



Физический факультет
Московского
государственного университета
имени М.В.Ломоносова

Резонансные вклады в структурные функции инклюзивного рассеяния электронов и их моменты

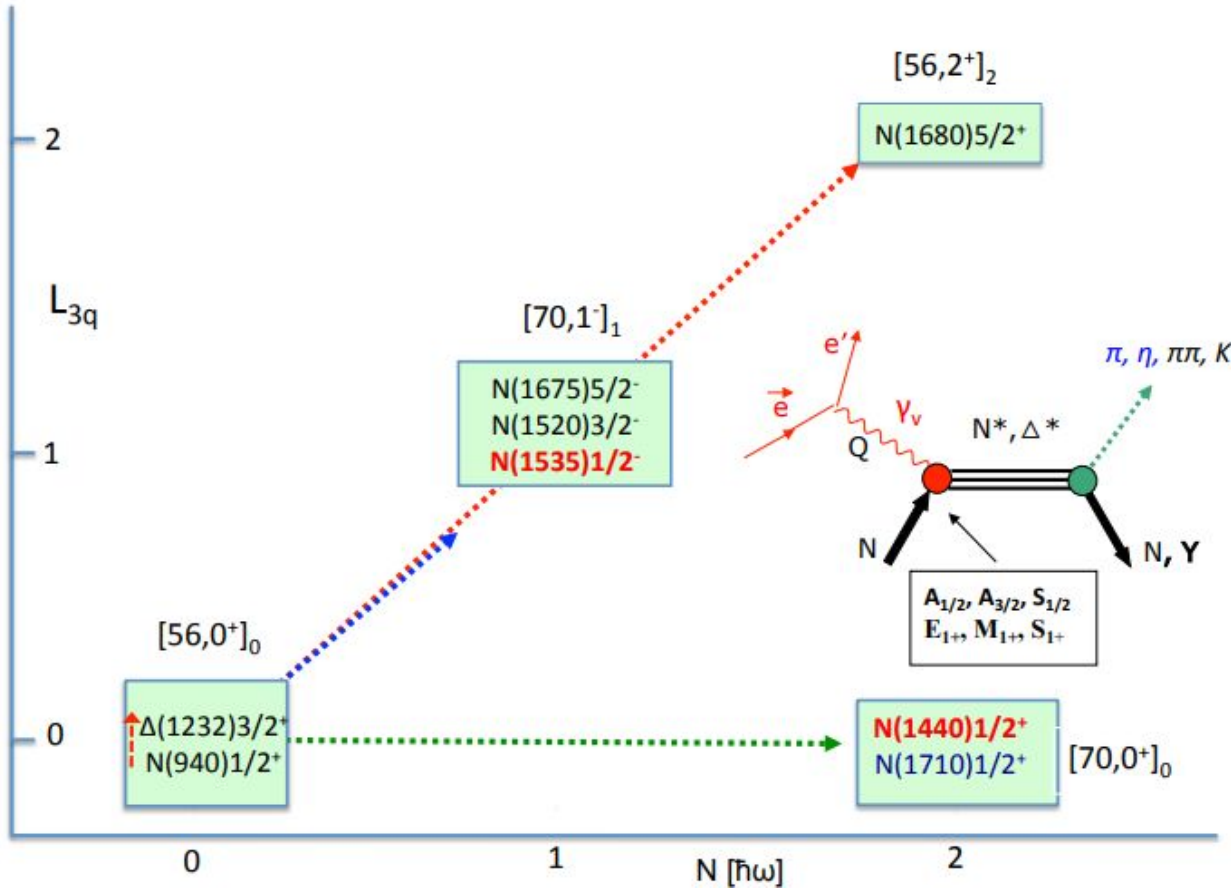
аспирант Фадеенко Б. А.

с.н.с. НИИЯФ им. Д.В.Скобельцына. Исупов Е.Л.

ассистент кафедры общей ядерной физики Русова А.А.



Резонансные области

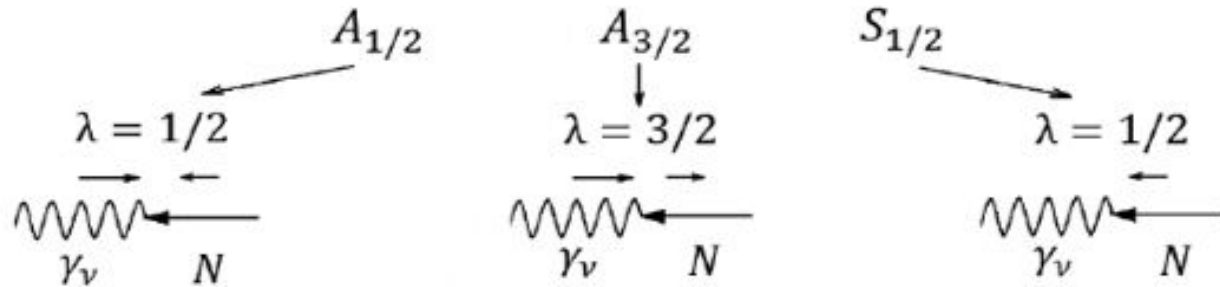


- Нуклонные резонансы можно разделить на три области:
 1. $\Delta(1232)3/2+$
 2. $N(1440)1/2+$, $N(1520)3/2-$ и $N(1535)1/2-$
 3. остальные при инвариантных массах ≥ 1600 МэВ
- Исследование резонансной области используется в изучении кварк-адронной дуальности, а также в объяснении образования массы адронов

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



Амплитуды электровозбуждения N^*



Q^2 - виртуальность фотона

W - инвариантная масса системы фотон-протон

q_γ - импульс виртуального фотона

M_r - масса резонанса

J_r - спин нуклонного резонанса

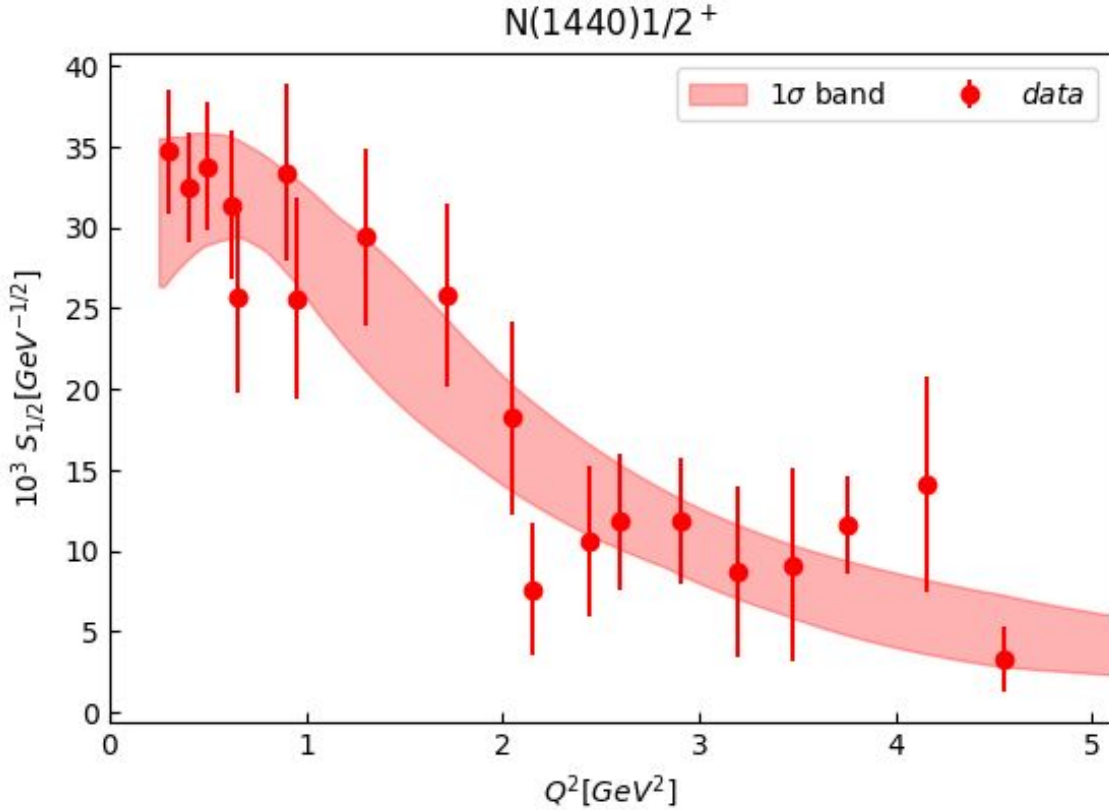
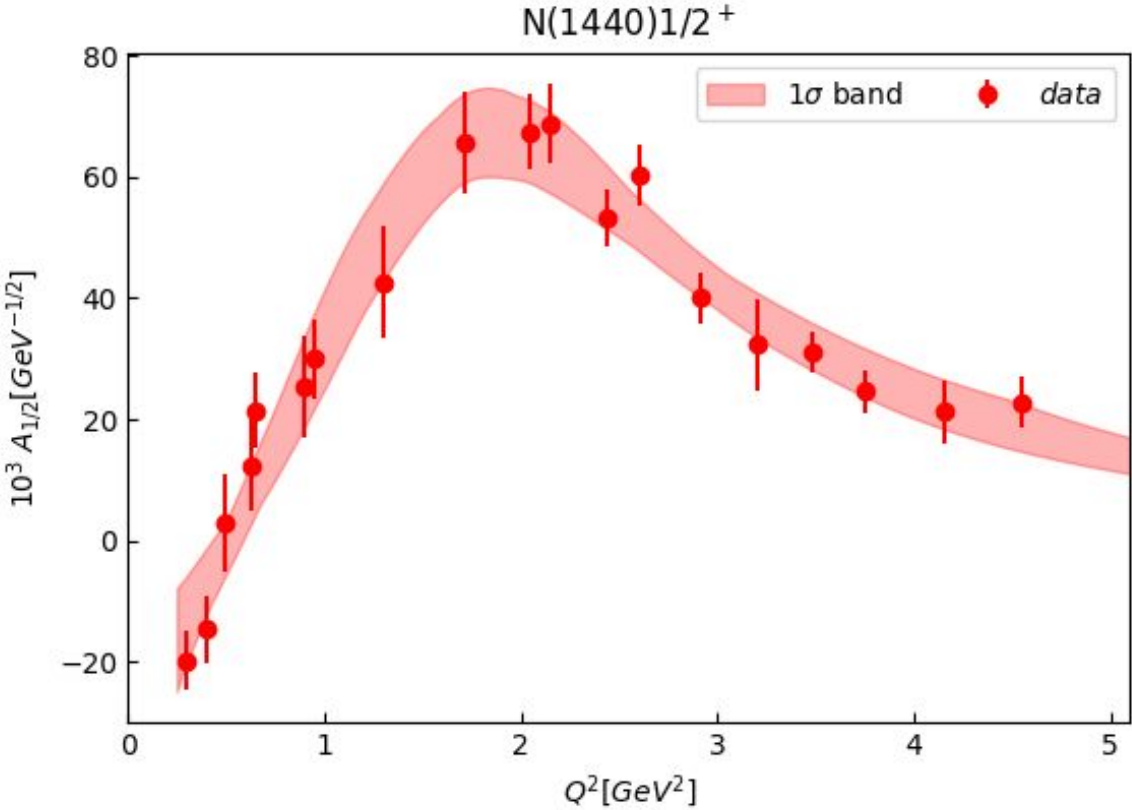
$$\Gamma_\gamma^T(W = M_r, Q^2) = \frac{q_{\gamma,r}^2(Q^2)}{\pi} \frac{2M_N}{(2J_r + 1)M_r} (|A_{1/2}(Q^2)|^2 + |A_{3/2}(Q^2)|^2),$$

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

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



Амплитуды электровозбуждения N^* Ропер резонанса



Резонансные спиральные вклады

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

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

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

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

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

η - внутренняя четность

α - константа
электромагнитного
взаимодействия



Структурные функции

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{Q^2}{\nu^2}\right) g_1^{\text{res}} &= M^2 \sum_{IJ\eta} \left\{ \left| \sum_{R^{IJ\eta}} G_+^{R^{IJ\eta}} \right|^2 - \left| \sum_{R^{IJ\eta}} G_-^{R^{IJ\eta}} \right|^2 \right. \\ &\quad \left. + \frac{\sqrt{2Q^2}}{\nu} \Re \left[\left(\sum_{R^{IJ\eta}} G_0^{R^{IJ\eta}} \right) \left(\sum_{R^{IJ\eta}} (-1)^{J_{R^{IJ\eta}} - \frac{1}{2}} \eta_{R^{IJ\eta}} G_+^{R^{IJ\eta}} \right)^* \right] \right\}, \\ \left(1 + \frac{Q^2}{\nu^2}\right) g_2^{\text{res}} &= -M^2 \sum_{IJ\eta} \left\{ \left| \sum_{R^{IJ\eta}} G_+^{R^{IJ\eta}} \right|^2 - \left| \sum_{R^{IJ\eta}} G_-^{R^{IJ\eta}} \right|^2 \right. \\ &\quad \left. - \frac{\nu\sqrt{2}}{\sqrt{Q^2}} \Re \left[\left(\sum_{R^{IJ\eta}} G_0^{R^{IJ\eta}} \right) \left(\sum_{R^{IJ\eta}} (-1)^{J_{R^{IJ\eta}} - \frac{1}{2}} \eta_{R^{IJ\eta}} G_+^{R^{IJ\eta}} \right)^* \right] \right\}, \end{aligned}$$

ν - переданная протону энергия в лабораторной системе

\Re - вещественная часть

R - определенный резонанс



Метод

1. Для интерполяции амплитуд электровозбуждения N^* используется следующий статистический метод: 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^* .



