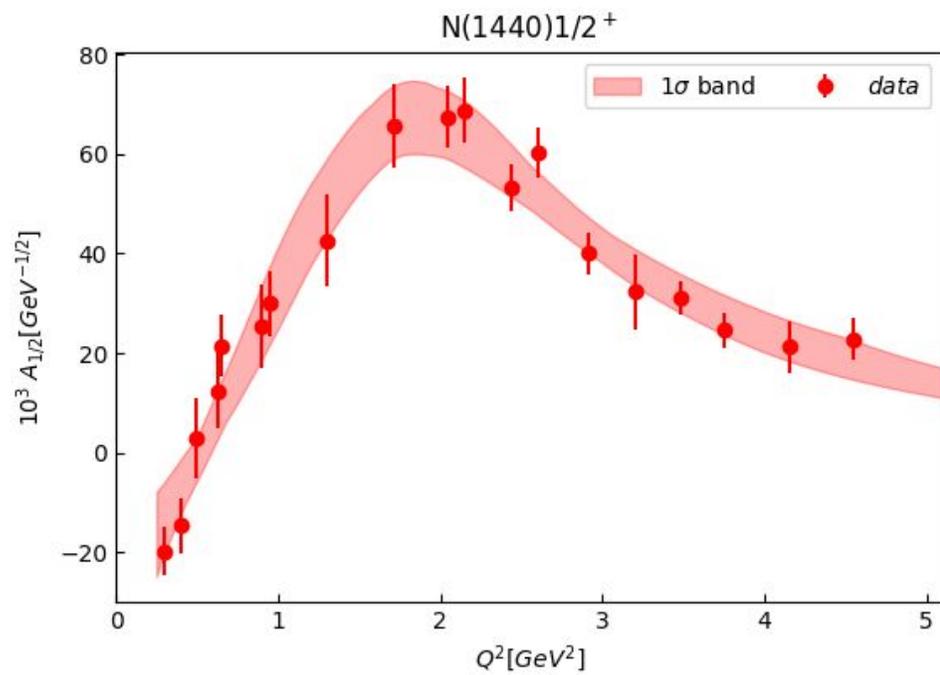


# Амплитуды электровозбуждения $N^*$ первого региона

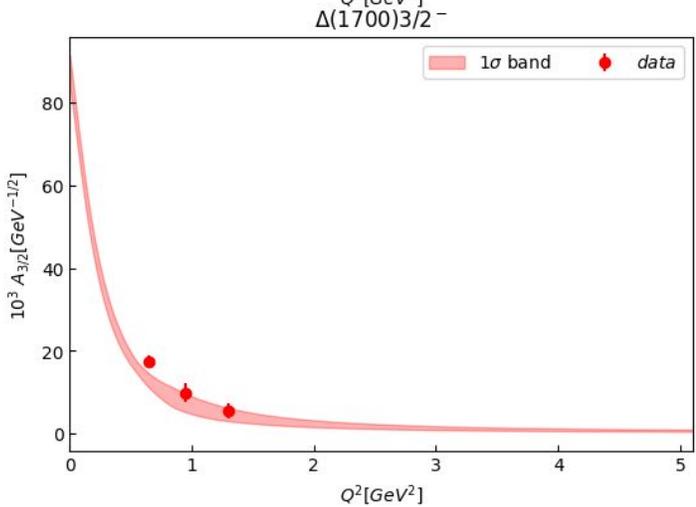
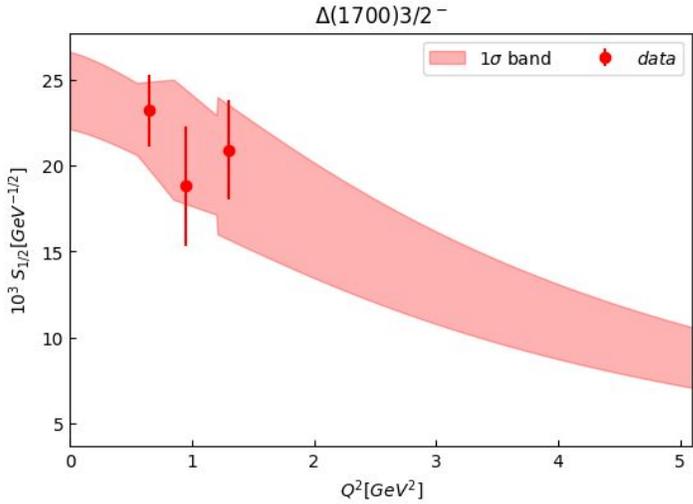
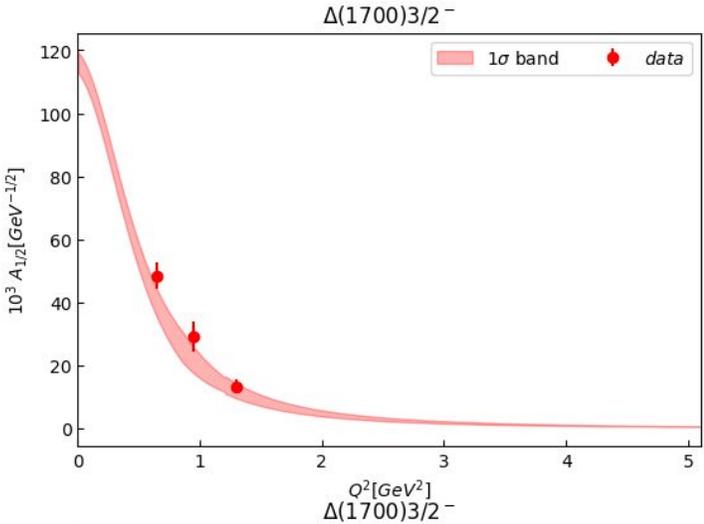


