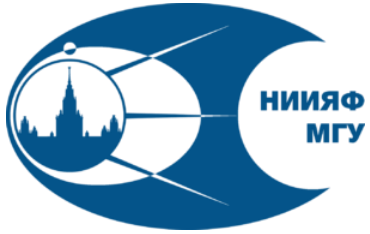


МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ В ЗАДАЧЕ ПРЕДСКАЗАНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ И СТРУКТУРНЫХ ФУНКЦИЙ ЭЛЕКТРОРОЖДЕНИЯ ОДИНОЧНОГО ПИОНА НА ПРОТОНЕ В РЕЗОНАНСНОЙ ОБЛАСТИ

Магистерская работа студентки 213М группы

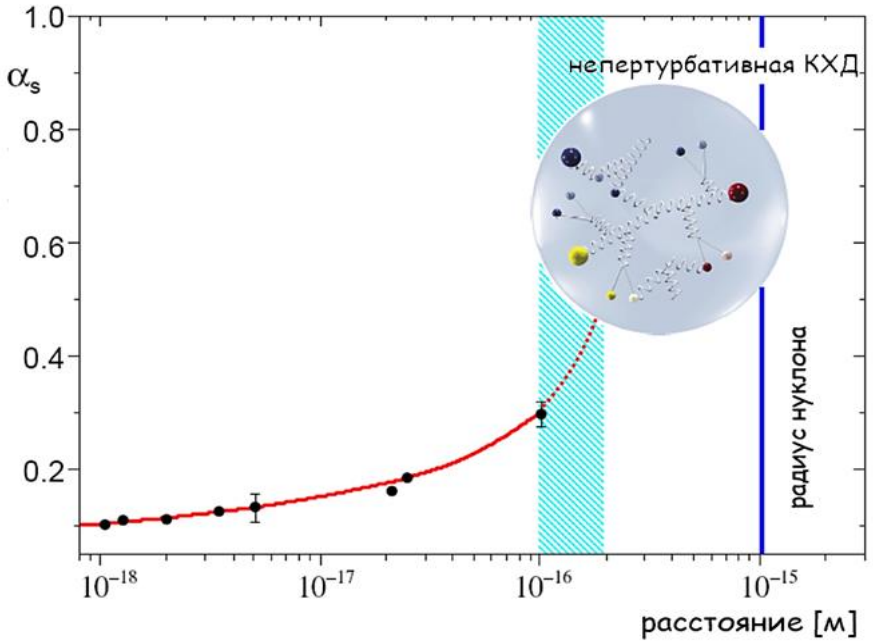
Чистяковой Влады Витальевны

Научный руководитель:

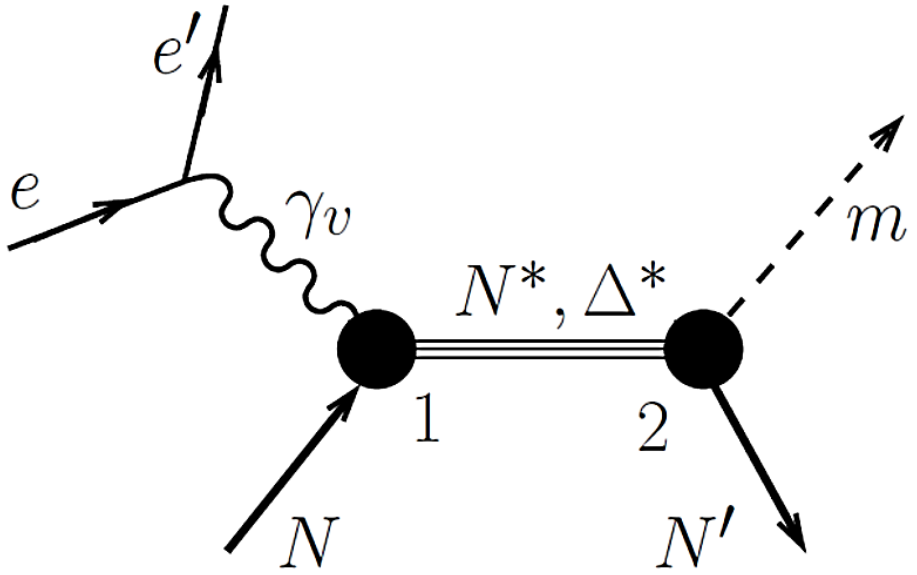
к.ф.-м.н., с.н.с. Исупов Евгений Леонидович

Москва, 2025

Предмет исследования



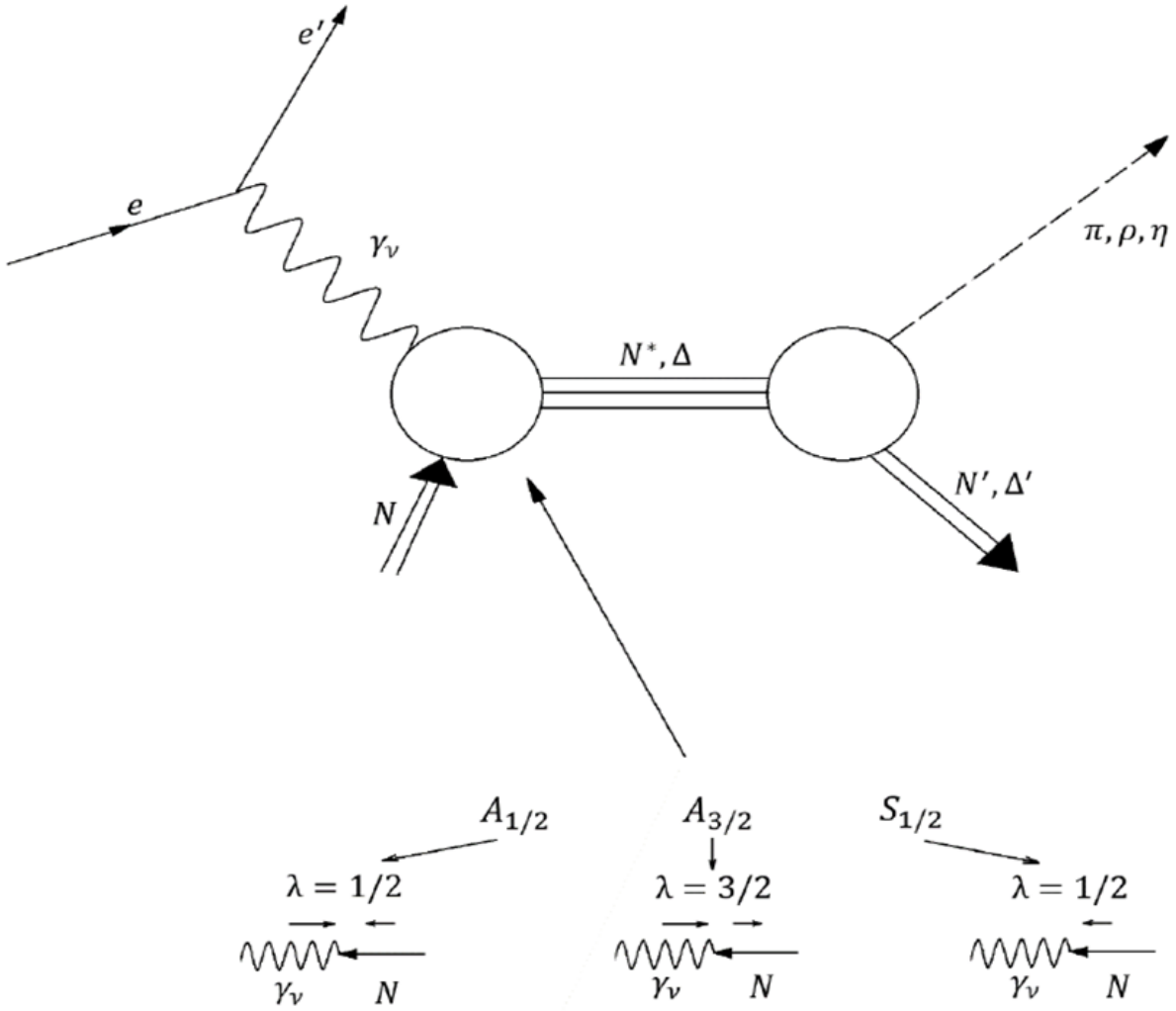
Зависимость константы сильного взаимодействия от расстояния



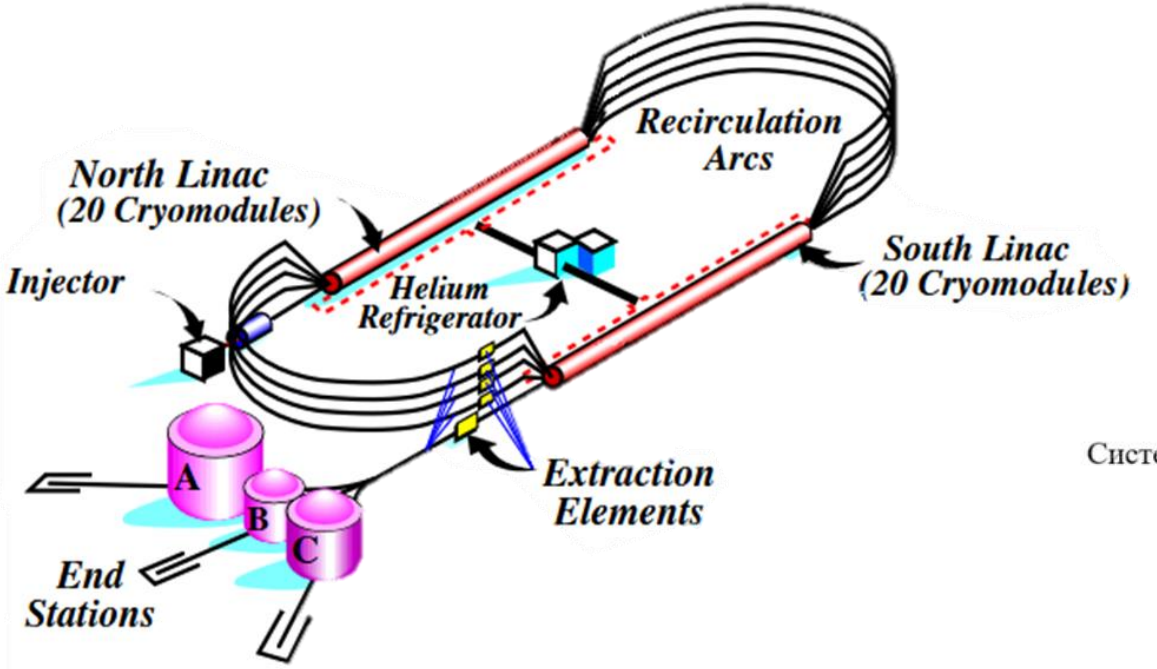
Электромагнитное возбуждение нуклонных резонансов

