

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

МАГИСТЕРСКАЯ РАБОТА

«Анализ процессов электророждения странных мезонов на протоне из данных
детектора CLAS»

Выполнил студент
213М группы
Давыдов Максим Михайлович

подпись студента

Научный руководитель:
к.ф.-м.н., с.н.с. Исупов Евгений Леонидович

подпись научного руководителя

Допущена к защите

Зав. кафедрой

подпись зав. кафедрой

МОСКВА

2023

Содержание

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Введение | 2 |
| 2 | Цели работы | 5 |
| 3 | Алгоритм интерполяции структурных функций для эксклюзивных каналов электророждения $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$ на протонах из экспериментальных данных CLAS | 6 |
| 3.1 | Формализм | 6 |
| 3.2 | Экспериментальные структурные функции | 7 |
| 3.3 | Интерполяция эксклюзивных структурных функций | 8 |
| 4 | Алгоритм экстраполяции структурных функций для эксклюзивных каналов электророждения $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$ на протонах из экспериментальных данных CLAS | 11 |
| 4.1 | Расширение доступного фазового пространства | 11 |
| 4.2 | Экстраполяция структурных функций по Q^2 | 12 |
| 4.2.1 | Случай $Q^2 > 3.45$ ГэВ ² | 12 |
| 4.2.2 | Случай $Q^2 < 0.65$ ГэВ ² | 13 |
| 4.2.3 | $\frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega_K}$ при $W \in [2.17, 2.65]$ ГэВ и $Q^2 \in [0, 1.8]$ ГэВ ² | 15 |
| 5 | Описание программы и веб-сайта для оценки сечений каналов электророждения $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$ | 17 |
| 5.1 | Техническая часть реализации инструмента | 18 |
| 6 | Заключение | 21 |
| A | Технические комментарии | 22 |
| A.1 | config.yaml | 22 |

1 Введение

Изучение эксклюзивных каналов $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$ представляет собой важную часть исследований спектра и структуры возбужденных нуклонных состояний. Детектор CLAS в лаборатории Джефферсона [1] предоставил основную часть имеющейся в мире информации об основных эксклюзивных каналах электророждения мезонов, относящихся к области резонансного возбуждения.

В таблице 1 приведены данные по дифференциальным сечениям, асимметриям и поляризациям с почти полным охватом угла вылета конечного адрона, что также имеет особое значение для надежного извлечения амплитуд электровозбуждения резонансов. Все доступные экспериментальные данные хранятся в базе данных CLAS [2, 3].

Таблица 1: Сводка доступных экспериментальных данных электророждения мезонов на протоне.

| Конечная адронная система | W , ГэВ | Q^2 , ГэВ ² | Измеренные наблюдаемые |
|---------------------------|------------|--------------------------|---------------------------------------|
| π^+n | 1.1 - 1.38 | 0.16 - 0.36 | $d\sigma/d\Omega$ |
| | 1.1 - 1.55 | 0.3 - 0.6 | $d\sigma/d\Omega$ |
| | 1.1 - 1.7 | 1.7 - 4.5 | $d\sigma/d\Omega, A_b$ |
| | 1.6 - 2.0 | 1.8 - 4.5 | $d\sigma/d\Omega$ |
| π^0p | 1.1 - 1.38 | 0.16 - 0.36 | $d\sigma/d\Omega$ |
| | 1.1 - 1.68 | 0.4 - 1.8 | $d\sigma/d\Omega, A_b, A_t, A_{bt}$ |
| | 1.1 - 1.39 | 3.0 - 6.0 | $d\sigma/d\Omega$ |
| $\eta\rho$ | 1.5 - 2.3 | 0.2 - 3.1 | $d\sigma/d\Omega$ |
| $K^+\Lambda$ | 1.61 - 2.6 | 1.4 - 3.9 | $d\sigma/d\Omega$ |
| | | 0.7 - 5.4 | P^0, P' |
| $K^+\Sigma^0$ | 1.69 - 2.6 | 1.4 - 3.9 | $d\sigma/d\Omega$ |
| | | 0.7 - 5.4 | P' |
| $\pi^+\pi^-p$ | 1.3 - 1.6 | 0.2 - 0.6 | 9 одномерных дифференциальных сечений |
| | 1.4 - 2.1 | 0.5 - 1.5 | |
| | 1.4 - 2.0 | 2.0 - 5.0 | |

К настоящему времени проведен ряд исследований [4, 5] с другими эксклюзивными каналами πN , $\pi\pi N$ и $\eta\rho$, которые предоставили информацию об амплитудах электровозбуждения большинства возбужденных нуклонных состояний в диапазоне масс до 1.8 ГэВ. Сводка имеющихся результатов представлена в таблице 2. Здесь показаны доступные интервалы по Q^2 и ряд возбужденных состояний, для которых были извлечены интересные амплитуды. Q^2 -распределения амплитуд электровозбуждения представлены на графиках 1 и 2. Дальнейшие исследования странных каналов послужат независимой проверкой полученных экспериментальных результатов.

Таблица 2: Кинематические области извлеченных амплитуд электровозбуждения.

| Каналы | Возбужденные нуклонные состояния | Q^2 , GeV ² |
|-------------------|--|--------------------------|
| $\pi^0 p \pi^+ n$ | $\Delta(1232)3/2^+$ | 0.16 – 6.0 |
| | $N(1440)1/2^+$ $N(1520)3/2^-$ $N(1535)1/2^-$ | 0.3 – 4.16 |
| $\pi^+ n$ | $N(1675)5/2^-$ $N(1680)5/2^+$ $N(1710)1/2^+$ | 1.6 – 4.5 |
| $\eta \rho$ | $N(1535)1/2^-$ | 0.2 – 2.9 |
| $\pi^+ \pi^- p$ | $N(1440)1/2^+$ $N(1520)3/2^-$ | 0.25 – 1.5 |
| | $\Delta(1620)1/2^-$ $N(1650)1/2^-$ $N(1680)5/2^+$ | 0.5 – 1.5 |
| | $\Delta(1700)3/2^-$ $N(1720)3/2^+$ $N'(1720)3/2^+$ | |

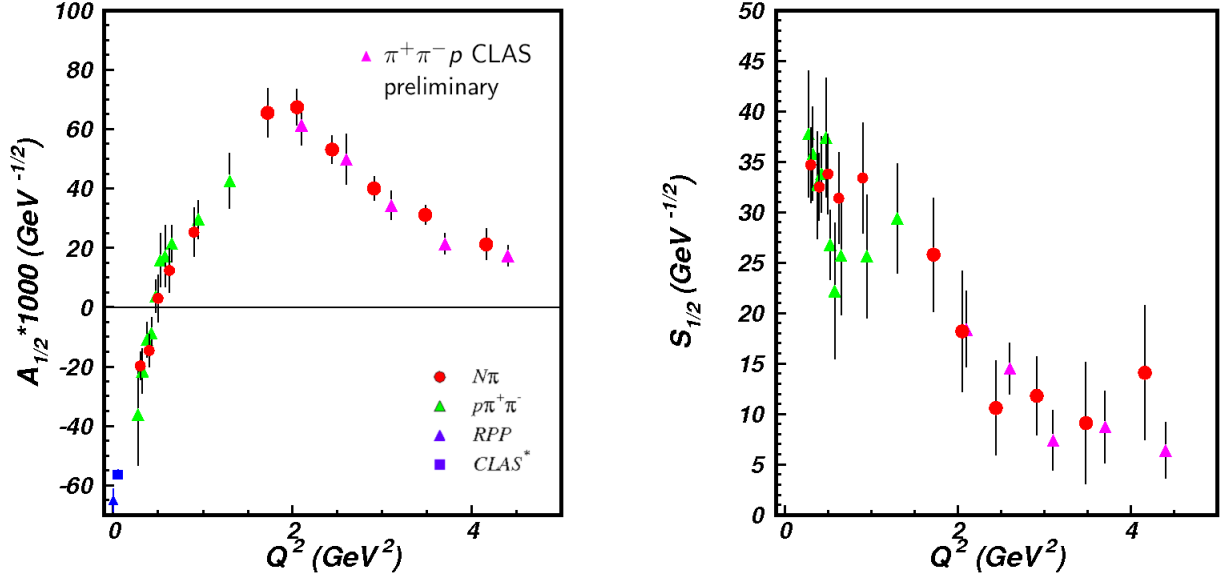


Рис. 1: Амплитуды электровозбуждения $N(1440)1/2^+$, полученные в результате независимых исследований двух основных каналов электроруждения πN и $\pi^+ \pi^- p$.

Большинство возбужденных нуклонных состояний с массой выше 1.6 ГэВ распадаются преимущественно с испусканием двух пионов (рис. 2), и до сих пор экспериментальные результаты для высоколежащих возбужденных состояний нуклонов были получены только при исследовании двухпионного канала [6].

Полезно сравнить эти результаты с амплитудами, доступными из других эксклюзивных каналов. Однопионный канал не обладает достаточной чувствительностью к этим состояниям. Странные каналы таким недостатком не обладают, что делает их прекрасным объектом для исследования высоколежащих возбужденных состояний нуклона.

Недавно было установлено несколько новых барионных состояний (рис. 3) в результате глобального многоканального анализа эксклюзивных наблюдаемых фото- и электроруждения мезонов [7]. Решающий вклад в эти исследования внесли результаты фоторуждения странных каналов.