# Амплитуды электровозбуждения $N^*$ второго региона

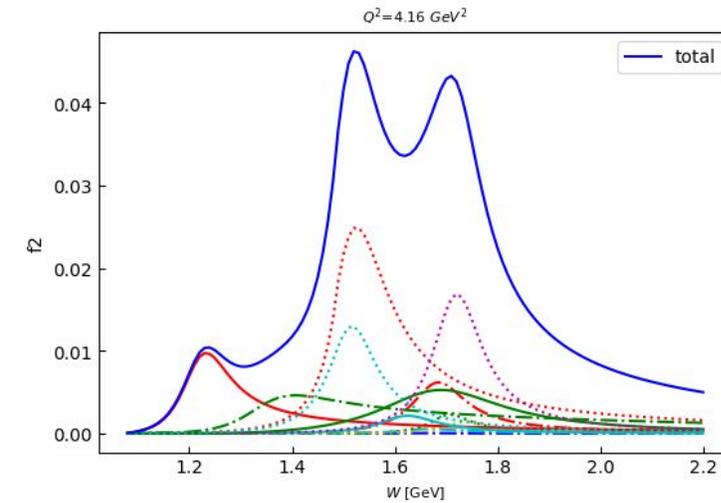
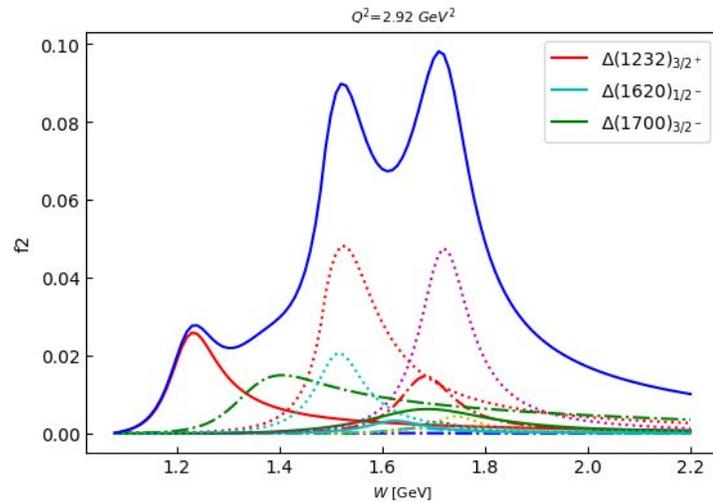
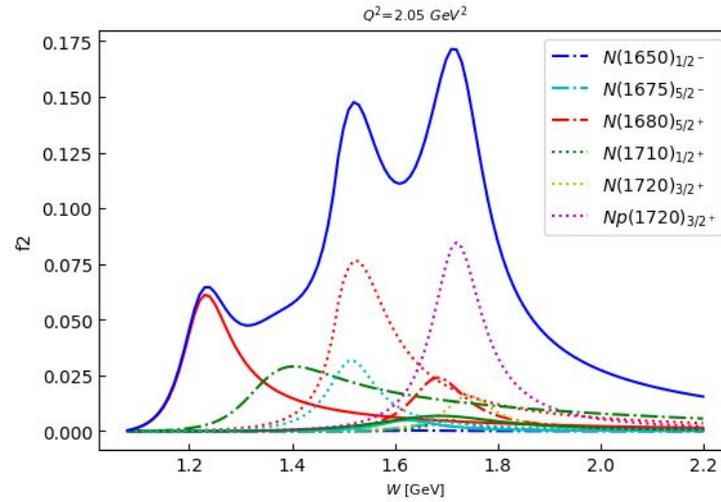
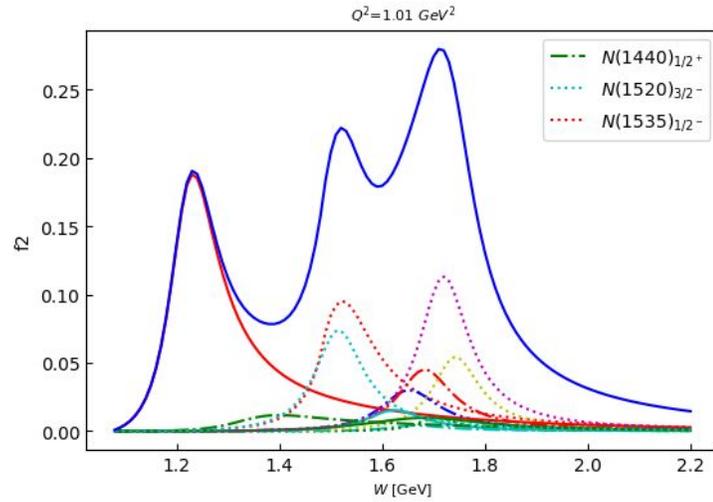




