



Jefferson Lab

Анализ процессов электророждения странных мезонов на протоне из данных детектора CLAS

Выполнил: *Давыдов М.М.*

Научный руководитель: к.ф.-м.н., с.н.с. *Исупов Е.Л.*

25 мая 2023 г.

Результаты CLAS электророждения на протонах в области возбуждения N^*

Hadronic final state	Covered W-range, GeV	Covered Q^2 -range, GeV ²	Measured observables
π^+n	1.1-1.38 1.1-1.55 1.1-1.7 1.6-2.0	0.16-0.36 0.3-0.6 1.7-4.5 1.8-4.5	$d\sigma/d\Omega$ $d\sigma/d\Omega$ $d\sigma/d\Omega, A_b$ $d\sigma/d\Omega$
π^0p	1.1-1.38 1.1-1.68 1.1-1.39	0.16-0.36 0.4-1.8 3.0-6.0	$d\sigma/d\Omega$ $d\sigma/d\Omega, A_b, A_p, A_{bt}$ $d\sigma/d\Omega$
ηp	1.5-2.3	0.2-3.1	$d\sigma/d\Omega$
$K^+\Lambda$	thresh-2.6	1.40-3.90 0.70-5.40	$d\sigma/d\Omega$ P^0, P'
$K^+\Sigma^0$	thresh-2.6	1.40-3.90 0.70-5.40	$d\sigma/d\Omega$ P'
$\pi^+\pi^0 p$	1.3-1.6 1.4-2.1 1.4-2.0	0.2-0.6 0.5-1.5 2.0-5.0	Nine 1-fold differential cross sections

$d\sigma/d\Omega$ - Угловые распределения

A_b, A_t - Продольные асимметрии

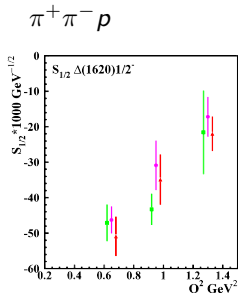
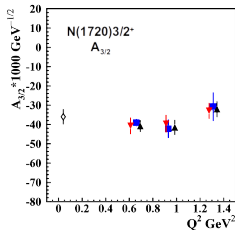
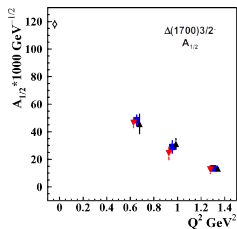
Almost full coverage of the final state hadron phase space

Измеренные наблюдаемые CLAS хранятся в **CLAS Physics Database**

Амплитуды электровозбуждения по данным эксклюзивного электророждения мезонов с CLAS

Exclusive meson electroproduction channels	Excited proton states	Q^2 -ranges for extracted γ, pN^* electrocouplings, GeV^2
$\pi^0 p, \pi^+ n$	$\Delta(1232)3/2^+$	0.16-6.0
	$N(1440)1/2^+, N(1520)3/2^-, N(1535)1/2^-$	0.30-4.16
$\pi^+ n$	$N(1675)5/2^-, N(1680)5/2^+, N(1710)1/2^+$	1.6-4.5
ηp	$N(1535)1/2^-$	0.2-2.9
$\pi^+ \pi^- p$	$N(1440)1/2^+, N(1520)3/2^-$	0.25-1.50
	$\Delta(1620)1/2^-, N(1650)1/2^-, N(1680)5/2^+, \Delta(1700)3/2^-, N(1720)3/2^+, N'(1720)3/2^+$	2.0-5.0 (preliminary) 0.5-1.5

Амплитуды электровозбуждения $\Delta(1700)3/2^-$, $N(1700)3/2^+$, $\Delta(1620)1/2^-$



V.I. Mokeev and I.G. Aznauryan., Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser. 26. 146080 (2014)

V.I. Mokeev et al.,

Независимо для разных W -интервалов:

PRC 93, 054016 (2016)

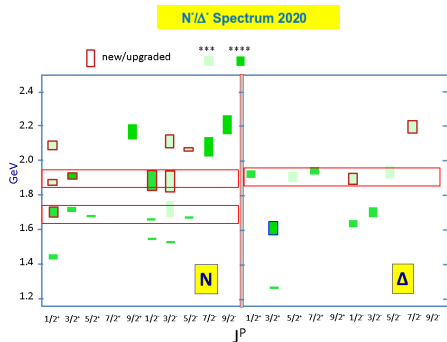
$W \in [1.51, 1.61]$ GeV $W \in [1.61, 1.71]$ GeV $W \in [1.71, 1.81]$ GeV $W \in [1.56, 1.66]$ GeV $W \in [1.66, 1.76]$ GeV

- Значительная часть резонансов в диапазоне масс $W > 1.6$ ГэВ распадается преимущественно в конечные состояния $N\pi\pi$
- Электророждение $\pi^+\pi^-p$ является основным источником информации об амплитудах электровозбуждения $\Delta(1620)1/2^-$, $\Delta(1700)3/2^-$ и $N(1720)3/2^+$ резонансов, распадающихся преимущественно в конечные состояния $N\pi\pi$
- Ожидается, что исследования электророждения $K\Upsilon$ предоставят независимую информацию об амплитудах электровозбуждения $\gamma_V p N^*$