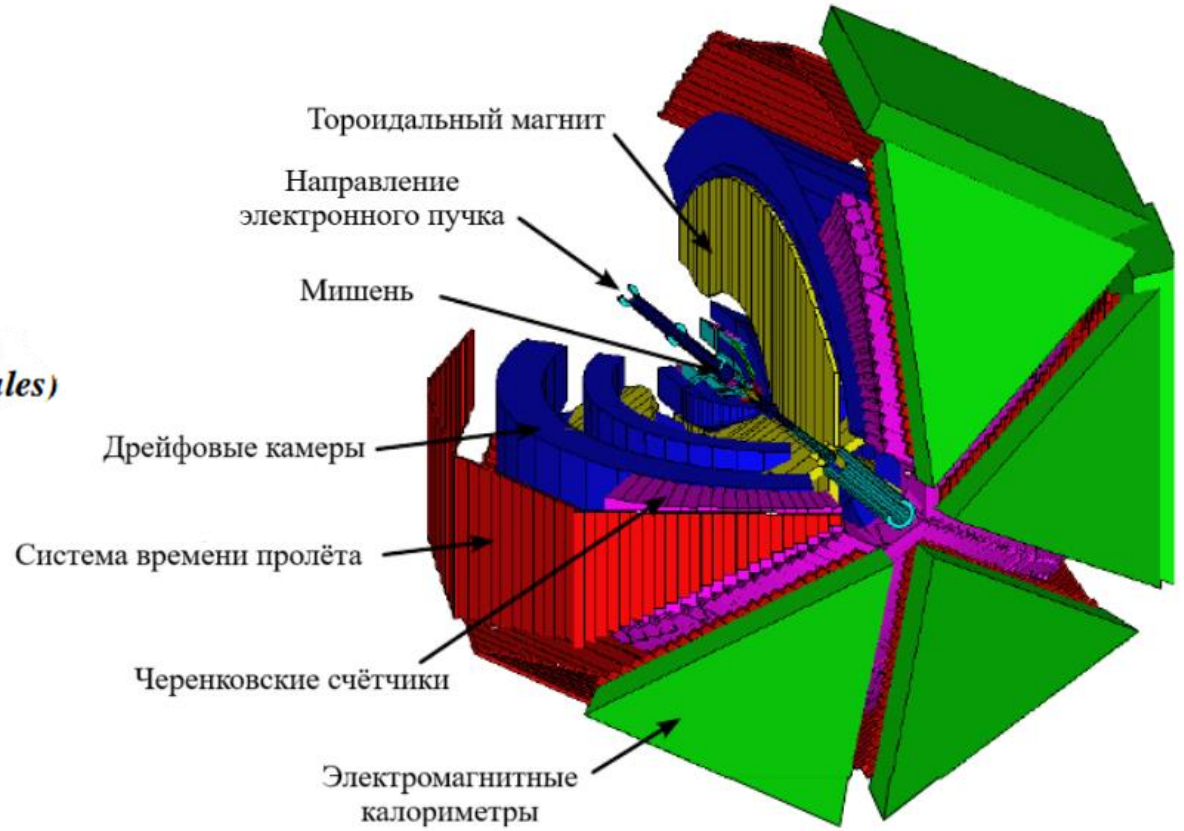
Исследование нуклонных резонансов – наиболее удобный инструмент для изучения динамики сильного взаимодействия в непертурбативной области

Вершина $\gamma_v p N^*$ может быть охарактеризована тремя амплитудами $A_{1/2}$, $A_{3/2}$, $S_{1/2}$



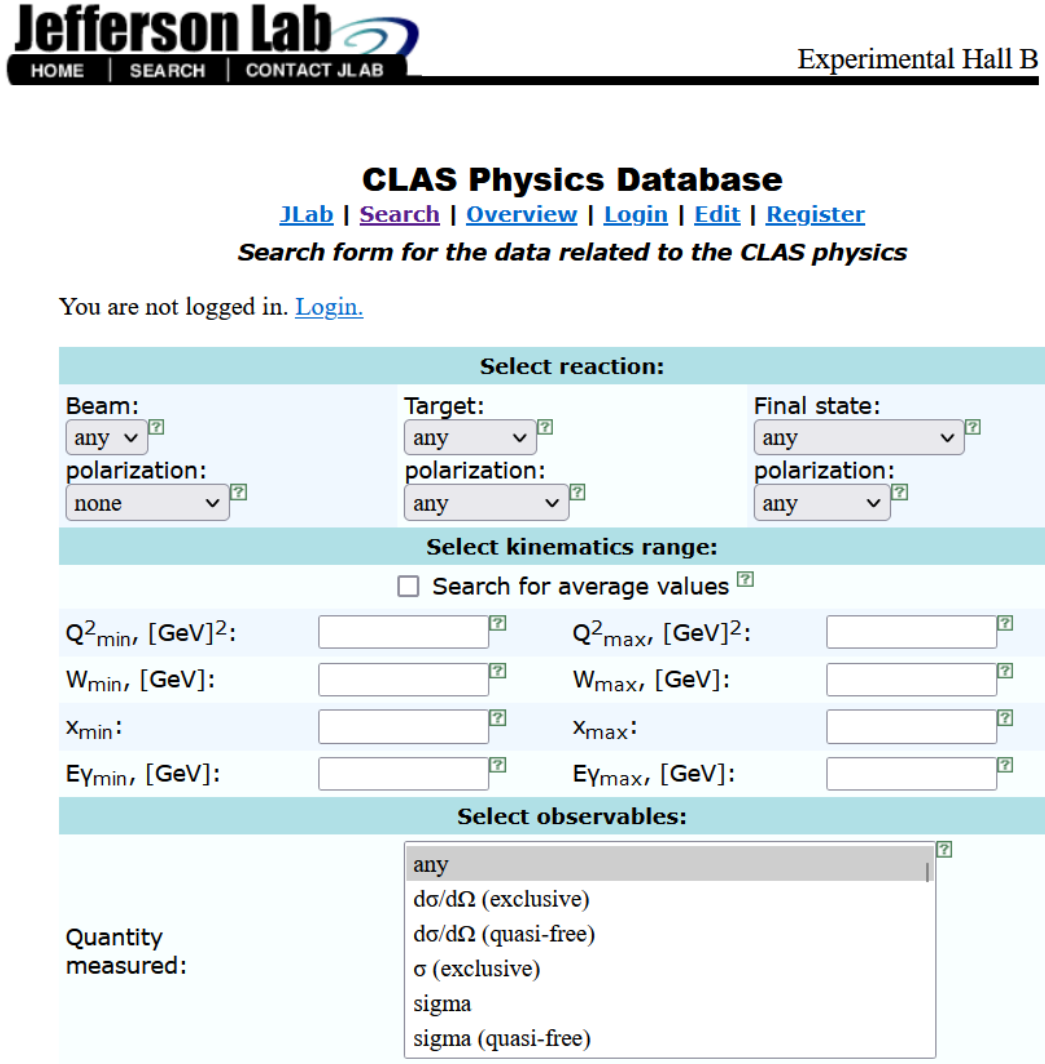
Ускоритель CEBAF и детектор CLAS Лаборатории Томаса Джефферсона (Jefferson Lab)

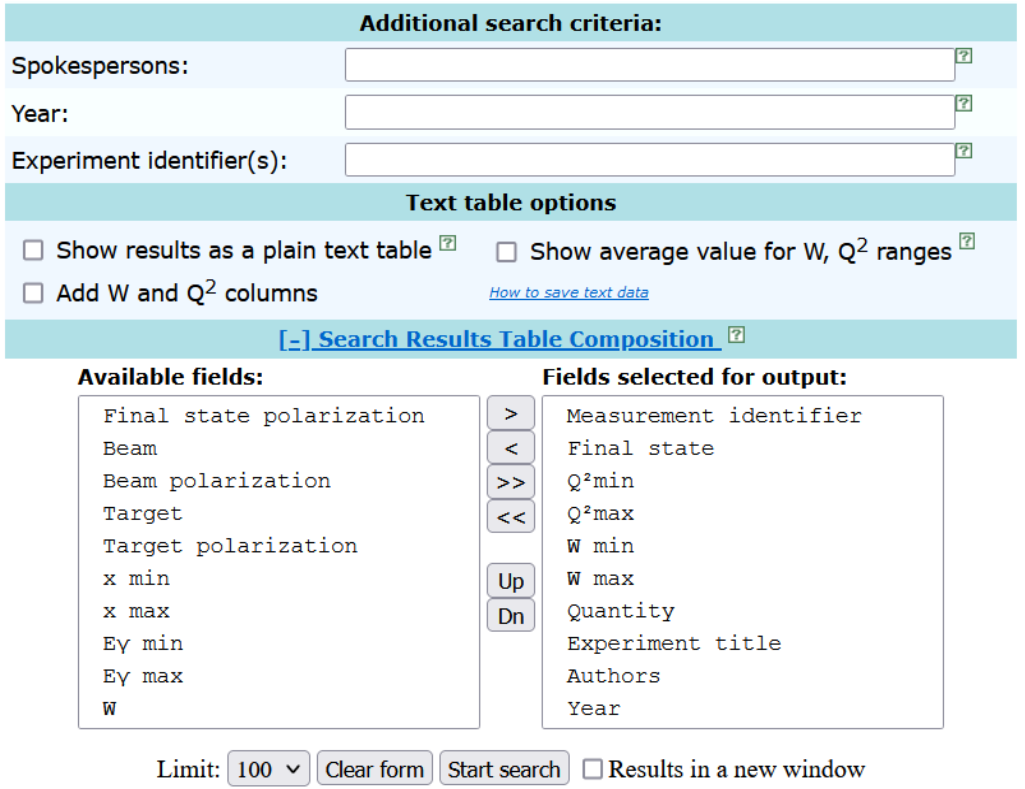




CLAS Physics Database

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





clas.sinp.msu.ru

База данных по дифференциальным сечениям реакции $\gamma_v p \to p\pi^0$

	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

$Q^2 = 4E_e E'_e sin^2 \frac{\theta_e}{2}$ - 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