Моменты поляризованных структурных функций

$$\Gamma_1^2 = \int_{\Delta x} x^2 g_1 dx$$

$$\Gamma_2^2 = \int_{\Delta x} x^2 g_2 dx$$

$$\Gamma_t = \int_{\Delta x} (g_1 + g_2) dx$$

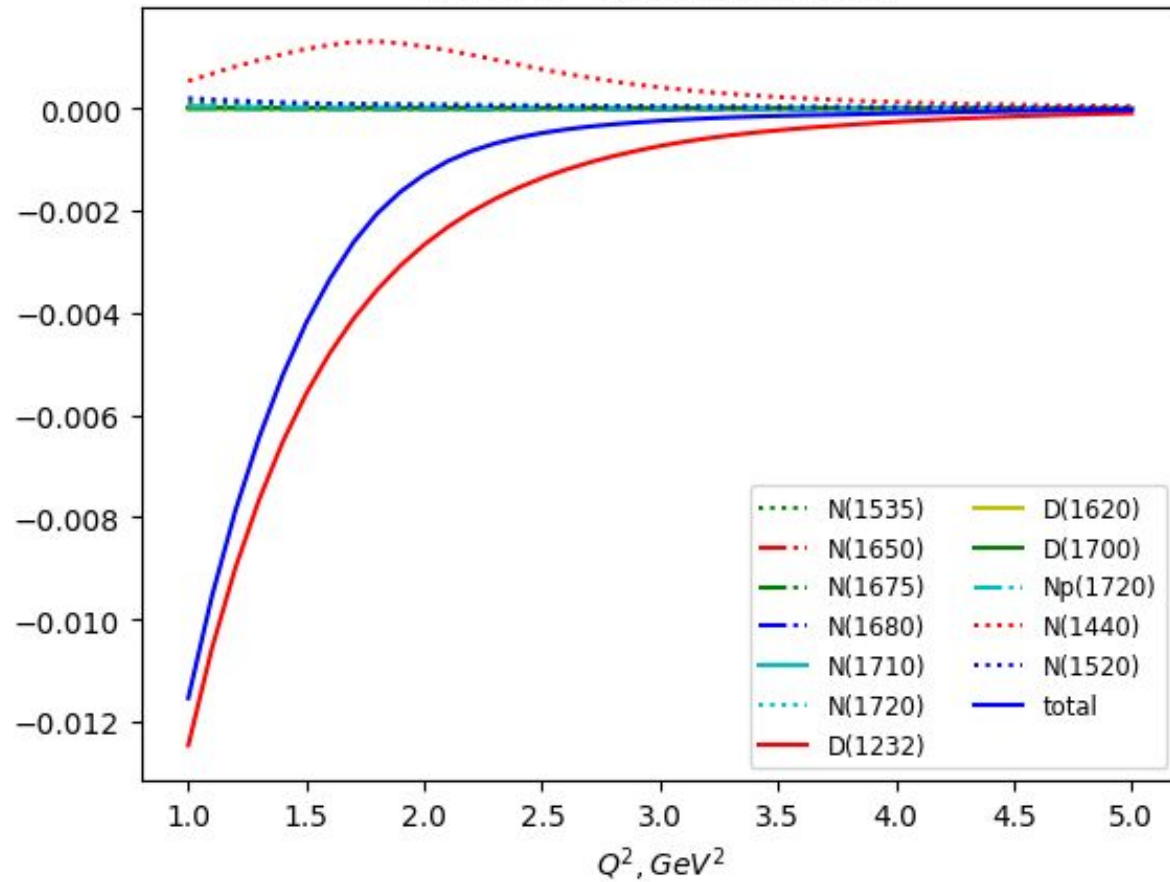
$$d_2 = \int_{\Delta x} x^2 (2g_1 + 3g_2) dx$$