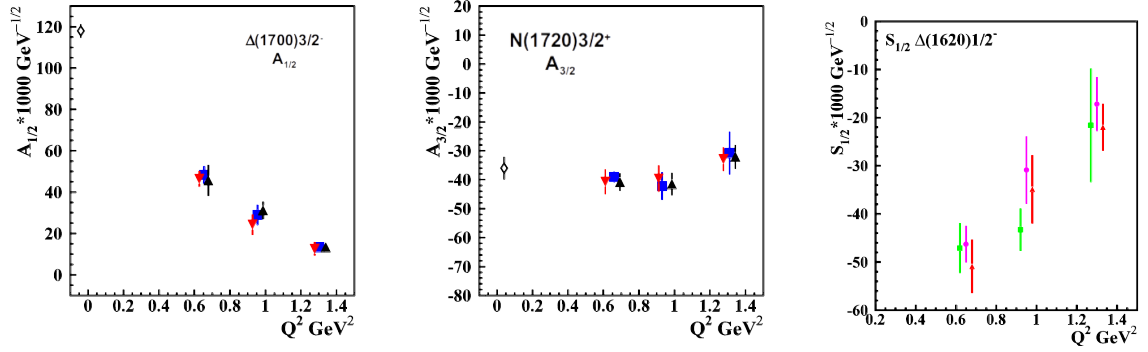
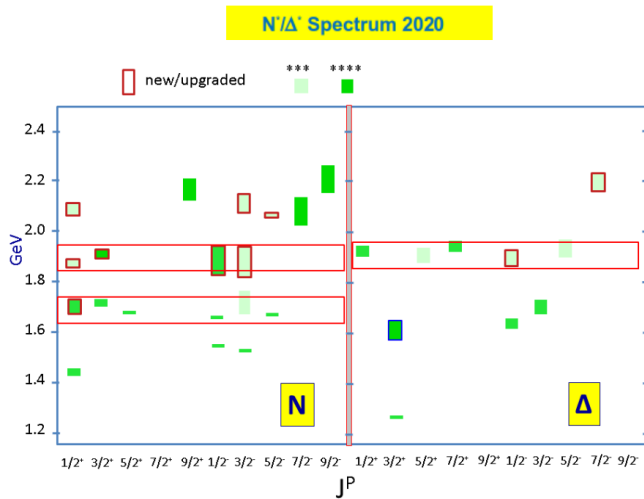


Рис. 2: Амплитуды электровозбуждения $\Delta(1700)3/2^-$, $N(1720)3/2^+$, $\Delta(1620)1/2^-$ (слева направо). Результаты приведены для следующих интервалов по W : $W \in [1.51, 1.61]$ ГэВ - зеленый; $W \in [1.61, 1.71]$ ГэВ - красный; $W \in [1.71, 1.81]$ ГэВ - черный; $W \in [1.56, 1.66]$ ГэВ - маджента; $W \in [1.66, 1.76]$ ГэВ - синий.

Следующим шагом в этой работе является совместное изучение каналов фото- и электророждения. Если нуклонный резонанс наблюдается в фоторождении, его можно наблюдать и в электророждении. Соответственно параметры, извлеченные из данных электророждения, такие как масса, полная ширина нуклонного резонанса, должны быть такими же, как и в фотонной точке. Поэтому исследования электророждения $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$ позволят укрепить доказательства наблюдения новых барионных состояний.



Нуклонные резонансы в PDG

| State N(mass)J ^P | PDG pre 2012 | PDG 2020* |
|--------------------------------|-----------------|-----------|
| N(1710)1/2* | *** | **** |
| N(1880)1/2* | | *** |
| N(1895)1/2 | | **** |
| N(1900)3/2* | ** | **** |
| N(1875)3/2 | | *** |
| N(2100)1/2* | * | *** |
| N(2120)3/2 | | *** |
| N(2000)5/2* | * | ** |
| N(2060)5/2 | | *** |
| $\Delta(1600)3/2^*$ | *** | **** |
| $\Delta(1900)1/2$ | ** | *** |
| $\Delta(2200)7/2$ | * | *** |

Рис. 3: Спектр возбужденных нуклонных состояний (слева). Зеленые прямоугольники соответствуют всем известным барионным состояниям. Список известных нуклонных состояний (справа). Красные прямоугольники указывают на новые барионные состояния.

2 Цели работы

Основным источником информации о наблюдаемых процессах электророжения является детектор CLAS12 Лаборатории Джефферсона [1]. Специфика такого спектрометра позволяет исследовать особенности неупругого (e, p) взаимодействия в резонансной области.

В рамках данной работы объектом интереса служат эксклюзивные каналы электророжения каонов на протоне $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$.

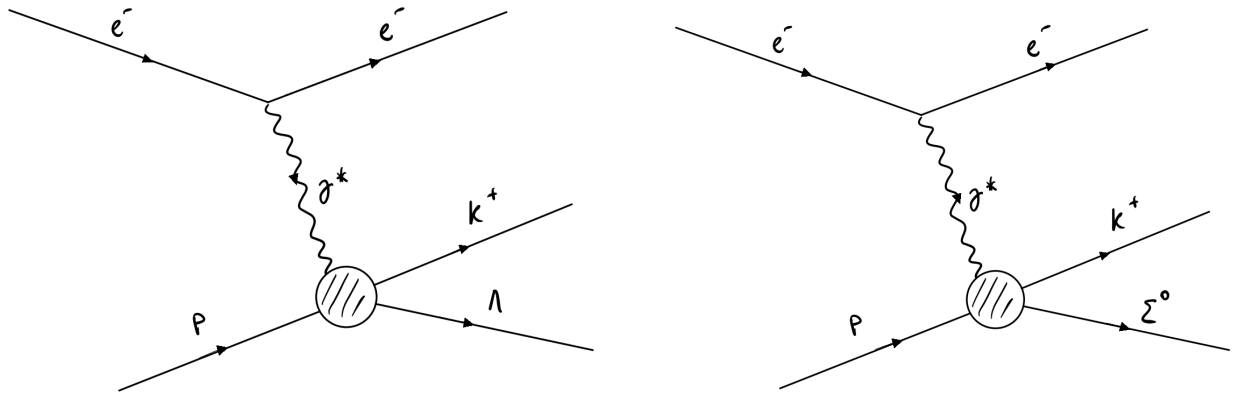


Рис. 4: Диаграммы Фейнмана рассматриваемых каналов электророжения: канал $K^+\Lambda$ (слева); канал $K^+\Sigma^0$ (справа).

К настоящему моменту проведен ряд исследований этих реакций в обширной кинематической области при различных энергиях пучка. Экспериментальные результаты представлены в виде набора средних значений структурных функций и дифференциальных сечений в достаточно ограниченной области фазового пространства. В таком виде данные проблематично использовать для дальнейшего анализа, разработки модельных предположений и извлечения амплитуд электровозбуждения резонансов, вносящих вклад в эти реакции.

Целью данной работы служит разработка алгоритмов и процедур интерполяции и экстраполяции известных экспериментальных данных. Такие методы позволят получить доступ к любой области фазового пространства реакции. Это облегчит выработку модельных предположений и, в дальнейшем, поспособствует развитию процедур извлечения амплитуд электровозбуждения резонансов.

Более того, имея возможность рассчитать неполяризованное сечение реакции для любых кинематических переменных, можно извлечь поляризованные структурные функции из нового набора данных CLAS12.

В данной работе представлен инструмент для оценки дифференциальных сечений реакций электророжения $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$ на протонах в широком диапазоне кинематических переменных реакции.

3 Алгоритм интерполяции структурных функций для эксклюзивных каналов электророждения $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$ на протонах из экспериментальных данных CLAS

В данной работе используются экспериментальные данные CLAS с неполяризованной протонной мишенью при энергиях пучка электронов 2.567, 4.056 и 5.499 ГэВ [8, 10]. В качестве отправной точки использовались результаты анализа дифференциальных сечений процессов электророждения $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$ в виде структурных функций $\frac{d\sigma_U}{d\Omega_K}$, $\frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega_K}$ и $\frac{d\sigma_{LT}}{d\Omega_K}$. Данные охватывают широкие диапазоны переданного импульса $Q^2 \in [0.65, 3.45]$ ГэВ² и инвариантной массы конечной адронной системы $W \in [M(K^+Y), 2.575]$ ГэВ, где Y - интересующий гиперон и $M(K^+Y)$ - инвариантная масса системы K^+Y в системе центра масс γ^*p .

3.1 Формализм

Разработанный инструмент использует полностью экспериментальные данные для оценки сечения без модельных предположений. Основная часть работы по созданию программы была связана с интерполяцией известных данных. Также были реализованы различные процедуры экстраполяции в кинематической области, где экспериментальные данные еще недоступны или их недостаточно.

Для оценки дифференциального сечения было использовано приближение однофотонного обмена. Дифференциальное сечение выражается через структурные функции, каждая из них несет определенный физический смысл и зависит только от трех параметров: W - инвариантная масса конечной адронной системы, Q^2 - виртуальность фотона и $\cos\theta$ - косинус полярного угла разлета каона в системе центра масс γ^*p . От энергии пучка они не зависят, что позволяет объединять результаты различных экспериментов.

Анализ дифференциального сечения проводился в следующем соглашении:

$$\frac{d\sigma}{dQ^2 dW d\Omega_K} = \Gamma_{\gamma^*} \frac{d\sigma_{\gamma^*}}{d\Omega_K},$$

$$\frac{d\sigma_{\gamma^*}}{d\Omega_K} = \frac{d\sigma_T}{d\Omega_K} + \varepsilon \frac{d\sigma_L}{d\Omega_K} + \sqrt{\varepsilon(1+\varepsilon)} \frac{d\sigma_{LT}}{d\Omega_K} \cos\varphi + \varepsilon \frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega_K} \cos 2\varphi, \quad (1)$$

где φ - азимутальный угол разлета каона в системе центра масс γ^*p , а ε - поперечная поляризация виртуального фотона.

Поток виртуальных фотонов Γ_{γ^*} и поперечная поляризация ε задаются соотношениями:

$$\Gamma_{\gamma^*} = \frac{\alpha}{4\pi} \frac{W}{M_p^2 E^2} \frac{W^2 - M_p^2}{Q^2} \frac{1}{1 - \varepsilon}, \quad \varepsilon = \left(1 + 2 \frac{|\vec{q}|^2}{Q^2} \tan^2 \frac{\theta_{e'}}{2}\right)^{-1}.$$

На рисунке 5 представлены доступные экспериментальные данные по каналам $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$, полученные с помощью детектора CLAS.

