



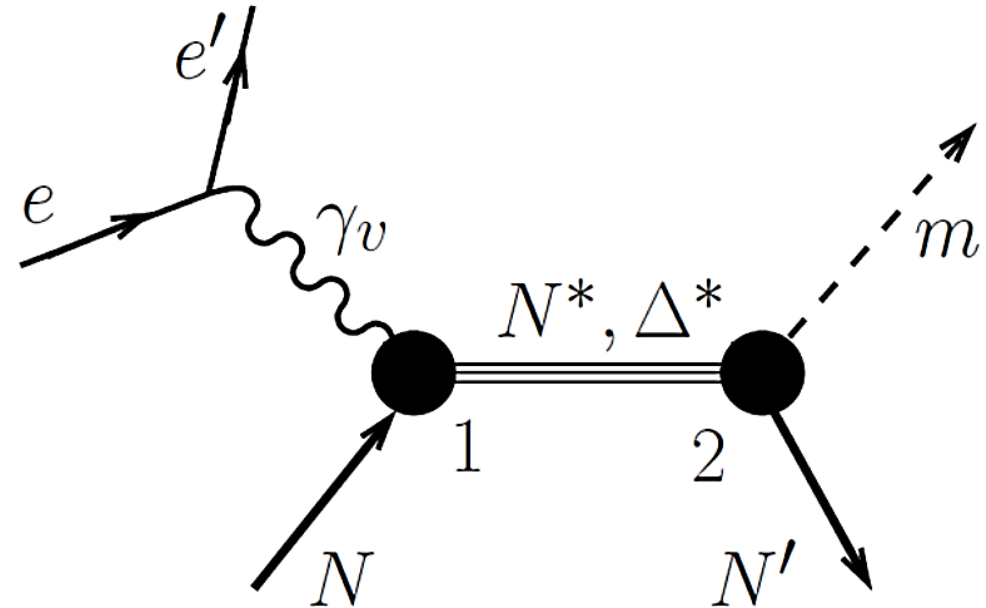
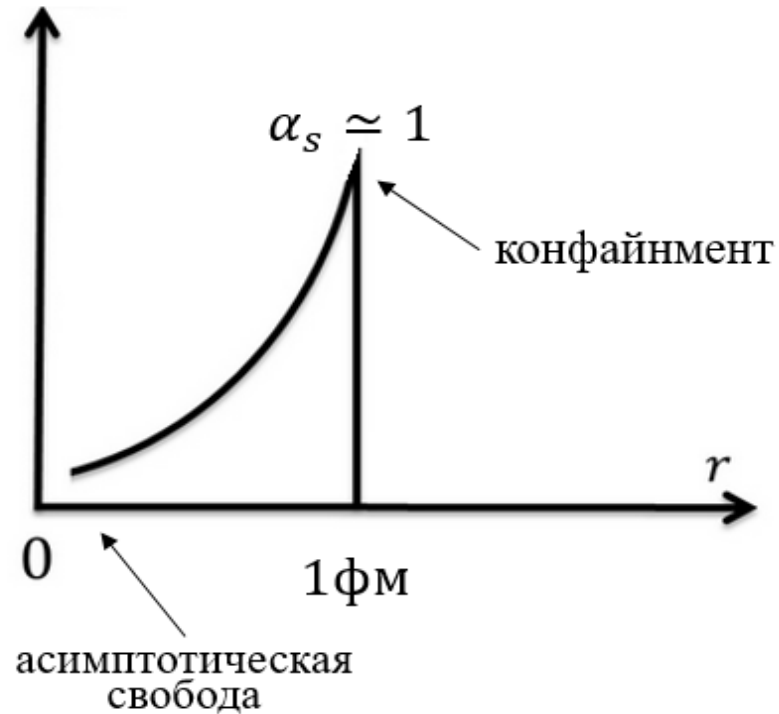
Физический факультет
Московского
государственного университета
имени М.В.Ломоносова



МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ В ЗАДАЧЕ ПРЕДСКАЗАНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ И СТРУКТУРНЫХ ФУНКЦИЙ ЭЛЕКТРОРОЖДЕНИЯ ОДИНОЧНОГО ПИОНА НА ПРОТОНЕ В РЕЗОНАНСНОЙ ОБЛАСТИ

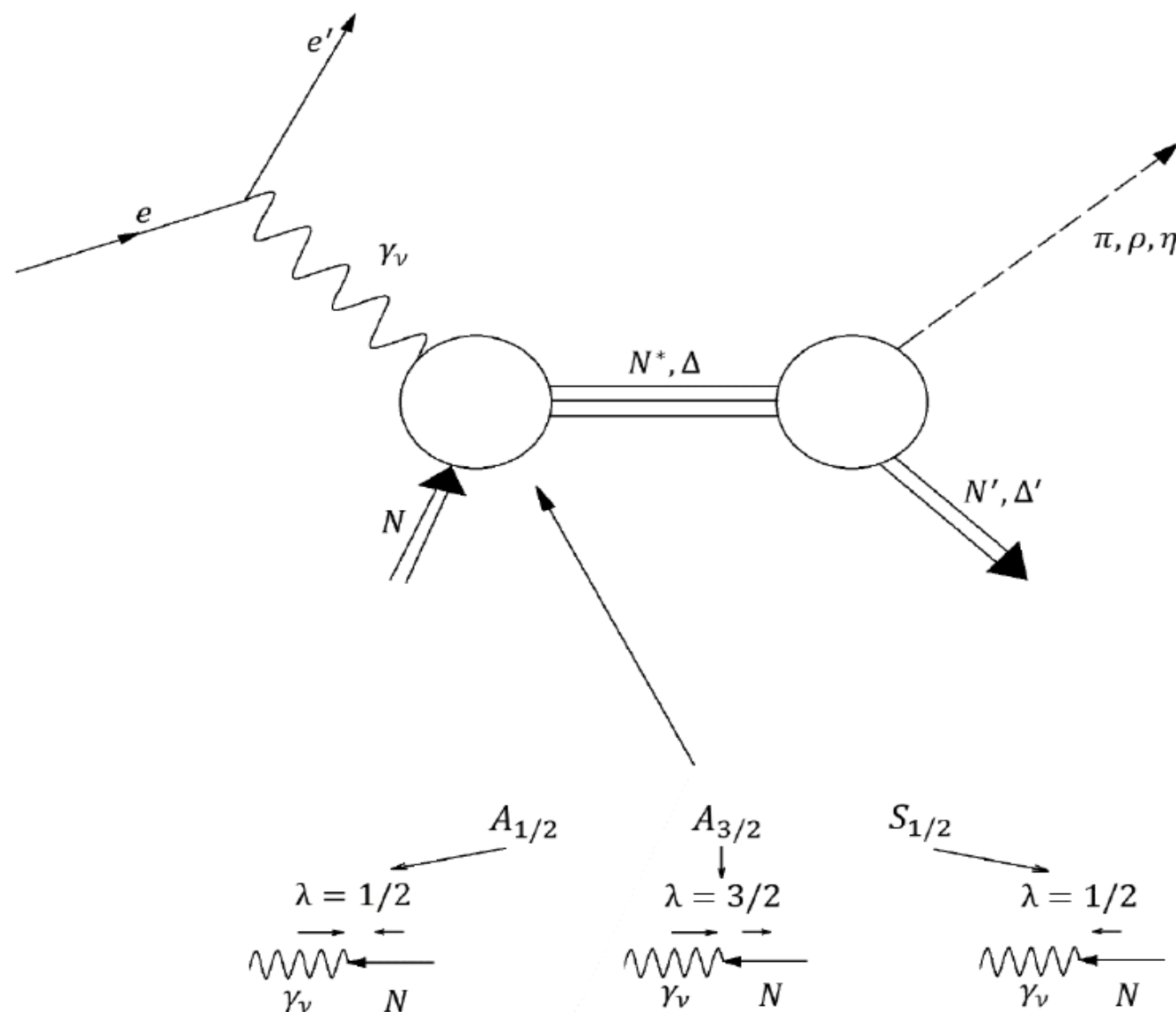
студентка Чистякова В.В., аспирант Голда А.В.,
к.ф.-м.н., асс. Русова А.А., к.ф.-м.н., с.н.с. Исупов Е.Л.