x - переменная Бьёркена

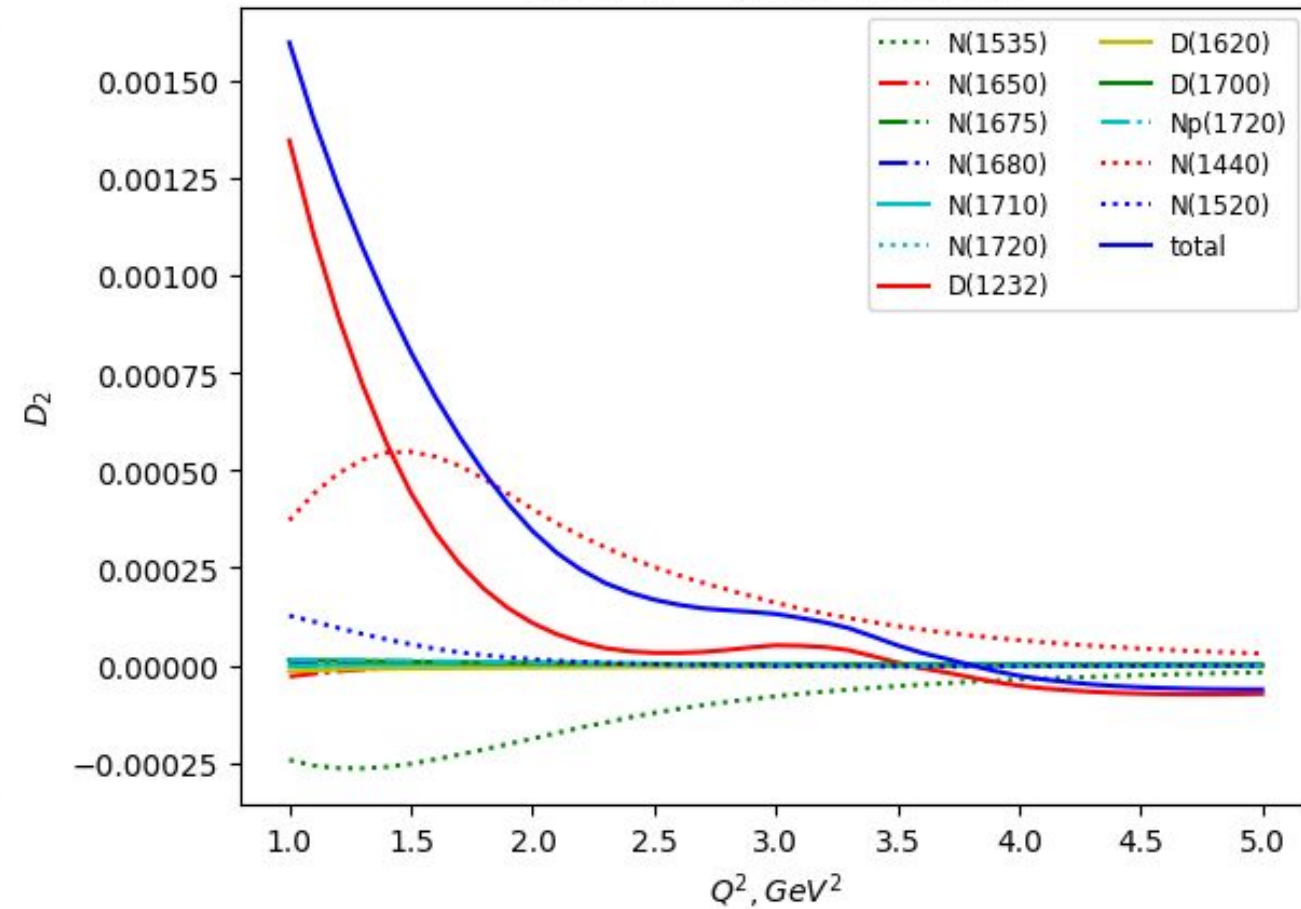


Моменты g_1 для первой резонансной области

Γ_1 for $W = [1.08, 1.38]$ GeV

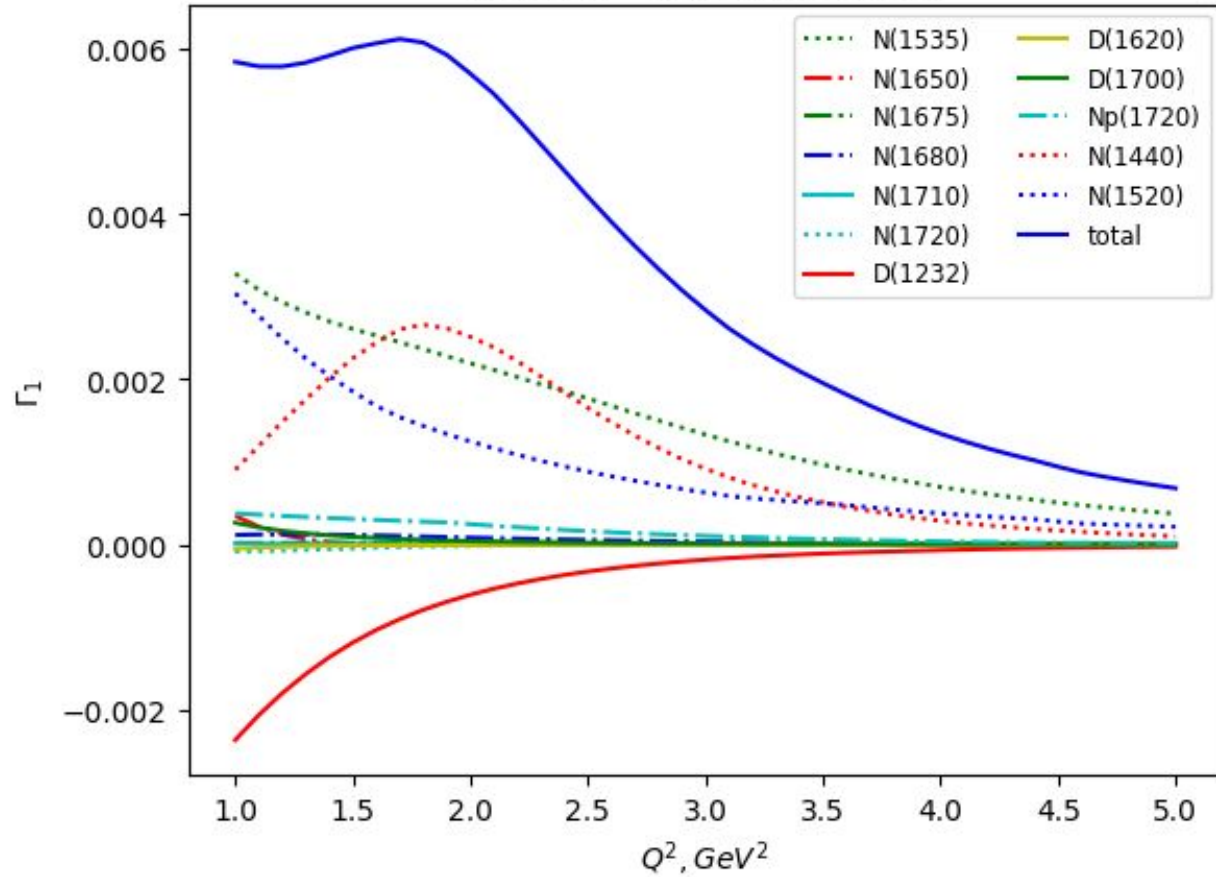


D_2 for $W = [1.08, 1.38]$ GeV

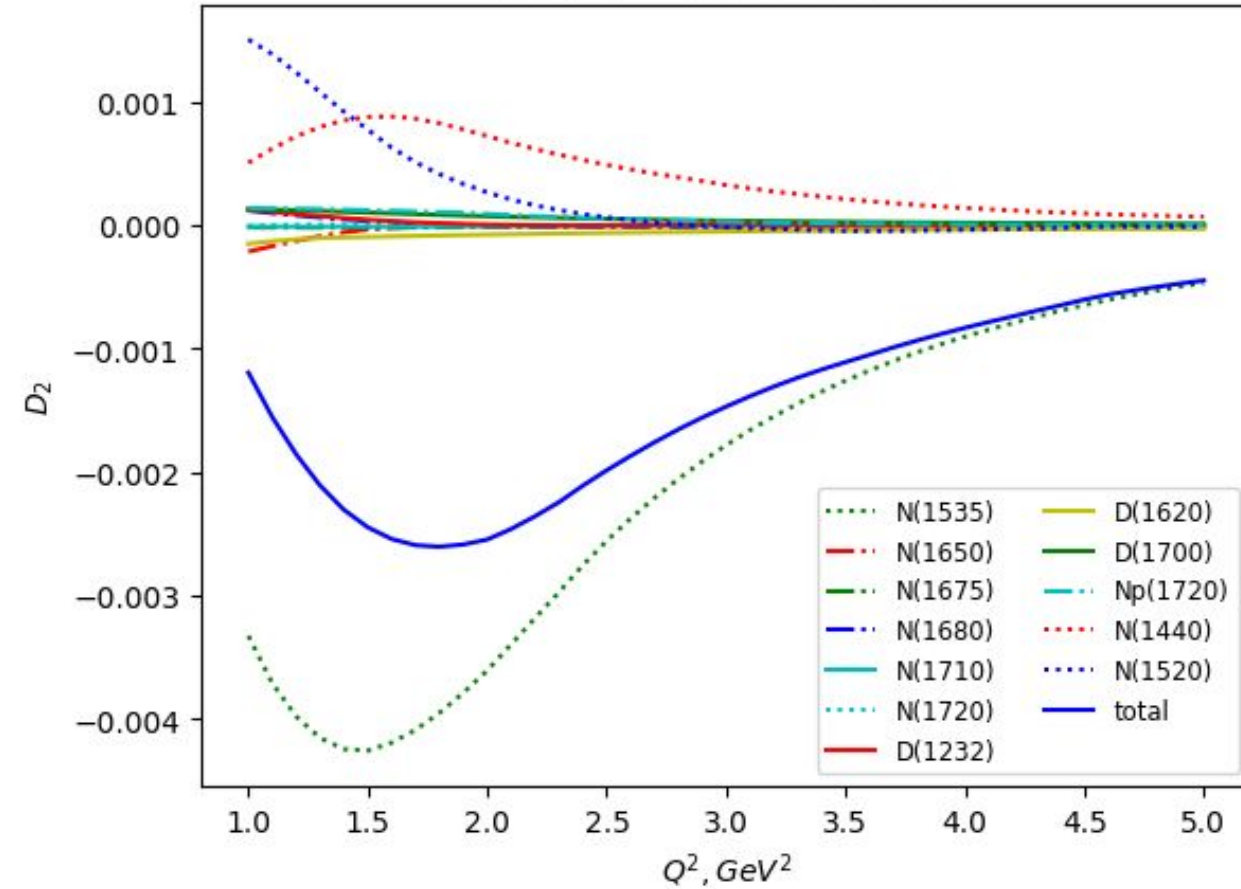


Моменты g_1 для второй резонансной области

Γ_1 for $W = [1.38, 1.58]$ GeV

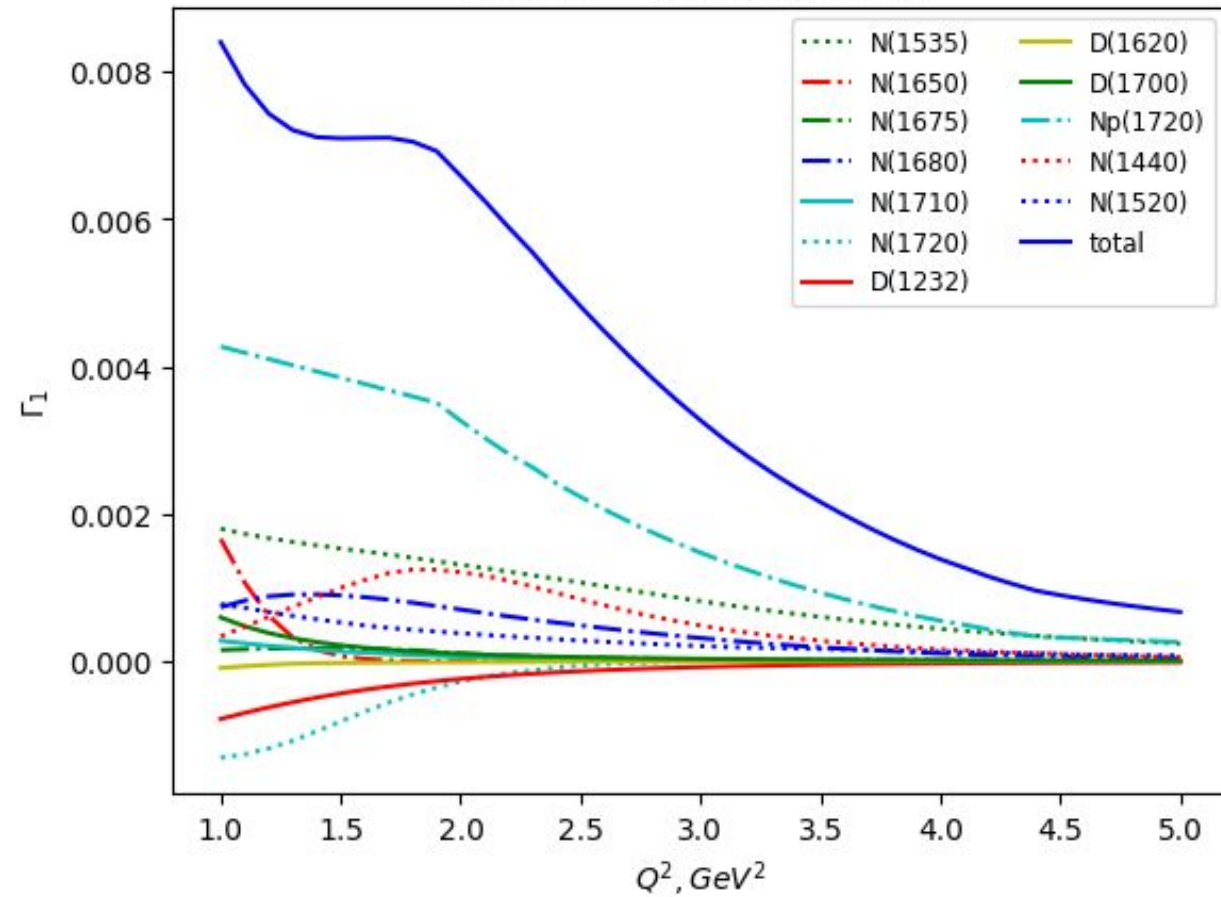


D_2 for $W = [1.38, 1.58]$ GeV

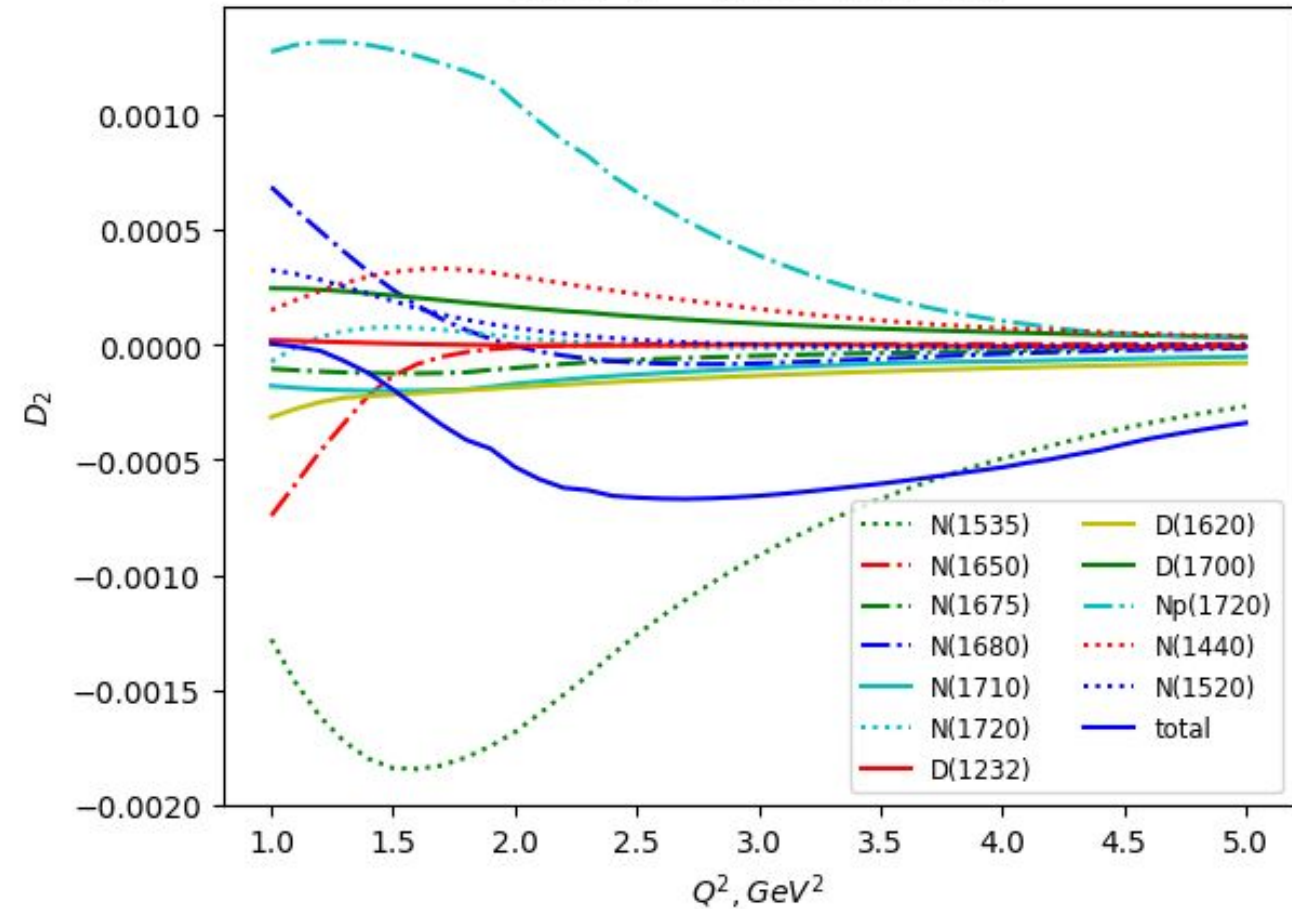


Моменты g_1 для третьей резонансной области

Γ_1 for $W = [1.58, 1.75]$ GeV