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

Дифференциальное сечение рождения одиночного пиона

$$\frac{d\sigma_{\gamma_v}}{d\Omega_\pi} = \frac{d\sigma_u}{d\Omega_\pi} + \varepsilon\frac{d\sigma_{tt}}{d\Omega_\pi}\cdot cos2\varphi_\pi + \sqrt{2\varepsilon(1+\varepsilon)}\frac{d\sigma_{lt}}{d\Omega_\pi}\cdot cos\varphi_\pi$$

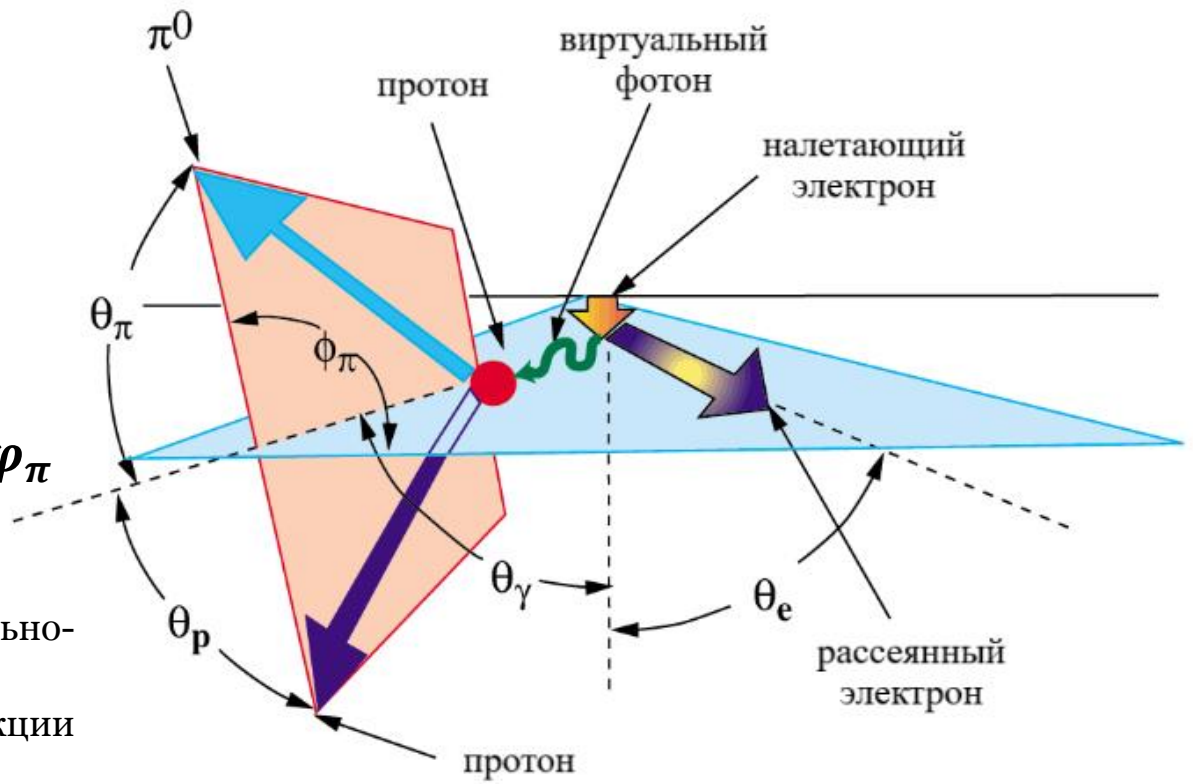
$$\frac{d\sigma_u}{d\Omega_\pi} = \frac{d\sigma_t}{d\Omega_\pi} + \varepsilon\frac{d\sigma_l}{d\Omega_\pi}$$

или в более компактном виде: $\boldsymbol{\frac{d\sigma_{\gamma_v}}{d\Omega_\pi} = A + Bcos2\varphi_\pi + Ccos\varphi_\pi}$

$\frac{d\sigma_t}{d\Omega_\pi}, \frac{d\sigma_l}{d\Omega_\pi}, \frac{d\sigma_{lt}}{d\Omega_\pi}, \frac{d\sigma_{tt}}{d\Omega_\pi}$ – 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

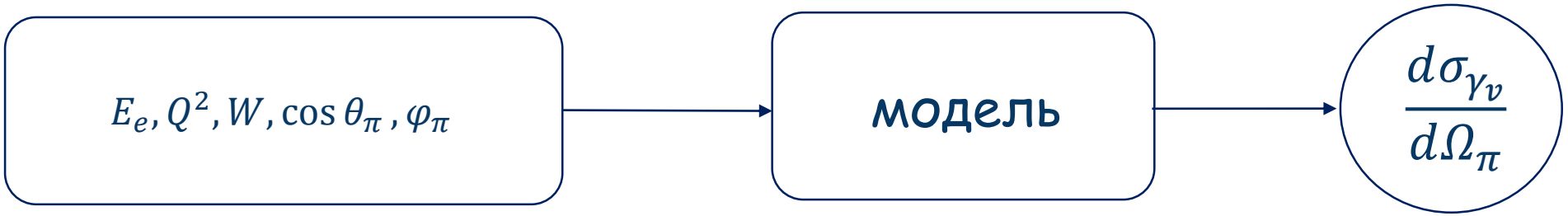


θ_π – полярный угол вылета пиона в системе центра масс «виртуальный фотон-протон»

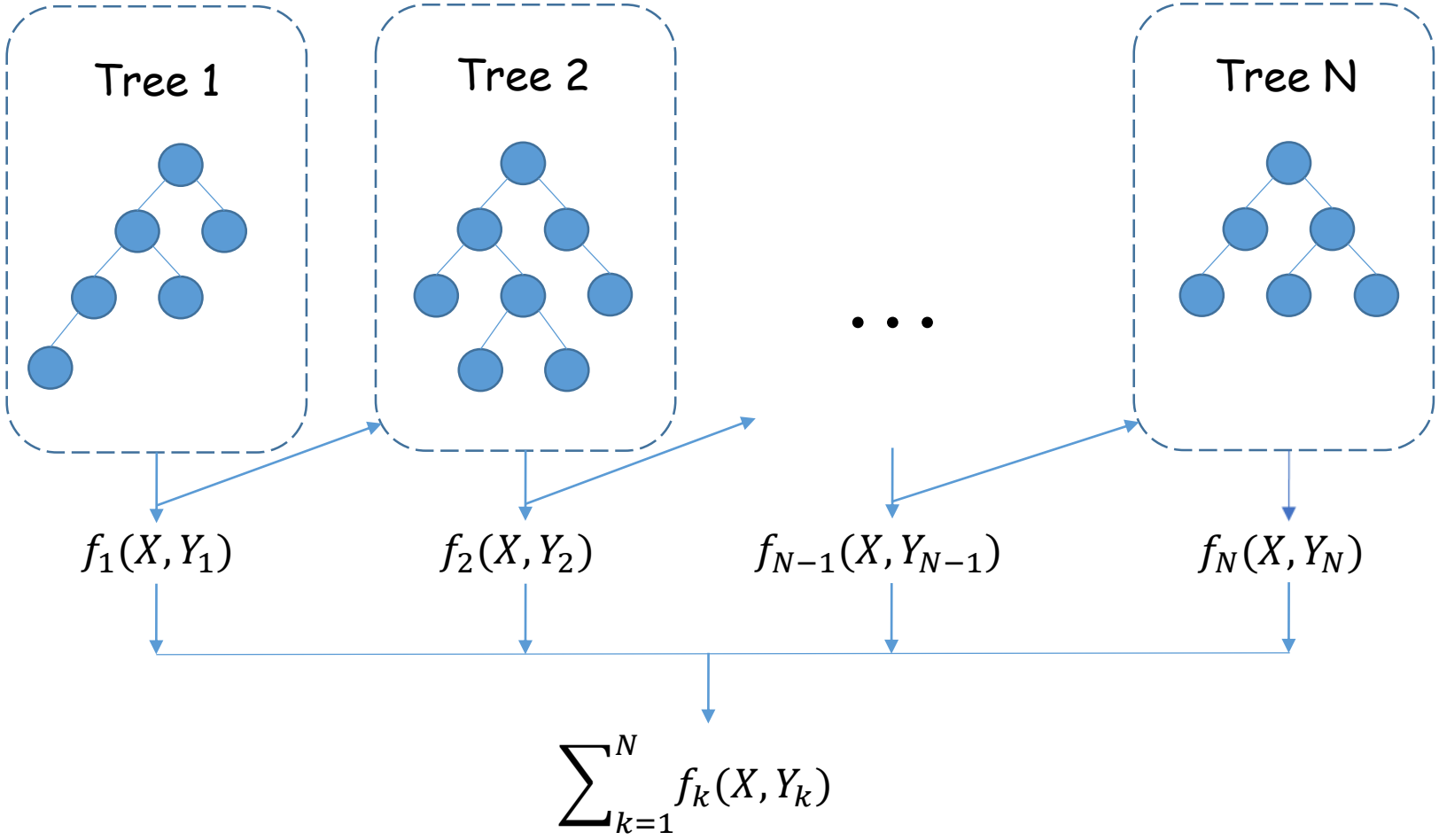
φ_π – угол между плоскостью рассеяния электрона и плоскостью реакции