Успехи в исследовании спектра N^*

Несколько **новых нуклонных резонансов** были установлены в глобальном многоканальном анализе эксклюзивных данных фоторождения с решающим влиянием результатов CLAS

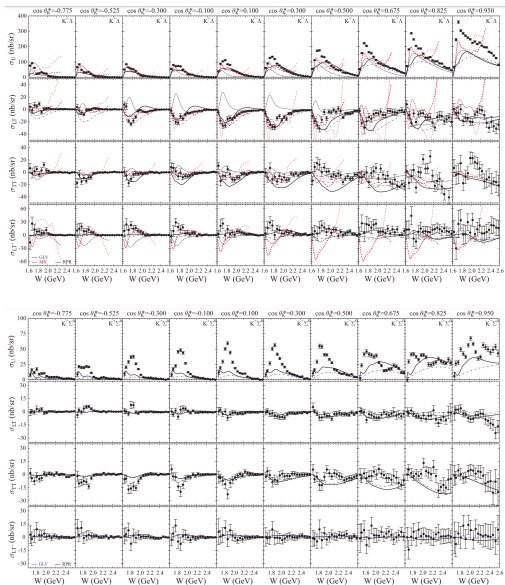
Нуклонные резонансы в PDG



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		***
Δ(1600)3/2*	***	****
Δ(1900)1/2	**	***
Δ(2200)7/2	*	***

Изучение данных электророждения $K\Upsilon$ позволит нам укрепить доказательства существования новых барионных состояний

Основные возможности инструмента и базы данных



(1) Используются экспериментальные результаты по эксклюзивным структурным функциям $\sigma_U(W, Q^2, \cos\theta)$, $\sigma_{TT}(W, Q^2, \cos\theta)$ и $\sigma_{LT}(W, Q^2, \cos\theta)$ для оценки дифф. сечения

(2) Реализована трехмерная интерполяция измеренных наблюдаемых по W , Q^2 , $\cos(\theta)$ и экстраполяция в пределах кинематических областей, где данные недоступны

(3) Будет использоваться для оценки структурной функции $\sigma_{LT'}(W, Q^2, \cos\theta)$ из первых данных CLAS12 по BSA

$$E_{beam} = 5.5 \text{ GeV} \quad Q^2 = 1.8 \text{ GeV}^2$$

[Carman et al., PRC 87, 025204 (2013)]



Формализм

Эксклюзивное рождение $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_\gamma}{d\Omega_K^*} = & \frac{d\sigma_T}{d\Omega} + \varepsilon \frac{d\sigma_L}{d\Omega} + \sqrt{\varepsilon(1+\varepsilon)} \frac{d\sigma_{LT}}{d\Omega} \cos \phi + \\ & + \varepsilon \frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega} \cos 2\phi + h\sqrt{\varepsilon(1-\varepsilon)} \frac{d\sigma_{LT'}}{d\Omega} \sin \phi \end{aligned}$$

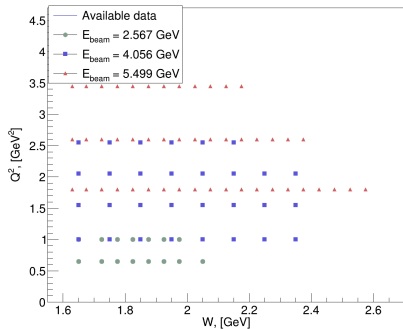
BSA:

$$A_{LT'} = \frac{\frac{d\sigma_\gamma^+}{d\Omega_K^*} - \frac{d\sigma_\gamma^-}{d\Omega_K^*}}{\frac{d\sigma_\gamma^+}{d\Omega_K^*} + \frac{d\sigma_\gamma^-}{d\Omega_K^*}} = \frac{\sqrt{\varepsilon(1-\varepsilon)} \frac{d\sigma_{LT'}}{d\Omega} \sin \phi}{\frac{d\sigma_\gamma^0}{d\Omega_K^*}}$$

Структурные функции $\frac{d\sigma_U}{d\Omega}$, $\frac{d\sigma_{LT}}{d\Omega}$, $\frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega}$

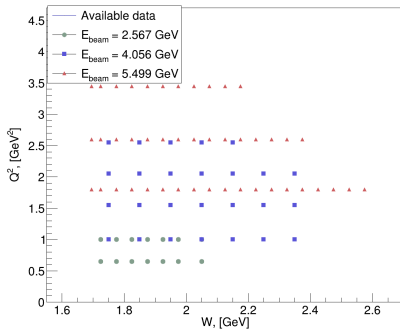
Эксклюзивное рождение $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$

Available data



$K^+\Lambda$

Available data



$K^+\Sigma^0$

$$\frac{d\sigma_U}{d\Omega} = \frac{d\sigma_T}{d\Omega} + \varepsilon \frac{d\sigma_L}{d\Omega}$$