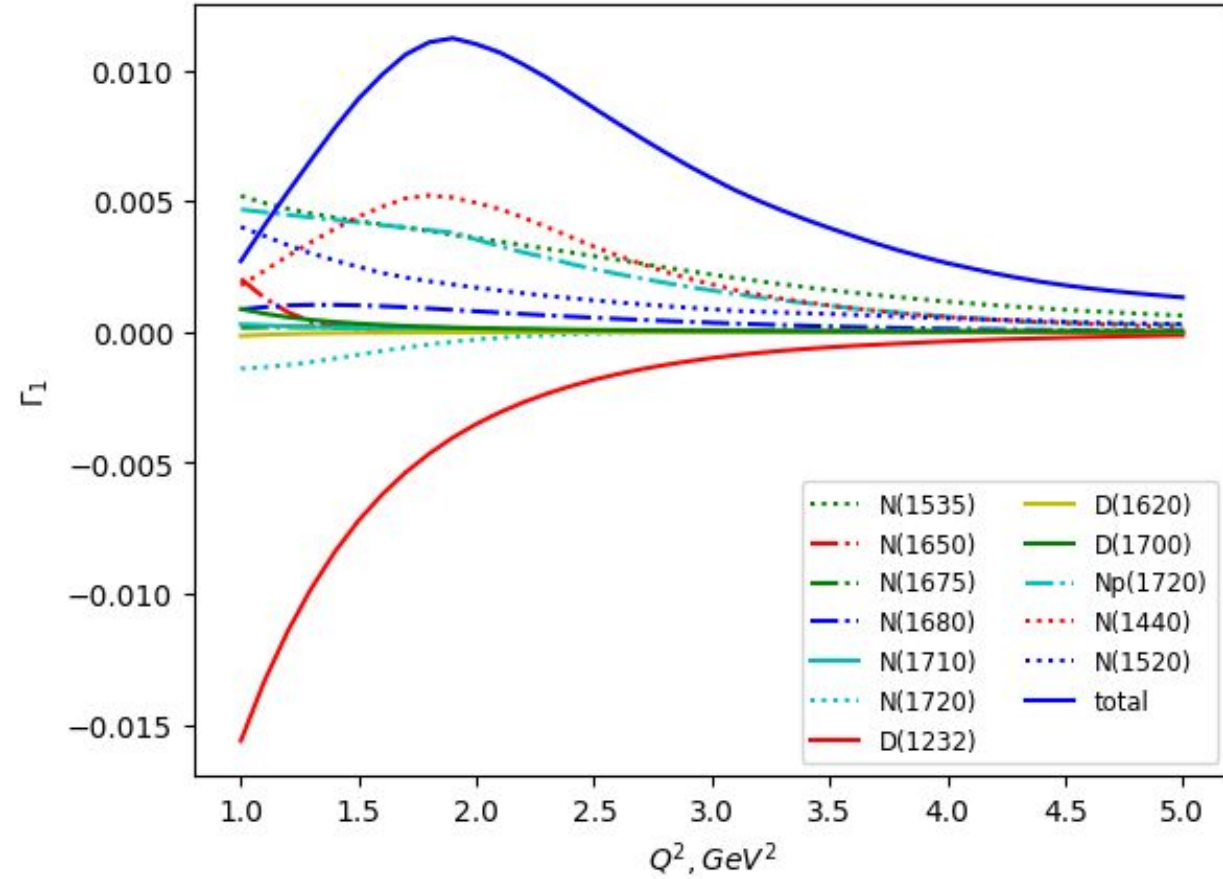


D_2 for $W = [1.58, 1.75]$ GeV

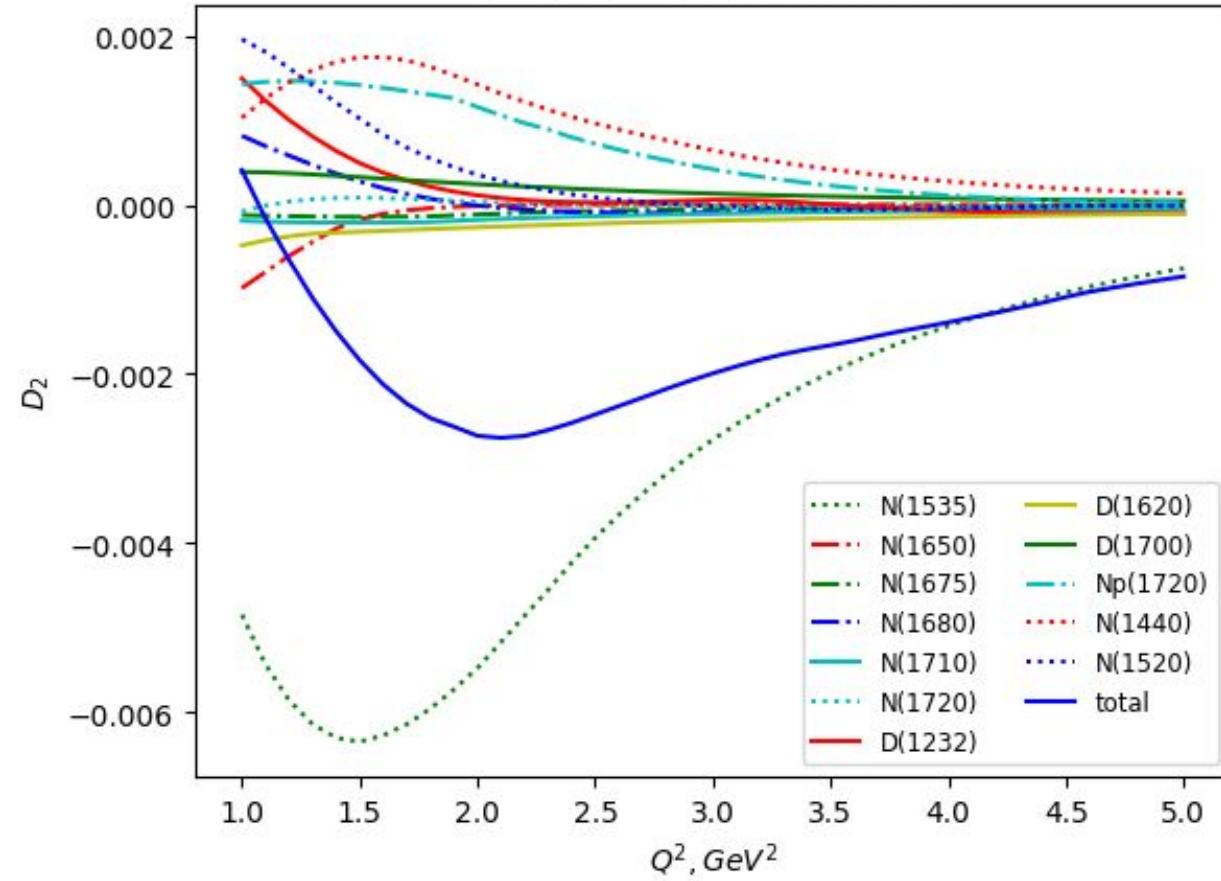


Моменты g_1 для всей резонансной области

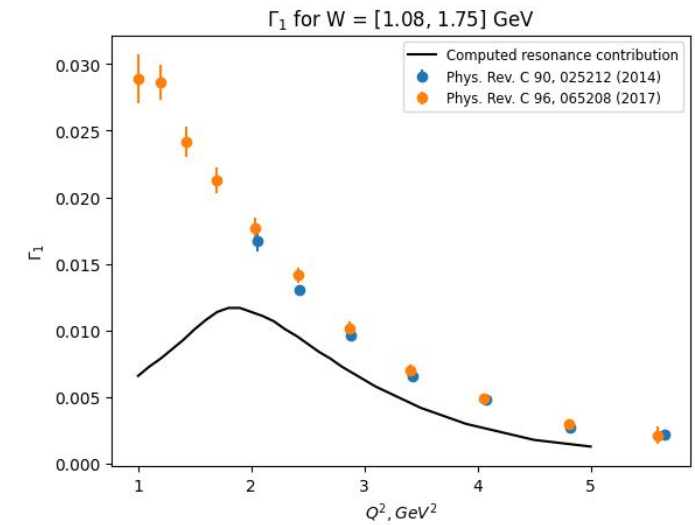
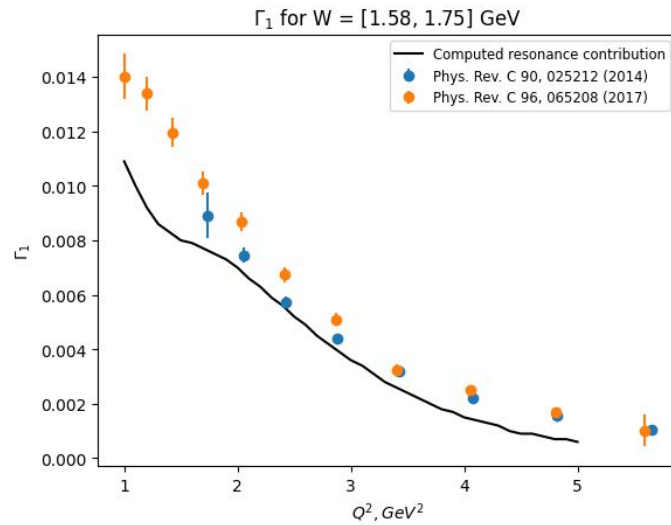
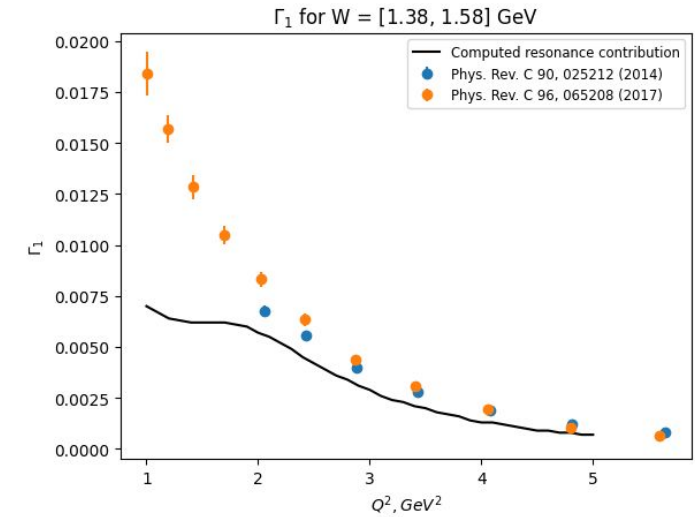
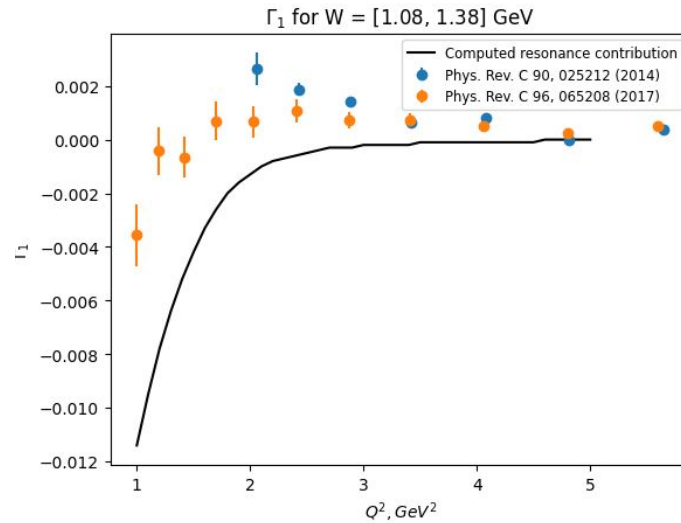
Γ_1 for $W = [1.08, 1.75]$ GeV



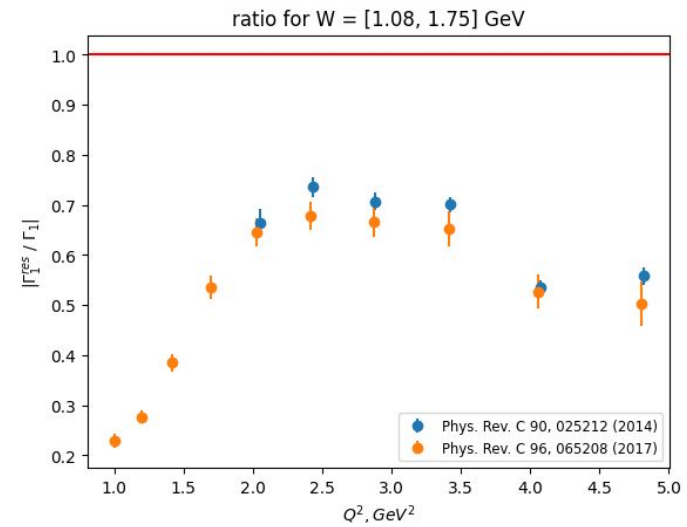
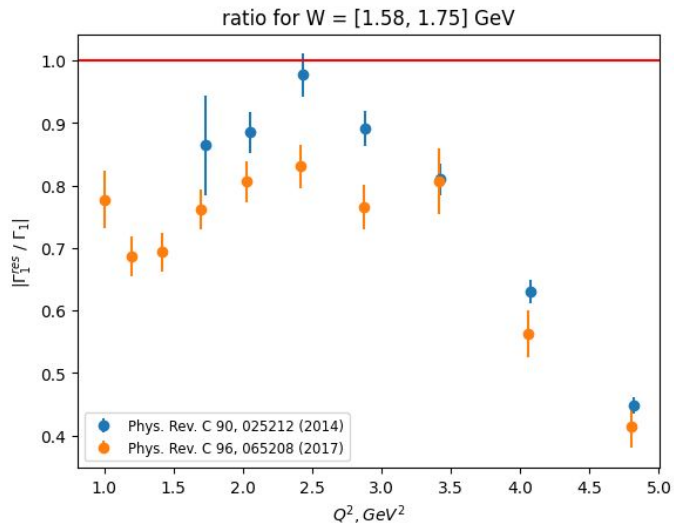
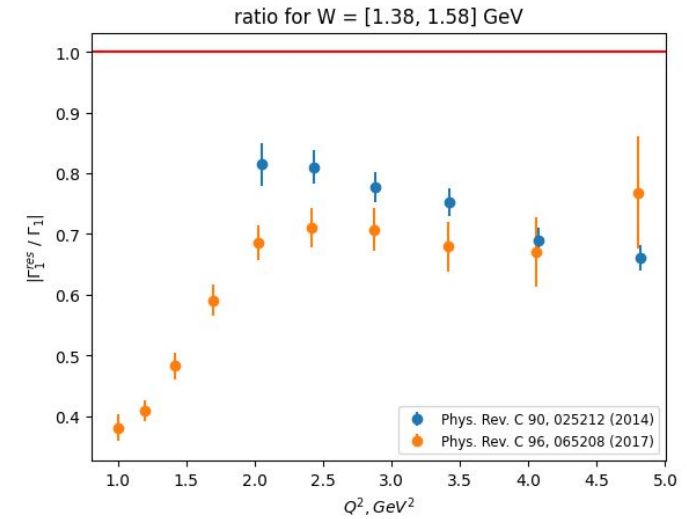
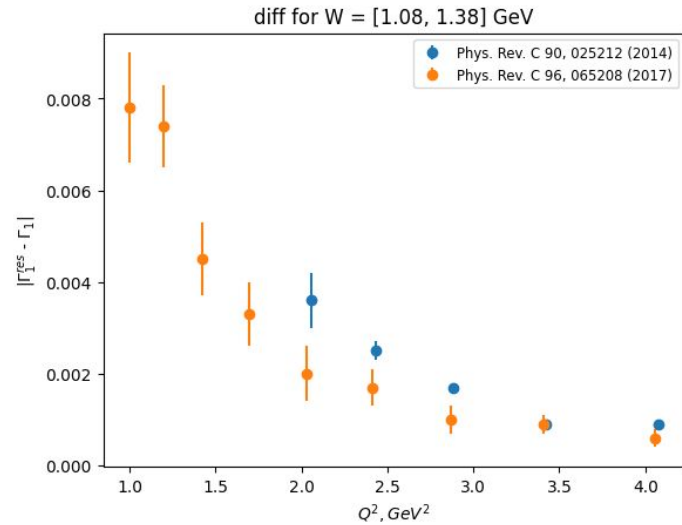
D_2 for $W = [1.08, 1.75]$ GeV



