

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Голда Андрей Васильевич

**Методы машинного обучения в исследовании электромагнитных
процессов рождения мезонов на протонах**

Специальность 1.3.15.

Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких
энергий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2026

Диссертация подготовлена на кафедре общей ядерной физики физического
факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель

Исупов Евгений Леонидович,
кандидат физико-математических наук

Официальные оппоненты

Дудко Лев Владимирович,
доктор физико-математических наук,
МГУ имени М.В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной
физики имени Д.В. Скобельцына,
Отдел экспериментальной физики высоких
энергий, лаборатория электрослабых и новых
взаимодействий, заведующий лабораторией

Ким Виктор Тимофеевич,
доктор физико-математических наук,
Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт», Петербургский
институт ядерной физики им. Б.П. Константинова,
Отделение физики высоких энергий, лаборатория
физики элементарных частиц, заместитель
руководителя отделения

Федоров Никита Александрович,
кандидат физико-математических наук,
Объединенный институт ядерных исследований,
Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка,
Отделение ядерной физики, Сектор исследований
нейтронно-ядерных взаимодействий, начальник
сектора

Защита диссертации состоится 11 сентября 2026 г. в 15 часов 00 минут на заседании
диссертационного совета МГУ.013.2 Московского государственного университета имени
М.В. Ломоносова по адресу: 119991 Москва, Ленинские горы, д. 1, строение 5 (19-й корпус
НИИЯФ МГУ), ауд. 2-15.

Е-mail диссовета: *galan_lidiya@mail.ru*

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ
имени М. В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале:
<https://dissovet.msu.ru/dissertation/3996>

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



Л.И. Галанина

Общая характеристика работы

В настоящее время не вызывает никаких сомнений, что квантовая хромодинамика (КХД) является истинной теорией сильного взаимодействия. Эффективный инструмент для описания адронных процессов в КХД – теория возмущений – демонстрирует высокую предсказательную способность, что было многократно подтверждено экспериментально при изучении реакций с участием адронов в широком диапазоне энергий от десятков ГэВ до нескольких ТэВ и при величинах переданных импульсов от 10 до 10 000 ГэВ² [1].

Однако пертурбативные методы применимы только при высоких переданных импульсах, или характерных расстояниях $r < 0.1$ Фм, характеризующихся значением безразмерного параметра $\alpha_s \ll 1$. С уменьшением переданных импульсов (или увеличением расстояния r) пертурбативный подход становится неприменимым, поскольку параметр α_s резко возрастает из-за эффекта антиэкранирования, обусловленного неабелевой природой КХД. При $\alpha_s \approx 1$ точечные кварки и глюоны формируют сложные структуры, включая виртуальные глюонные облака и кварк-антикварковые пары, что приводит к возникновению "одетых" частиц. Около 98% массы адронов формируется именно за счёт процесса одевания, тогда как вклад механизма Хиггса не превышает 2% [2].

В промежуточной области ($0.1 \text{ Фм} < r < 1 \text{ Фм}$) особую роль играют возбуждённые состояния нуклонов, изучение которых позволяет исследовать непертурбативную динамику сильного взаимодействия. Анализ спектра и структуры этих состояний, включая радиальные и орбитальные возбуждения, даёт ценную информацию о формировании динамической массы и эволюции структуры одетых частиц [3].

Электромагнитное взаимодействие служит одним из основных инструментов исследования возбуждённых состояний нуклонов. Значительная часть экспериментальных данных получена коллаборацией CLAS (Continuous

Electron Beam Accelerator Facility - Large Acceptance Spectrometer) Национальной лаборатории им. Т. Джефферсона в реакциях рассеяния электронов и фотонов на протонах и ядрах. Эти исследования направлены на изучение спектра резонансов в эксклюзивных реакциях фоторождения мезонов [4] и их внутренней структуры в процессах электророждения [5].

Получаемые данные включают дифференциальные сечения и поляризационные наблюдаемые, зависящие от множества кинематических переменных. Их анализ осложнён высокой размерностью фазового пространства, нелинейными корреляциями и статистическими флуктуациями. Традиционные статистические и параметрические методы не всегда позволяют полно описать структуру таких данных.