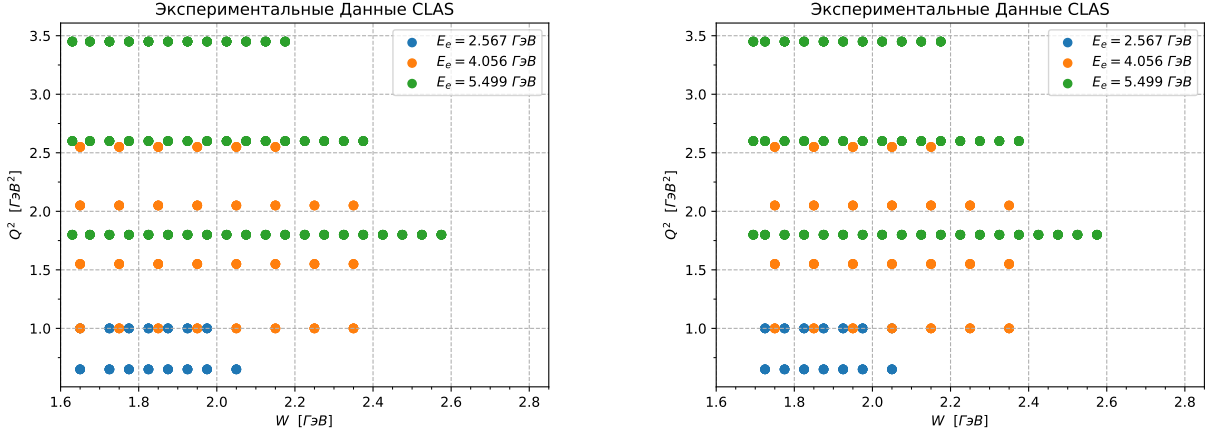


Рис. 5: Иллюстрация наборов экспериментальных структурных функций CLAS для трех энергий пучка: канал $K^+\Lambda$ (слева); канал $K^+\Sigma^0$ (справа).

На иллюстрации №5 приведена сетка экспериментальных данных в осях W и Q^2 . Каждый узел приведенной сетки соответствует распределению структурных функций по оси $\cos \theta$. Всего представлено три различных набора экспериментальных данных, соответствующих энергиям пучка электронов 2.567, 4.056 и 5.499 ГэВ.

3.2 Экспериментальные структурные функции

Главной задачей данного инструмента является предсказание дифференциального сечения процессов электророждения $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$ в широких диапазонах переменных реакции. Экспериментальные данные по электророждению странных каналов представлены в виде структурных функций $\frac{d\sigma_U}{d\Omega_K}(E, W, Q^2, \cos \theta)$, $\frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega_K}(W, Q^2, \cos \theta)$ и $\frac{d\sigma_{LT}}{d\Omega_K}(W, Q^2, \cos \theta)$, где неполяризованная структурная функция $\frac{d\sigma_U}{d\Omega_K}(E, W, Q^2, \cos \theta)$ зависит от энергии пучка E :

$$\frac{d\sigma_U}{d\Omega_K} = \frac{d\sigma_T}{d\Omega_K} + \varepsilon \frac{d\sigma_L}{d\Omega_K}. \quad (2)$$

Данная неполяризованная структурная функция может быть представлена как комбинация структурных функций $\frac{d\sigma_T}{d\Omega_K}(W, Q^2, \cos \theta)$ и $\frac{d\sigma_L}{d\Omega_K}(W, Q^2, \cos \theta)$, отвечающих поперечной и продольной поляризации виртуального фотона соответственно. Зависимой от энергии пучка в данном представлении будет являться только поляризация виртуального фотона ε . Зная отношение вкладов поперечной и продольной структурной функции в дифференциальное сечение, можно разделить неполяризованную составляющую на соответствующую

щие части. Данная процедура позволяет прийти к набору данных, зависящих только от 3-х переменных ($W, Q^2, \cos \theta$).

В качестве отношения структурных функций использовалось приближение:

$$\frac{d\sigma_L}{d\Omega_K} : \frac{d\sigma_T}{d\Omega_K} = 0.2. \quad (3)$$

Используя соотношения (2) и (3), можно оценить значения структурных функций $\frac{d\sigma_T}{d\Omega_K}(W, Q^2, \cos \theta)$ и $\frac{d\sigma_L}{d\Omega_K}(W, Q^2, \cos \theta)$:

$$\frac{d\sigma_T}{d\Omega_K} = \frac{d\sigma_U}{d\Omega_K} \frac{1}{1 + 0.2\varepsilon}, \quad \frac{d\sigma_L}{d\Omega_K} = \frac{d\sigma_U}{d\Omega_K} \frac{1}{5 + \varepsilon}.$$

Таким образом, данное допущение позволяет оценить значения всех структурных функций для любых кинематических переменных ($W, Q^2, \cos \theta$). Другими словами, набор экспериментальных структурных функций преобразуется в набор коэффициентов выражения (1), независящих от энергии пучка. Такой результат позволяет оценить значение дифференциального сечения для любой энергии налетающих электронов, так как зависимость от этой величины исходит только от поляризации фотонов.

Рисунок 6 иллюстрирует полученный результат.

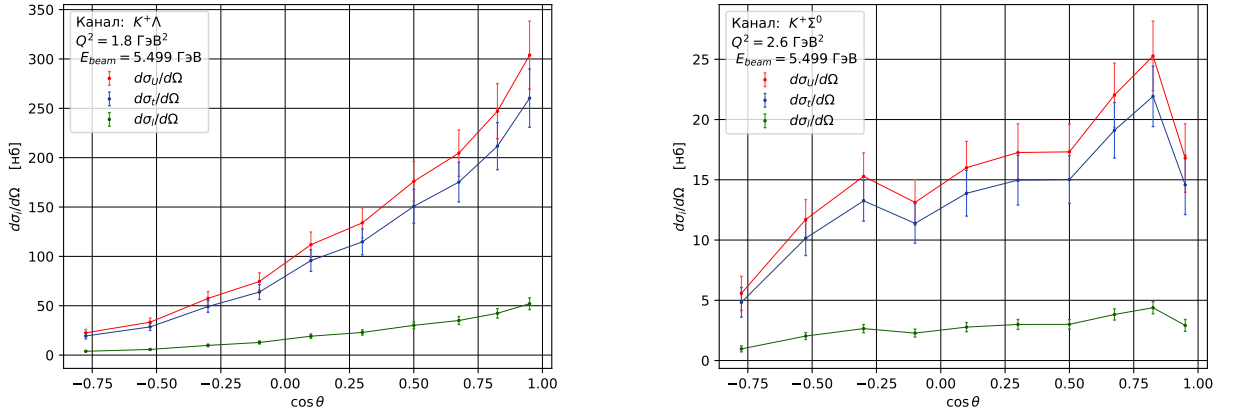


Рис. 6: Вклады $\frac{d\sigma_T}{d\Omega_K}$ (синяя линия) и $\frac{d\sigma_L}{d\Omega_K}$ (зеленая линия) в структурную функцию $\frac{d\sigma_U}{d\Omega_K}$ (красная линия) при энергии пучка $E_{beam} = 5.499$ ГэВ: канал $K^+\Lambda$ (слева); канал $K^+\Sigma^0$ (справа).

3.3 Интерполяция эксклюзивных структурных функций

Для успешной реализации поставленной задачи необходимо получить доступ ко всему интересующему фазовому пространству реакции электророждения странных каналов: $W \in [M_Y, 2.65]$ ГэВ, $Q^2 \in [0, 5]$ ГэВ² и $\cos \theta \in [-1, 1]$. Выбор диапазонов кинематических величин обусловлен техническими возможностями усовершенствованного детектора CLAS12. Так как исходные данные представлены в виде сетки в осях ($W, Q^2, \cos \theta$), то, в

первую очередь, необходимо реализовать интерполяционную процедуру.

Интерполяция известных значений структурных функций была произведена в два этапа:

1. Аппроксимация экспериментальных данных по оси $\cos\theta$ - косинус полярного угла разлета каона в системе центра масс γ^*p с помощью первых 5-ти полиномов Лежандра.

$$\frac{d\sigma_{T/L}}{d\Omega_K} = A \cdot P_0(\cos\theta) + B \cdot P_1(\cos\theta) + C \cdot P_2(\cos\theta) + D \cdot P_3(\cos\theta) + E \cdot P_4(\cos\theta),$$

$$\frac{d\sigma_{LT}}{d\Omega_K} = \sin\theta (A \cdot P_0(\cos\theta) + B \cdot P_1(\cos\theta) + C \cdot P_2(\cos\theta) + D \cdot P_3(\cos\theta) + E \cdot P_4(\cos\theta)),$$

$$\frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega_K} = \sin^2\theta (A \cdot P_0(\cos\theta) + B \cdot P_1(\cos\theta) + C \cdot P_2(\cos\theta) + D \cdot P_3(\cos\theta) + E \cdot P_4(\cos\theta)).$$

Количество полиномов ограничено сверху объемом экспериментальных данных. Было выявлено, что 5 полиномов обеспечивают хорошее описание экспериментальных точек и гарантируют адекватные результаты во всем кинематическом диапазоне.

Данная процедура позволила получить распределения структурных функций во всем диапазоне значений $\cos\theta$ для всех доступных точек (W, Q^2) . Рис. 7 и 8 иллюстрируют сравнение данной процедуры с экспериментальными точками для структурных функций $\frac{d\sigma_{LT}}{d\Omega_K}$ и $\frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega_K}$. Для вычисления ошибок наблюдаемых используется алгоритм аппроксимации погрешностей кубическим сплайном.

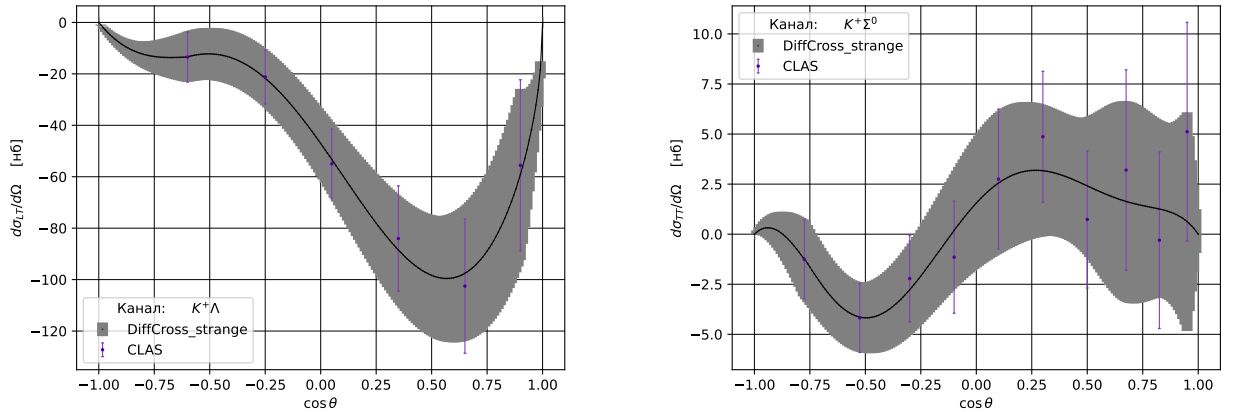


Рис. 7: Интерполяция структурных функций: $\frac{d\sigma_{LT}}{d\Omega_K}$ для канала $K^+\Lambda$, $Q^2 = 0.65$ ГэВ² и $W = 1.725$ ГэВ (слева); $\frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega_K}$ для канала $K^+\Sigma^0$, $Q^2 = 2.6$ ГэВ² и $W = 1.975$ ГэВ (справа).