План

Эксклюзивное рождение $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$

- Аппроксимация данных для известных точек $\{W, Q^2\}$ вдоль оси $\cos\theta$
- 2D интерполяция данных по осям W и Q^2
- 2D экстраполяция данных по осям W и Q^2
- Извлечение $\frac{d\sigma_{LT'}}{d\Omega}$

$$\frac{d\sigma_{LT'}}{d\Omega} = \frac{A_{LT'} \cdot \sigma_0}{\sqrt{\varepsilon(1-\varepsilon)}}$$

Оценка $d\sigma/d\Omega_T$ и $d\sigma/d\Omega_L$:

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_L}{d\Omega} : \frac{d\sigma_T}{d\Omega} &= 0.2 & \frac{d\sigma_U}{d\Omega} &= \frac{d\sigma_T}{d\Omega} + \varepsilon \frac{d\sigma_L}{d\Omega} \\ \frac{d\sigma_T}{d\Omega} &= \frac{\frac{d\sigma_U}{d\Omega}}{1 + 0.2 \cdot \varepsilon} & \frac{d\sigma_L}{d\Omega} &= \frac{\frac{d\sigma_U}{d\Omega}}{5 + \varepsilon} \end{aligned}$$

Полиномы Лежандра для $\cos\theta$

Для всех точек (W, Q^2) :

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_i} = A \cdot P_0(\cos\theta) + B \cdot P_1(\cos\theta) + C \cdot P_2(\cos\theta) + D \cdot P_3(\cos\theta) + E \cdot P_4(\cos\theta)$$

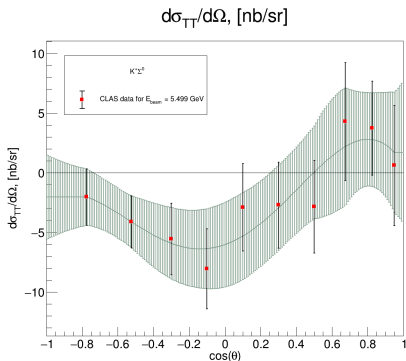
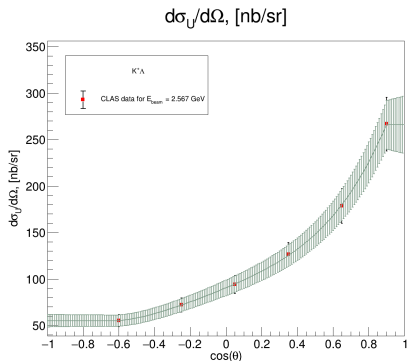


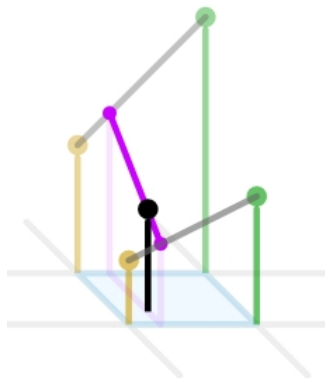
Рис.: Первые 5 членов системы для $K^+\Lambda$ (слева) и $K^+\Sigma^0$ (справа)

2D интерполяция данных по осям W и Q^2

Эксклюзивное рождение $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$

Алгоритм:

- Поиск
4 ближайших точек по осям W , Q^2
- Аппроксимация
данных для каждого бина по оси $\cos\theta$
- Расчет значения функции
и ее ошибки для заданного $\cos\theta$
- Билинейную интерполяцию
в четырех выбранных точках



Проверка интерполяции

$\frac{d\sigma_T}{d\Omega}$, $\frac{d\sigma_L}{d\Omega}$, $\frac{d\sigma_{LT}}{d\Omega}$ и $\frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega}$ структурные функции могут быть вычислены для любого значения $\cos\theta$ в пределах области $\{W, Q^2\}$:

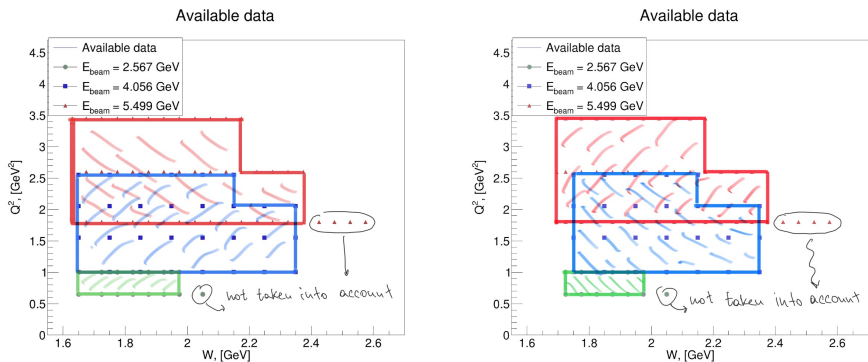
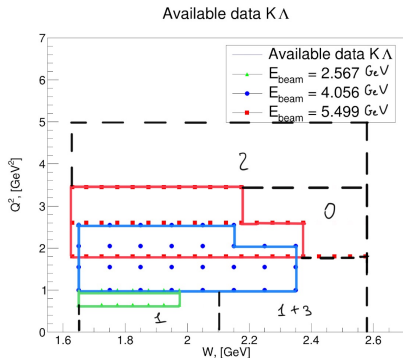