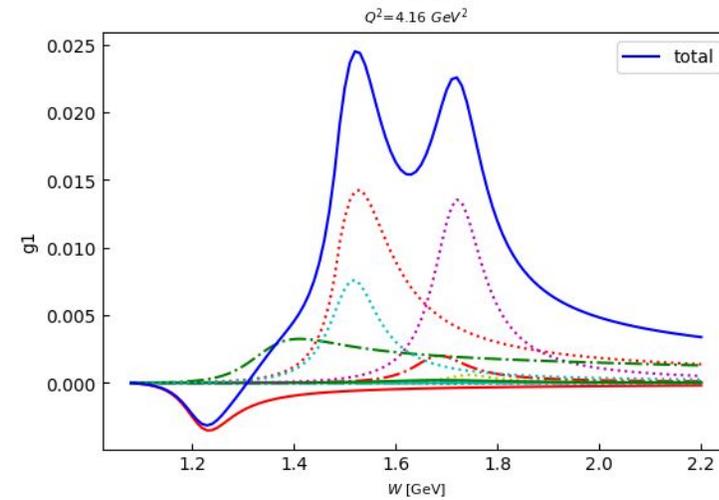
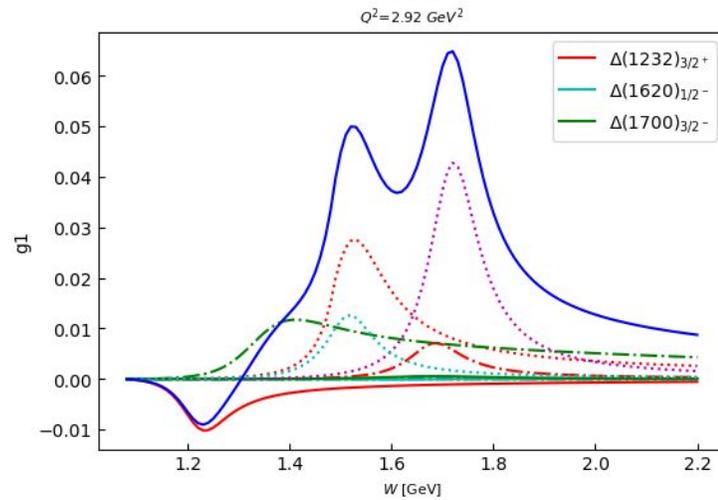
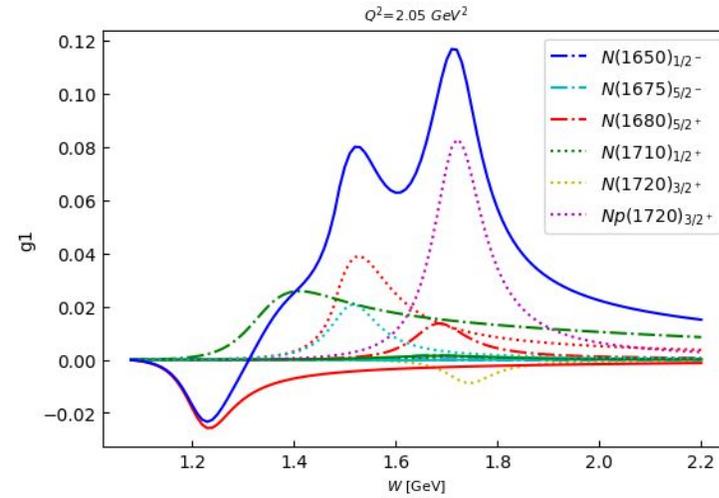
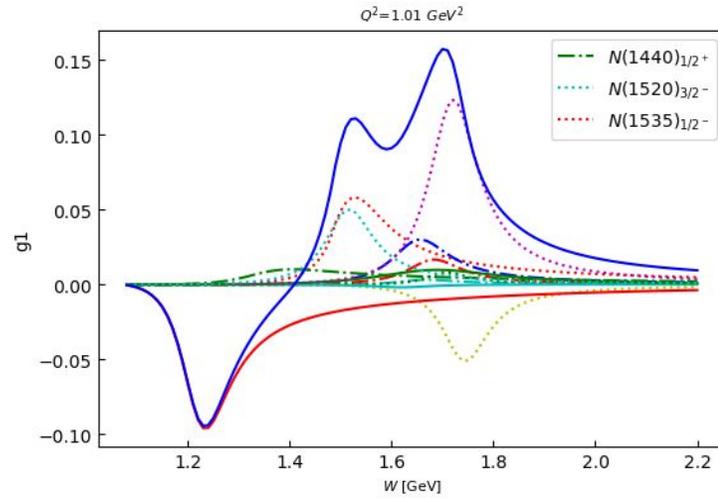
# Амплитуды электровозбуждения $N^*$ третьего региона