2. Билинейная интерполяция [9] экспериментальных данных по осям W и Q^2 . Суть этого метода заключается в последовательной линейной интерполяции значений структурных функций сначала по одной оси W , а затем по другой Q^2 .

Приведенные процедуры интерполяции позволяют получить доступ ко всем структурным функциям $\frac{d\sigma_T}{d\Omega_K}$, $\frac{d\sigma_L}{d\Omega_K}$, $\frac{d\sigma_{LT}}{d\Omega_K}$ и $\frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega_K}$ в ограниченной области фазового пространства и для всех значений $\cos\theta$. Для практического применения разработанного инструмента такое ограничение не позволяет использовать его в исследовательских целях. Дальнейшая экстраполяция полученного результата позволит работать с новыми экспериментальными данными CLAS12.

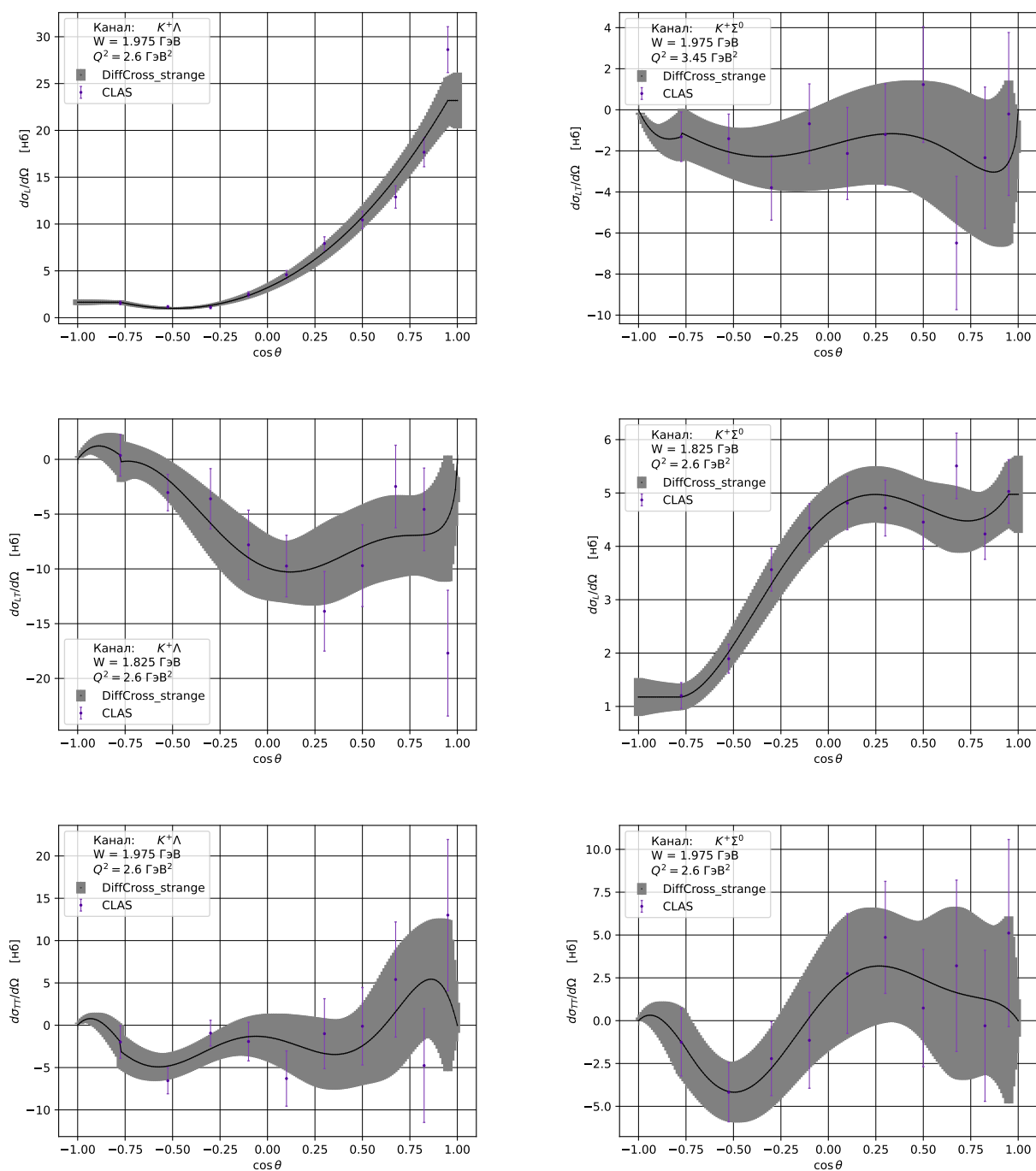


Рис. 8: Интерполяция структурных функций $\frac{d\sigma_T}{d\Omega_K}$, $\frac{d\sigma_L}{d\Omega_K}$, $\frac{d\sigma_{LT}}{d\Omega_K}$ и $\frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega_K}$: канал $K^+\Lambda$ (слева); канал $K^+\Sigma^0$ (справа).

4 Алгоритм экстраполяции структурных функций для эксклюзивных каналов электророждения $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$ на протонах из экспериментальных данных CLAS

4.1 Расширение доступного фазового пространства

Для увеличения зоны практического применения данного инструмента было произведено расширение области доступного фазового пространства, подходящего под интерполяционные процедуры. Основная идея данного шага заключалась в симуляции псевдоданных в области больших $W \in [2.4, 2.6]$ ГэВ и $Q^2 \in [1.8, 3.45]$ ГэВ². Метод генерации псевдоданных основан на известном распределении структурных функций по оси W для $Q^2 = 1.8$ ГэВ² в диапазоне $W \in [2.4, 2.6]$ ГэВ. В результате, используя известные экспериментальные точки для больших значений $Q^2 = 2.6$ ГэВ² и $Q^2 = 3.45$ ГэВ² при меньших $W < 2.4$ ГэВ, получилось восстановить распределение вдоль $W > 2.4$ ГэВ для этих значений Q^2 . В итоге, имеющиеся экспериментальные точки были дополнены сеткой значений структурных функций с аналогичным шагом по W , Q^2 и $\cos \theta$ в области $W \in [2.4, 2.6]$ ГэВ и $Q^2 \in [1.8, 3.45]$ ГэВ².

$$\frac{d\sigma_i}{d\Omega_K}(W_{i+1}, Q^2 = 2.6 \text{ ГэВ}^2, \cos \theta) = \frac{d\sigma_i}{d\Omega_K}(W_{i+1}, Q^2 = 1.8 \text{ ГэВ}^2, \cos \theta) \times \\ \times \frac{d\sigma_i}{d\Omega_K}(W_i, Q^2 = 2.6 \text{ ГэВ}^2, \cos \theta) : \frac{d\sigma_i}{d\Omega_K}(W_i, Q^2 = 1.8 \text{ ГэВ}^2, \cos \theta).$$

Такой метод позволил расширить область фазового пространства для работы алгоритмов интерполяции. Сравнение W -распределений представлено на рисунке 9.

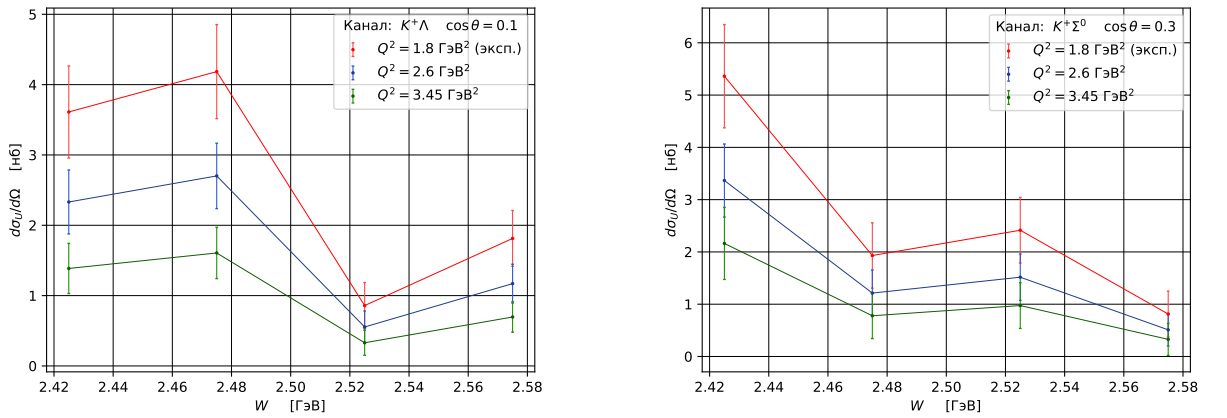


Рис. 9: Сравнение предсказанных структурных функций при $Q^2 = 2.6$ ГэВ² (синий) и $Q^2 = 3.45$ ГэВ² (зеленый) с экспериментальными при $Q^2 = 1.8$ ГэВ² (красный): канал $K^+\Lambda$ (слева); канал $K^+\Sigma^0$ (справа).