Рис.: $K^+\Lambda$ (слева); $K^+\Sigma^0$ (справа)

Идеи для экстраполяции

Эксклюзивное рождение $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$



Q^2 :

0. Псевдоданные для высоких Q^2 повторяют W -распределение для $Q^2 = 1,8 \text{ ГэВ}^2$
1. Область малых Q^2 : интерполяция между фото- и электророждением где это возможно
2. Область больших Q^2 : степенная экстраполяция функций:

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

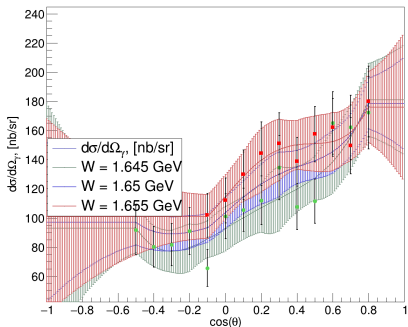
3. Оценка σ_{TT} на основе среднего соотношения σ_{TT}/σ_T

Данные фоторождения

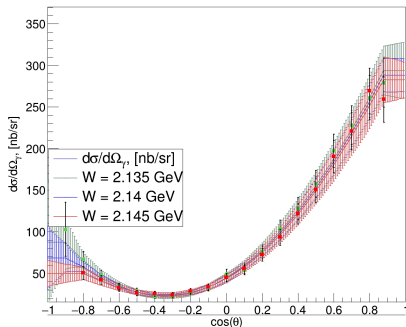
Дифференциальное сечение

$$\frac{d\sigma_T}{d\Omega}(W, Q^2 = 0, \cos\theta) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\sigma_\gamma}{d\cos(\theta)}(W, \cos\theta)$$

$d\sigma/d\Omega_\gamma$, [nb/sr]



$d\sigma/d\Omega_\gamma$, [nb/sr]



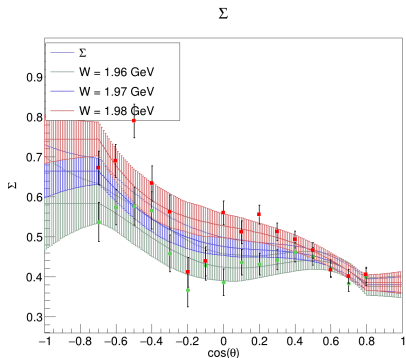
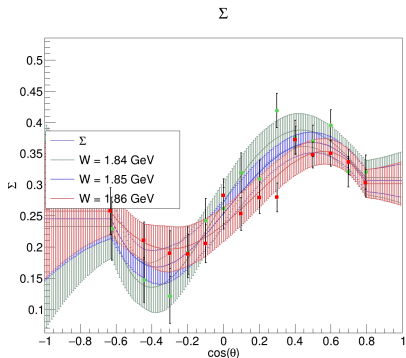
[M. McCracken, M. Bellis, C.A. Meyer, M. Williams et al., PRC 81, 025201 (2010)]

Данные фоторождения

Σ асимметрия

$K^+\Lambda$: $W \in [1.72, 2.18]$ ГэВ

$K^+\Sigma^0$: $W \in [1.78, 2.17]$ ГэВ



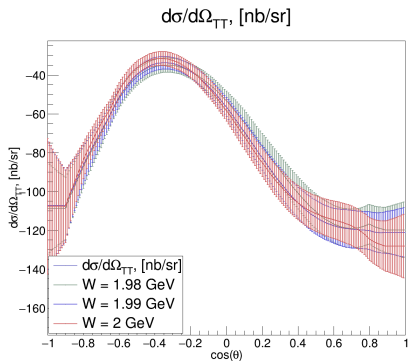
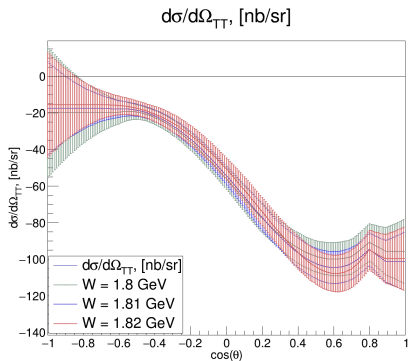
$$\sigma_{pol}(\phi, \phi_\gamma) = \sigma_0 [1 - P_\gamma \Sigma \cos\{2(\phi - \phi_\gamma)\}]$$

[Dave Ireland, g8 experiment]

Данные фоторождения

$\frac{d\sigma_{\text{TT}}}{d\Omega}$ структурная функция

$$\frac{d\sigma_{\text{TT}}}{d\Omega} = (-1) \cdot \Sigma \cdot \frac{d\sigma_{\gamma}}{d\Omega}$$