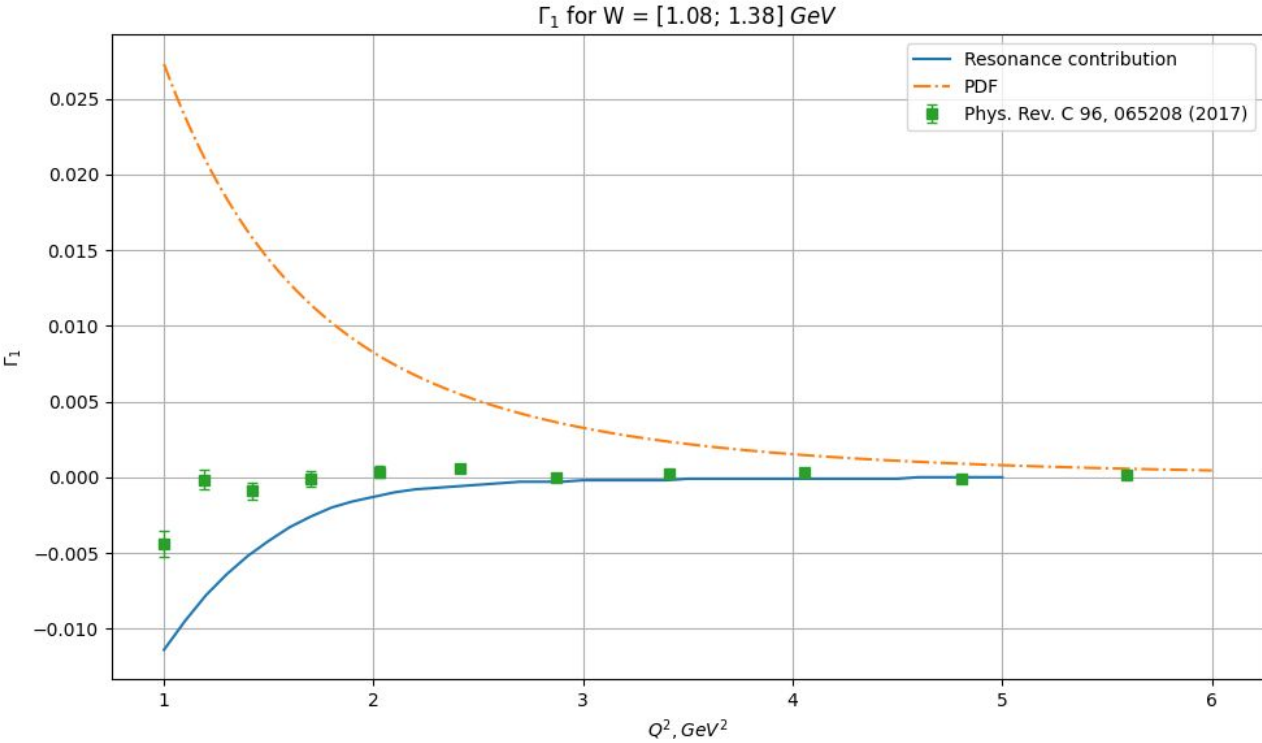
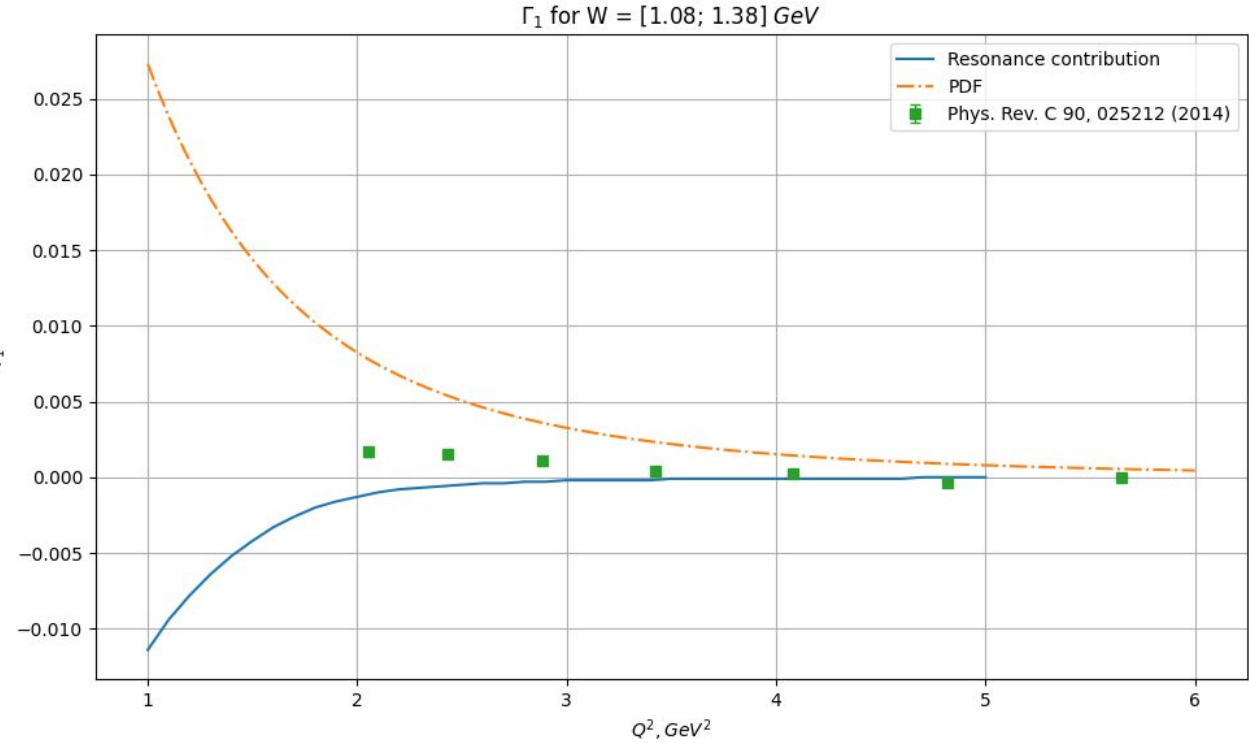
Резонансные вклады в Γ_1



Отношение резонансного вклада в Γ_1 к данным



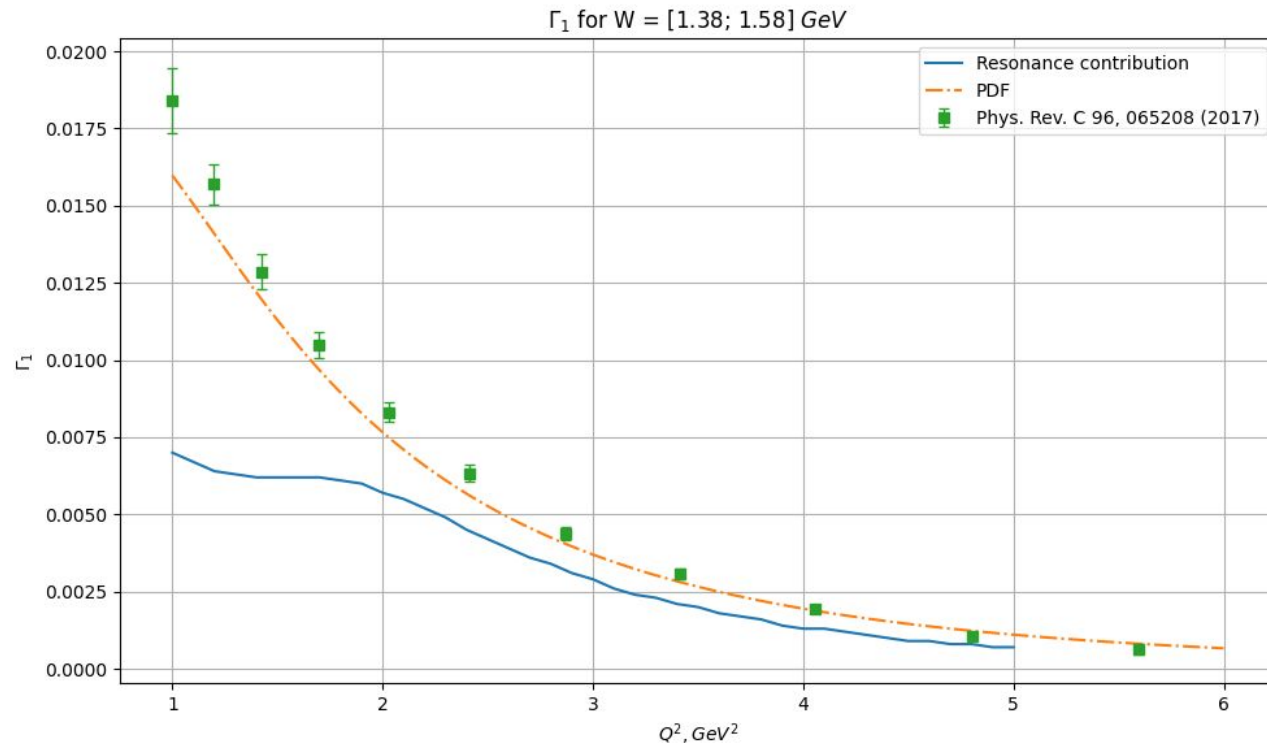
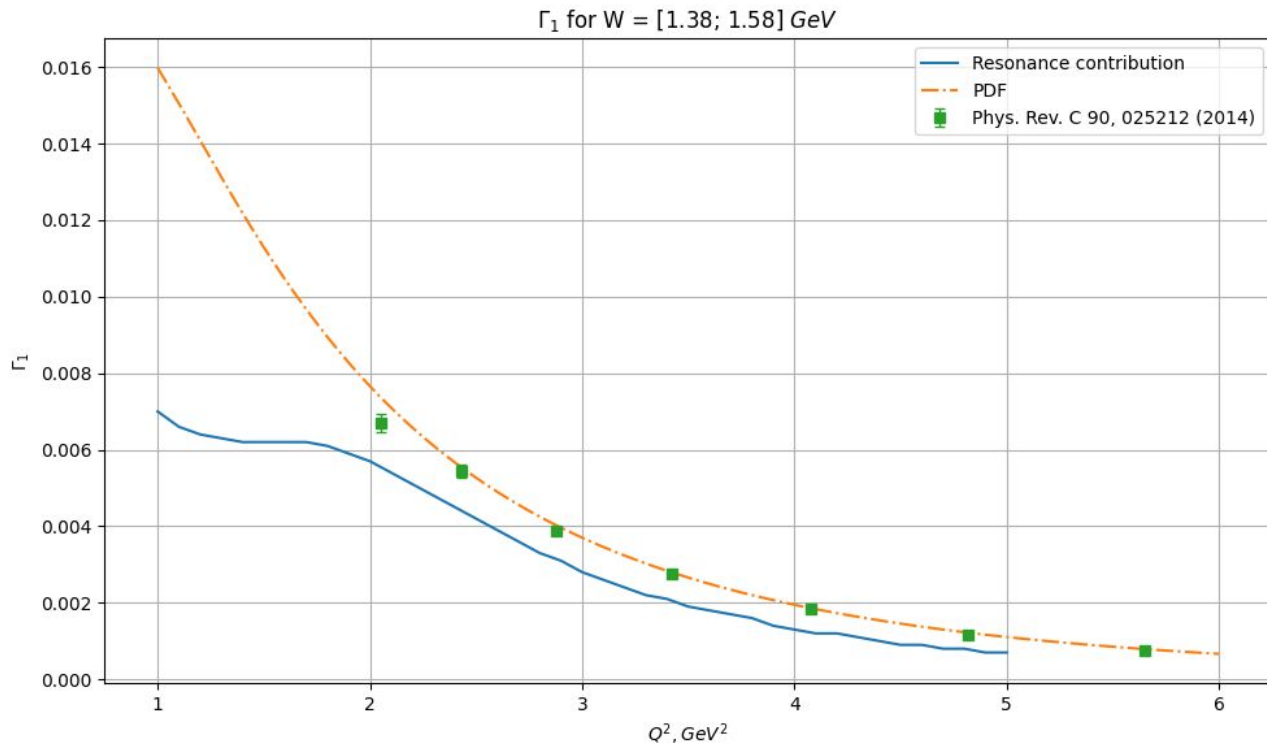
Сравнение резонансного вклада в Γ_1 с данными и JAM15



Ref: <https://github.com/QCDHUB/JAM15>



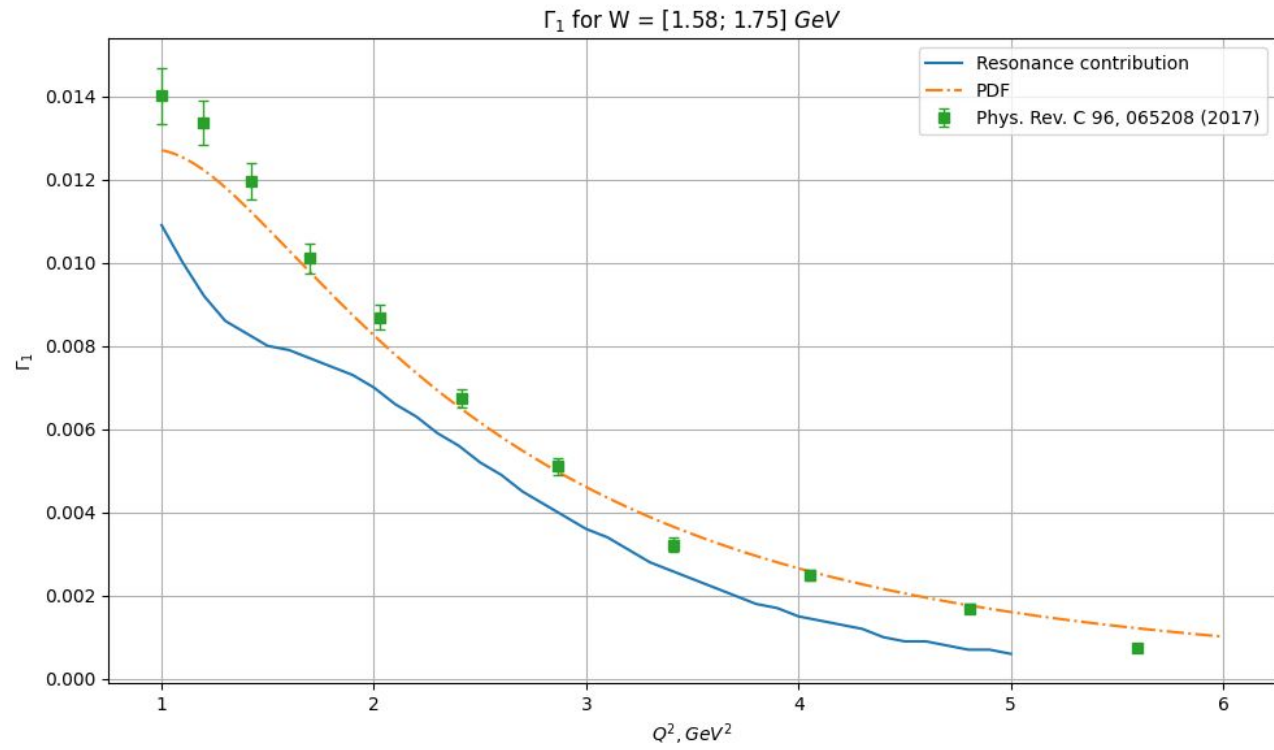
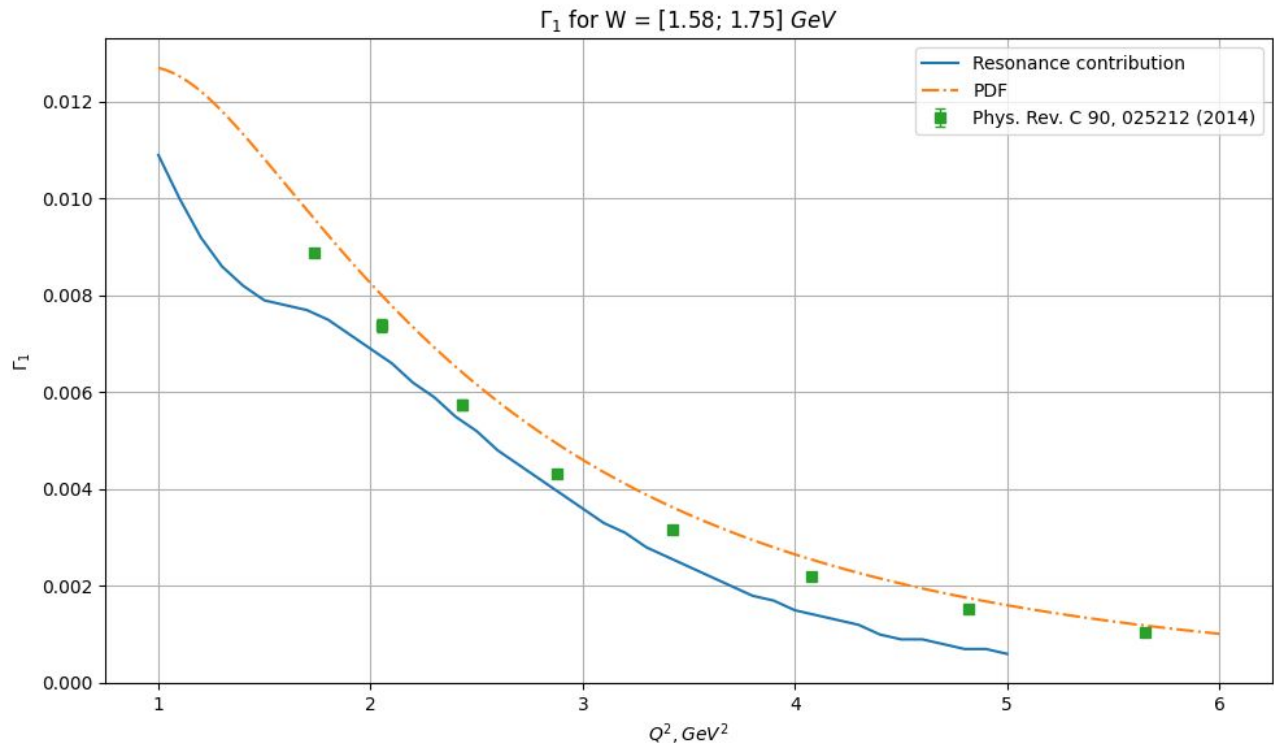
Сравнение резонансного вклада в Γ_1 с данными и JAM15