4.2 Экстраполяция структурных функций по Q^2

Экспериментальные данные по эксклюзивным структурным функциям реакций электроорождения каналов $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$ ограничены интервалом $Q^2 \in [0.65, 3.45]$ ГэВ². Известно, что сечение любой реакции электроорождения сильно зависит от виртуальности фотона: распределения резко падают с ростом Q^2 . Соответственно, ограничивая область анализа данных $Q^2 > 0.65$ ГэВ² при работе с детектором, теряется большая выборка измерений. Чтобы задействовать нашу программу во всей интересующей области фазового пространства, необходимо реализовать дополнительные экстраполяционные методы по оси Q^2 .

Практическую ценность при работе с новыми экспериментальными данными CLAS12 будет иметь инструмент с полным покрытием кинематической области вплоть до $Q^2 < 5.0$ ГэВ². Для достижения этой цели было реализовано 3 независимых метода оценки структурных функций: 2 в области малых значений $Q^2 < 0.65$ ГэВ² и 1 в области $Q^2 > 3.45$ ГэВ².

4.2.1 Случай $Q^2 > 3.45$ ГэВ²

В этой области используется экстраполяция всех структурных функций из области интерполяции с помощью степенной функции:

$$\frac{d\sigma_i}{d\Omega_K} = A + \frac{B}{Q^2} + \frac{C}{Q^4}.$$

На графиках 10 и 11 приведено сравнение результатов интерполяции данных для $Q^2 = 3.45$ ГэВ² с экстраполяцией в область больших значений Q^2 .

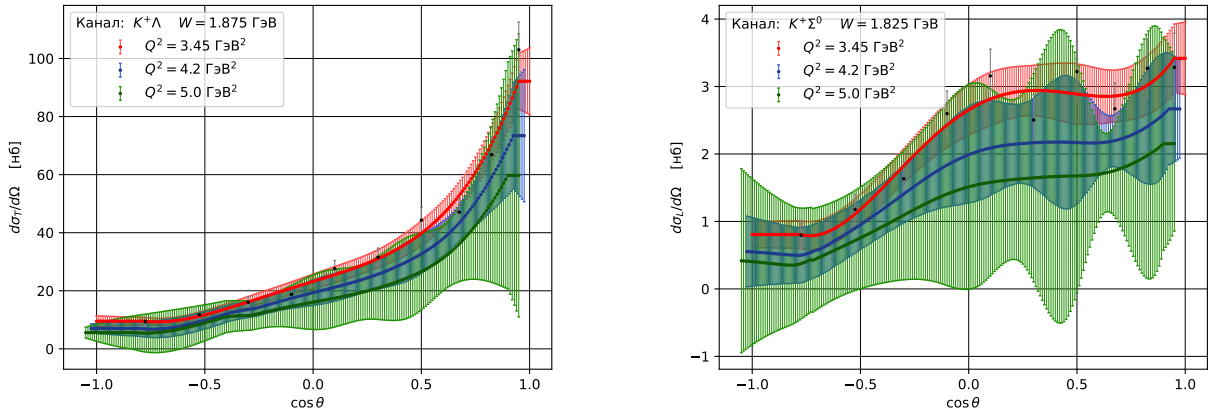


Рис. 10: Экстраполяция в область $Q^2 > 3.45$ ГэВ². Сравнение распределений структурных функций для разных значений Q^2 : $\frac{d\sigma_T}{d\Omega_K}$ для канала $K^+\Lambda$ (слева); $\frac{d\sigma_L}{d\Omega_K}$ для канала $K^+\Sigma^0$ (справа). Черные точки - экспериментальные данные. Цветные линии - результат экстраполяции: красный - $Q^2 = 3.45$ ГэВ², синий - $Q^2 = 4.2$ ГэВ², зеленый - $Q^2 = 5.0$ ГэВ².

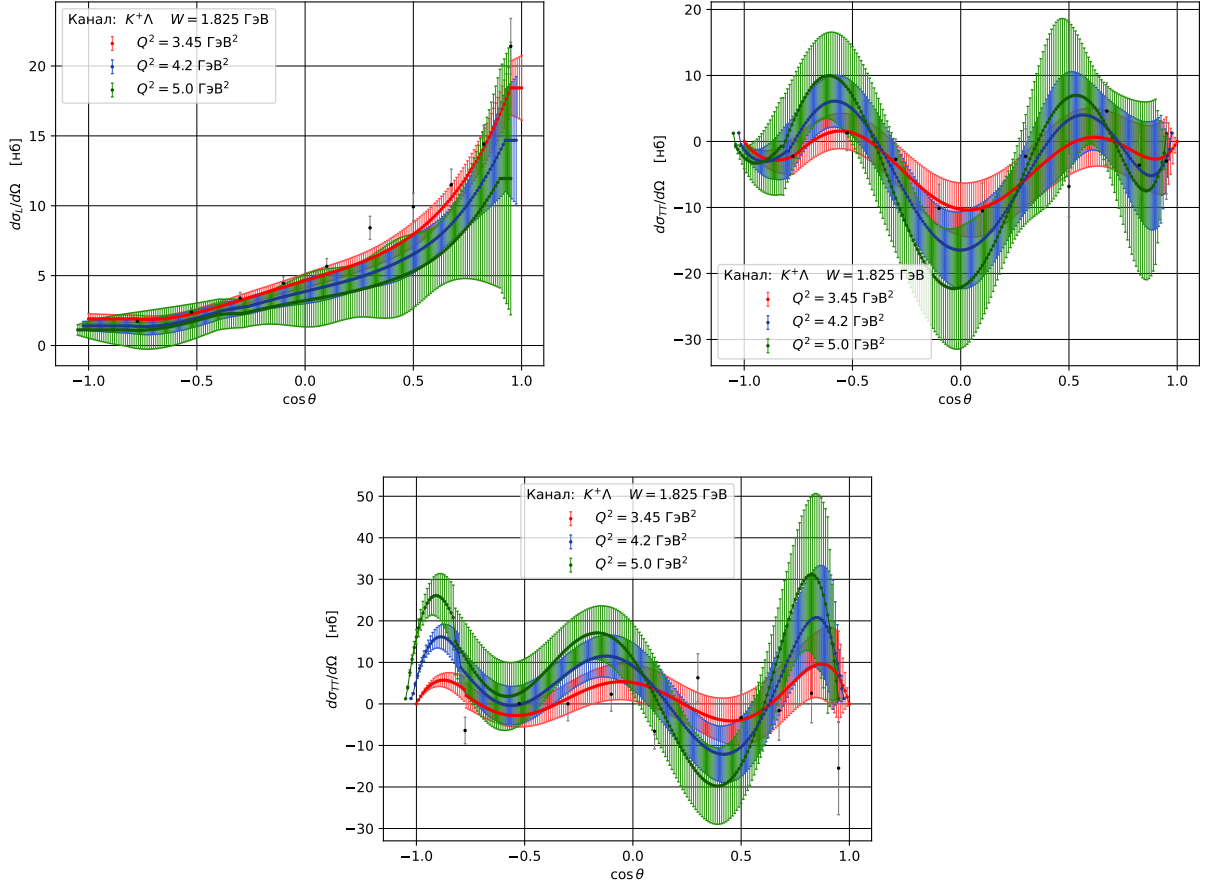


Рис. 11: Экстраполяция в область $Q^2 > 3.45$ ГэВ². Сравнение распределений структурных функций $\frac{d\sigma_L}{d\Omega_K}$ и $\frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega_K}$ для разных значений Q^2 : канал $K^+\Lambda$ (слева); канал $K^+\Sigma^0$ (справа). Черные точки - экспериментальные данные. Цветные линии - результат экстраполяции: красный - $Q^2 = 3.45$ ГэВ², синий - $Q^2 = 4.2$ ГэВ², зеленый - $Q^2 = 5.0$ ГэВ².

4.2.2 Случай $Q^2 < 0.65$ ГэВ²

В области малых значений Q^2 нет возможности использовать степенную функцию для экстраполяции, так как особенность при $Q^2 = 0$ ГэВ² будет приводить к нефизическому результату. Эту проблему можно обойти, используя данные фоторождения [11], полученные из эксперимента с мечеными фотонами. Данные по фоторождению будут прекрасным дополнением к имеющимся экспериментальным результатам электророждения в области малых Q^2 . В данных реакциях фотон участвует как реальная частица с квадратом 4-вектора импульса $Q^2 = 0$ ГэВ². Используя эти результаты, можно предсказать любую структурную функцию в области $Q^2 \in [0, 0.65]$ ГэВ².

По аналогии с данными электророждения, данные фоторождения представлены в виде сетки в осях $(W, \cos \theta)$. Интерполируя имеющиеся данные по сечению фоторождения, можно извлечь значения структурной функции $\frac{d\sigma_T}{d\Omega_K}$ в фотонной точке (рис. 12).

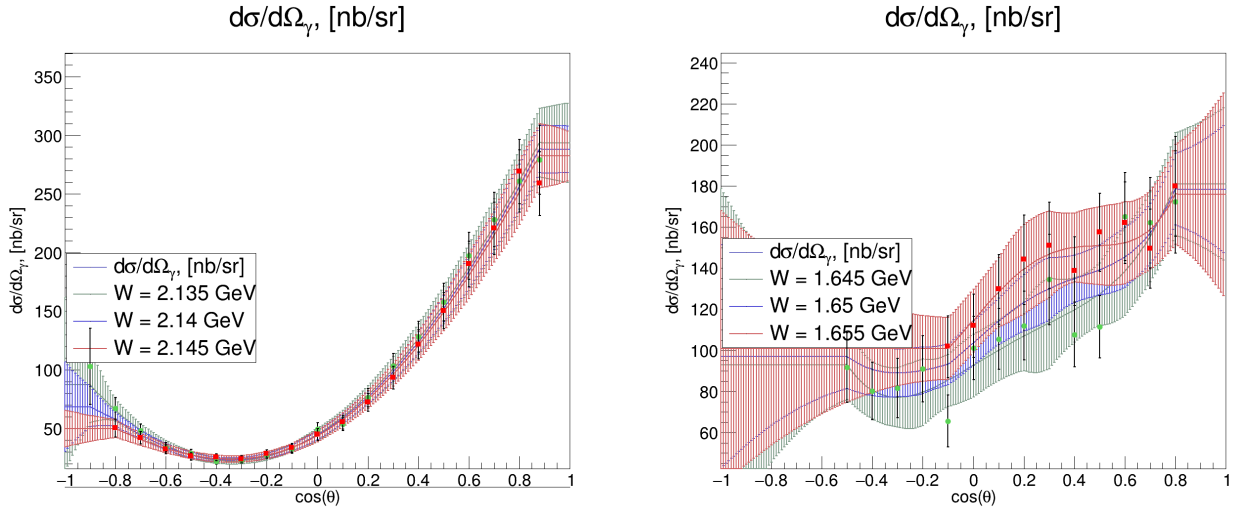


Рис. 12: Интерполяция дифференциального сечения фоторождения вдоль оси $\cos\theta$: канал $K^+\Lambda$. Распределения представлены для 3-х значений инвариантной массы конечной адронной системы. Точки соответствующего цвета обозначают экспериментальные данные.