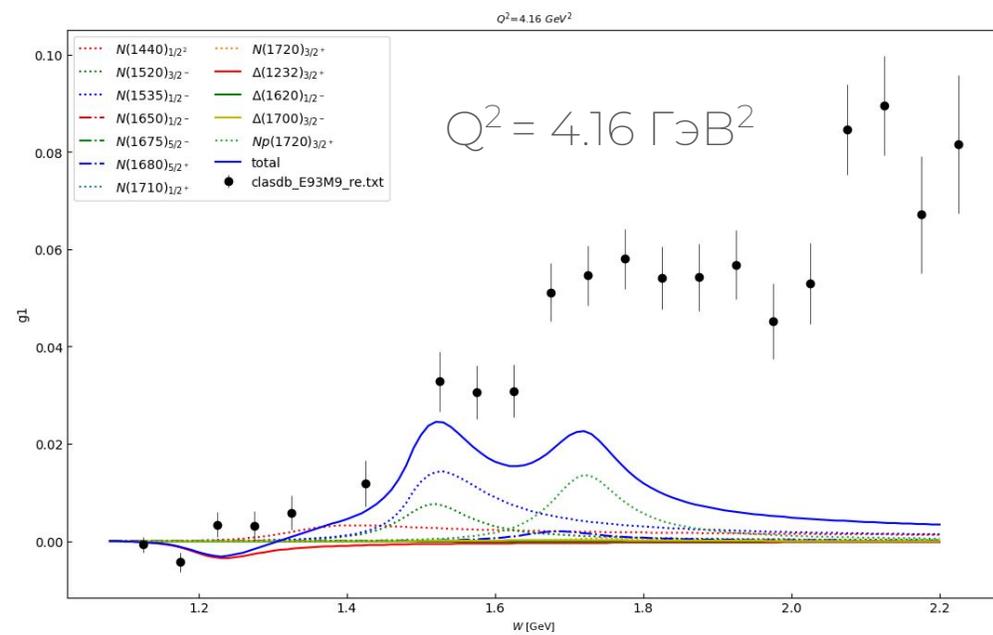
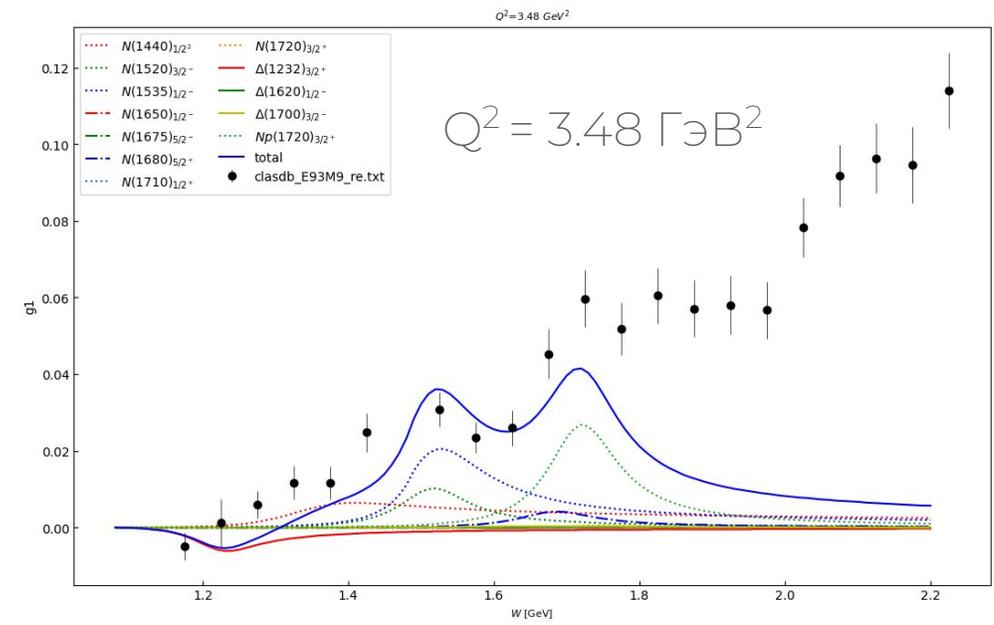
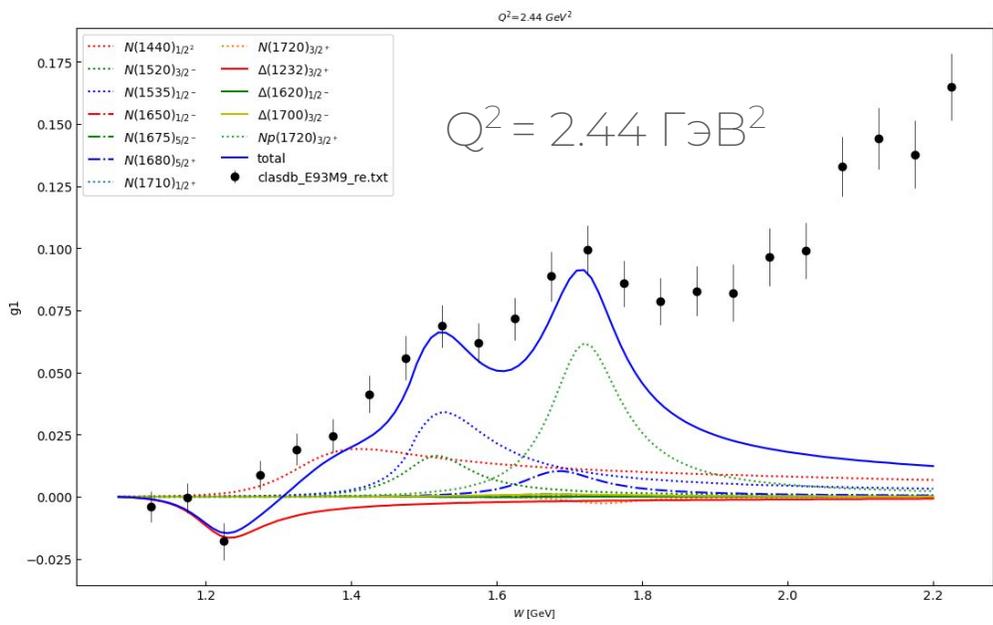