Ref: <https://github.com/QCDHUB/JAM15>



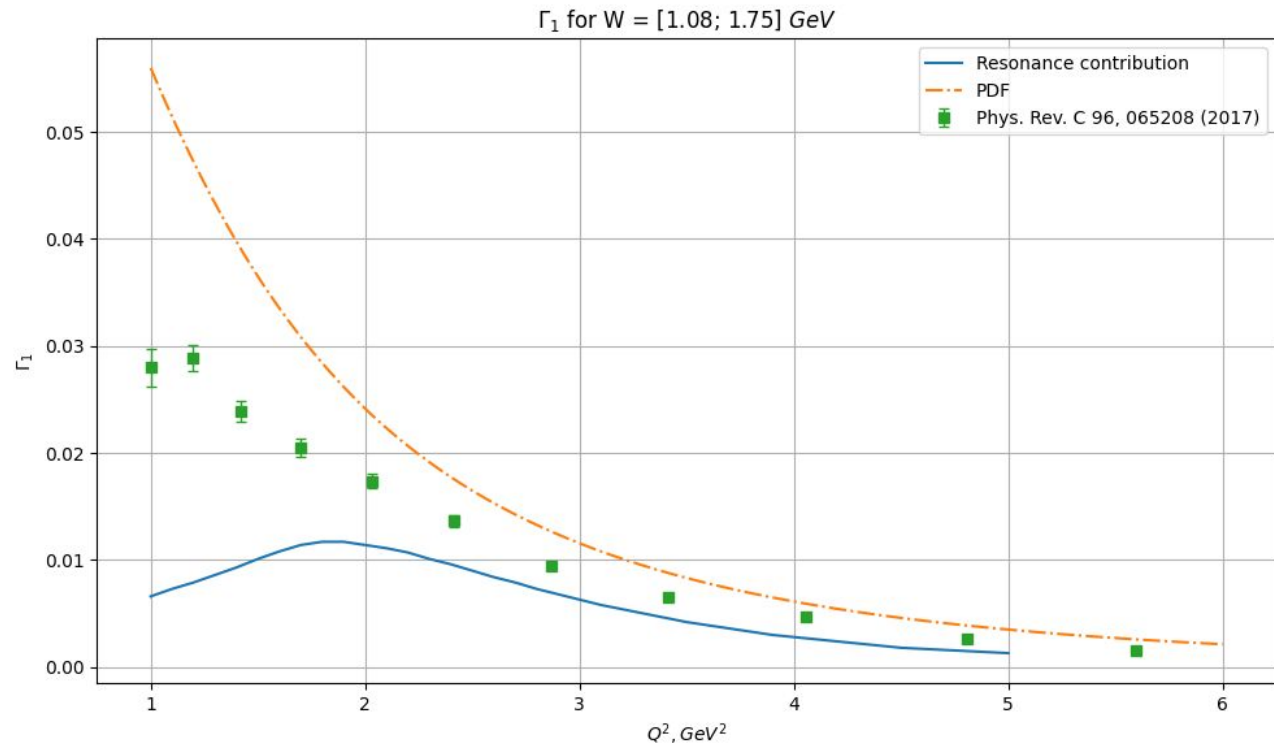
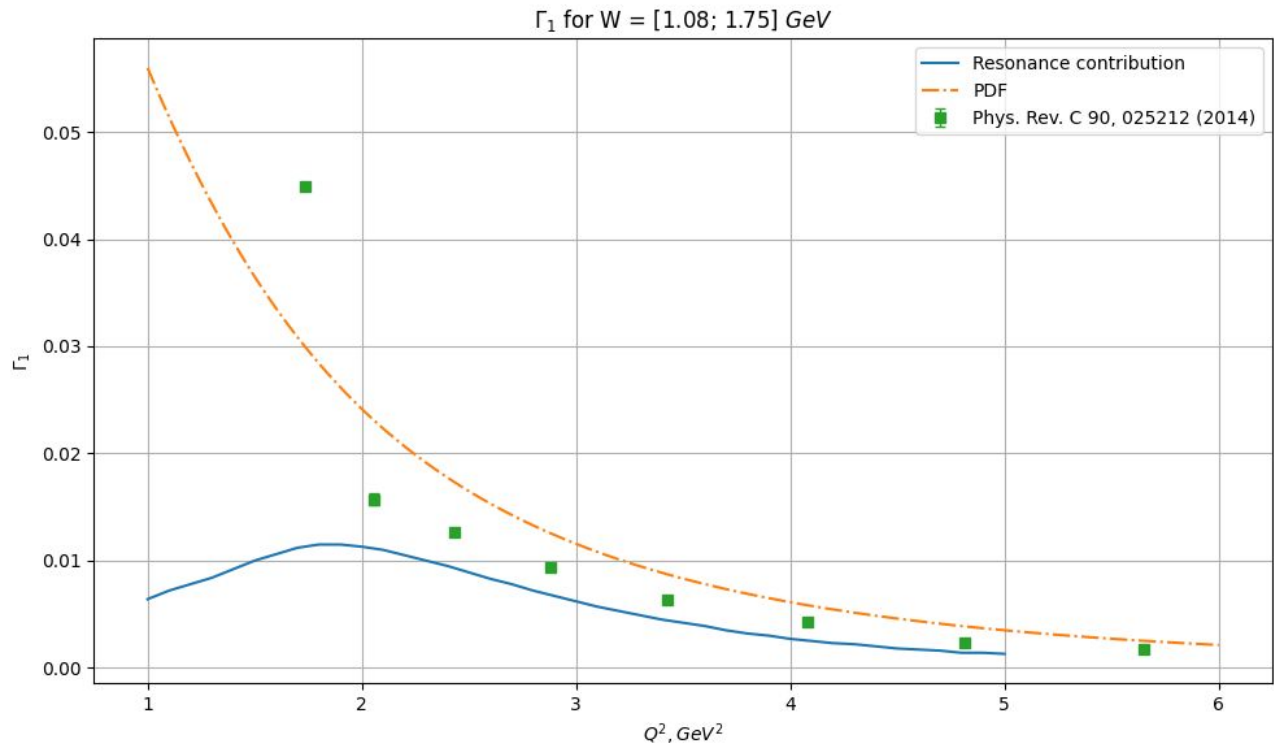
Сравнение резонансного вклада в Γ_1 с данными и JAM15



Ref: <https://github.com/QCDHUB/JAM15>



Сравнение резонансного вклада в Γ_1 с данными и JAM15



Ref: <https://github.com/QCDHUB/JAM15>



Заключение

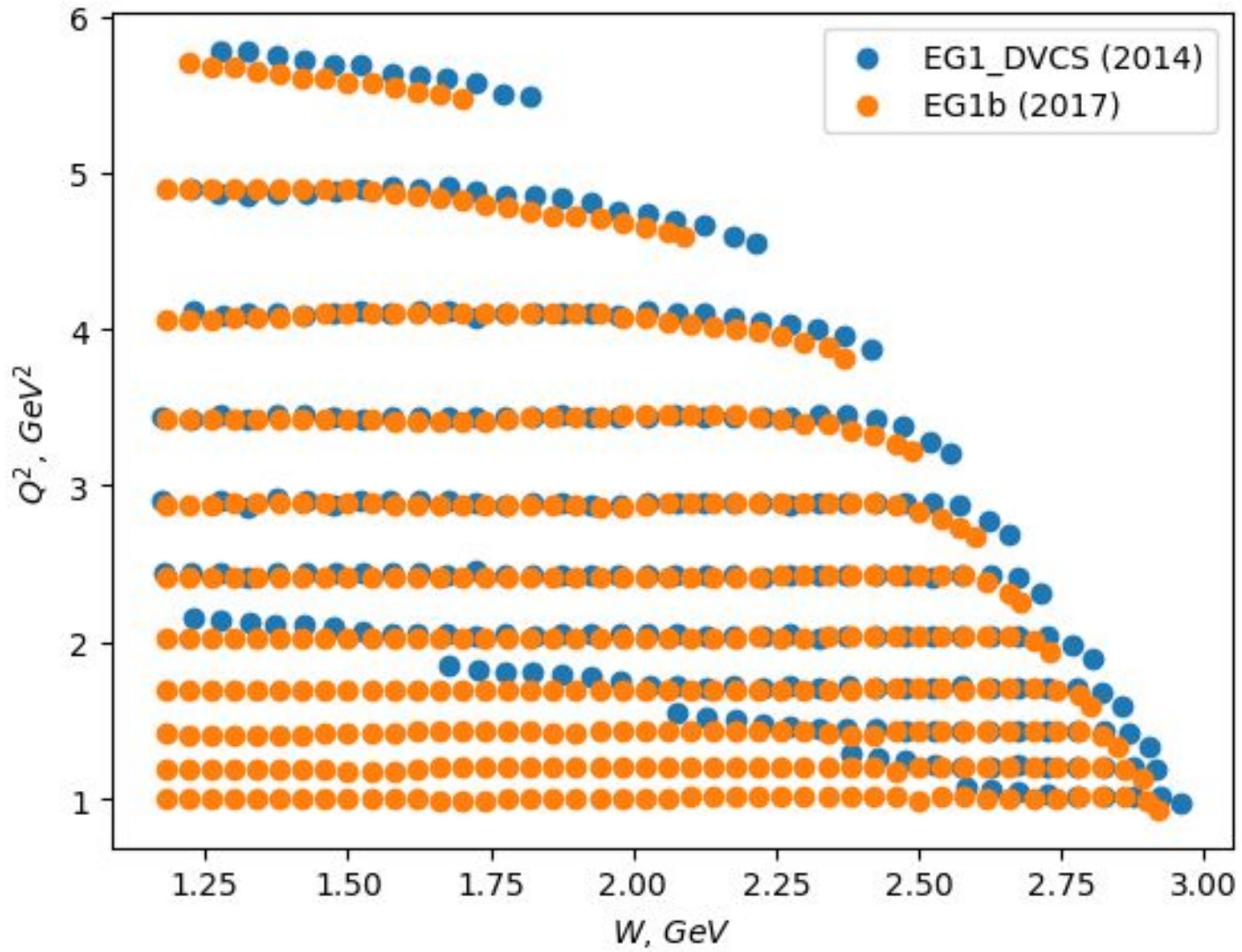
1. Рассчитаны резонансные вклады в поляризованные структурные функции g_1 , g_2 и их моменты Γ_1 , Γ_2 , Γ_t , d_2
2. Показано, что вклад резонансов в момент Γ_1 является существенным ($\sim 60\%$) и слабо зависит от Q^2
3. Значения рассчитанных резонансных вкладов и экстраполированного из области глубоконеупругого рассеяния момента функции Γ_1 ведут себя подобно для значений $Q^2 > 2 \text{ ГэВ}^2$ - возможный признак дуальности