Так как реальный фотон не обладает продольной поляризацией, структурные функции $\frac{d\sigma_L}{d\Omega_K}$ и $\frac{d\sigma_{LT}}{d\Omega_K}$ не имеют смысла при $Q^2 = 0$ ГэВ². В рамках данной задачи, мы приняли их равными нулю в фотонной точке.

Для вычисления структурной функции $\frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega_K}$ можно воспользоваться значениями наблюдаемой Σ -асимметрии (рис. 13):

$$\frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega_K}(W, Q^2 = 0 \text{ ГэВ}^2, \cos\theta) = (-1) \cdot \Sigma \cdot \frac{d\sigma_T}{d\Omega_K}(W, Q^2 = 0 \text{ ГэВ}^2, \cos\theta).$$

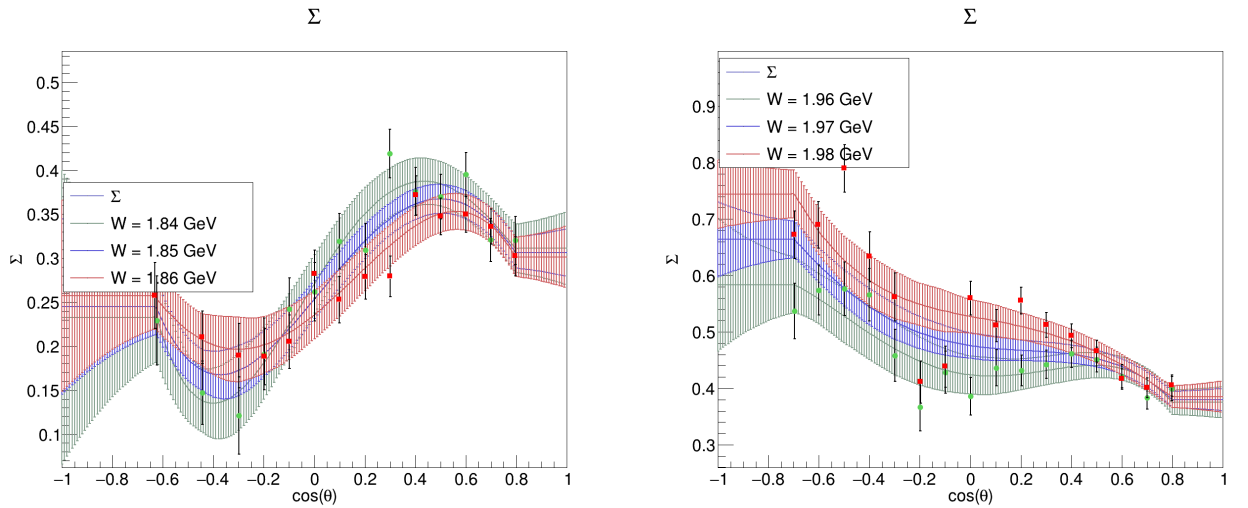


Рис. 13: Интерполяция Σ -асимметрии реакции фоторождения вдоль оси $\cos\theta$: канал $K^+\Lambda$. Распределения представлены для 3-х значений инвариантной массы конечной адронной системы. Точки соответствующего цвета обозначают экспериментальные данные.

Однако экспериментальные данные по этой наблюдаемой сильно ограничены в интервале по W :

- $W \in [1.72, 2.18]$ ГэВ для $K^+\Lambda$,
- $W \in [1.78, 2.17]$ ГэВ для $K^+\Sigma^0$.

По этой причине был реализован дополнительный метод для структурной функции $\frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega_K}$ в области $W > 2.17$ ГэВ, использующий известные экспериментальные наблюдения для этих каналов. В результате, в той кинематической области, где есть поддержка со стороны данных фоторождения, была осуществлена интерполяция между этими данными и данными электророждения по оси Q^2 . Для этого была использована интерполяция квадратичной функцией (рис. 14):

$$\frac{d\sigma_i}{d\Omega_K} = A \cdot Q^4 + B \cdot Q^2 + C.$$

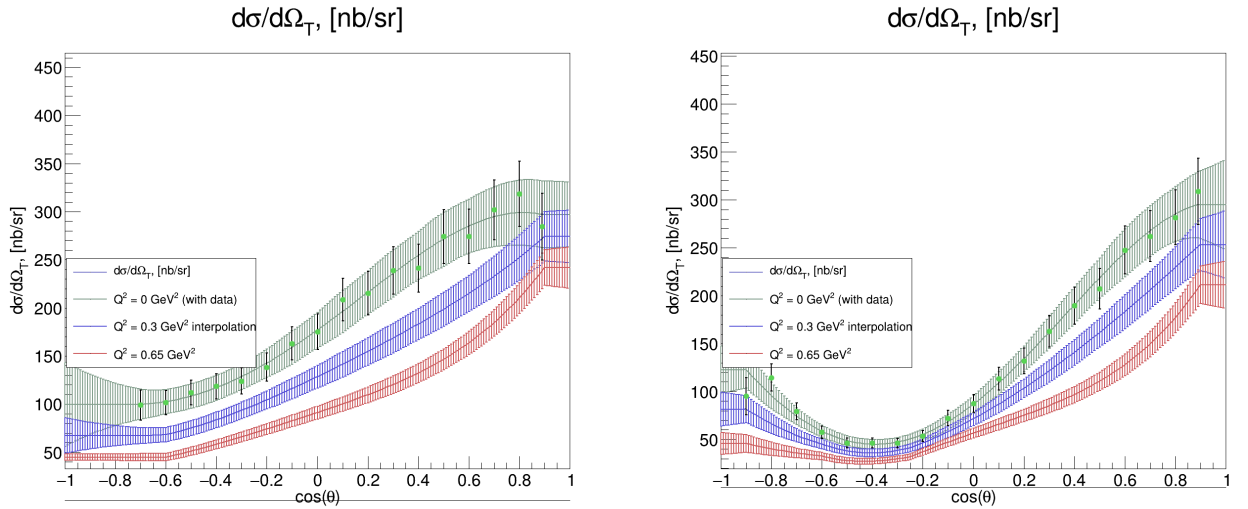


Рис. 14: Интерполяция структурных функций в области малых значений Q^2 : канал $K^+\Lambda$. Зеленая кривая - результат интерполяции сечения фоторождения; зеленые точки - экспериментальные данные сечения фоторождения; красная кривая - результат интерполяции экспериментальных данных электророждения. Синяя кривая - результат интерполяции между данными фото- и электророждения.

4.2.3 $\frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega_K}$ при $W \in [2.17, 2.65]$ ГэВ и $Q^2 \in [0, 1.8]$ ГэВ²

В предыдущих исследованиях коллаборации CLAS по странным каналам [10] указывалось, что при достаточно больших значениях W отношение структурной функции

$$\frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega_K} : \frac{d\sigma_T}{d\Omega_K} \approx const.$$

Данный факт позволил оценить структурную функцию $\frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega_K}$ в области $W \in [2.17, 2.65]$ ГэВ и $Q^2 \in [0, 1.8]$ ГэВ². Для этого был реализован следующий алгоритм действий:

1. Для всех известных экспериментальных точек при $W > 2.0$ ГэВ вычислены значения отношений $\frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega_K} : \frac{d\sigma_T}{d\Omega_K}$.
2. Произведено усреднение полученных значений по оси W .
3. Реализована линейная интерполяция нерегулярной сетки (рис. 15) значений отношений структурных функций в осях $(Q^2, \cos \theta)$.

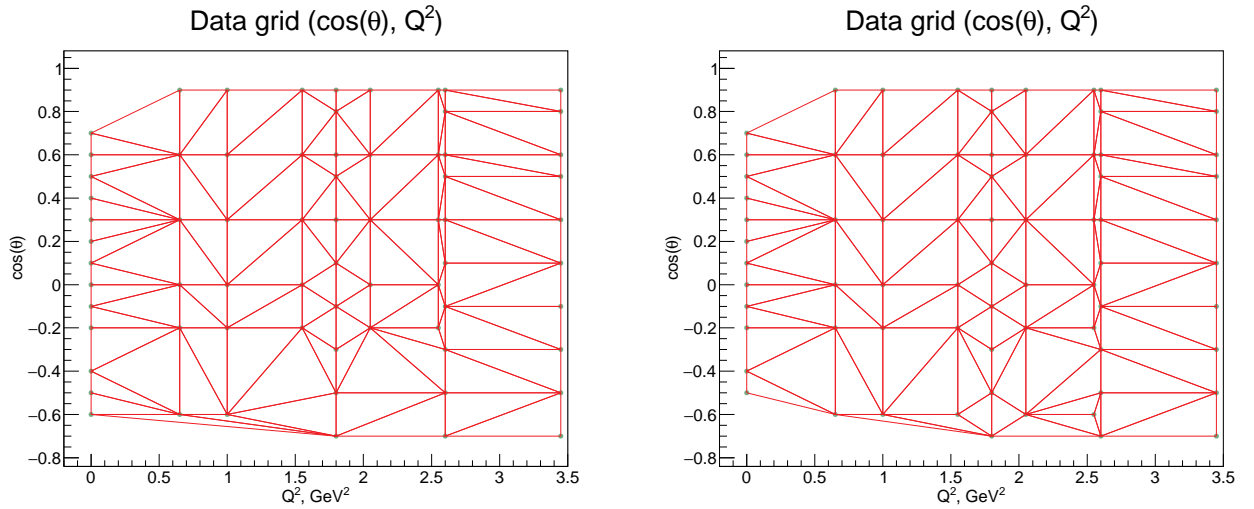


Рис. 15: Триангуляция Делоне сетки значений σ_{TT}/σ_T в осях $(Q^2, \cos \theta)$: канал $K^+\Lambda$ (слева); канал $K^+\Sigma^0$ (справа).