Цель работы

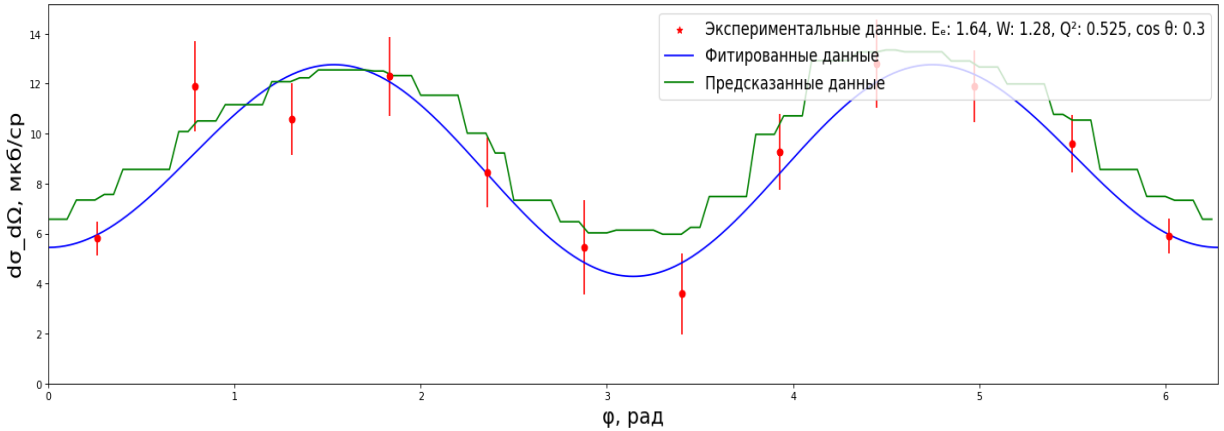
Цель моей работы заключается в построении алгоритма для описания дифференциальных сечений реакции электророждения одиночного пиона на протоне, способного осуществлять надёжную интерполяцию данных в пятимерном пространстве

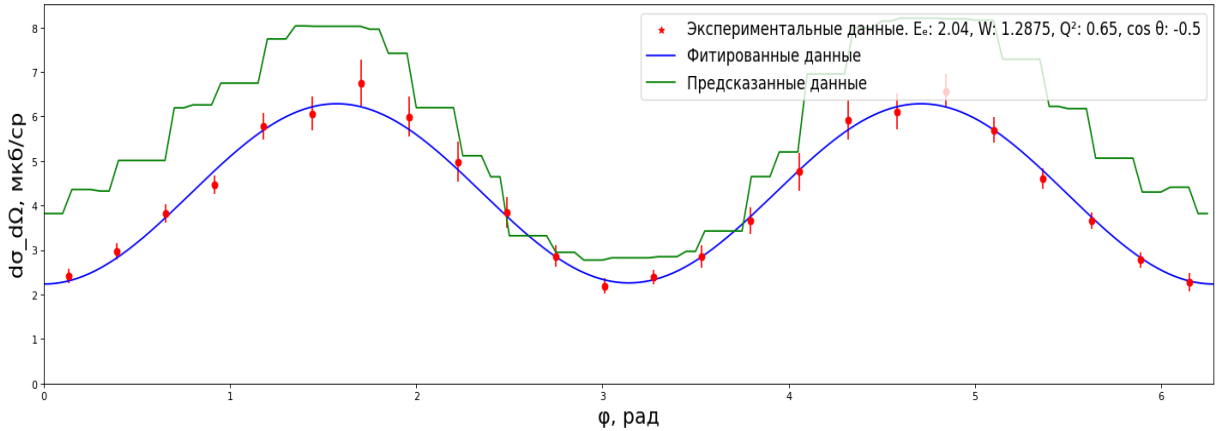


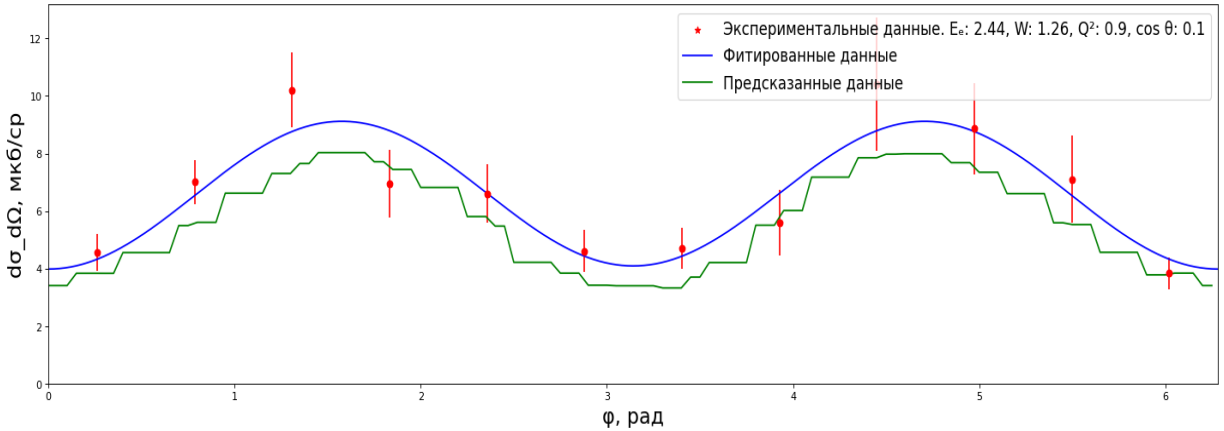
Алгоритм XGBoost

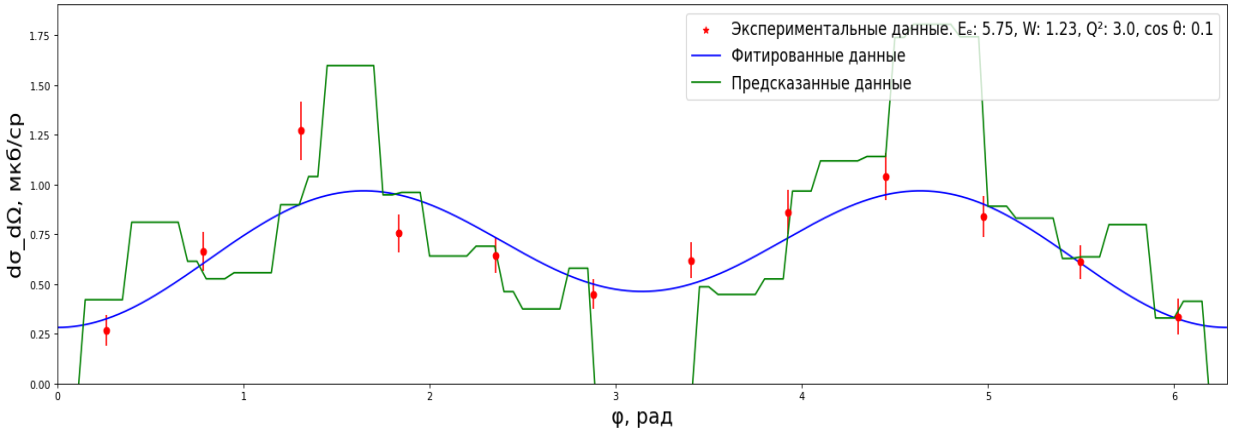


Предсказанные дифференциальные сечения реакции $\gamma_v p \to p\,\pi^0$ (алгоритм XGBoost)









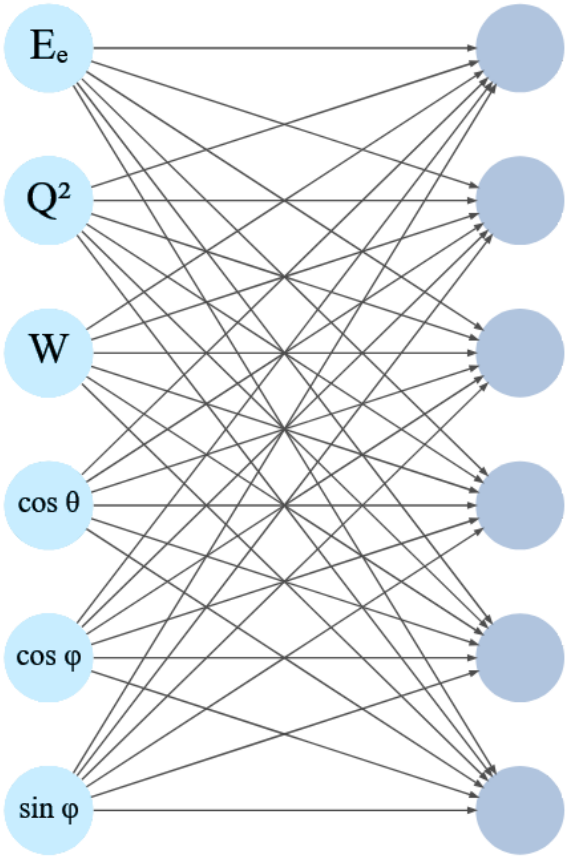
Фитирование: $\frac{d\sigma_{\gamma v}}{d\Omega_\pi} = A + B cos2\varphi_\pi + C cos\varphi_\pi$