# Неполяризованная структурная функция $F_2$



# Поляризованная структурная функция $g_1$

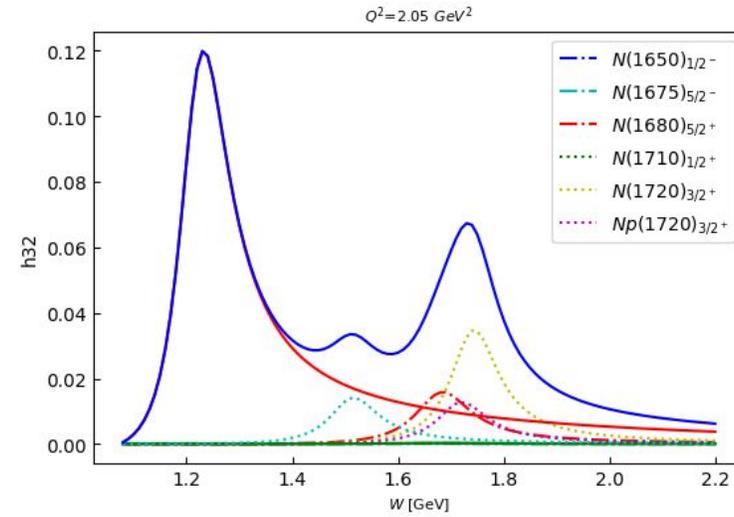
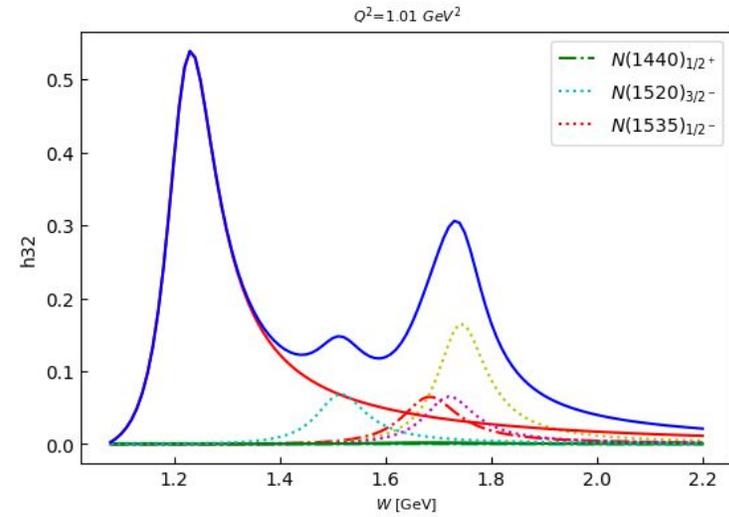