Таким образом был получен доступ к значениям отношений структурных функций $\frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega_K} : \frac{d\sigma_T}{d\Omega_K}$ для всех значений $W \in [2.17, 2.65]$ ГэВ, $Q^2 \in [0, 1.8]$ ГэВ² с полным охватом угла эмиссии каона с системе центра масс γ^*p . В качестве заключительного шага, используя интерполированные значения структурной функции $\frac{d\sigma_T}{d\Omega_K}$, были восстановлены значения структурной функции $\frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega_K}$. На рисунке 16 приведены результаты данной процедуры.

Для оценки значений $\frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega_K}(W, Q^2, \cos \theta)$ в области $W \in [2.17, 2.65]$ ГэВ, $Q^2 \in [0, 1.8]$ ГэВ² используется следующее соотношение:

$$\frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega_K}(W, Q^2, \cos \theta) = \left[\frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega_K} : \frac{d\sigma_T}{d\Omega_K} \right] (Q^2, \cos \theta) \cdot \frac{d\sigma_T}{d\Omega_K}(W, Q^2, \cos \theta).$$

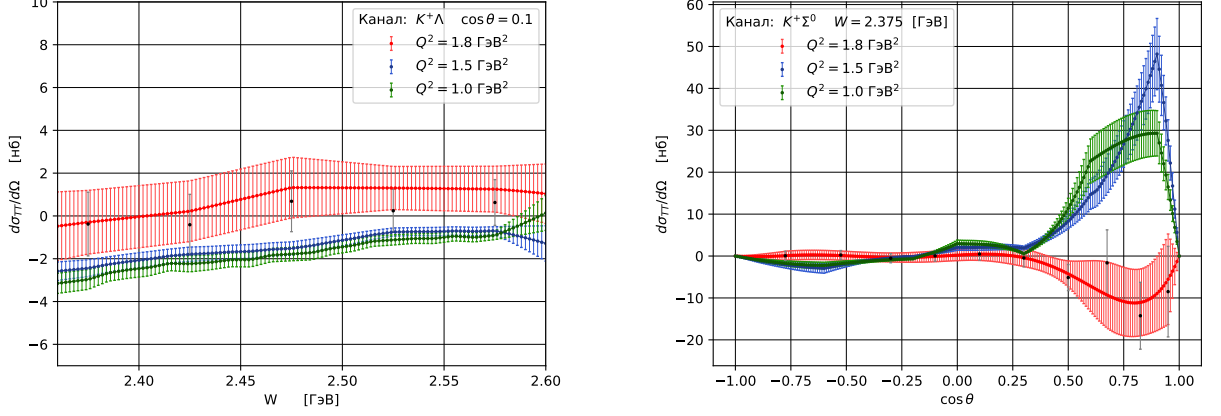


Рис. 16: Сравнение результатов предсказания структурной функции $\frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega_K}$ для различных значений Q^2 : распределение по W (слева); распределение по $\cos\theta$ (справа). Черные точки - экспериментальные результаты $\frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega_K}$. Красная, синяя и зеленая кривые - результат предсказания структурной функции $\frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega_K}$.

5 Описание программы и веб-сайта для оценки сечений каналов электророждения $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$

Приведенные процедуры интерполяции и экстраполяции структурных функций позволили рассчитать значения дифференциального сечения процесса для любых значений ($W, Q^2, \cos\theta$) и энергии пучка. В качестве заключительного этапа реализации данного инструмента была реализована процедура оценки данной наблюдаемой согласно следующему соотношению:

$$\frac{d\sigma_{\gamma^*}}{d\Omega_K} = \frac{d\sigma_T}{d\Omega_K} + \varepsilon \frac{d\sigma_L}{d\Omega_K} + \sqrt{\varepsilon(1+\varepsilon)} \frac{d\sigma_{LT}}{d\Omega_K} \cos\varphi + \varepsilon \frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega_K} \cos 2\varphi. \quad (4)$$

Цель реализованного инструмента состоит в оценке структурных функций при любых значениях ($W, Q^2, \cos\theta$). Так как выражение для дифференциального сечения представимо в явном виде относительно параметра φ , то для любой экспериментальной точки и для любого набора структурных функций, полученных с помощью данной программы, можно построить непрерывное распределение дифференциального сечения. Такое сравнение представлено на графике (рис. 17).

Для практических целей удобно работать со средними значениями этой величины. При анализе экспериментальных данных детектора CLAS12 основная работа будет вестись в отдельных бинах - ячейках фазового пространства в осях ($W, Q^2, \cos\theta$). Процедура усреднения дифференциального сечения сводится к следующему алгоритму:

- Определить сетку значений ($W, Q^2, \cos\theta$) в выделенном объеме фазового простран-

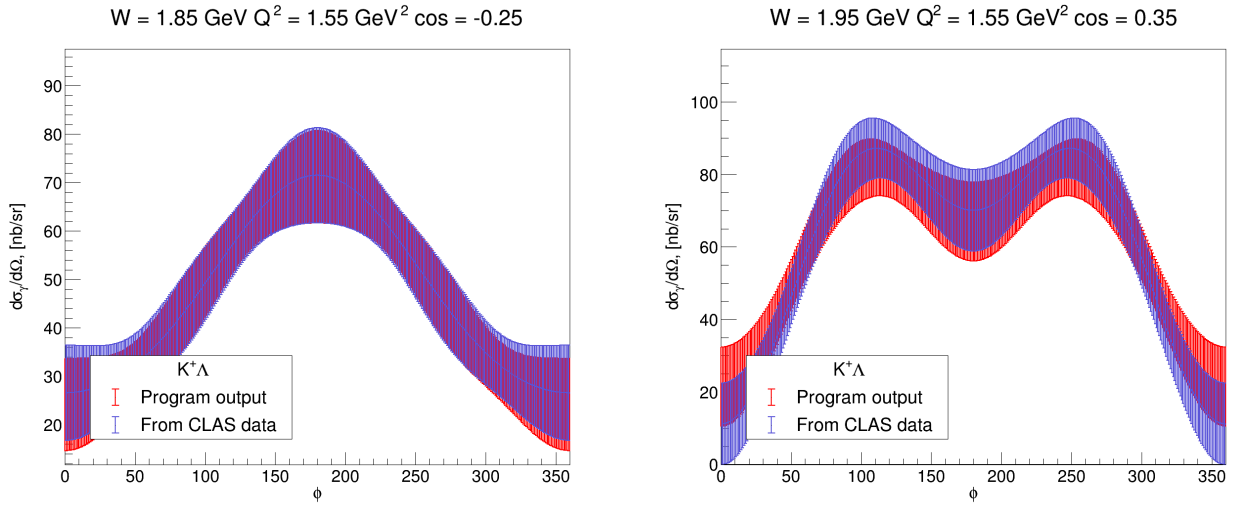


Рис. 17: Сравнение результатов предсказания дифференциального сечения с экспериментальными данными: Красная область - результат программы; синяя область - расчет дифференциального сечения на основе экспериментальных структурных функций

ства с шагом по $\Delta W = 10$ МэВ, $Q^2 = 0.1$ ГэВ², $\cos \theta = 0.1$ и $\phi = 15^\circ$.

- Расчет значений дифференциального сечения в каждом узле сетки.
- Усреднение полученных значений по общему числу узлов

$$\bar{\sigma}_N = \sum_{i=0}^N \frac{\sigma_i}{N} \xrightarrow{N \rightarrow \infty} \bar{\sigma}.$$

Рисунок 18 демонстрирует сравнение распределения дифференциального сечения, основанного на экспериментальных данных по структурным функциям, с результатом приведенной процедуры. В данном случае в качестве экспериментальных данных использовались значения структурных функций $\frac{d\sigma_U}{d\Omega_K}(E, W, Q^2, \cos \theta)$, $\frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega_K}(W, Q^2, \cos \theta)$ и $\frac{d\sigma_{LT}}{d\Omega_K}(W, Q^2, \cos \theta)$ при энергии пучка $E_{beam} = 4.056$ ГэВ. Данные величины представлены в виде коэффициентов выражения (4).

В результате была получена непрерывная зависимость распределения дифференциального сечения относительно угла ϕ между плоскостями реакций $e \rightarrow e'\gamma^*$ и $\gamma^*p \rightarrow K^+Y$ в системе центра масс γ^*p .

5.1 Техническая часть реализации инструмента

Реализация кода данного инструмента представлена на двух языках: C++ и Python - с использованием различных библиотек для визуализации результата и интерполяции экспериментальных данных. Исходный код программы опубликован для общего доступа и может быть найден по ссылке [12].

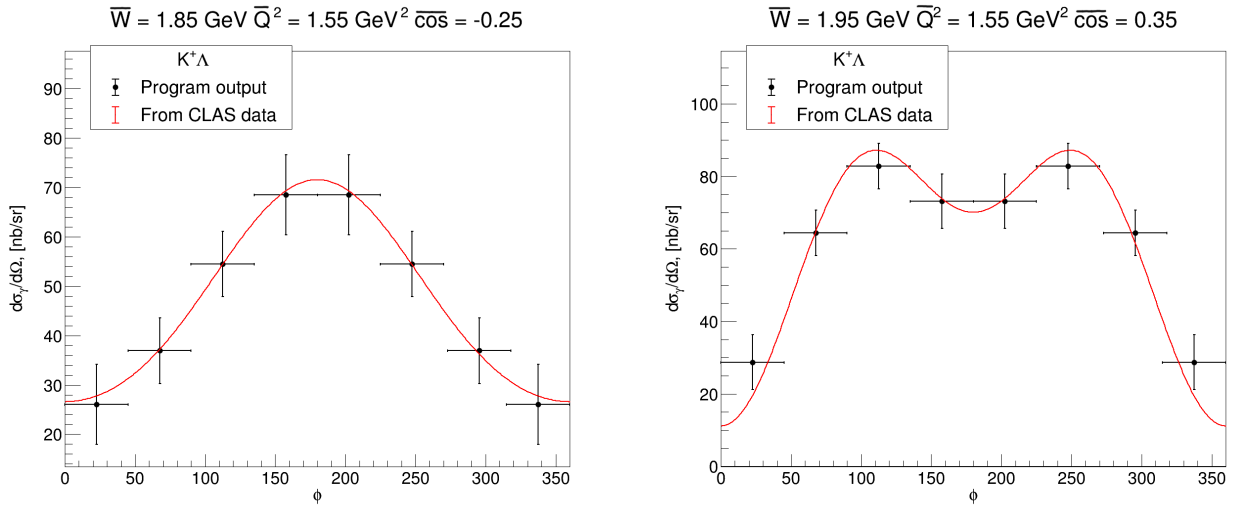


Рис. 18: Сравнение результатов расчета дифференциального сечения (черные точки) с оценкой дифференциального сечения на основе экспериментальных структурных функций (красная кривая).