Предмет исследования

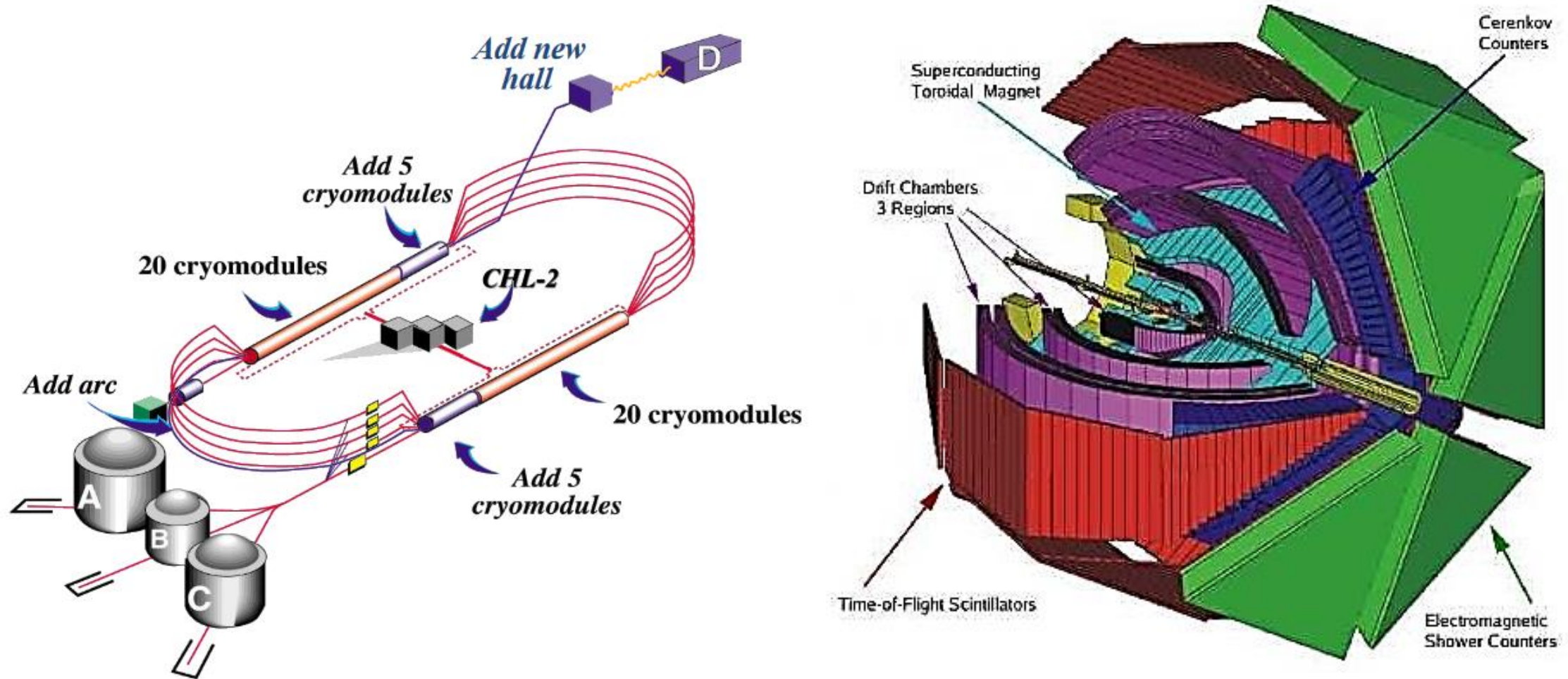


Непертурбативная область ответственна за формирование структуры нуклона и нуклонных резонансов. Анализ основного и возбуждённых состояний нуклона открывает доступ к исследованию структуры одетых кварков и глюонов с расстоянием.

Электромагнитное возбуждение нуклонных резонансов



Ускоритель CEBAF и детектор CLAS



CLAS Physics Database

(создана в коллаборации между Hall B at Jefferson Lab и ОЭПВАЯ НИИЯФ МГУ)



Experimental Hall B

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

polarization:

none

Target:

any

polarization:

any

Final state:

any

polarization:

any

Select kinematics range:

☐ Search for average values

$Q^2_{\min}$, [GeV]²:

$Q^2_{\max}$, [GeV]²:

$W_{\min}$, [GeV]:

$W_{\max}$, [GeV]:

$x_{\min}$:

$x_{\max}$:

$E_{Y\min}$, [GeV]:

$E_{Y\max}$, [GeV]:

Select observables:

Quantity measured:

any

dσ/dΩ (exclusive)

dσ/dΩ (quasi-free)

σ (exclusive)

sigma

sigma (quasi-free)

Additional search criteria:

Spokespersons:

?

Year:

?

Experiment identifier(s):

?

Text table options

☐ Show results as a plain text table

?

☐ Show average value for W, Q² ranges

?

☐ Add W and Q² columns

[How to save text data](#)

[-] Search Results Table Composition

?

Available fields:		Fields selected for output:
Final state polarization	>	Measurement identifier
Beam	<	Final state
Beam polarization	>>	Q ² min
Target	<<	Q ² max
Target polarization		W min
x min	Up	W max
x max	Dn	Quantity
E _y min		Experiment title
E _y max		Authors
W		Year

Limit: 100 ☐ Results in a new window

clas.sinp.msu.ru

База данных по дифференциальным сечениям реакции $\gamma p \rightarrow p\pi^0$

	Ebeam	W	Q2	cos_theta	phi	dsigma_dOmega	error
0	1.64	1.1000	0.40	-0.9	0.261799	0.912000	0.982353
1	1.64	1.1000	0.40	-0.9	0.785398	0.175000	0.356108
2	1.64	1.1000	0.40	-0.9	1.308997	1.650000	2.769879
3	1.64	1.1000	0.40	-0.9	1.832596	0.560000	0.979330
4	1.64	1.1000	0.40	-0.9	2.356194	1.130000	0.909689
...	...	...	...	...	...	...	...
76244	2.04	1.7875	0.65	0.9	5.105088	0.497479	0.107885
76245	2.04	1.7875	0.65	0.9	5.366887	2.774690	2.426200
76246	2.04	1.7875	0.65	0.9	5.628687	5.130680	4.529040
76247	2.04	1.7875	0.65	0.9	5.890486	2.657480	2.404660
76248	2.04	1.7875	0.65	0.9	6.152286	8.551600	6.940400

76249 rows × 7 columns

$$E_e \in [1.64; 2.04; 2.44; 5.75] \text{ ГэВ}$$

$Q^2 = 4E_e E'_e \sin^2 \frac{\theta_e}{2}$ - квадрат переданного
четырёхимпульса виртуального фотона