Полносвязная нейронная сеть (многослойный персептрон)

input layer

19 hidden layers

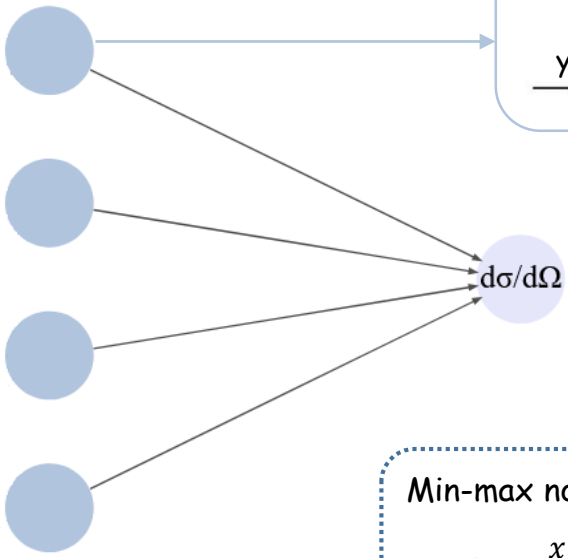
output layer

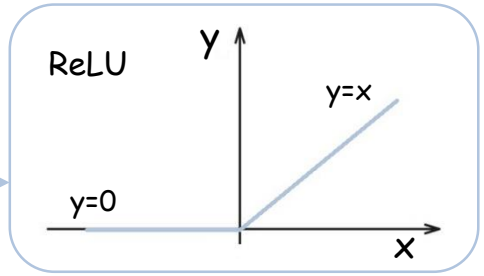


Standardization: $x' = \frac{x-\mu}{\sigma}$

$$\mu = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} (x_i - \mu)^2}$$

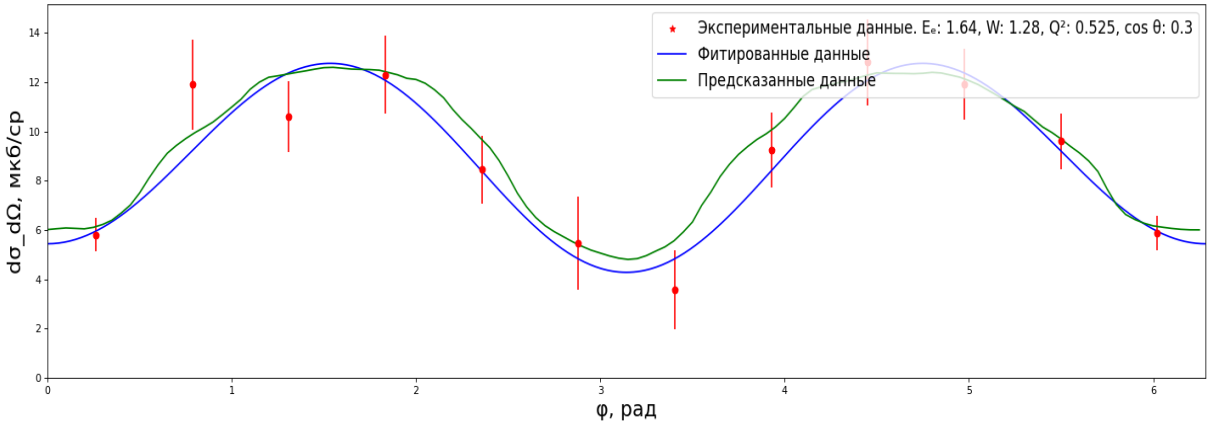


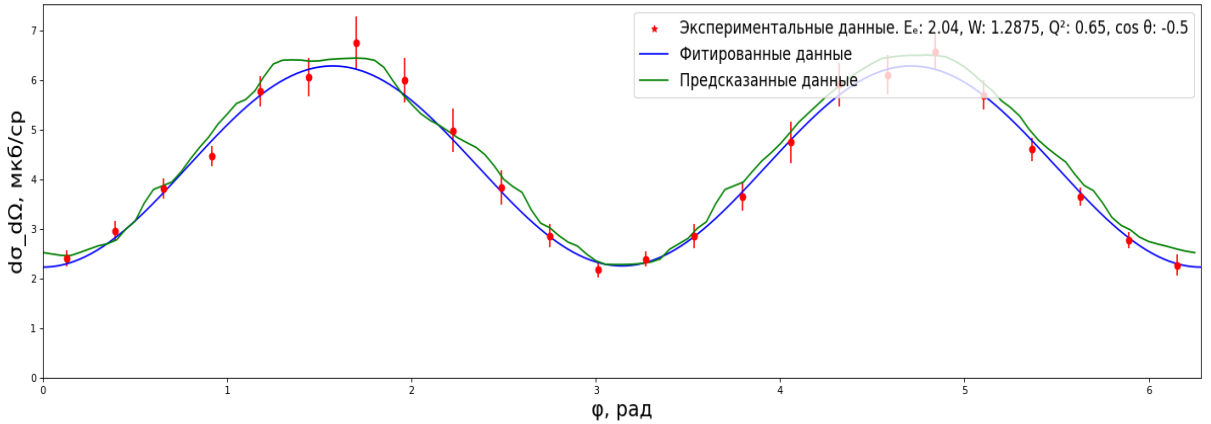


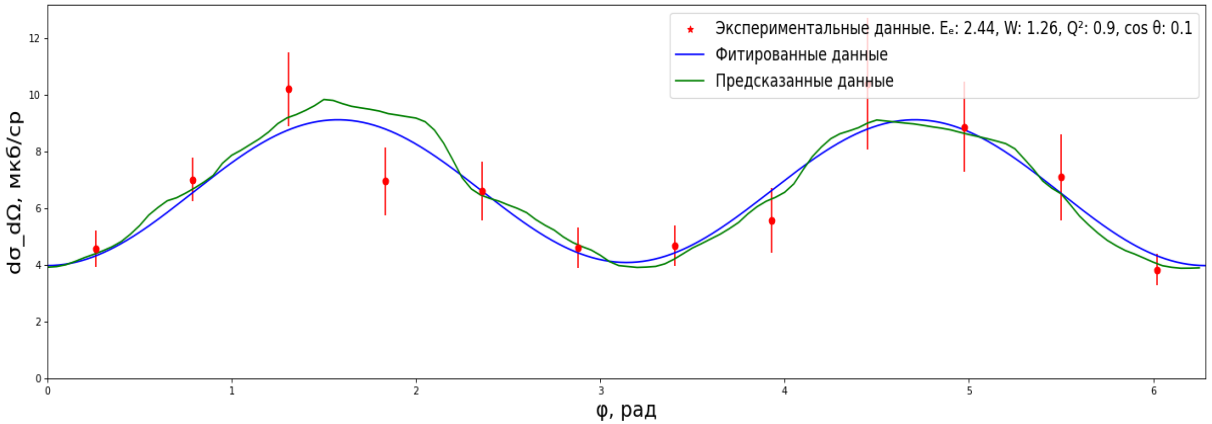
Min-max normalization:

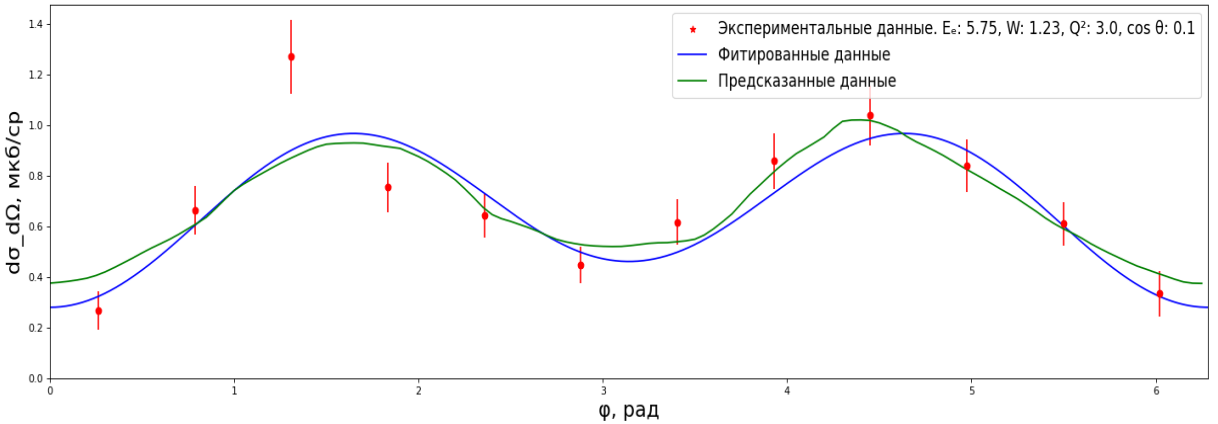
$$x' = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}$$

Предсказанные дифференциальные сечения реакции $\gamma_v p \to p\,\pi^0$ (нейронная сеть)