Интерполяция в области малых Q^2

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

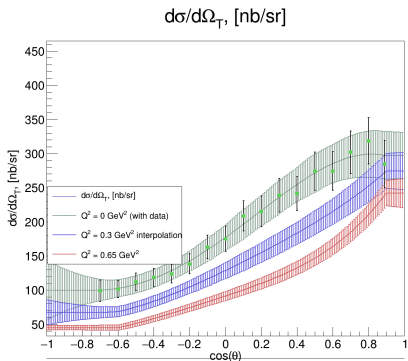


Рис.: $W = 1.845 \text{ ГэВ}$

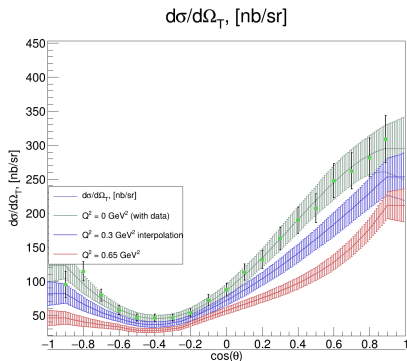


Рис.: $W = 2.005 \text{ ГэВ}$

Экстраполяция для $Q^2 > 3.45 \text{ ГэВ}^2$

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

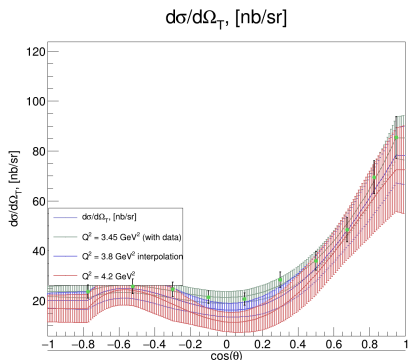


Рис.: $W = 1.675 \text{ ГэВ}$

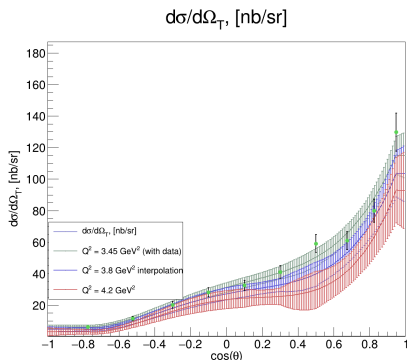
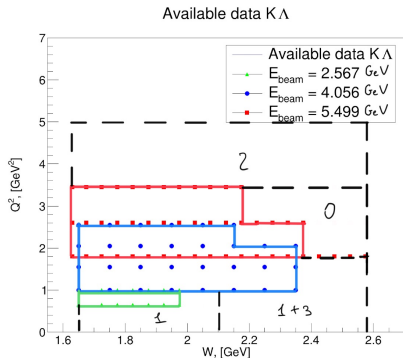


Рис.: $W = 1.775 \text{ ГэВ}$

Идеи для экстраполяции

Эксклюзивное рождение $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$



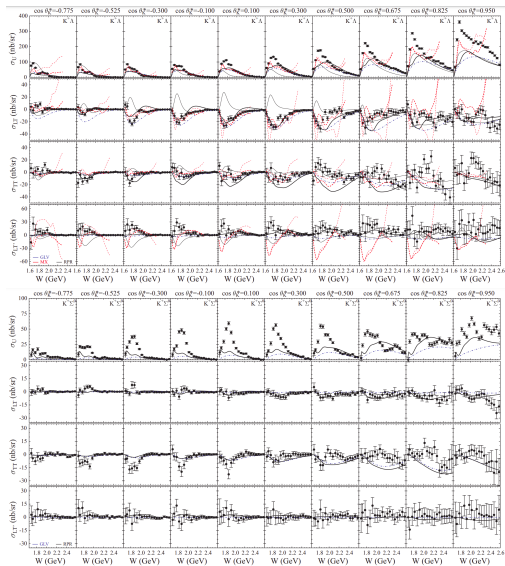
Q^2 :

0. Псевдоданные для высоких Q^2 повторяют W -распределение для $Q^2 = 1,8 \text{ ГэВ}^2$
1. Область малых Q^2 : интерполяция между фото- и электророждением где это возможно
2. Область больших Q^2 : степенная экстраполяция функцией:

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

3. Оценка σ_{TT} на основе среднего соотношения σ_{TT}/σ_T

Слабо покрытая область фазового пространства



(1) Оценка отношений σ_{TT}/σ_T для всех бинов данных из CLAS с $W > 2.0$ ГэВ (включая данные по фоторождению)

(2) Усреднение отношения по оси W для всех точек ($Q^2, \cos\theta$)