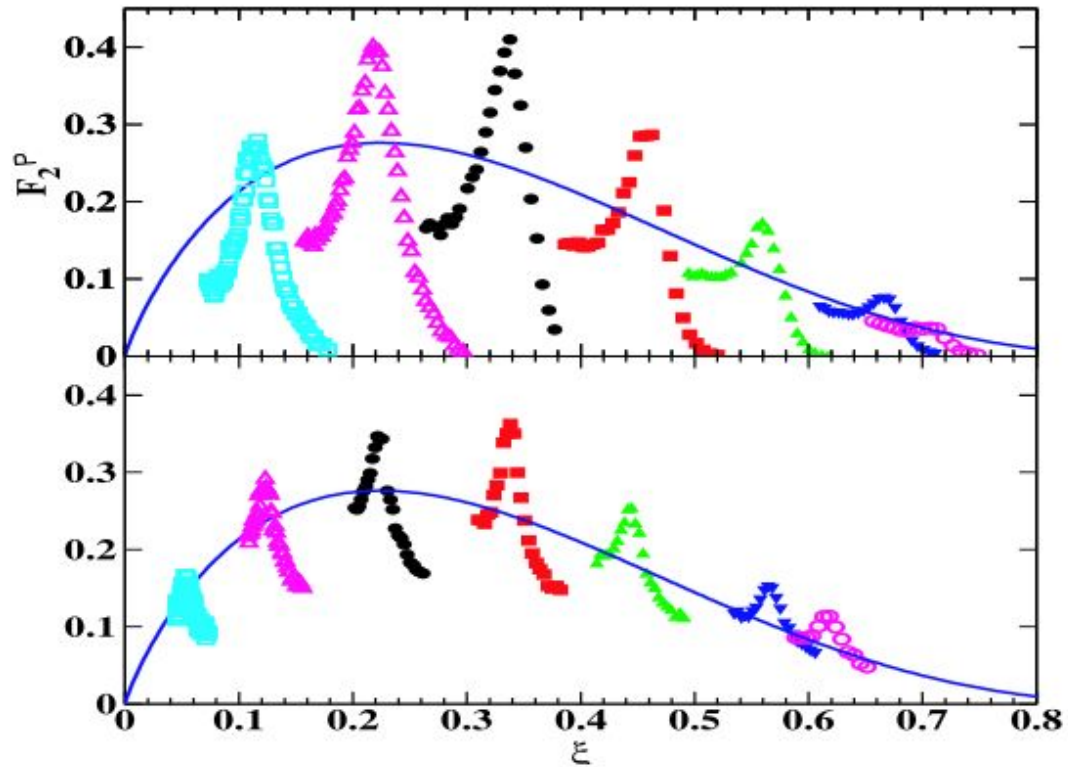
Спасибо за внимание!



Кинематическая карта данных



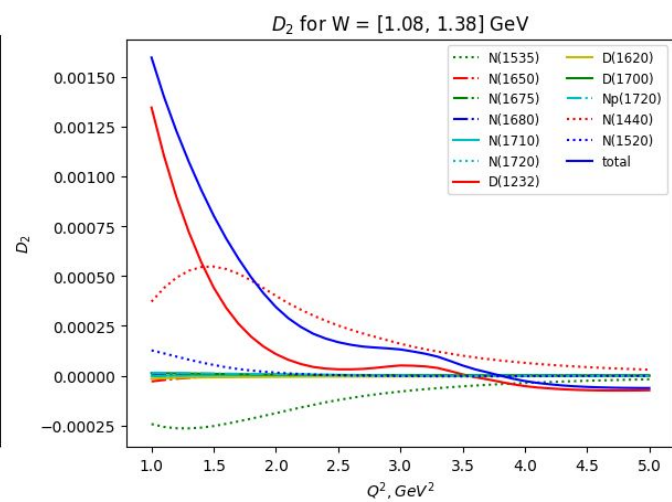
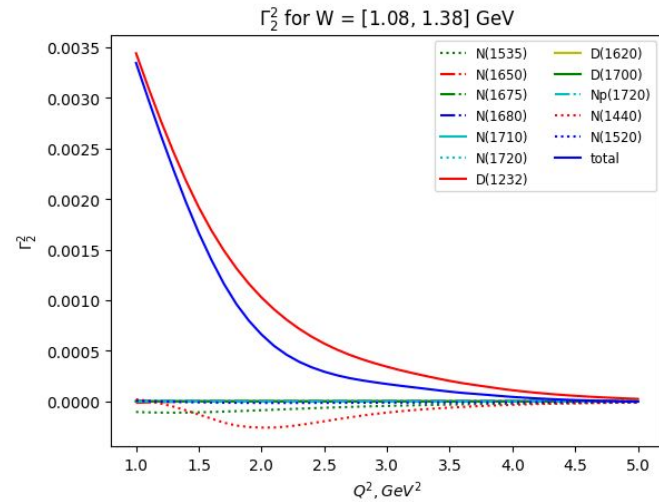
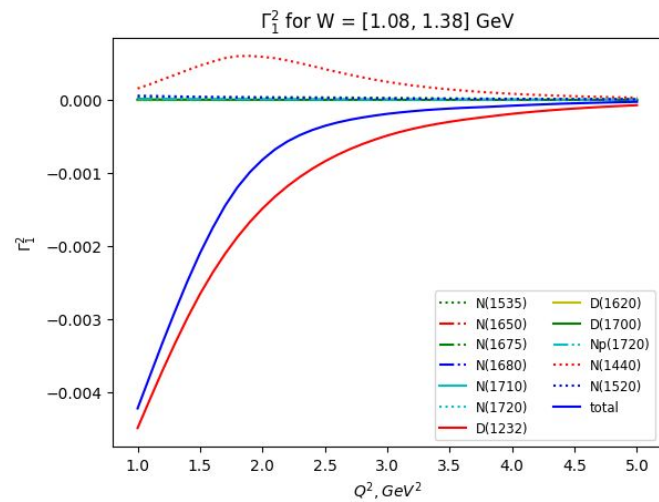
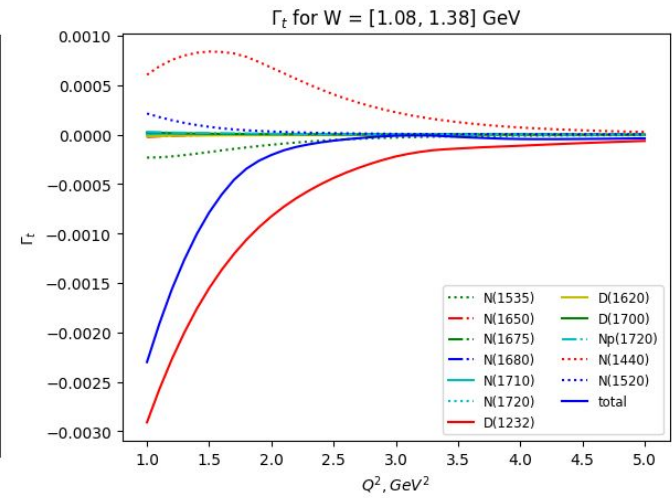
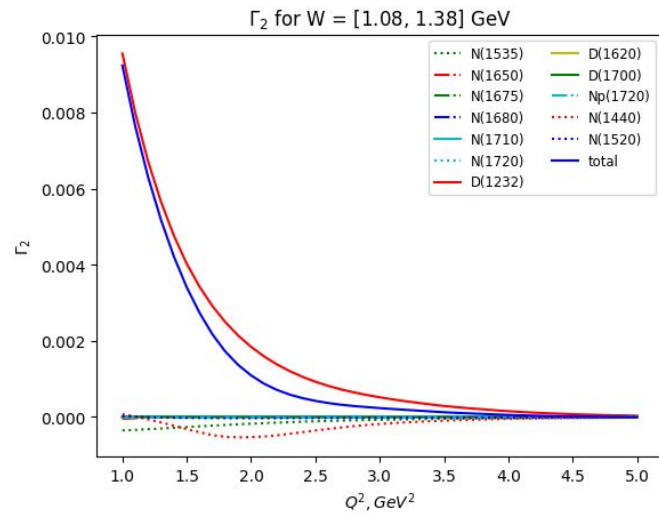
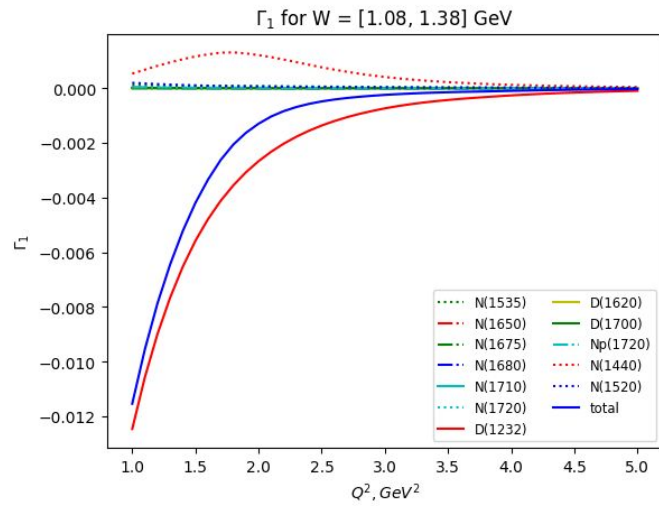
Наблюдение дуальности в F_2



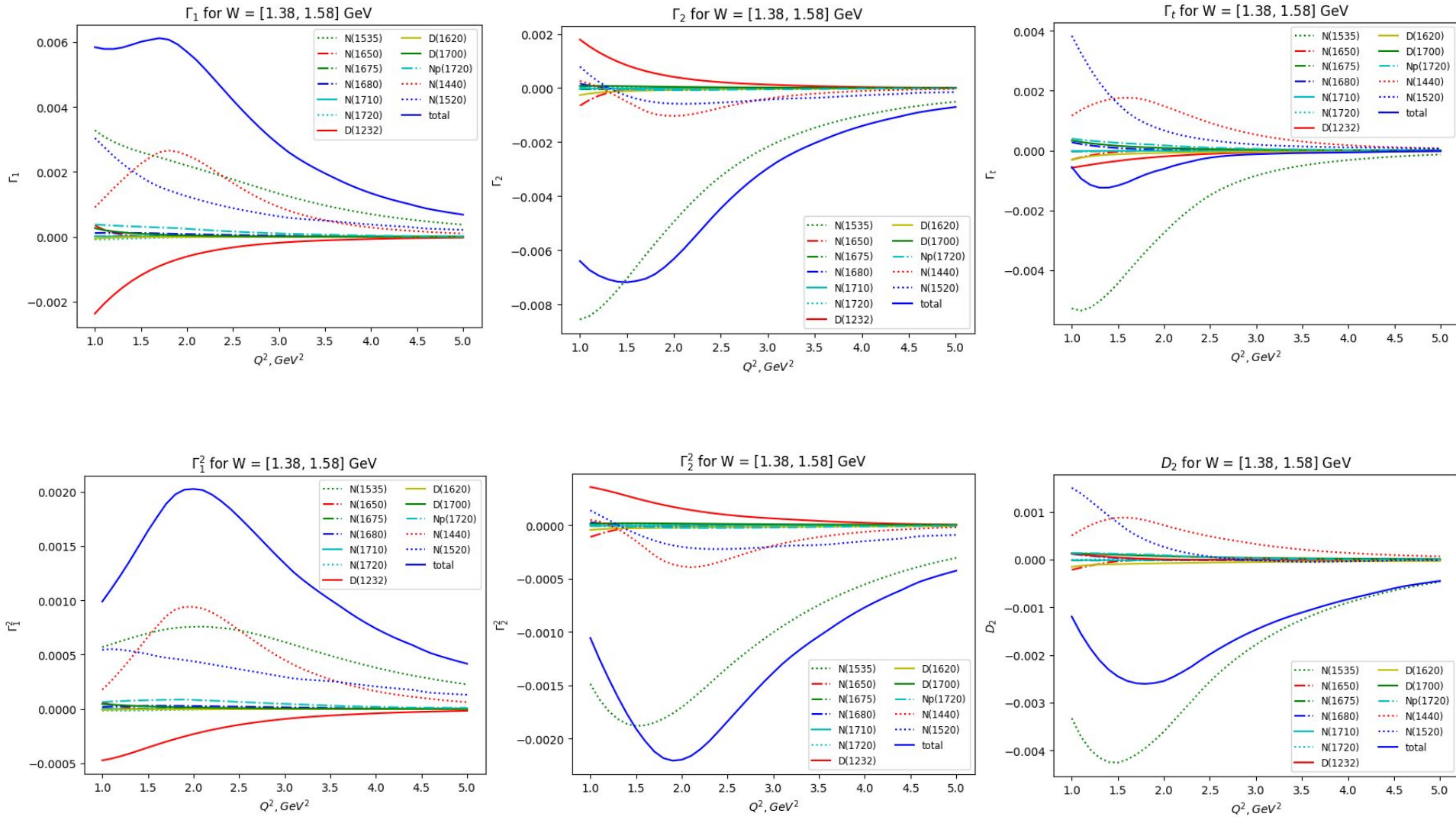
- I The resonance region data oscillate around the scaling curve.
- II The resonance data are on average equivalent to the scaling curve.
- III The resonance region data “slide” along the deep inelastic curve with increasing Q^2 .