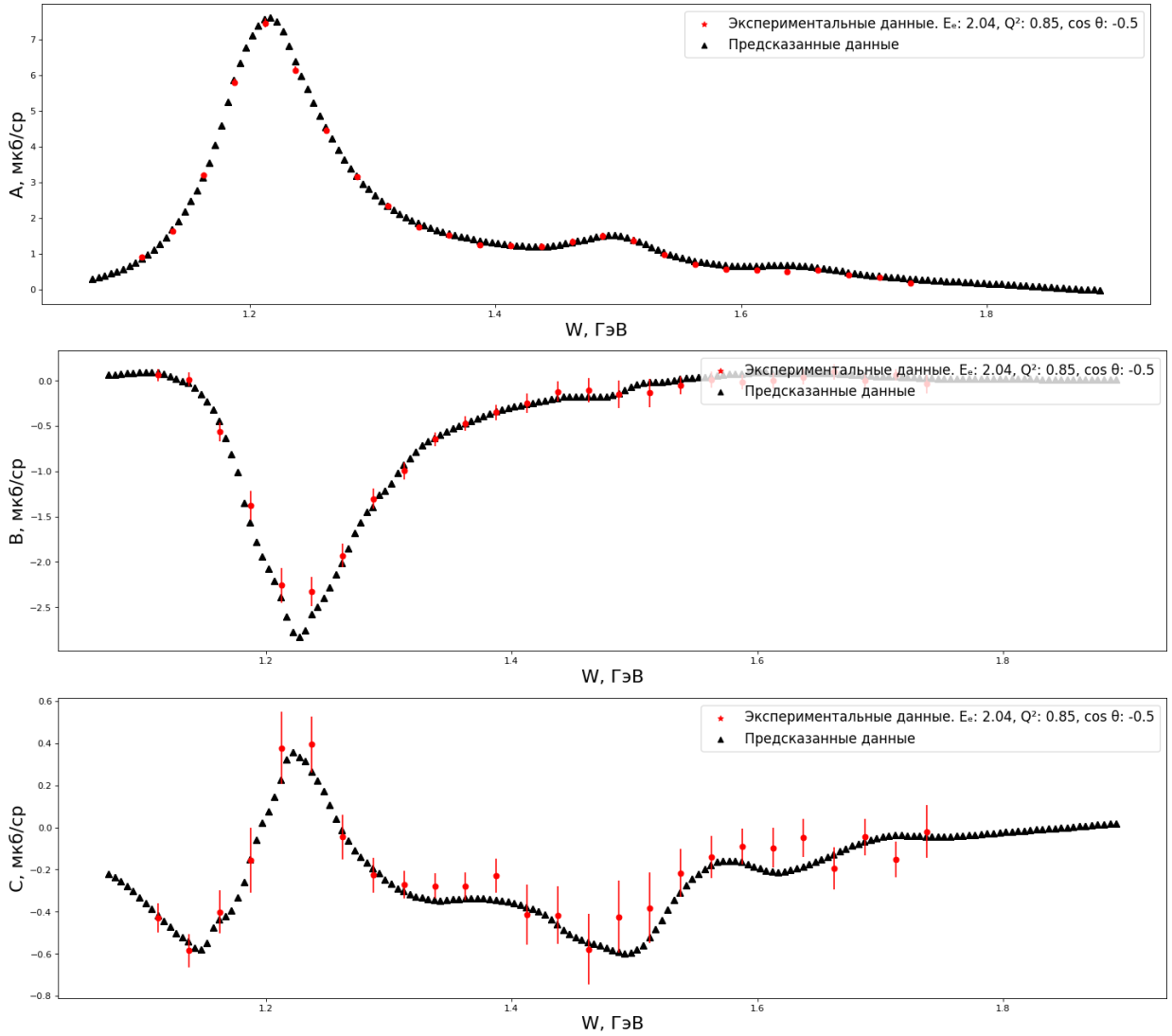






Фитирование: $\frac{d\sigma_{\gamma v}}{d\Omega_\pi} = A + B cos2\varphi_\pi + C cos\varphi_\pi$

Предсказанные структурные функции $\gamma_v p \to p\,\pi^0$ (нейронная сеть)

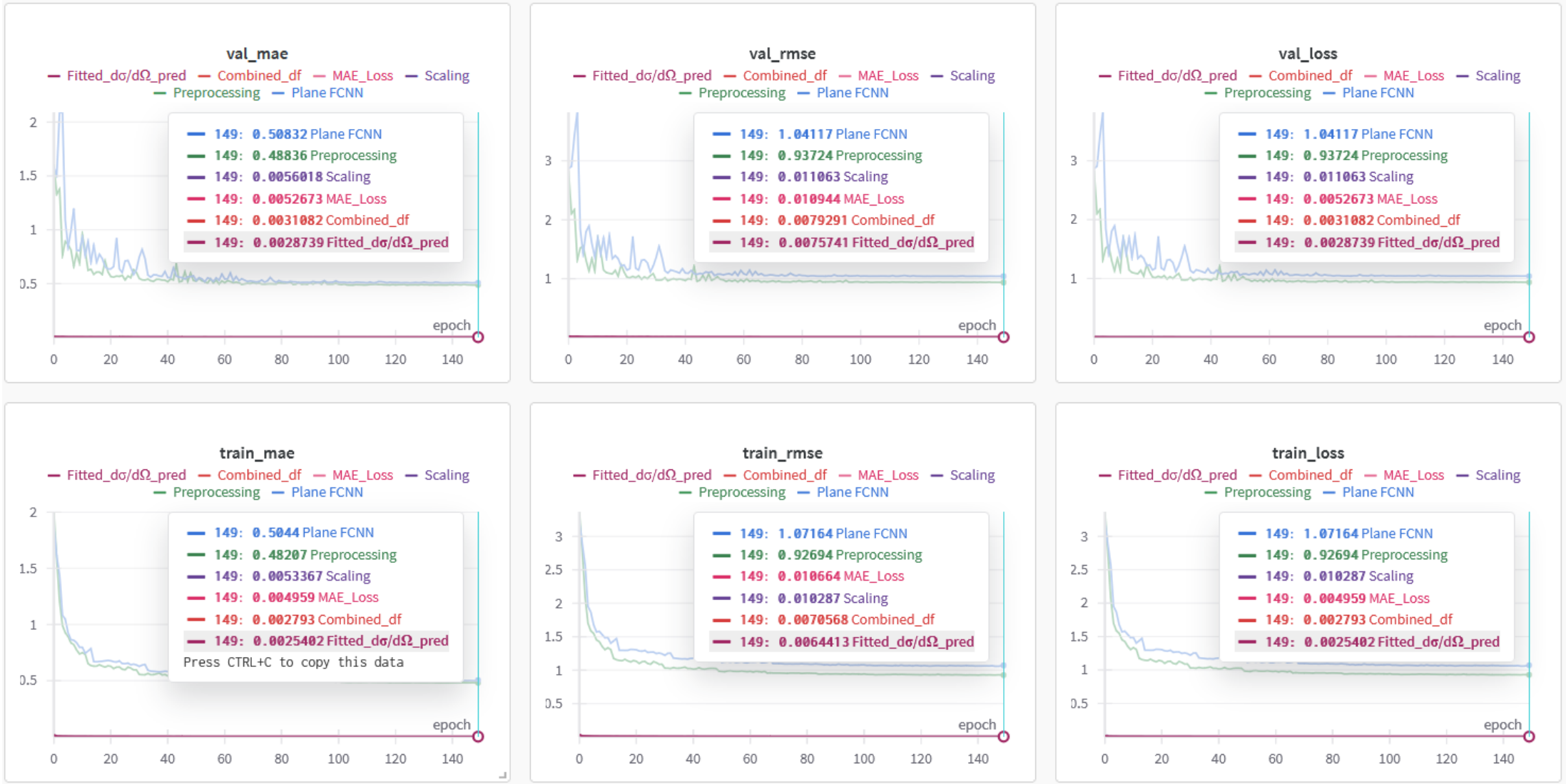


$$A(E_e, Q^2, W, \cos\theta_\pi) = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} \frac{d\sigma_{\gamma_v}(\varphi_\pi)}{d\Omega_\pi}\, d\varphi_\pi$$

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

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

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



Объединённая база данных по дифференциальным сечениям реакций $\gamma_v p \to p\,\pi^0$ и $\gamma_v p \to n\,\pi^+$

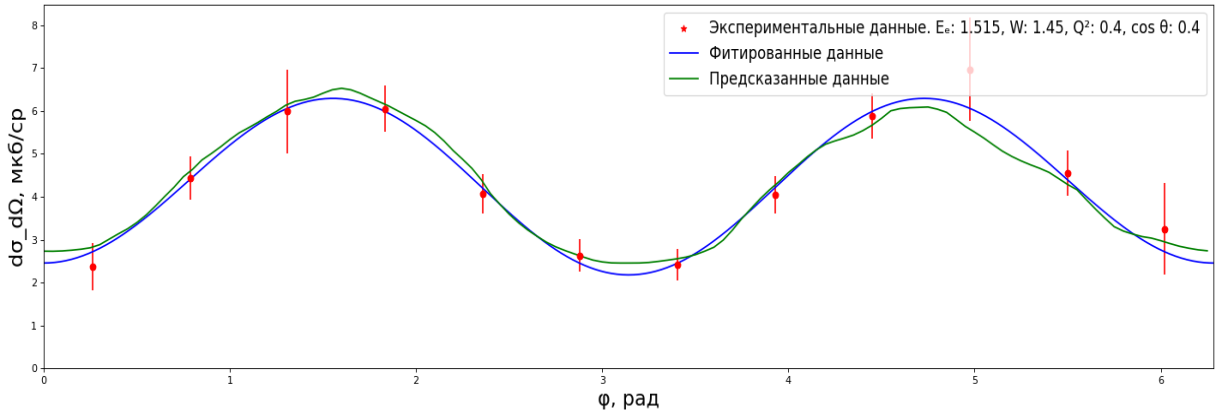
	Ebeam	W	Q2	cos_theta	phi	dsigma_dOmega	error	cos_phi	sin_phi	reaction_type
0	1.640	1.10	0.4	-0.900	0.261799	0.9120	0.982353	0.965926	0.258819	1
1	1.640	1.10	0.4	-0.900	0.785398	0.1750	0.356108	0.707107	0.707107	1
2	1.640	1.10	0.4	-0.900	1.308997	1.6500	2.769879	0.258819	0.965926	1
3	1.640	1.10	0.4	-0.900	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