Работа с программой осуществляется при помощи текстового файла `config.yaml`, структура которого приведена в Аппендиксе А.1.

Программа работает в 3-х режимах:

- Расчет дифференциального сечения/структурных функций в заданной сетке значений $(W, Q^2, \cos \theta, \varphi, E_{beam})$.
- Расчет средних значений дифференциальных сечений в заданной ячейке фазового пространства.
- Визуализация распределений дифференциального сечения/структурных функций по осям $(W, Q^2, \cos \theta, \varphi)$ в одномерном и двумерном виде.

Для комфортного использования данный инструмент был опубликован на веб-сайте НИИ ядерной физики имени Д. В. Скобельцына МГУ [13] (рис. 19).

Финальная версия программы включает в себя возможность расчета структурных функций и дифференциального сечения в любой точке фазового пространства реакции, расчет среднего значения сечения в определенном бине и визуализацию распределений структурных функций, дифференциального сечения, а также средних значений в 1D и 2D представлении.

KY Cross Section/Structure Functions Evaluation Tool

$$KY \text{ electroproduction: } \frac{d\sigma_r}{d\Omega_K} = \frac{d\sigma_T}{d\Omega_K} + \epsilon \frac{d\sigma_L}{d\Omega_K} + \sqrt{\epsilon(1+\epsilon)} \frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega_K} \cos \varphi + \epsilon \frac{d\sigma_{LT}}{d\Omega_K} \cos 2\varphi$$

Рис. 19: Интерфейс веб-сайта

Пример работы интерфейса веб-сайта:

[Download Your CSV file here](#)

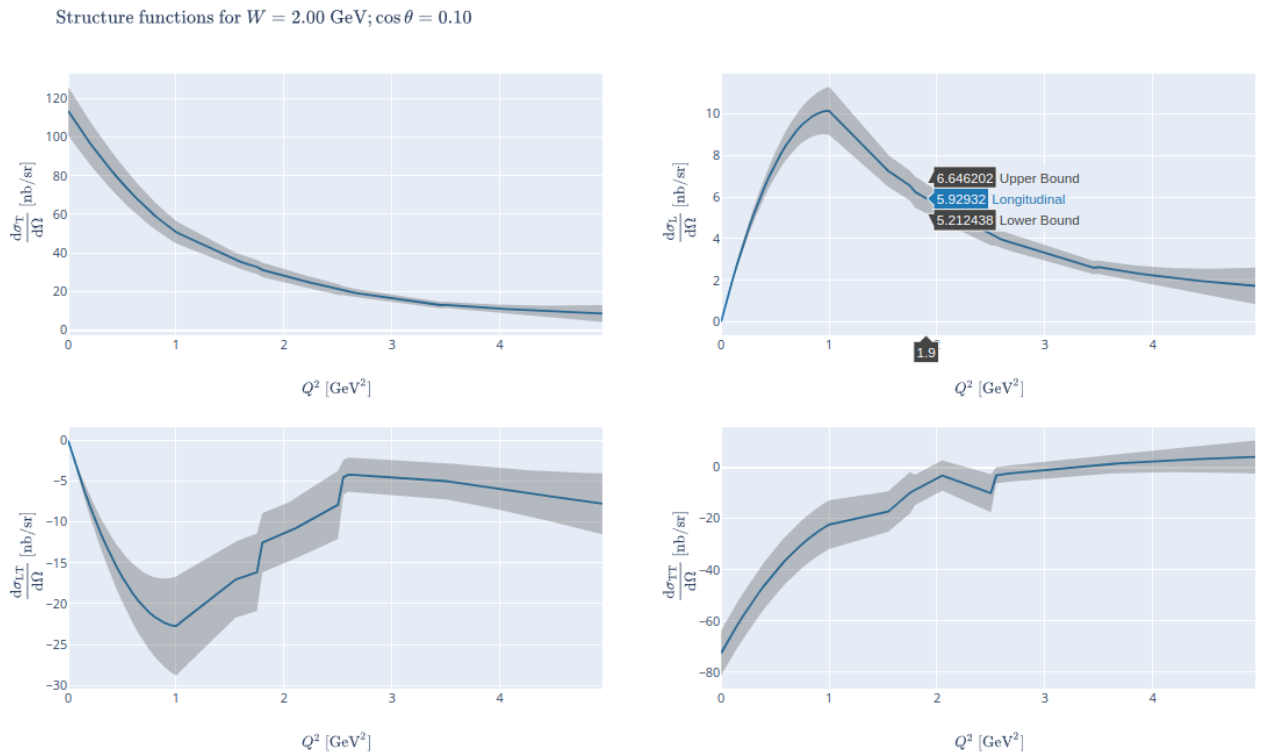


Рис. 20: Визуализация структурных функций $\frac{d\sigma_T}{d\Omega_K}$ (слева сверху), $\frac{d\sigma_L}{d\Omega_K}$ (справа сверху), $\frac{d\sigma_{LT}}{d\Omega_K}$ (слева снизу) и $\frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega_K}$ (справа снизу) на веб-сайте группы JLab/MSU [3].

6 Заключение

В результате данной работы был реализован инструмент для оценки дифференциального сечения и структурных функций каналов электророждения $K\Lambda$ и $K\Sigma^0$, разработаны алгоритмы интерполяции и экстраполяции структурных функций. В настоящий момент программа активно используется для внутренних задач коллаборации и в различных исследовательских проектах. В частности, данная программа имеет практическую ценность для определения эффективности детектора CLAS12. В дальнейшем планируется применить данную программу для оценки поляризованной структурной функции $\frac{d\sigma_{LT'}}{d\Omega_K}$, используя первые экспериментальные данные CLAS12 по спиновым асимметриям пучка.

А Технические комментарии

А.1 config.yamll

```
1 model:
2   ratio_str: True
3   add_factor: True
4   W_sys: True
5   err_option: 3
6   channel: "K+S0"
7   E_beam: 6.535
8
9 cs_grid:
10  str_func: True
11  diff_cs: False
12  W: [2.375]
13  Q2: [1, 1.5, 1.8]
14  cos_th: [-1.0, -0.42, 0.51, 0.84, 0.9, ]
15  phi: [-20, 30]
16
17 av_cs_grid:
18   method1:
19     active: False
20     bin1: {'W': [1.7, 1.8], 'Q2': [0.5, 1.5], 'cos_th': [0, 1.0],
21           ↪ 'phi': [0.0, 45]}
22     bin2: {'W': [1.8, 1.9], 'Q2': [0.5, 1.5], 'cos_th': [0, 1.0],
23           ↪ 'phi': [0.0, 45]}
24     bin3: {'W': [1.9, 2.0], 'Q2': [0.5, 1.5], 'cos_th': [0, 1.0],
25           ↪ 'phi': [0.0, 45]}
26     bin4: {'W': [2.0, 2.1], 'Q2': [0.5, 1.5], 'cos_th': [0, 1.0],
27           ↪ 'phi': [0.0, 45]}
28
29   method2:
30     active: False
31     plot: True
32     W_axis: False
33     Q2_axis: True
34     cos_th_axis: False
35     phi_axis: False
36     W: 2.0
37     Q2: 2.0
38     cos_th: 0
39     phi: 45
```

```

35         dW: 0.1
36         dQ2: 0.5
37         dcos_th: 0.5
38         dphi: 45
39
40 plot:
41     active: False
42     plot_cs: False
43     plot_str_func: True
44     W_axis: False
45     Q2_axis: False
46     cos_th_axis: True
47     phi_axis: False
48     W: 2.0
49     Q2: 2.0
50     cos_th: 0
51     phi: 45

```

Список литературы

- [1] CLAS12 | Jefferson Lab, <https://www.jlab.org/research/hall-b/clas12>
- [2] V. V. Chesnokov, A. A. Golubenko, B. S. Ishkhanov and V. I. Mokeev // Phys. Part. Nucl. 2022. **53**, N2. P. 184-190
- [3] CLAS Physics Database, <https://clas.sinp.msu.ru/cgi-bin/jlab/db.cgi>
- [4] V. I. Mokeev, D. S. Carman // Few Body Syst. 2022. **63**, N3. P. 59
- [5] D. S. Carman, K. Joo and V. I. Mokeev, “Strong QCD Insights from Excited Nucleon Structure Studies with CLAS and CLAS12,” Few Body Syst. **61**, no.3, 29 (2020) doi:10.1007/s00601-020-01563-3 [arXiv:2006.15566 [nucl-ex]].
- [6] V. I. Mokeev, I. G. Aznauryan et al. // Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser. 26. 146080 (2014)
- [7] V. I. Mokeev, D. S. Carman // Rev. Mex. Fis. Suppl. 2022. **3**, N3.
- [8] P. Ambrozewicz, D. S. Carman, R. J. Feuerbach et al. // Phys. Rev. C. 2007 **75**
- [9] Калиткин Н.Н., Альшина Е.А. 2013 Численные методы Кн. **1**. ”Численный анализ”
- [10] D. S. Carman, K. Park, B. A. Raue et al. // Phys. Rev. C. 2013. **87**, N2
- [11] M. E. McCracken et al. // Phys. Rev. C 2010. **81**, 025201

[12] Репозиторий исходного кода на GitHub, https://github.com/maksaska/Diff_cros_strange

[13] Веб-сайт программы, <https://clas.sinp.msu.ru/~maksaska/>