E_e, E'_e - энергия начального и рассеянного
электронов

$\theta_e = \arccos \frac{p'_z}{E'_e}$ - угол рассеяния электрона

$W = M_p^2 + 2M_p(E_e - E'_e) - Q^2$ - инвариантная
масса конечных адронов

Дифференциальное сечение рождения одиночного пиона

$$\frac{d\sigma_{\gamma\nu}}{d\Omega_\pi} = \frac{d\sigma_u}{d\Omega_\pi} + \varepsilon \frac{d\sigma_{tt}}{d\Omega_\pi} \cdot \cos 2\varphi + \sqrt{2\varepsilon(1+\varepsilon)} \frac{d\sigma_{lt}}{d\Omega_\pi} \cdot \cos \varphi$$

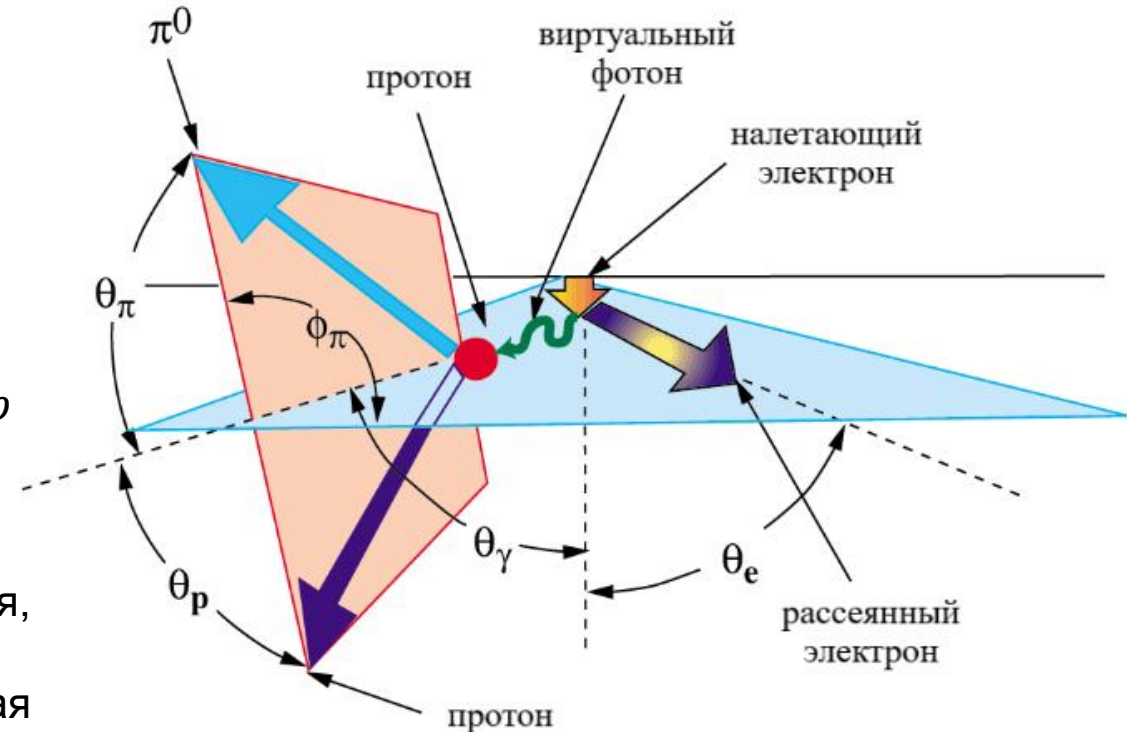
$$\frac{d\sigma_u}{d\Omega_\pi} = \frac{d\sigma_t}{d\Omega_\pi} + \varepsilon \frac{d\sigma_l}{d\Omega_\pi}$$

или в более компактном виде: $\frac{d\sigma_{\gamma\nu}}{d\Omega_\pi} = A + B\cos 2\varphi + C\cos \varphi$

$\frac{d\sigma_u}{d\Omega_\pi}$, $\frac{d\sigma_t}{d\Omega_\pi}$, $\frac{d\sigma_l}{d\Omega_\pi}$, $\frac{d\sigma_{lt}}{d\Omega_\pi}$, $\frac{d\sigma_{tt}}{d\Omega_\pi}$ — неполяризованная, поперечная, продольная, продольно-поперечная, поперечно-поперечная структурные функции соответственно

$\varepsilon = \left(1 + 2 \left(1 + \frac{\nu^2}{Q^2}\right) \tan^2 \frac{\theta_e}{2}\right)^{-1}$ — поляризация виртуального фотона

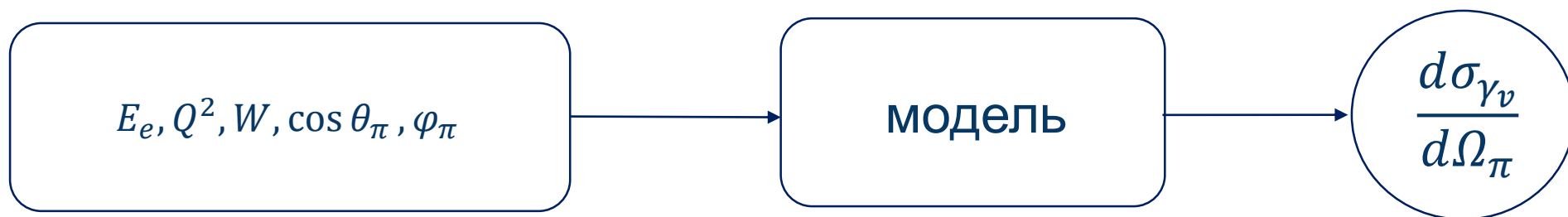
$\nu = E_e - E'_e$ - переданная электроном энергия