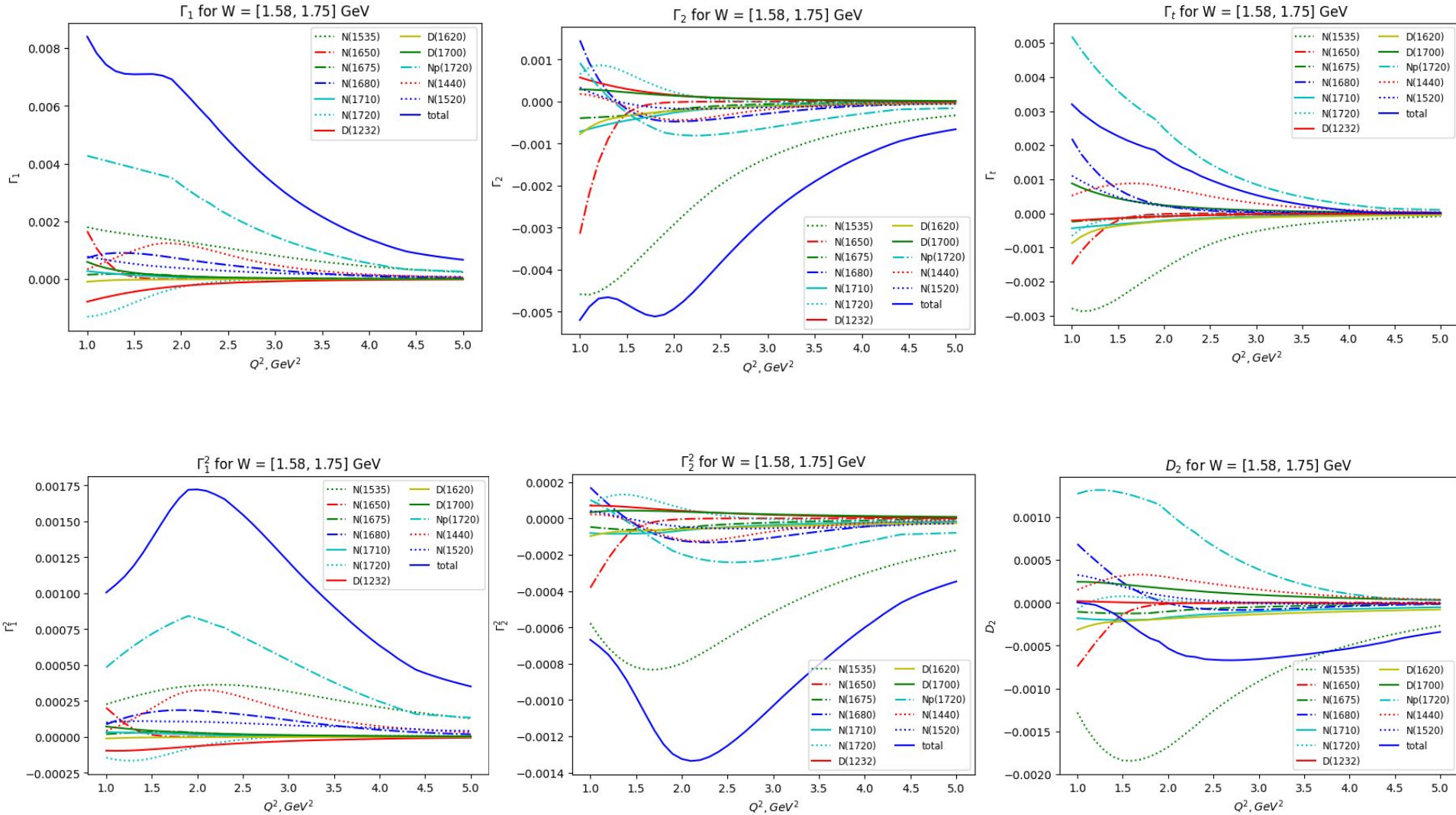
Моменты g_1 для первой резонансной области



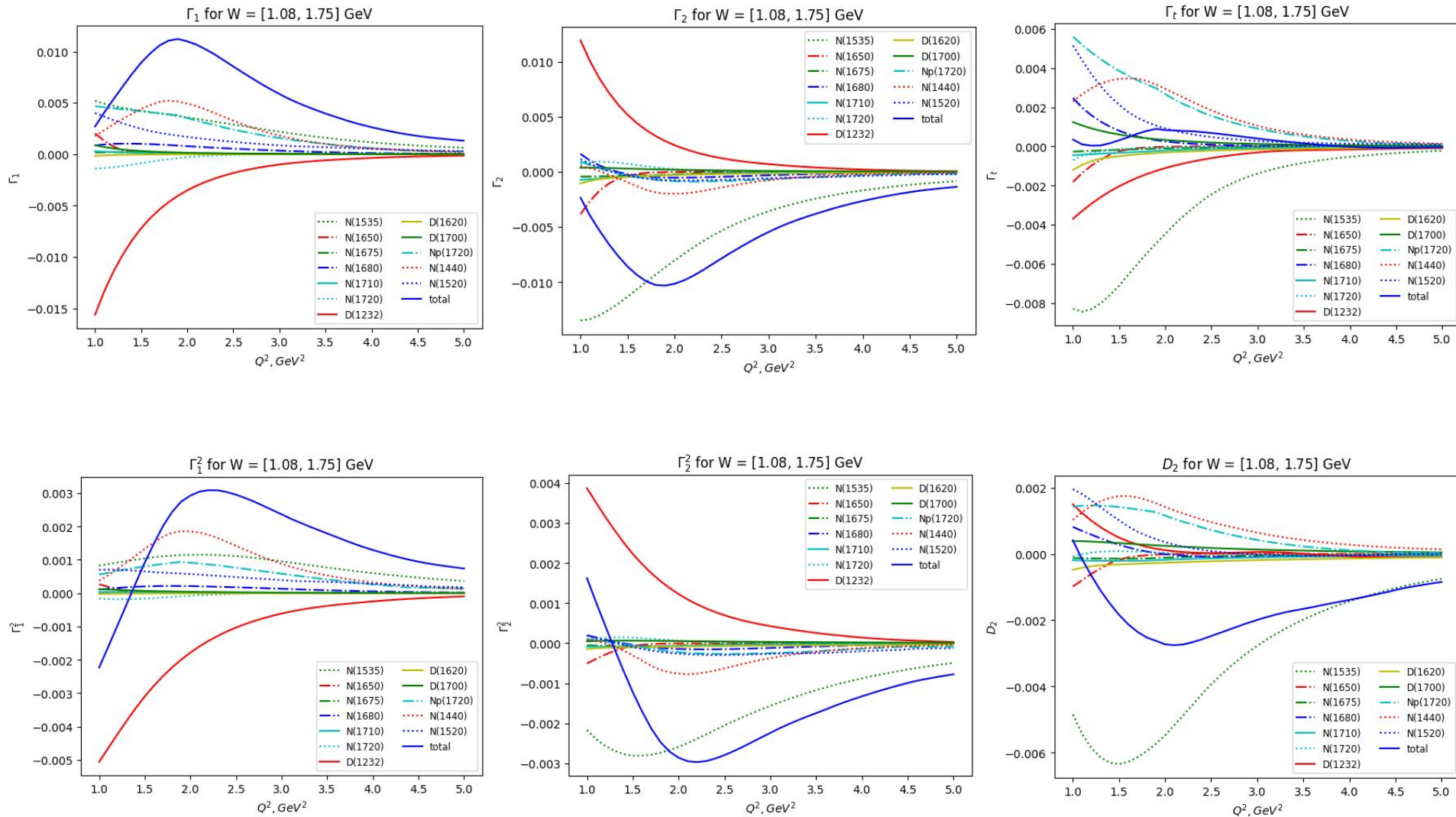
Моменты g_1 для второй резонансной области



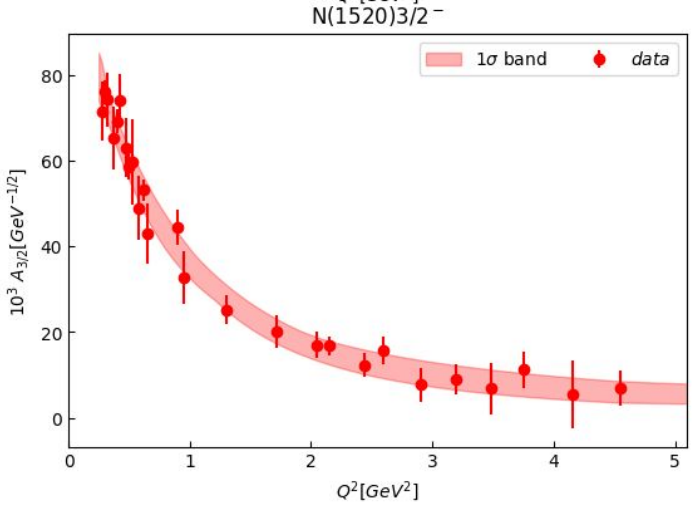
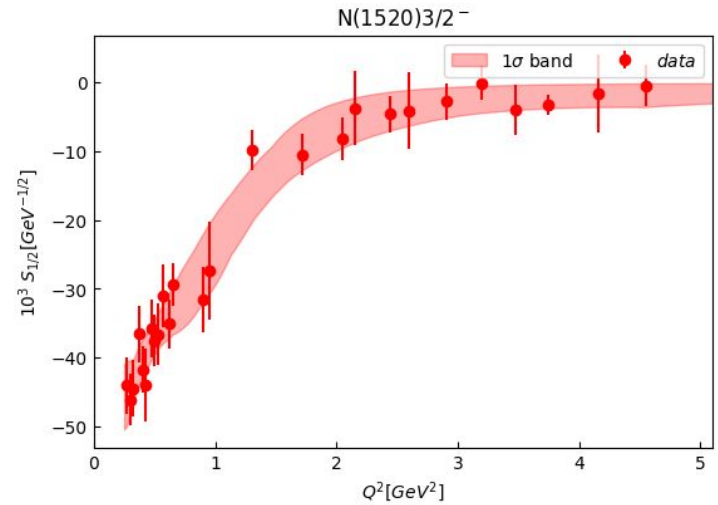
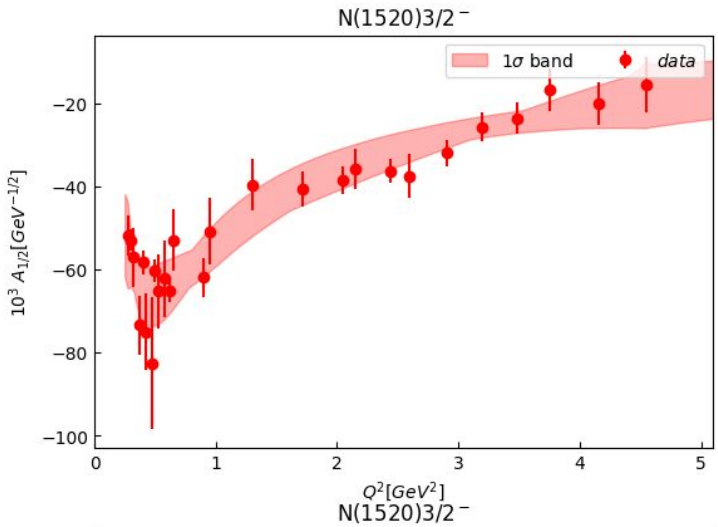
Моменты g_1 для третьей резонансной области



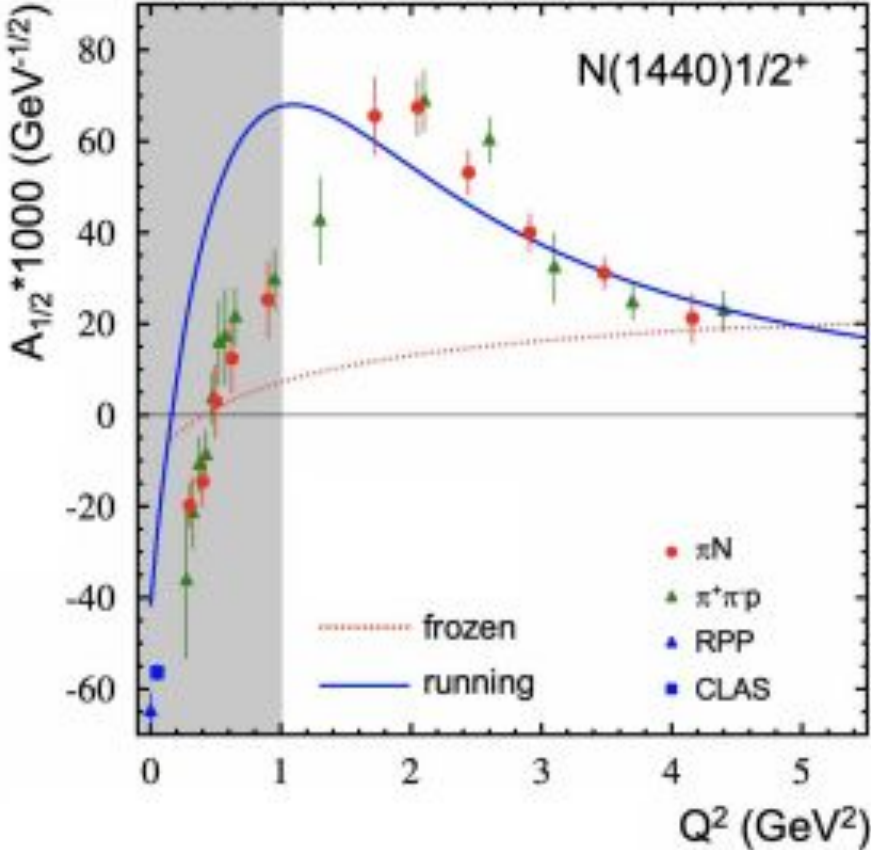
Моменты g_1 для всей резонансной области



Амплитуды электровозбуждения N^* второй области



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