Ref: K.V. Dharmawardane, Measurement of the x- and  $Q^2$ -dependence of the asymmetry  $A_1$  on the nucleon, Physics Letters B Volume 641, Issue 1

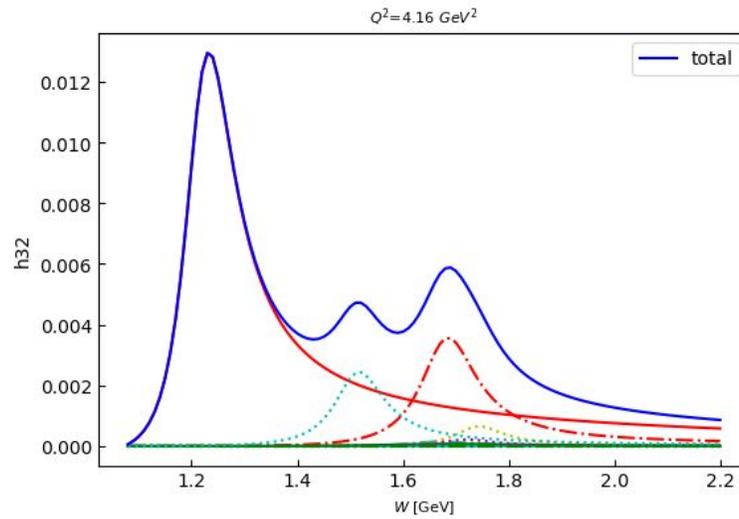
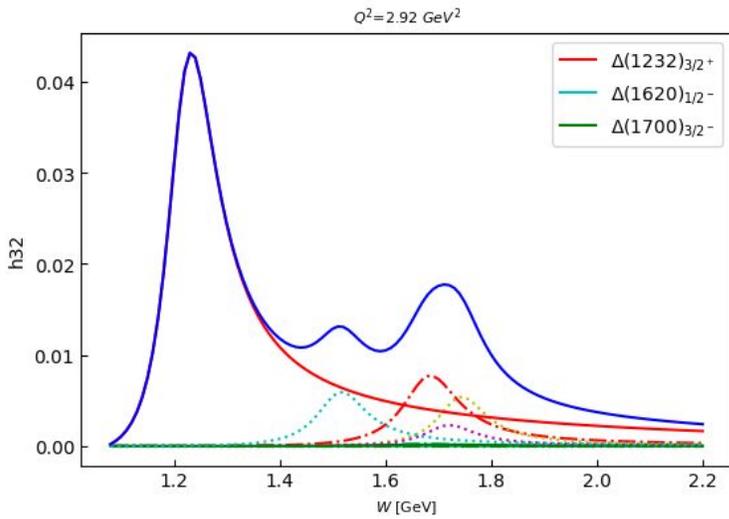