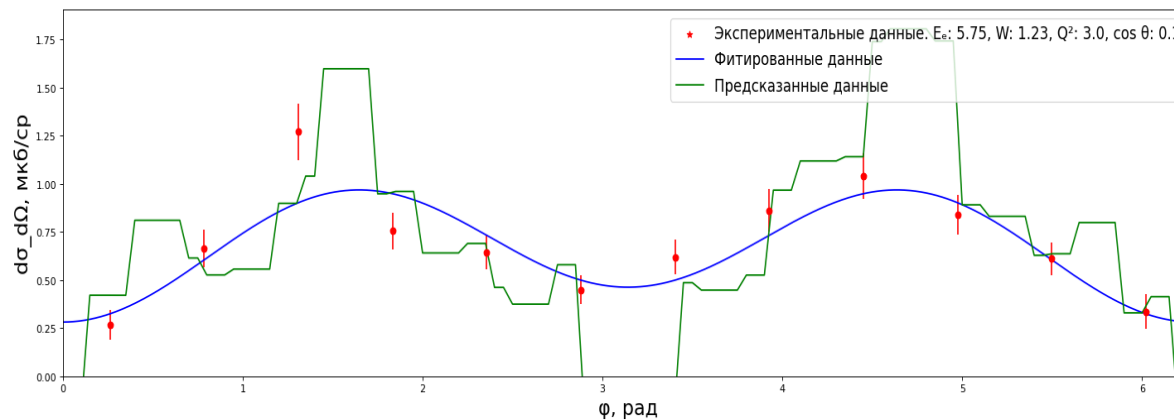
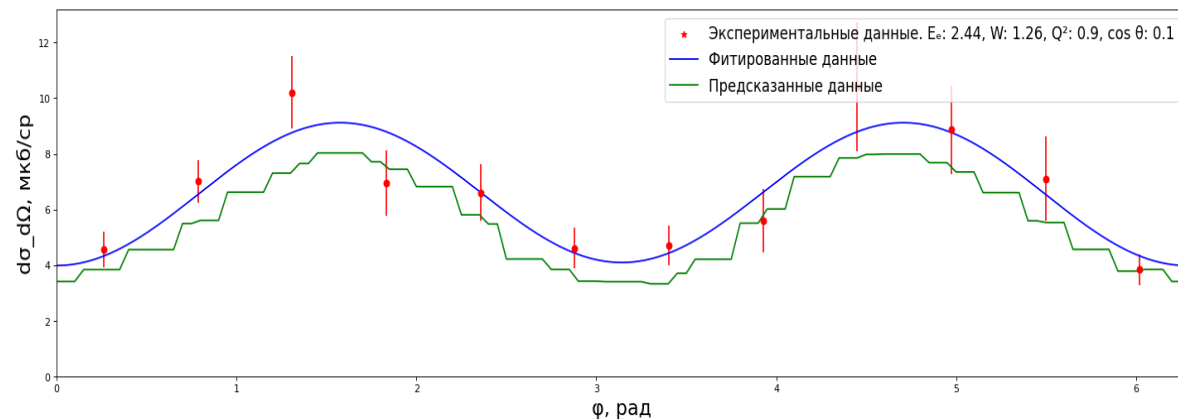
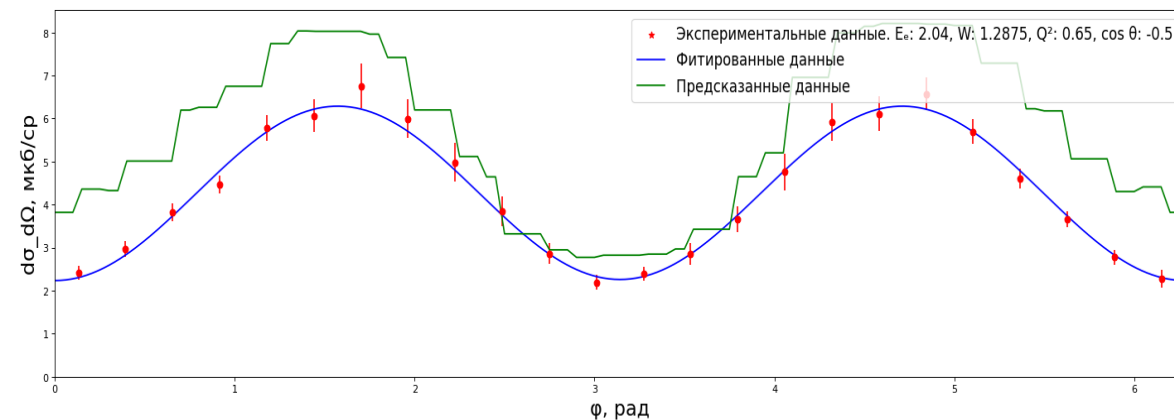
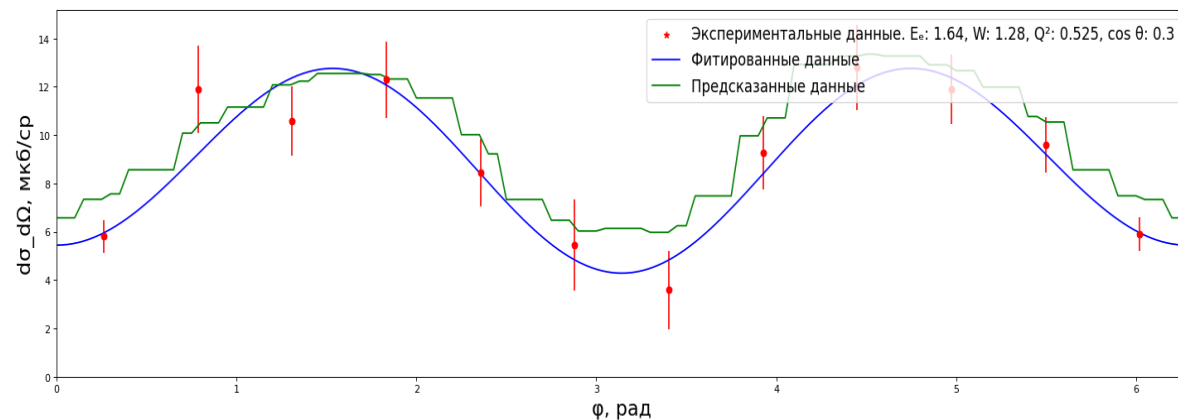
θ_e — полярный угол рассеяния электрона
 φ — угол между плоскостью рассеяния электрона и плоскостью реакции

Цель работы

Цель настоящей работы заключается в построении алгоритма для описания дифференциальных сечений, способного осуществлять надёжную интерполяцию данных в пятимерном пространстве