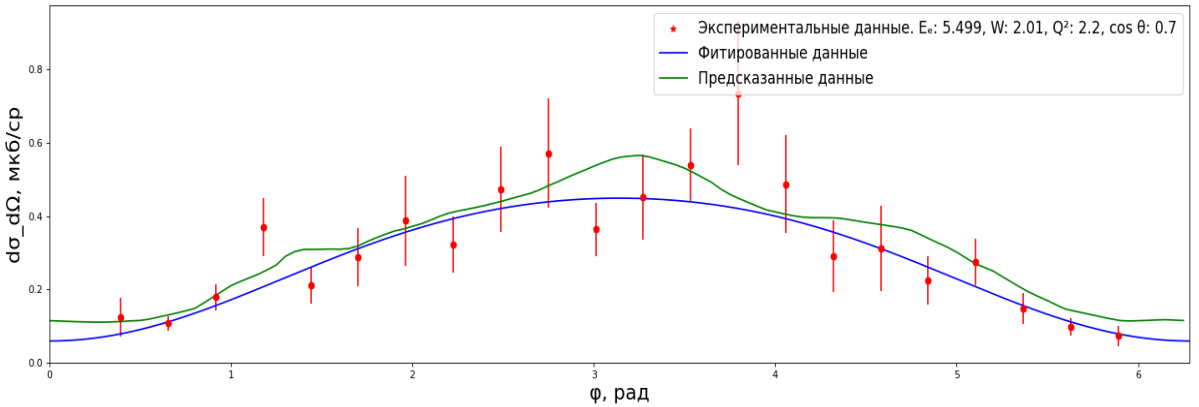
160836 rows × 10 columns

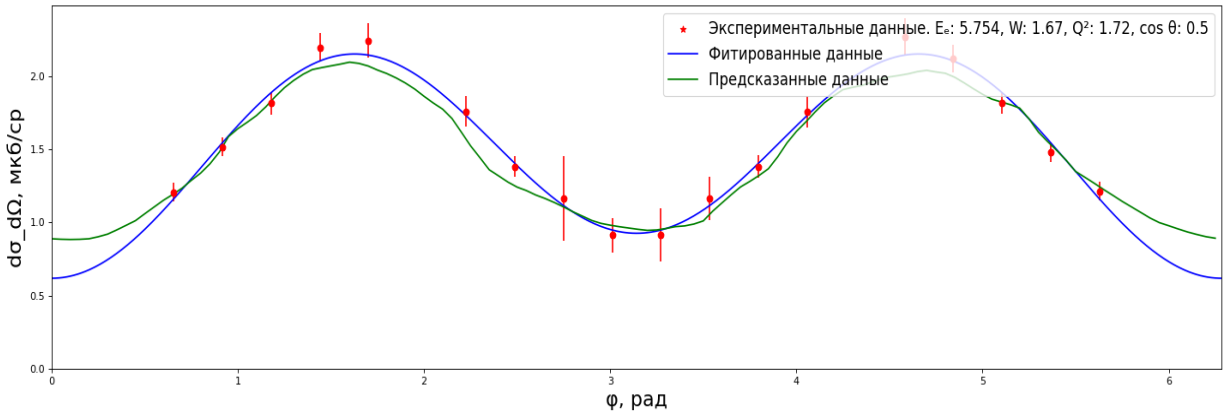
$E_{beam}(\gamma_v p \to n\,\pi^+) \in [1.515;\ 5.499;\ 5.754]$ ГэВ

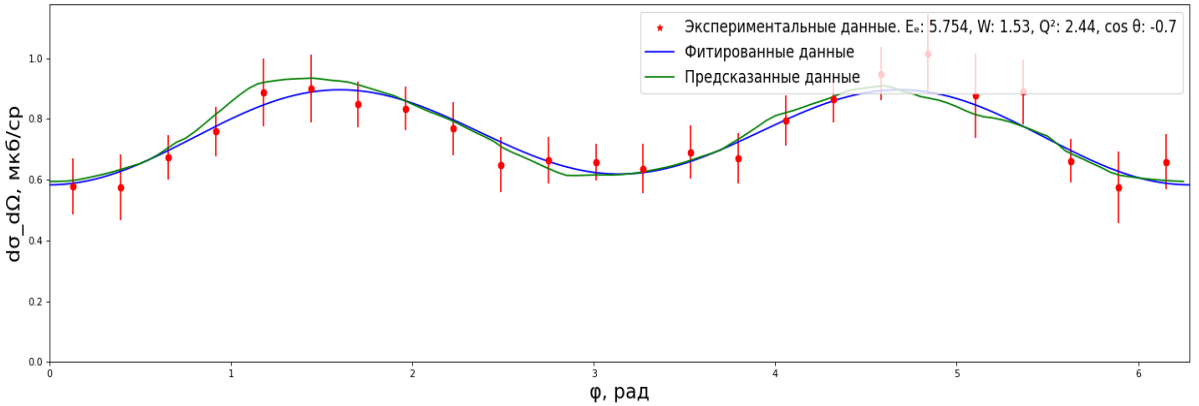
$E_{beam}(\gamma_v p \to p\,\pi^0) \in [1.64; 2.04; 2.44; 5.75]$ ГэВ

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



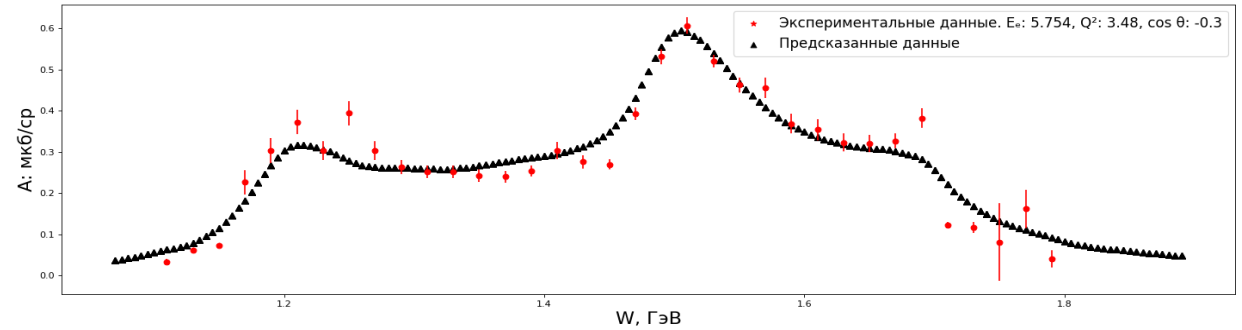


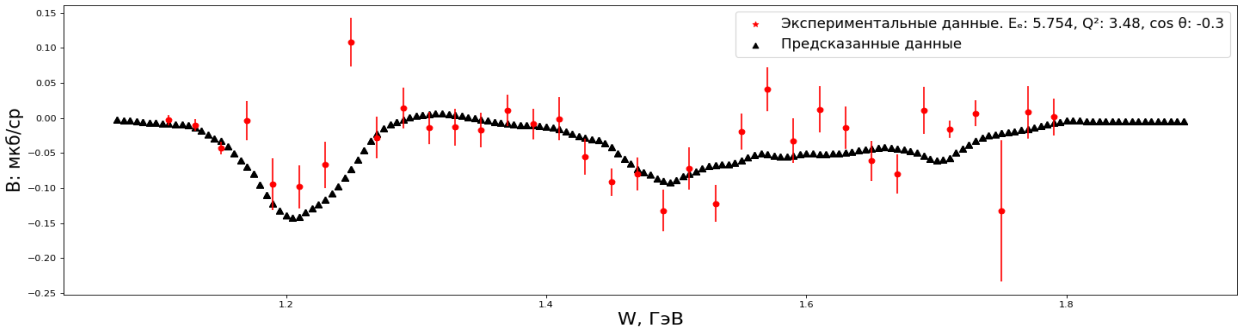


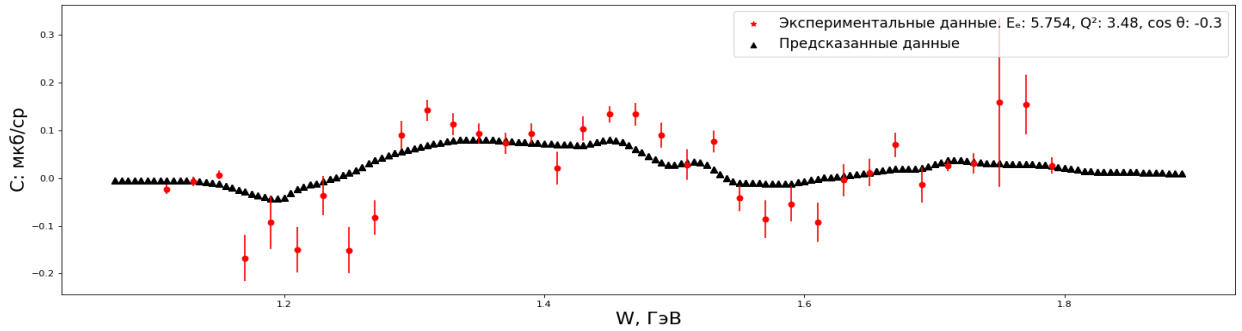


Фитирование: $\frac{d\sigma_{\gamma v}}{d\Omega_\pi} = A + B cos2\varphi_\pi + C cos\varphi_\pi$

Предсказанные структурные функции $\gamma_v p \to n\,\pi^+$ (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