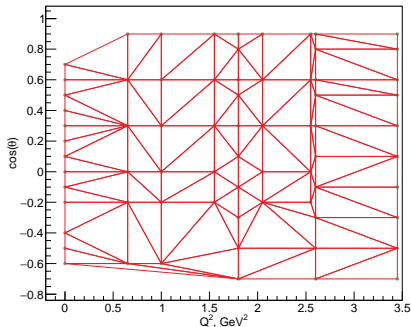
(3) Оценка σ_{TT} с помощью полученной сетки отношений ($Q^2, \cos\theta$) и интерполированных структурных функций σ_T

$$E_{beam} = 5.5 \text{ GeV} \quad Q^2 = 1.8 \text{ GeV}^2$$

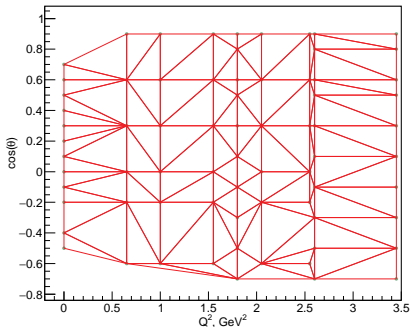
[Carman et al., PRC 87, 025204 (2013)]

Сетка $(Q^2, \cos\theta)$ отношений σ_T/σ_{TT}

Data grid $(\cos(\theta), Q^2)$



Data grid $(\cos(\theta), Q^2)$



Для любого $(W, Q^2, \cos\theta)$ из "слабой" области фазового пространства:

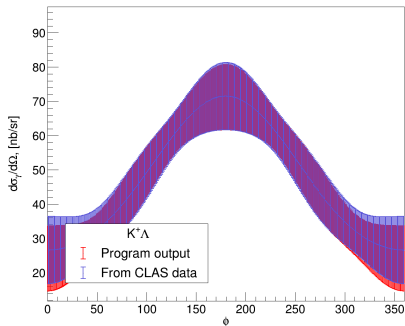
- σ_T , σ_L и σ_{LT} интерполируются с использованием данных электро- и фоторождения
- Предполагается, что σ_L и σ_{LT} равны 0 при $Q^2 = 0$ ГэВ²
- При $Q^2 = 0$ ГэВ² σ_{TT}/σ_T трактуется как $-\Sigma$ асимметрия
- $\sigma_{TT}(W, Q^2, \cos\theta) = \sigma_T(W, Q^2, \cos\theta) \cdot [\sigma_{TT}/\sigma_T](Q^2, \cos\theta)$

Дифференциальное сечение

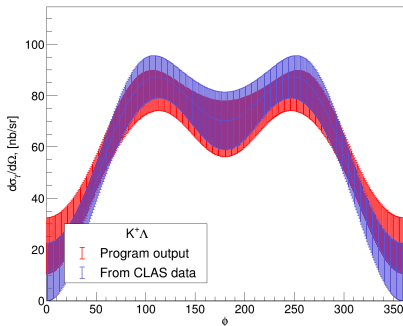
Эксклюзивное рождение $K^+\Lambda$

$$\sigma_0 = \frac{d\sigma_T}{d\Omega} + \varepsilon \frac{d\sigma_L}{d\Omega} + \sqrt{\varepsilon(1+\varepsilon)} \frac{d\sigma_{LT}}{d\Omega} \cos\phi + \varepsilon \frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega} \cos 2\phi$$

$W = 1.85 \text{ GeV}$ $Q^2 = 1.55 \text{ GeV}^2$ $\cos = -0.25$



$W = 1.95 \text{ GeV}$ $Q^2 = 1.55 \text{ GeV}^2$ $\cos = 0.35$



Измеренные наблюдаемые CLAS хранятся в CLAS Physics Database

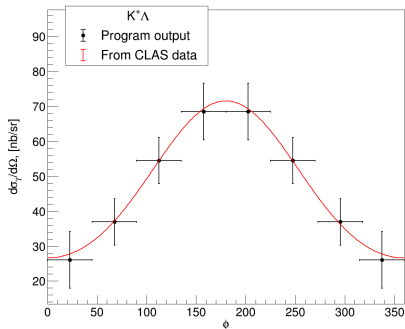
<http://clas.sinp.msu.ru/cgi-bin/jlab/db.cgi>

Среднее сечение в бине

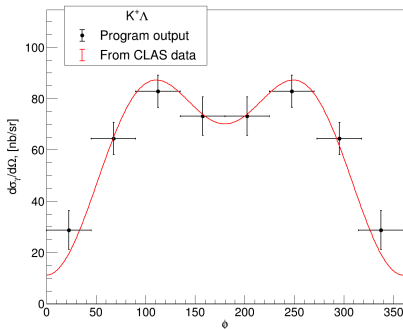
Эксклюзивное рождение $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$ для $E_{beam} = 4.056$ ГэВ

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{d\sigma_T}{d\Omega} + \varepsilon \frac{d\sigma_L}{d\Omega} + \sqrt{\varepsilon(1+\varepsilon)} \frac{d\sigma_{LT}}{d\Omega} \cos \phi + \varepsilon \frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega} \cos 2\phi$$

$\bar{W} = 1.85$ GeV $\bar{Q}^2 = 1.55$ GeV² $\overline{\cos} = -0.25$



$\bar{W} = 1.95$ GeV $\bar{Q}^2 = 1.55$ GeV² $\overline{\cos} = 0.35$



KY Cross Section/Structure Functions Evaluation Tool

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

Model configuration

Channel: K+Λ

Energy (GeV):