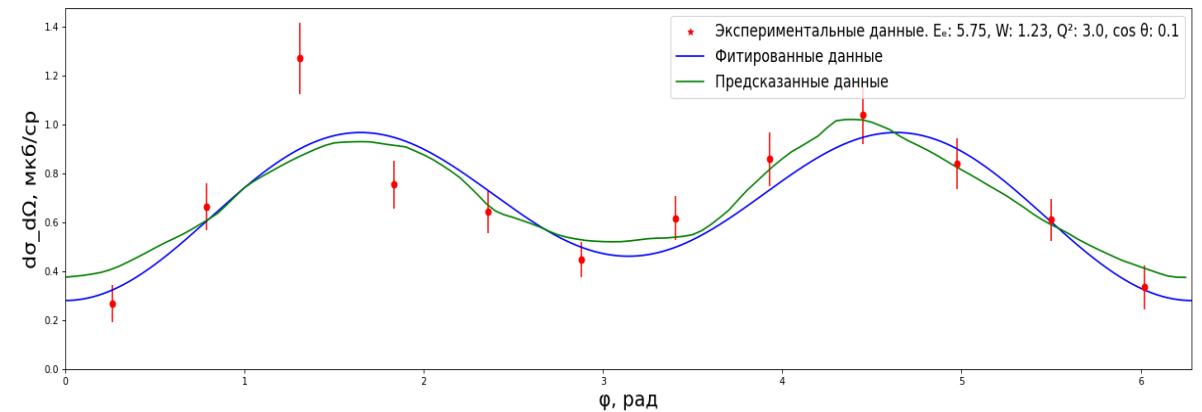
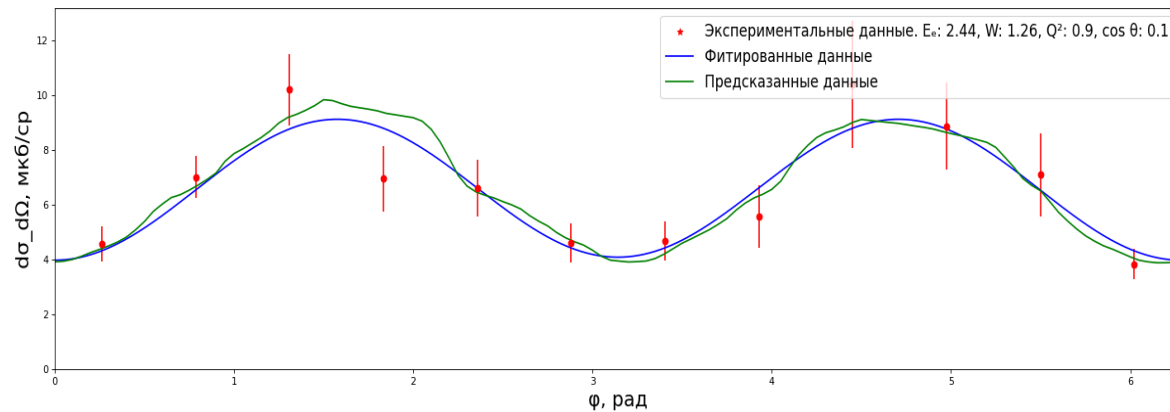
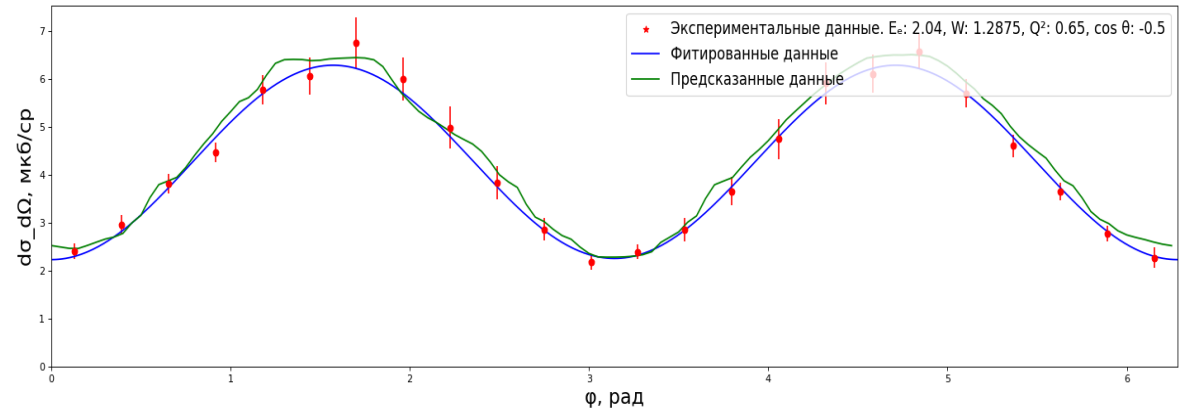
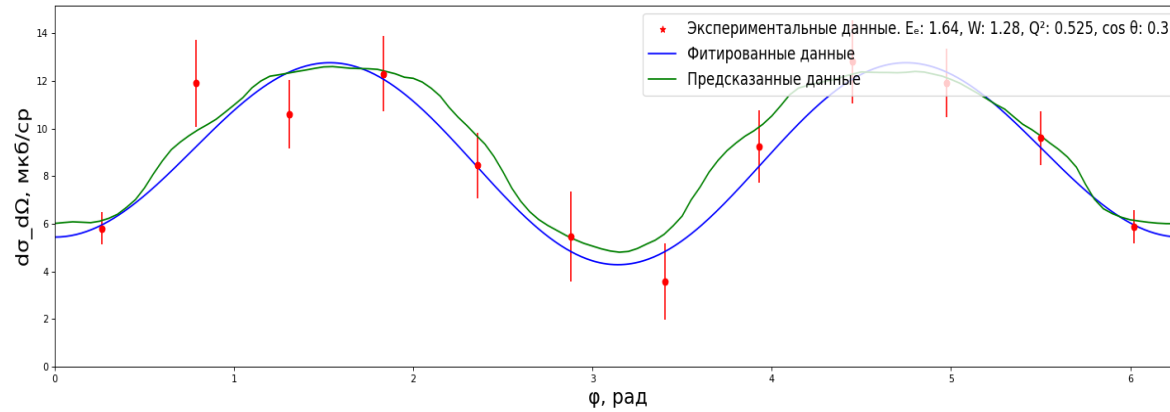


Предсказанные дифференциальные сечения реакции $\gamma_v p \rightarrow p \pi^0$ (алгоритм XGBoost)



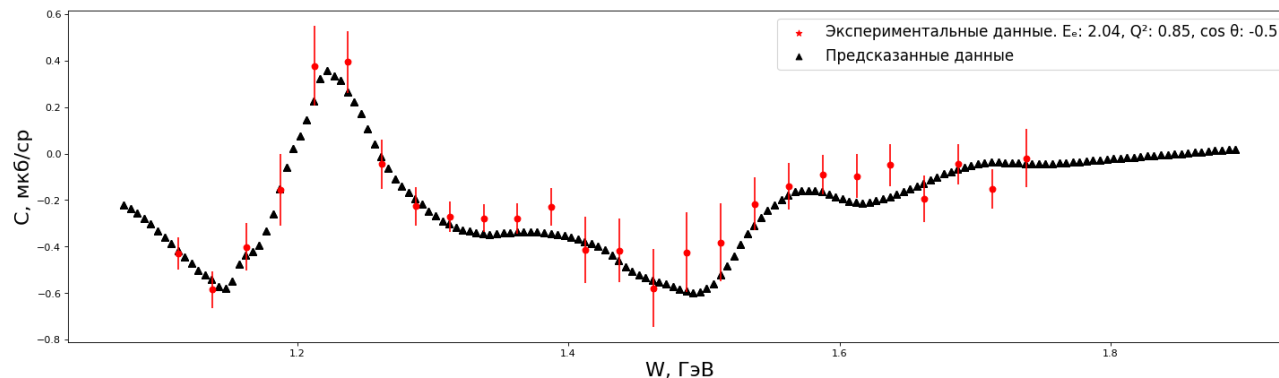
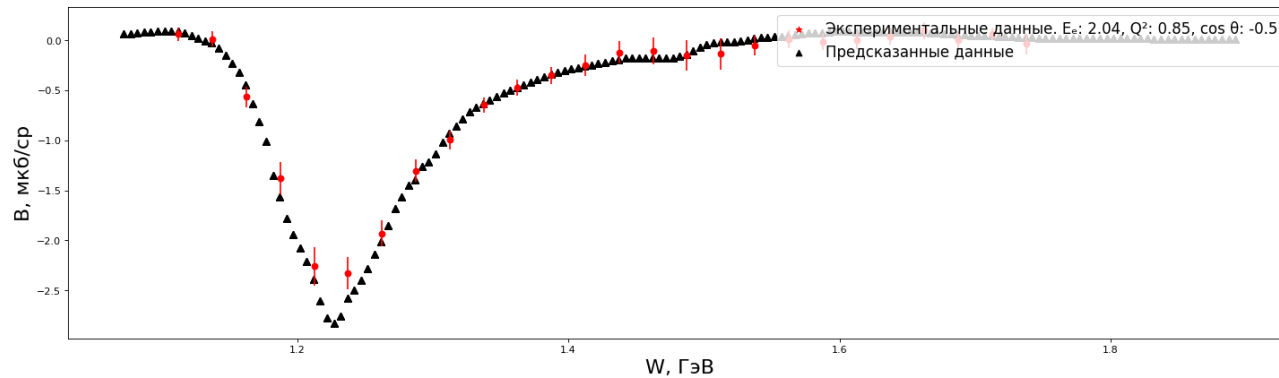
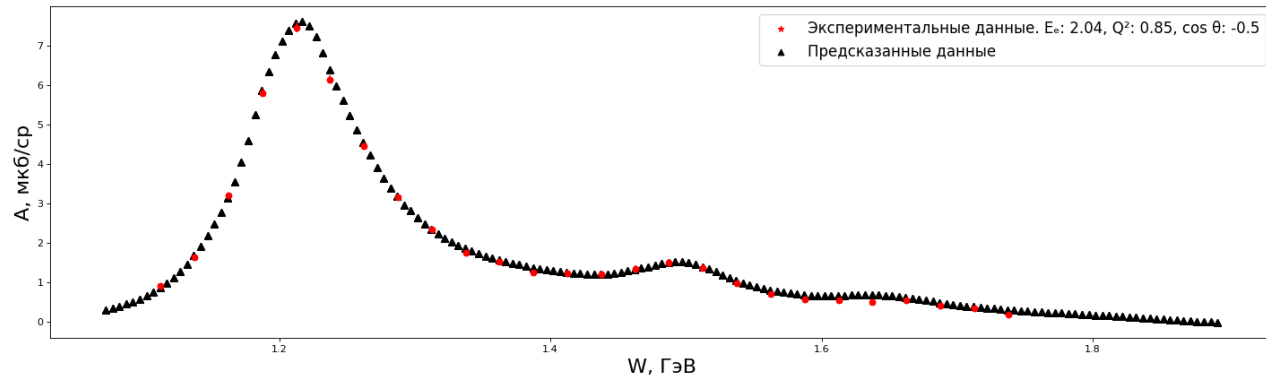
Фитирование: $\frac{d\sigma_{\gamma v}}{d\Omega_{\pi}} = A + B\cos 2\phi + C\cos \phi$