Методы машинного обучения дают возможность выявлять сложные многомерные зависимости, повышать точность анализа, что расширяет возможности исследования динамики сильных взаимодействий.

В последние годы Нобелевские премии по физике и химии были присуждены за выдающиеся достижения в области искусственного интеллекта, что демонстрирует, как методы ИИ становятся неотъемлемой частью современных научных исследований, открывая новые горизонты в понимании сложных систем и ускоряя прогресс в различных областях науки.

Таким образом, актуальность темы работы обусловлена необходимостью получения достоверной информации о наблюдаемых в электромагнитных процессах рождения мезонов на протонах в резонансной области и возможностью применения методов машинного обучения для моделирования многомерных экспериментальных данных, восстановления физических корреляций и учета детекторных эффектов.

Цели: Целью настоящей работы является создание методов анализа и обработки экспериментальных данных для выявления нелинейных физических корреляций в электромагнитных процессах с использованием алгоритмов машинного обучения на примере задачи многомерной интерполяции

дифференциальных сечений и структурных функций в реакции электророждения одиночного мезона на протоне, а также задачи генеративного моделирования для восстановления детекторных эффектов в реакции фоторождения пар заряженных пионов.

Для достижения поставленных целей необходимо было решить следующие **задачи:**

1. Разработать метод вычисления значений структурных функций и дифференциальных сечений рассеяния реакции $\gamma^* + p \rightarrow n + \pi^+$ в резонансной области. Построить валидационную схему для определения качества работы предложенного метода.
2. Создать метод вычисления эксклюзивных структурных функций и дифференциальных сечений электророждения $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$ на протонах. Оценить погрешности полученных результатов, а также области применимости данного метода. Провести сравнение оценок с экспериментальными данными.
3. Разработать метод, позволяющий устранять детекторные эффекты и выявлять корреляции в многомерном фазовом пространстве кинематических переменных для процессов фоторождения пар заряженных пионов на протонах. Провести процедуру тестирования метода на синтетических данных и определить систематические погрешности.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Применение нейросетевых подходов на основе полносвязной архитектуры с использованием независимых переменных, однозначно задающих кинематику реакции, реализует модельно-независимый метод оценки дифференциальных сечений реакции электророждения положительного пиона на протоне в резонансной области.
2. Разложение структурных функций в ряд по полиномам Лежандра, а также использование степенных функций для описания эволюции по квадрату

четырехимпульса виртуального фотона Q^2 количественно определяет зависимость дифференциальных сечений рассеяния и структурных функций от кинематических переменных в реакции электророждения $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$.

3. Методы анализа и обработки экспериментальных данных, основанные на генеративно-состязательных нейронных сетях, выявляют корреляции в многомерном фазовом пространстве кинематических переменных и корректируют влияние эффектов, обусловленных откликом детектора, в событиях реакции двухпионного фоторождения.

Научная новизна:

1. Впервые разработан и реализован метод, основанный на полносвязных нейронных сетях, для моделирования экспериментальных данных по структурным функциям и дифференциальным сечениям рассеяния реакции $\gamma^* + p \rightarrow n + \pi^+$ в резонансной области, который воспроизводит данные с точностью, сопоставимой с экспериментальными погрешностями (средняя абсолютная ошибка 0.08 мкб/ср).
2. Создан метод вычисления эксклюзивных структурных функций и дифференциальных сечений электророждения $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$ на протонах, позволяющий количественно определить зависимость этих величин от кинематических переменных.
3. Разработан метод выявления многомерных корреляций в событиях реакции $\gamma + p \rightarrow p + \pi^+ + \pi^-$ с использованием генеративных алгоритмов машинного обучения, позволяющий корректировать влияние детекторных эффектов и получать достоверные распределения четырехимпульсов исходных частиц.

Предмет и объект исследования. Объектом исследования являются электромагнитные процессы рождения мезонов на протонах, изучаемые в эксклюзивных реакциях электророждения и фоторождения мезонов. Предметом исследования являются методы машинного обучения для выявления нелинейных

физических корреляций, моделирования дифференциальных сечений и структурных функций, а также коррекции детекторных эффектов в многомерном фазовом пространстве кинематических переменных.