$\sigma_{\text{sys. extr.}}$ for $\cos(\theta)$: const

Point-like calculation

Structure Functions
 Differential Cross Section

W (GeV)

Q^2 (GeV²)

$\cos(\theta)$

φ °

Model configuration

Channel: K+Λ

Energy (GeV):

$\sigma_{\text{sys. extr.}}$ for $\cos(\theta)$: const

Average calculation

W axis
 Q^2 axis
 $\cos(\theta)$ axis
 φ axis

W (GeV) ΔW (GeV)

Q^2 (GeV²) Δ Q^2 (GeV²)

$\cos(\theta)$ Δ $\cos(\theta)$

φ ° Δ φ °

Заключение

- Оценка дифференциальных сечений с использованием экспериментальных результатов по $\sigma_U(W, Q^2, \cos\theta)$, $\sigma_{TT}(W, Q^2, \cos\theta)$ и $\sigma_{LT}(W, Q^2, \cos\theta)$ эксклюзивным структурным функциям
- Реализована трехмерная интерполяция измеренных наблюдаемых по W , Q^2 , $\cos(\theta)$ и экстраполяция в пределах кинематических областей, где данные недоступны.

$$W \in [M_Y + M_K, 2.65] \text{ ГэВ} \quad Q^2 \in [0, 5] \text{ ГэВ}^2$$
$$\cos\theta \in [-1, 1] \quad \phi \in [0, 360^\circ]$$

Следующие шаги:

- Оценки структурной функции $\sigma_{LT'}$ по данным CLAS12
https://github.com/Maksaska/Diff_cros_strange

Заключение

- Оценка дифференциальных сечений с использованием экспериментальных результатов по $\sigma_U(W, Q^2, \cos\theta)$, $\sigma_{TT}(W, Q^2, \cos\theta)$ и $\sigma_{LT}(W, Q^2, \cos\theta)$ эксклюзивным структурным функциям
- Реализована трехмерная интерполяция измеренных наблюдаемых по W , Q^2 , $\cos(\theta)$ и экстраполяция в пределах кинематических областей, где данные недоступны.

$$W \in [M_Y + M_K, 2.65] \text{ ГэВ} \quad Q^2 \in [0, 5] \text{ ГэВ}^2$$
$$\cos\theta \in [-1, 1] \quad \phi \in [0, 360^\circ]$$

Следующие шаги:

- Оценки структурной функции $\sigma_{LT'}$ по данным CLAS12

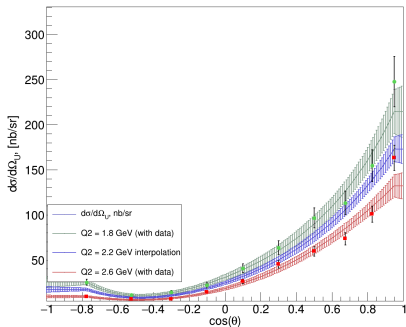
Спасибо!

https://github.com/Maksaska/Diff_cros_strange

Проверка интерполяции

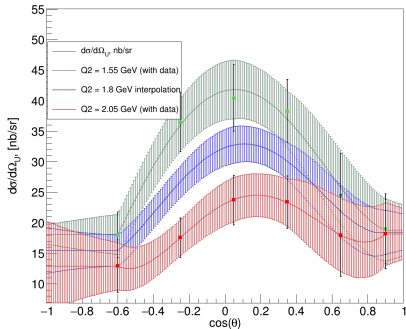
Эксклюзивное рождение $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$

$d\sigma/d\Omega_U$, nb/sr



$K^+\Lambda$: $E_{beam} = 5.499$ GeV

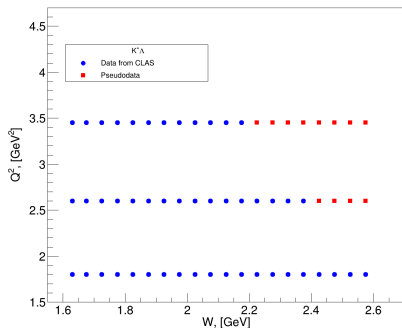
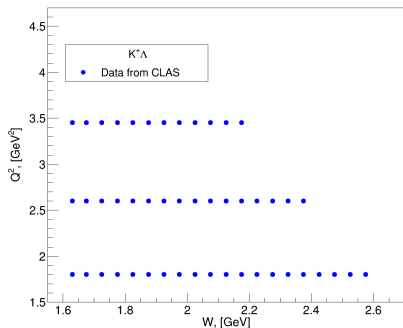
$d\sigma/d\Omega_U$, nb/sr



$K^+\Sigma^0$: $E_{beam} = 4.056$ GeV

Попытка расширить доступную область фазового пространства

- Псевдоданные для более высоких Q^2 повторяют W -распределение для $Q^2 = 1.8 \text{ ГэВ}^2$