Предсказанные дифференциальные сечения реакции $\gamma_v p \rightarrow p \pi^0$ (полносвязная нейронная сеть)



Фитирование: $\frac{d\sigma_{\gamma v}}{d\Omega_{\pi}} = A + B\cos 2\phi + C\cos \phi$

Предсказанные неполяризованные структурные функции реакции $\gamma_v p \rightarrow p \pi^0$ (полносвязная нейронная сеть)

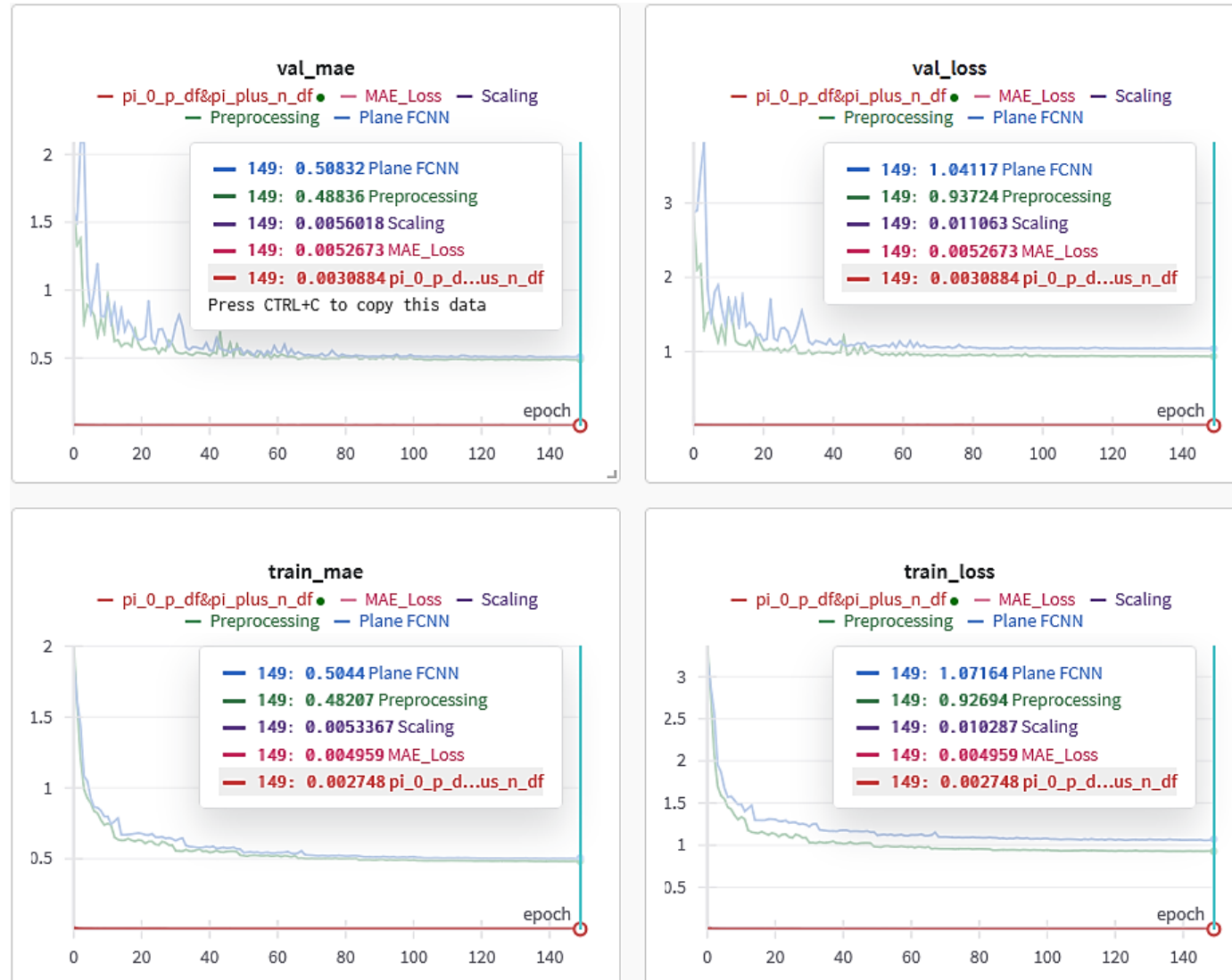


$$A(E_e, Q^2, W, \cos \theta_\pi) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{d\sigma_{\gamma_v}(\varphi_\pi)}{d\Omega_\pi} d\varphi_\pi$$

$$B(E_e, Q^2, W, \cos \theta_\pi) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{d\sigma_{\gamma_v}(\varphi_\pi)}{d\Omega_\pi} \cos 2\varphi_\pi d\varphi_\pi$$

$$C(E_e, Q^2, W, \cos \theta_\pi) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{d\sigma_{\gamma_v}(\varphi_\pi)}{d\Omega_\pi} \cos \varphi_\pi d\varphi_\pi$$

Зависимость метрики и функции потерь от эпохи для валидационной и тренировочной выборок при обучении полносвязной нейронной сети