# Спиральная структурная функция $H_{3/2}$



$$H_{1/2} = F_1 + g_1 - (\rho^2 - 1) g_2,$$

$$H_{3/2} = F_1 - g_1 + (\rho^2 - 1) g_2.$$



$$\rho^2 = 1 + Q^2/\nu^2$$



# Заключение

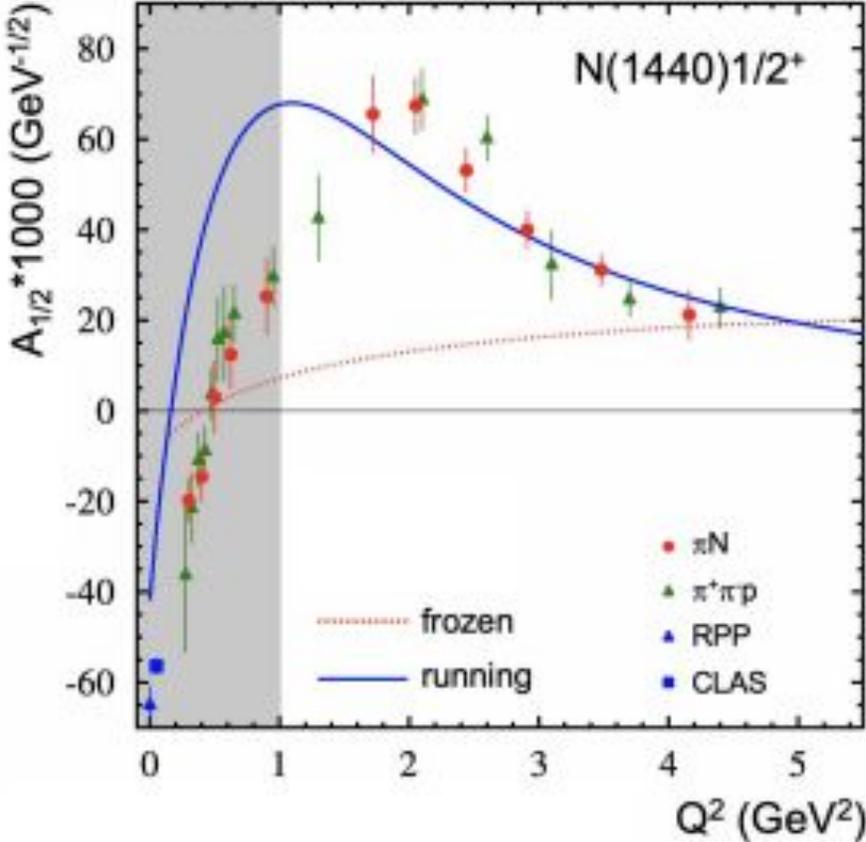
1. Были рассчитаны амплитуды электровозбуждения  $N^*$  и структурные функции методом бутстрепа.
2. Было показано, что резонансный вклад определяет форму структурных функций и объясняет наличие резонансных областей.
3. Изменение знака в поляризационных структурных функциях объясняется влиянием резонанса  $\Delta(1232)_{3/2^+}$ .
4. Было показано влияние резонансов на структурные функции при  $W \neq W_R$  на примере влияние резонанса  $\Delta(1232)_{3/2^+}$  на спиральную структурную функцию  $N_{3/2}$ .



Спасибо за внимание!



# Масса кварков и амплитуды электровозбуждения



D.S. Carman et al., Particles 6, 416 (2023)



# Измерение структурных функций

$$F_1(W, Q^2) = \frac{KM}{4\pi^2\alpha} \sigma_T(W, Q^2),$$
$$F_2(W, Q^2) = \frac{KM}{4\pi^2\alpha} \frac{2x}{\rho^2} (\sigma_T(W, Q^2) + \sigma_L(W, Q^2))$$