Методология и методы исследования. Для моделирования дифференциальных сечений и структурных функций в реакциях электророждения мезонов на протонах использовались методы машинного обучения, включая полносвязные нейронные сети, методы многомерной регрессии и статистической валидации. Для анализа реакций электророждения $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$ применялись разложения структурных функций по полиномам Лежандра и параметризация их зависимости от квадрата четырехимпульса виртуального фотона Q^2 . Для восстановления многомерных корреляций кинематических переменных и коррекции детекторных эффектов в реакции двухпионного фоторождения использовались генеративно-состязательные нейронные сети и методы Монте-Карло моделирования. Для численных расчётов в работе были реализованы алгоритмы на языках программирования C++ и Python. Язык Python также использовался для разработки и обучения нейронных сетей, проведения процедур их валидации, а также для анализа и визуализации полученных результатов.

Практическая значимость. Результаты работы моделей, полученные в диссертации, могут быть использованы для проверки точности теоретических моделей, а также для создания или улучшения работы существующих Монте-Карло генераторов событий. Также подобные алгоритмы могут послужить основой для системы хранения и распределения экспериментальных данных.

Достоверность результатов, описанных в диссертации, обеспечивается использованием апробированных и зарекомендовавших себя методов машинного обучения и классических методов обработки экспериментальных данных. Эффективность этих методов подтверждается согласием результатов с экспериментальными данными, полученными в ранее опубликованных работах коллаборации CLAS и мировых данных.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались автором на следующих конференциях: Международная молодежная научная конференция «Технологии ИИ в науке и образовании» (Москва - 2023), Научная конференция «Ломоносовские чтения» (Москва - 2024), Научная конференция «Ломоносов» (Москва - 2024), 8-я международная конференция «Deep Learning in Computational Physics» (Москва - 2024), Научная конференция имени Б.С. Ишханова «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине» (Москва - 2024).

Личный вклад. Вклад соискателя во всех опубликованных работах является определяющим. Все выносимые на защиту положения являются результатами, полученными лично соискателем.

В публикации [A1] соискателем реализована разработка и валидация нового подхода к восстановлению детекторных эффектов в эксклюзивной реакции двухпионного фоторождения с использованием генеративно-состязательных нейронных сетей. Выполнены задачи анализа, связанные с построением и исследованием функций плотности вероятности для сгенерированных Монте-Карло псевдоданных, а также с проверкой применимости GAN-архитектур для раскрытия детекторных эффектов в многомерном фазовом пространстве. Проведённая соискателем работа являлась важной частью процедуры теста раскрытия и внесла вклад в обоснование основного вывода публикации о возможности применения генеративных моделей для восстановления детекторных эффектов при сохранении корреляций между кинематическими переменными.

В публикации [A2] соискателем разработан и реализован метод вычисления эксклюзивных структурных функций и дифференциальных сечений электророждения $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$ на протонах из экспериментальных данных детектора CLAS, проведена интерполяция и экстраполяция сечений в широкой области кинематических переменных, выполнена оценка неопределённостей

полученных результатов, а также реализован программный комплекс для расчёта и визуализации дифференциальных сечений и структурных функций.

В публикации [A3] соискателем предложен, реализован и валидирован передовой нейросетевой подход к моделированию дифференциальных сечений и структурных функций реакции электророждения одиночного пиона на протоне в резонансной области. Соискателем разработана архитектура полносвязной нейронной сети, проведено обучение модели на экспериментальных данных CLAS, выполнена оптимизация гиперпараметров, а также проведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными. В публикации [A4] соискателем была выполнена дополнительная валидация разработанного нейросетевого подхода, включая сравнение с феноменологической моделью MAID2007 и применение метода реплик для оценки устойчивости результатов и неопределённостей нейросетевого моделирования.

Соискателем была проведена основная работа при подготовке текста всех статей, а также представление статей в архив и редакции журналов и переписка с редакторами и рецензентами.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 5 статьях, в том числе в 4 публикациях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова по специальности и отрасли науки.

Структура и содержание работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 136 страниц текста, включая 40 рисунков и 2 таблицы. Список литературы содержит 84 наименования.