Объединённая база данных по дифференциальным сечениям реакций

$\gamma_\nu p \rightarrow p \pi^0$ и $\gamma_\nu p \rightarrow n \pi^+$

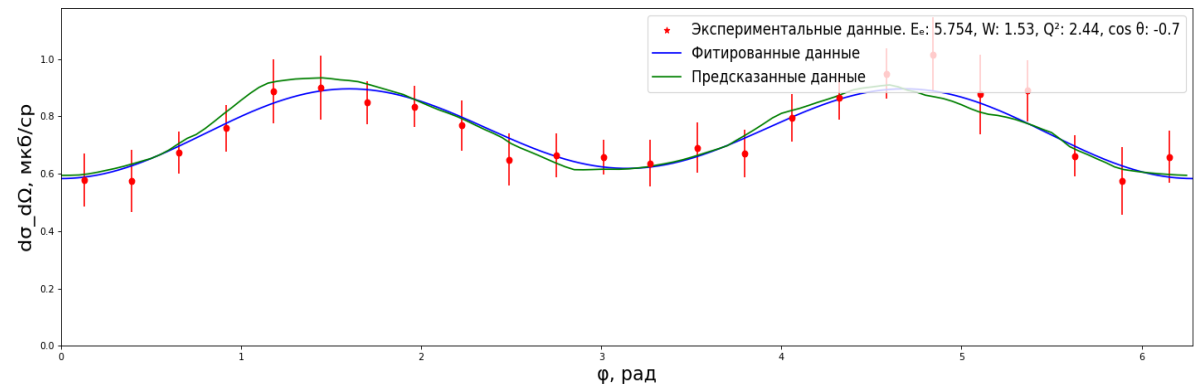
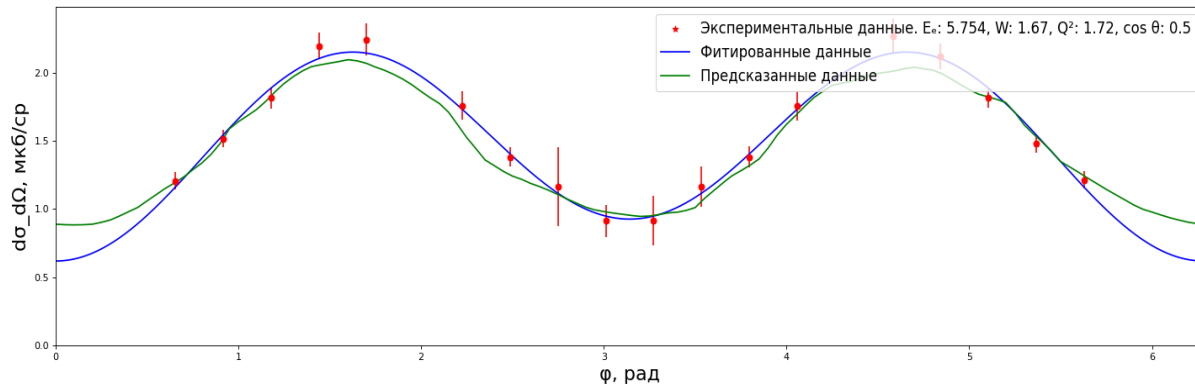
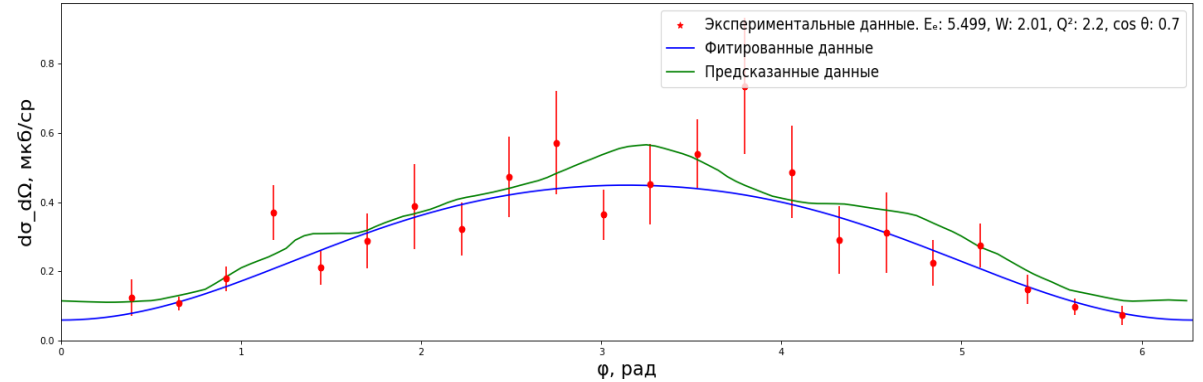
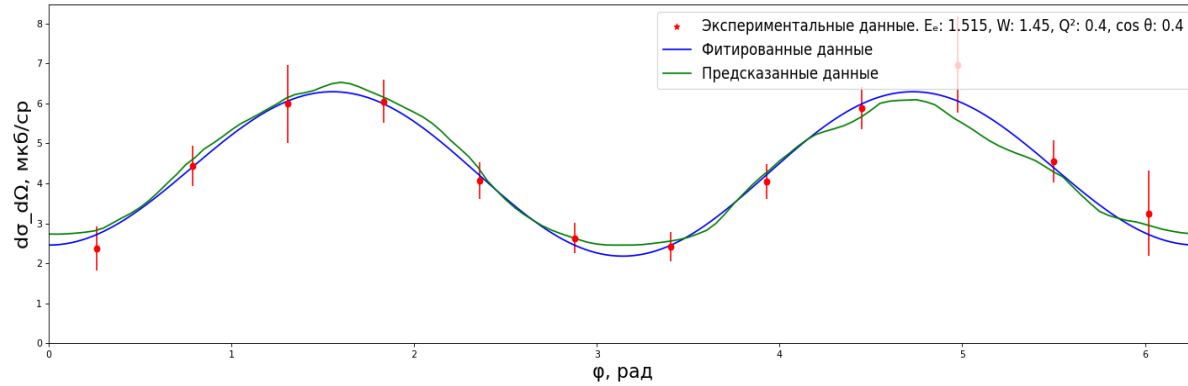
	Ebeam	W	Q2	cos_theta	phi	dsigma_dOmega	error	cos_phi	sin_phi	reaction_type
0	1.640	1.10	0.4	-0.900	0.261799	0.9120	0.982353	0.965926	0.258819	1
1	1.640	1.10	0.4	-0.900	0.785398	0.1750	0.356108	0.707107	0.707107	1
2	1.640	1.10	0.4	-0.900	1.308997	1.6500	2.769879	0.258819	0.965926	1
3	1.640	1.10	0.4	-0.900	1.832596	0.5600	0.979330	-0.258819	0.965926	1
4	1.640	1.10	0.4	-0.900	2.356194	1.1300	0.909689	-0.707107	0.707107	1
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
160831	5.499	2.01	4.0	0.975	3.730641	0.1012	0.043165	-0.831470	-0.555570	0
160832	5.499	2.01	4.0	0.975	3.992441	0.1199	0.076638	-0.659346	-0.751840	0
160833	5.499	2.01	4.0	0.975	4.646939	0.1578	0.095391	-0.065403	-0.997859	0
160834	5.499	2.01	4.0	0.975	4.777839	0.2346	0.158557	0.065403	-0.997859	0
160835	5.499	2.01	4.0	0.975	6.086836	0.1250	0.077753	0.980785	-0.195090	0

160836 rows × 10 columns

$E_{beam}(\gamma_\nu p \rightarrow n \pi^+) \in [1.515; 5.499; 5.754] \text{ ГэВ}$