$$K = \frac{W^2 - M^2}{2M},$$

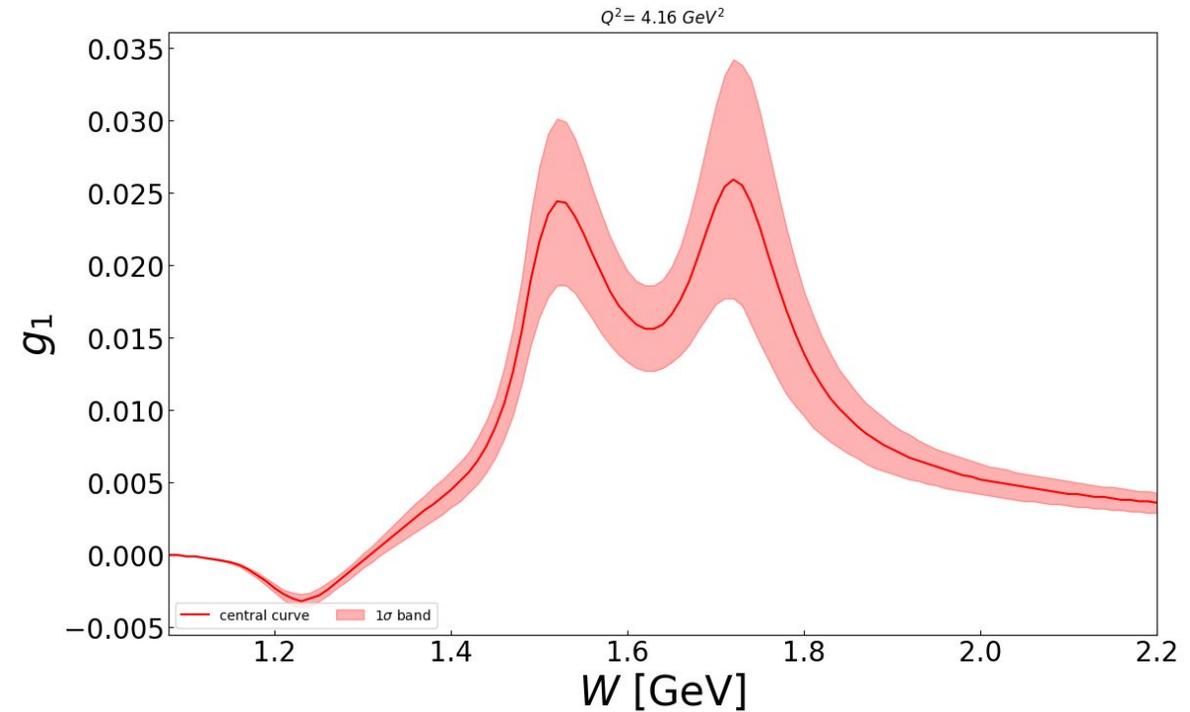
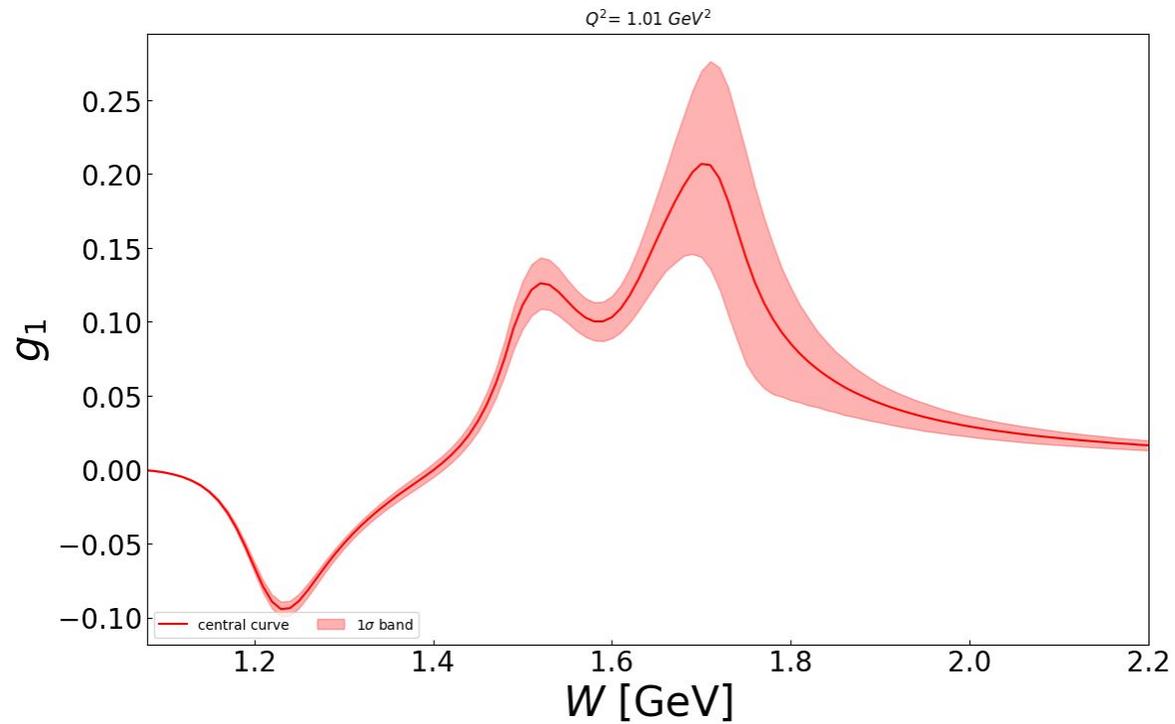
$$A_1 = \frac{\sigma_T^{1/2} - \sigma_T^{3/2}}{2\sigma_T}, \quad A_2 = \frac{\sigma_L}{\sigma_T},$$

$$g_1 = \frac{1}{\rho^2} F_1\left(A_1 + A_2 \sqrt{\rho^2 - 1}\right),$$
$$g_2 = \frac{1}{\rho^2} F_1\left(-A_1 + \frac{A_2}{\sqrt{\rho^2 - 1}}\right),$$

$$\rho^2 = 1 + \frac{4M^2 x^2}{Q^2}.$$



# Погрешность расчета структурной функции



# Спиральная структурная функция $N_{1/2}$