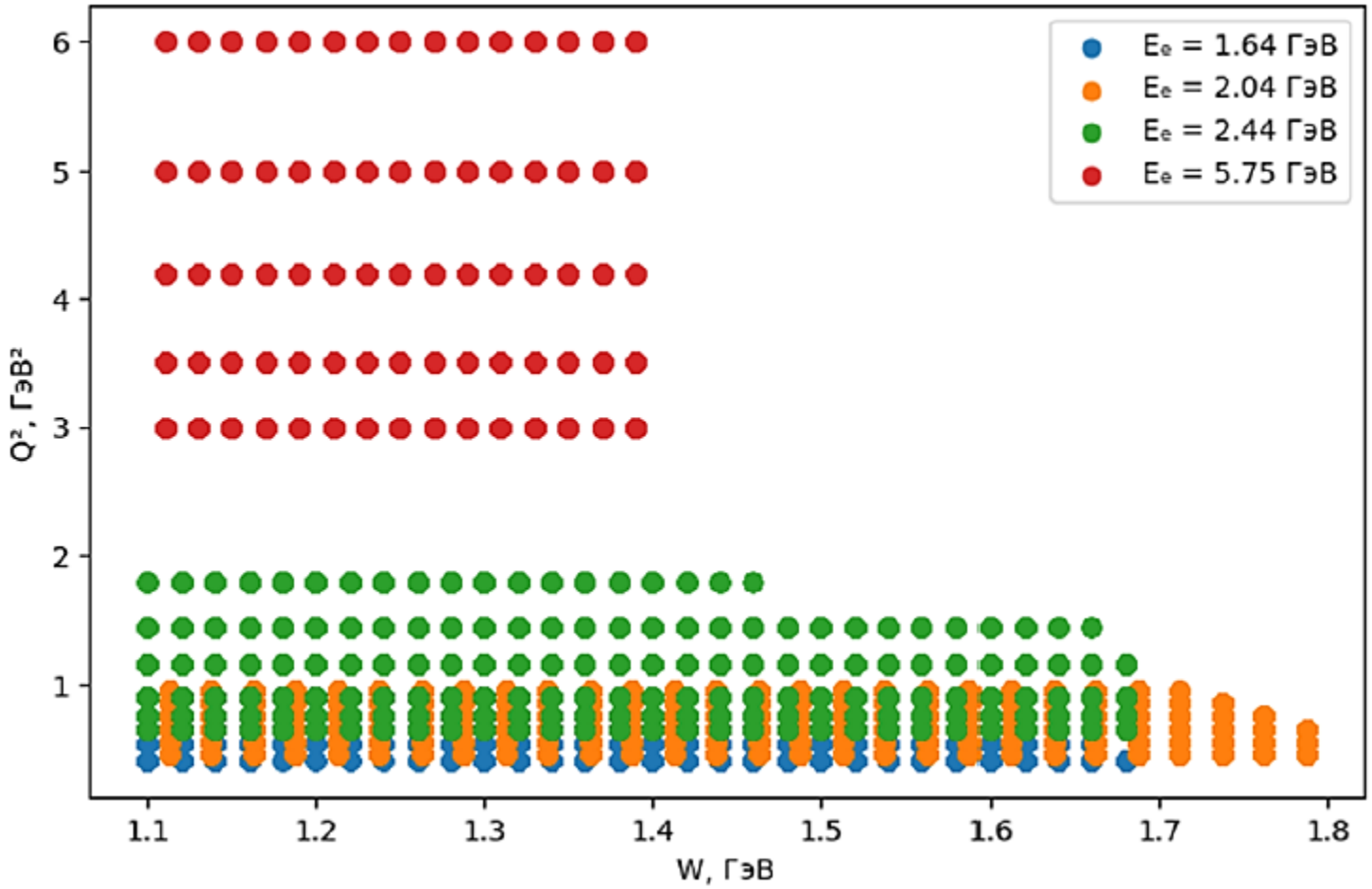
- разработан алгоритм на основе полносвязной нейронной сети для предсказания дифференциальных сечений электророждения одиночного пиона в реакции $\gamma_v\, p \rightarrow p\, \pi^0$;
- качество работы нейронной сети проверяется путём построения зависимости структурных функций от инвариантной массы системы конечных адронов исследуемой реакции;
- ведётся работа по улучшению алгоритма, в настоящее время модель обучается на объединённой базе данных реакций $\gamma_v\, p \rightarrow p\, \pi^0$ и $\gamma_v\, p \rightarrow n\, \pi^+$, вносятся корректировки в архитектуру сети;
- по результатам работы была опубликованы статьи:

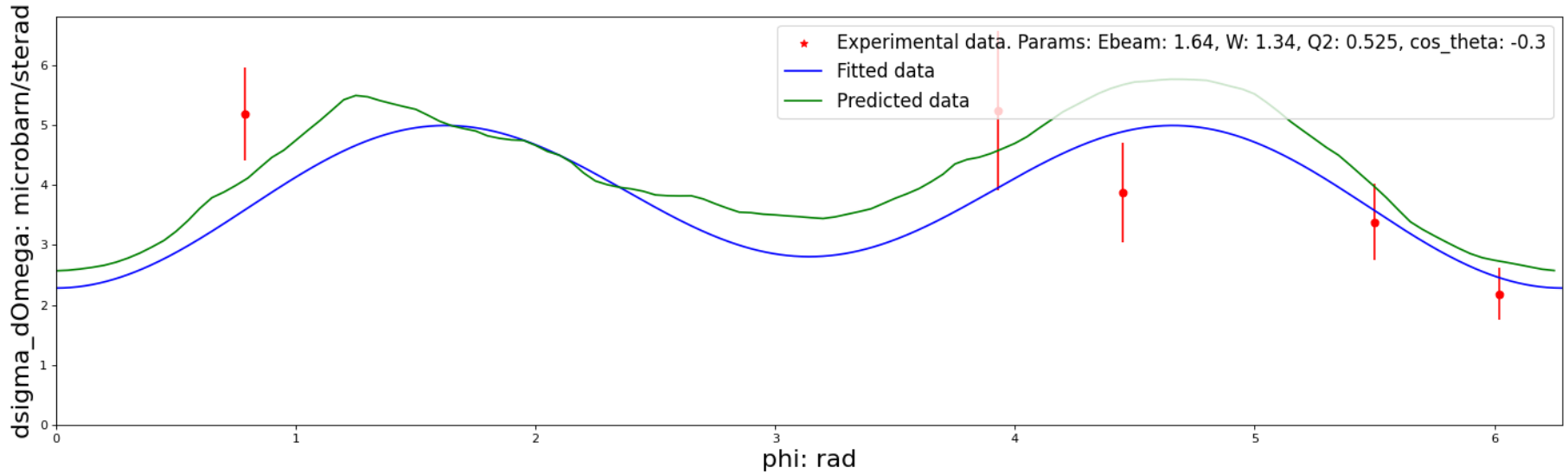
- *Golda A.V., Rusova A.A., Isupov E.L., Chistyakova V.V.* Machine Learning Approach in the Prediction of Differential Cross Sections and Structure Functions of Single Pion Electroproduction in the Resonance Region // Moscow University Physics Bulletin. 2024. **79**. P. 608-621.

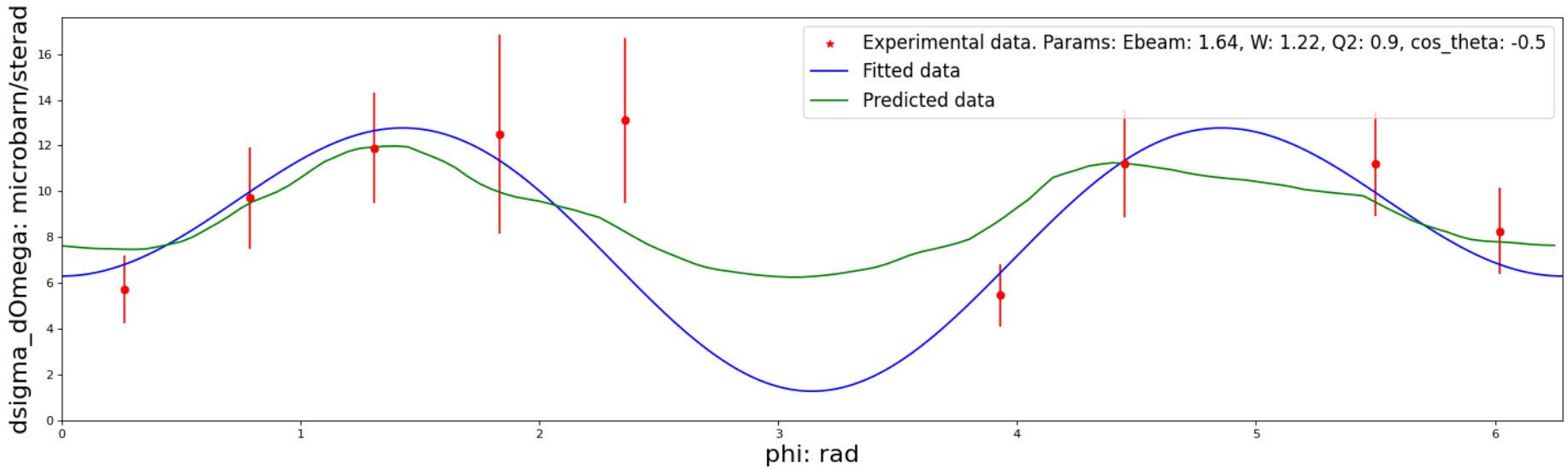
- *Чистякова В.В., Голда А.В., Русова А.А., Исупов Е.Л.* Машинное обучение в задаче предсказания дифференциальных сечений и структурных функций электророждения пионов в резонансной области // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. 2025. **2**. 2520213.

Спасибо за внимание!

Доступная в эксперименте кинематическая область




Experimental data. Params: Ebeam: 1.64, W: 1.34, Q2: 0.525, cos_theta: -0.3
Fitted data
Predicted data
dsigma_dOmega: microbarn/sterad
phi: rad


Experimental data. Params: Ebeam: 1.64, W: 1.22, Q2: 0.9, cos_theta: -0.5
Fitted data
Predicted data
dsigma_dOmega: microbarn/sterad
phi: rad

Измеренные наблюдаемые эксклюзивных реакций $\gamma_v\, p \rightarrow p\, \pi^0$ и $\gamma_v\, p \rightarrow n\, \pi^+$

Конечное адронное состояние	Диапазон по W, ГэВ	Диапазон по Q^2, ГэВ^2	Измеренные наблюдаемые
$p\, \pi^0$	1.10-1.38	0.16-0.36	$\frac{d\sigma}{d\Omega}$
	1.1125-1.7875	0.45-0.95	$\frac{d\sigma}{d\Omega}$
	1.10-1.68	0.40-1.15	$\frac{d\sigma}{d\Omega}, A_{LT'}, A_t, A_{et}$
	1.08-1.16	2.00-4.50	$\frac{d^2\sigma}{d\cos\theta_\pi\, d\varphi_\pi}$
	1.10-1.39	3.00-6.00	$\frac{d\sigma}{d\Omega}$
$n\, \pi^+$	1.10-1.38	0.16-0.36	$\frac{d\sigma}{d\Omega}$
	1.10-1.55	0.30-0.60	$\frac{d\sigma}{d\Omega}$
	1.10-1.70	1.70-4.50	$\frac{d\sigma}{d\Omega}, A_{LT'}$
	1.60-2.00	1.80-4.50	$\frac{d\sigma}{d\Omega}$

Нуклонные резонансы, для которых получены амплитуды электровозбуждения из анализа данных CLAS

Эксклю-зивные каналы	Возбуждённые состояния протона	Диапазон по Q^2 в реакции $\gamma_v p N^*$, ГэВ^2
$p\,\pi^0, n\,\pi^+$	$\Delta(1232)\,3/2^+$	0.16-6.00
	$N(1440)\,1/2^+, N(1520)\,3/2^-, N(1535)\,1/2^-$	0.30-4.16
$n\,\pi^+$	$N(1675)\,5/2^-, N(1680)\,5/2^+, N(1710)\,1/2^+$	1.60-4.50