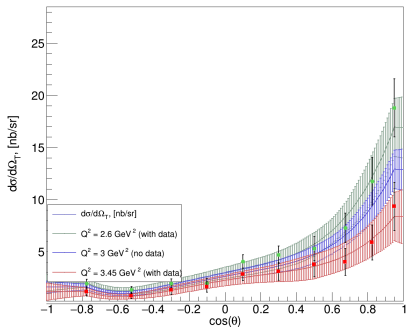


Отношение $\sigma_i(W_2, Q_2)/\sigma_i(W_1, Q_2)$ для каждого значения $\cos(\theta)$ из набора данных такое же, как $\sigma_i(W_2, 1.8 \text{ ГэВ}^2)/\sigma_i(W_1, 1.8 \text{ ГэВ}^2)$

Проверка

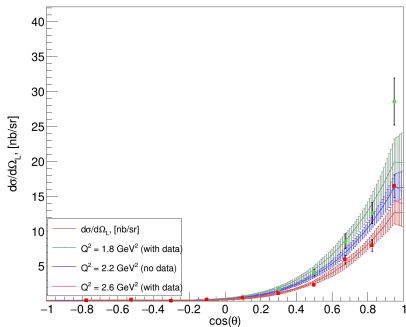
Эксклюзивное рождение $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$

$d\sigma/d\Omega_T$, [nb/sr]



$K^+\Sigma^0$: $E_{beam} = 5.499 \text{ ГэВ}$

$d\sigma/d\Omega_L$, [nb/sr]



$K^+\Lambda$: $E_{beam} = 5.499 \text{ ГэВ}$

Сравнение

Квадратичная экстраполяция vs. подход с σ_{TT}/σ_T отношениями

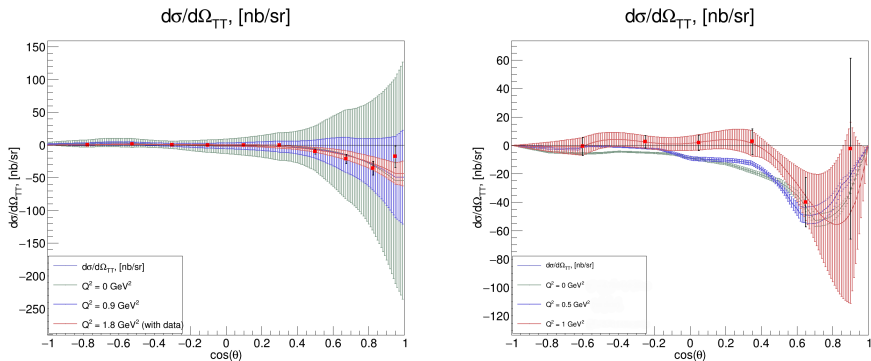
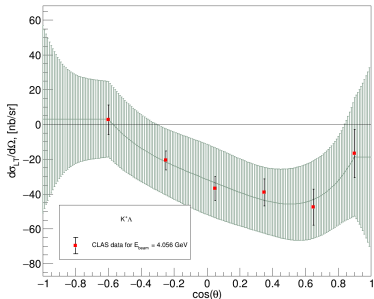


Рис.: $\cos\theta$ - распределения структурной функции σ_{TT} при $W = 2,425$ ГэВ. Чистая квадратичная экстраполяция из набора данных $Q^2 = 1.8 \text{ ГэВ}^2$ слева. Подход с отношением σ_{TT}/σ_T справа

Quadratic error interpolation with $y = ax^2 + bx + c$

Эксклюзивное рождение $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$

$d\sigma_{L^+}/d\Omega$, [nb/sr]



$d\sigma_{L^+}/d\Omega$, [nb/sr]

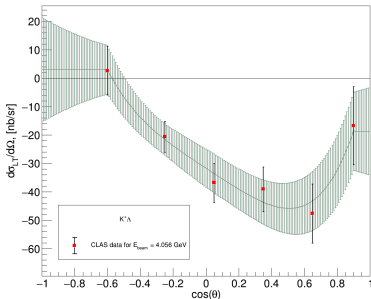


Рис.: Fit with 5 leg. polynomials. Errors from fit parameters on the left, from quadratic interpolation on the right

- $f_1 = \text{"value + error_value"}$ quad. interpolation
- $f_2 = \text{"value"}$ quad. interpolation
- Error result: $Err = f_1 - f_2$

Среднее сечение в бине

$$\sigma_i = \frac{d\sigma_T}{d\Omega} + \varepsilon \frac{d\sigma_L}{d\Omega} + \sqrt{\varepsilon(1+\varepsilon)} \frac{d\sigma_{LT}}{d\Omega} \cos \phi + \varepsilon \frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega} \cos 2\phi$$

$$\bar{\sigma}_N = \sum_{i=0}^N \frac{\sigma_i}{N} \xrightarrow{N \rightarrow \infty} \bar{\sigma} \quad \bar{\sigma}_{N+1} = \frac{N \cdot \bar{\sigma}_N + \sigma_{N+1}}{N+1}$$

$$Err(\bar{\sigma}) = \frac{\sum_{i=0}^N Err(\sigma_i)}{N}$$

Амлитуды электровозбуждения $N(1440)1/2^+$ из πN и $\pi^+\pi^-\rho$