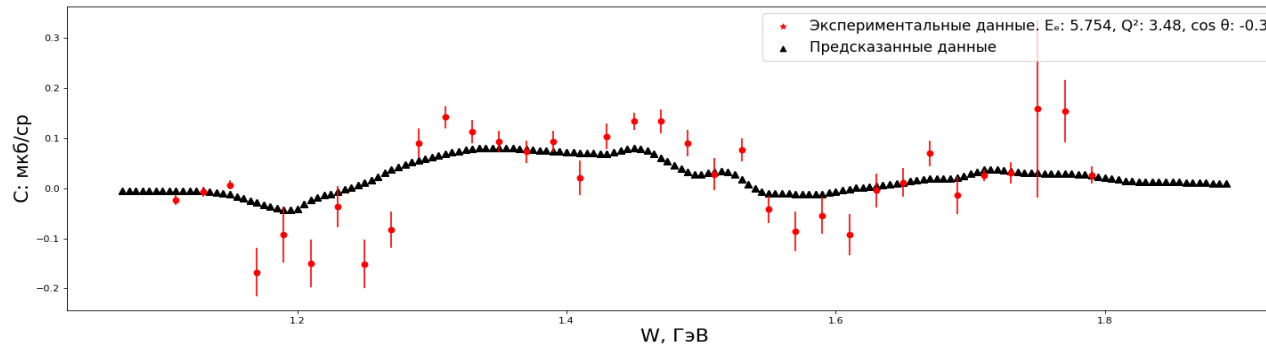
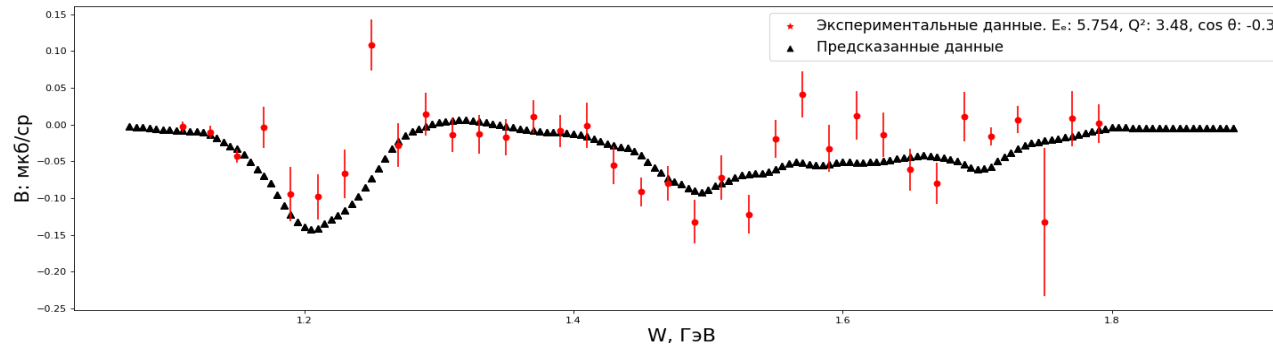
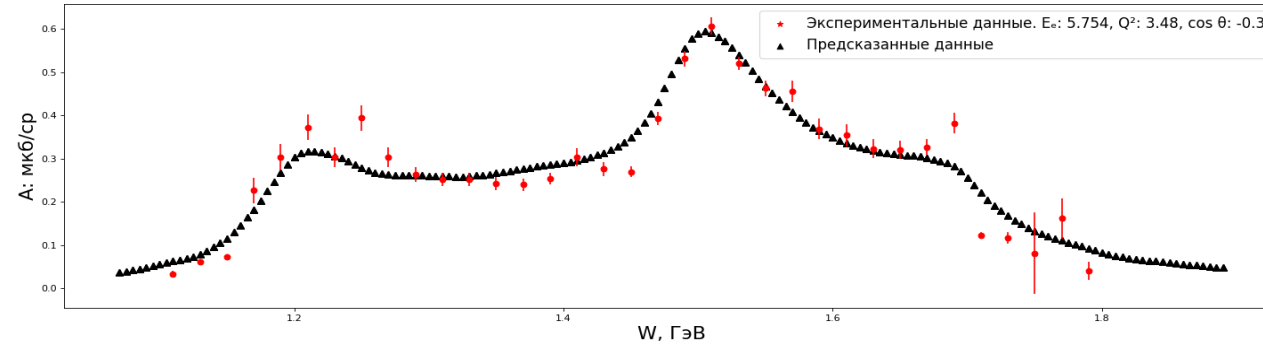
$E_{beam}(\gamma_\nu p \rightarrow p \pi^0) \in [1.64; 2.04; 2.44; 5.75] \text{ ГэВ}$

Предсказанные дифференциальные сечения реакции $\gamma_v p \rightarrow n \pi^+$ (полносвязная нейронная сеть)



Фитирование:
$$\frac{d\sigma_{\gamma v}}{d\Omega_\pi} = A + B\cos 2\phi + C\cos \phi$$

Предсказанные неполяризованные структурные функции реакции $\gamma_v p \rightarrow n \pi^+$ (полносвязная нейронная сеть)



$$A(E_e, Q^2, W, \cos \theta_\pi) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{d\sigma_{\gamma_v}(\varphi_\pi)}{d\Omega_\pi} d\varphi_\pi$$

$$B(E_e, Q^2, W, \cos \theta_\pi) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{d\sigma_{\gamma_v}(\varphi_\pi)}{d\Omega_\pi} \cos 2\varphi_\pi d\varphi_\pi$$

$$C(E_e, Q^2, W, \cos \theta_\pi) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{d\sigma_{\gamma_v}(\varphi_\pi)}{d\Omega_\pi} \cos \varphi_\pi d\varphi_\pi$$

Результаты работы

- усилиями нашей научной группы был разработан алгоритм на основе полносвязной нейронной сети для предсказания дифференциальных сечений электророждения одиночного пиона;
- алгоритм был адаптирован для работы с реакцией $\gamma_\nu p \rightarrow p \pi^0$;
- качество работы нейронной сети проверяется путём построения зависимости структурных функций от инвариантной массы системы конечных адронов исследуемой реакции;
- производится валидация модели в применении к данным детектора CLAS по электророждению пиона в реакциях $\gamma_\nu p \rightarrow n \pi^+$ и $\gamma_\nu p \rightarrow p \pi^0$;
- ведётся работа по улучшению алгоритма, в настоящее время модель обучается на объединённой базе данных, вносятся корректировки в архитектуру сети.

Публикация в журнале Moscow University Physics Bulletin

Machine Learning Approach in the Prediction of Differential Cross Sections and Structure Functions of Single Pion Electroproduction in the Resonance Region

A. V. Golda^{1*}, A. A. Rusova^{1,2}, E. L. Isupov^{2**}, and V. V. Chistyakova¹

¹*Department of General Nuclear Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

²*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

Received October 1, 2024; revised October 10, 2024; accepted October 20, 2024

Abstract—This work explores artificial intelligence methods in the task of predicting differential cross sections in exclusive reactions of positively charged pion production induced by virtual photons. A fully connected neural network devoid of any prior theoretical knowledge about the scattering process was trained on experimental data from the CLAS detector. We present a comparison of the network's predictions with experimental data in the form of graphs showing the dependence of differential cross sections on kinematic variables in the excitation energy regions of nucleon resonances, as well as a comparison of the structure functions depending on the values of invariant mass of the final hadron system. Based on this algorithm we can interpolate both the cross-section values and structure function values in different regions of phase space. The neural network approach preserves all correlations of the multidimensional space of kinematic variables, it is model independent and does not consume any a priori knowledge of the process, it is easily extensible to a high dimensional space, which can serve as a good basis for building Monte Carlo event generators or detailed reaction analysis.

Keywords: electroproduction, artificial intelligence, neural networks, differential cross section, structure functions, CLAS detector

DOI: 10.3103/S0027134924702060

Спасибо за внимание!