Основное содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований,

показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

Первая глава посвящена обзору методов машинного обучения. Представлены основные понятия, используемые в этой области, типы обучения, группы алгоритмов и основные виды архитектур нейронных сетей. Рассмотрены ключевые аспекты обучения нейронных сетей, дан краткий обзор процесса обучения алгоритмов и введена основная используемая терминология. Описаны методы оценки качества моделей и предобработки данных при обучении нейронных сетей.

Во **второй главе** дано описание исследования нейронных сетей в задаче моделирования дифференциальных сечений рассеяния и структурных функций для реакции электророжения одиночного пиона на протоне в резонансной области.

Для эксклюзивной реакции

$$\gamma^* + p \rightarrow n + \pi^+ \quad (1)$$

описана кинематика реакции и основные кинематические переменные $(E, Q^2, W, \theta_\pi^*, \phi_\pi^*)$: E — энергия электронного пучка, Q^2 — виртуальность фотона, W — инвариантная масса конечной адронной системы, θ_π^* — полярный угол эмиссии пиона, ϕ_π^* — угол между плоскостью реакции и плоскостью рассеяния. Дано определение структурных функций, дифференциальных сечений рассеяния и приведена их зависимость от угла ϕ_π^* :

$$\begin{aligned} & \frac{d\sigma}{d\Omega}(E, Q^2, W, \cos\theta_\pi^*, \phi_\pi^*) = \\ & = \frac{d\sigma_T}{d\Omega}(Q^2, W, \cos\theta_\pi^*) + \varepsilon \frac{d\sigma_L}{d\Omega}(Q^2, W, \cos\theta_\pi^*) + \varepsilon \frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega}(Q^2, W, \cos\theta_\pi^*) \cos 2\phi_\pi^* + \\ & \quad + \sqrt{\varepsilon(1+\varepsilon)} \frac{d\sigma_{LT}}{d\Omega}(Q^2, W, \cos\theta_\pi^*) \cos\phi_\pi^* = \\ & = A(E, Q^2, W, \cos\theta_\pi^*) + B(E, Q^2, W, \cos\theta_\pi^*) \cos 2\phi_\pi^* + C(E, Q^2, W, \cos\theta_\pi^*) \cos\phi_\pi^*. \end{aligned} \quad (2)$$

Экспериментальные данные для исследуемой реакции (1) получены в экспериментах на детекторе CLAS научной лаборатории имени Т. Джефферсона и взяты из CLAS Physics Database [6].

Далее описаны используемые алгоритмы и процедуры обучения. Основной моделью является полносвязная нейронная сеть с четырьмя входами (совпадающих с четырьмя независимыми кинематическими переменными – $Q^2, W, \theta_\pi^*, \phi_\pi^*$), 19 скрытыми слоями шириной до 2000 нейронов и одним выходом для оценки $\frac{d\sigma}{d\Omega}$. Для трёх значений энергии пучка ($E = 1.515, 5.499, 5.754$ ГэВ) обучались отдельные модели.

Было протестировано более 200 архитектур и наборов гиперпараметров, включая компактные сети с меньшим количеством весов. Для лучшей модели применялись аугментация данных с увеличением выборки в 25 раз, стандартизация входных переменных, взвешенная функция потерь с учётом экспериментальных погрешностей, динамическая настройка скорости обучения и ранняя остановка.

В заключении главы приводится оценка качества работы алгоритма вместе со сравнением значений дифференциальных сечений (полученных в результате работы нейронной сети) с экспериментальными данными. Средняя абсолютная ошибка на кросс-валидации для трех обученных алгоритмов (при различных энергиях электронного пучка) составляет $M_{MAE} = 0.08$ мкб/ср, в то время как среднее значение экспериментальной ошибки дифференциальных сечений в исследуемом наборе данных составляет $AVG \left(\varepsilon \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right) \right) = \frac{\sum_i^N \varepsilon_i \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)}{N} = 0.2$ мкб/ср. Также приводятся графики сравнения зависимости дифференциальных сечений рассеяния от угла ϕ_π^* (рис. 1) и структурных функций от инвариантной массы системы конечных адронов (рис. 2) с экспериментальными данными. Сравнение демонстрирует, что алгоритм способен воспроизводить зависимость (2) с высокой точностью.

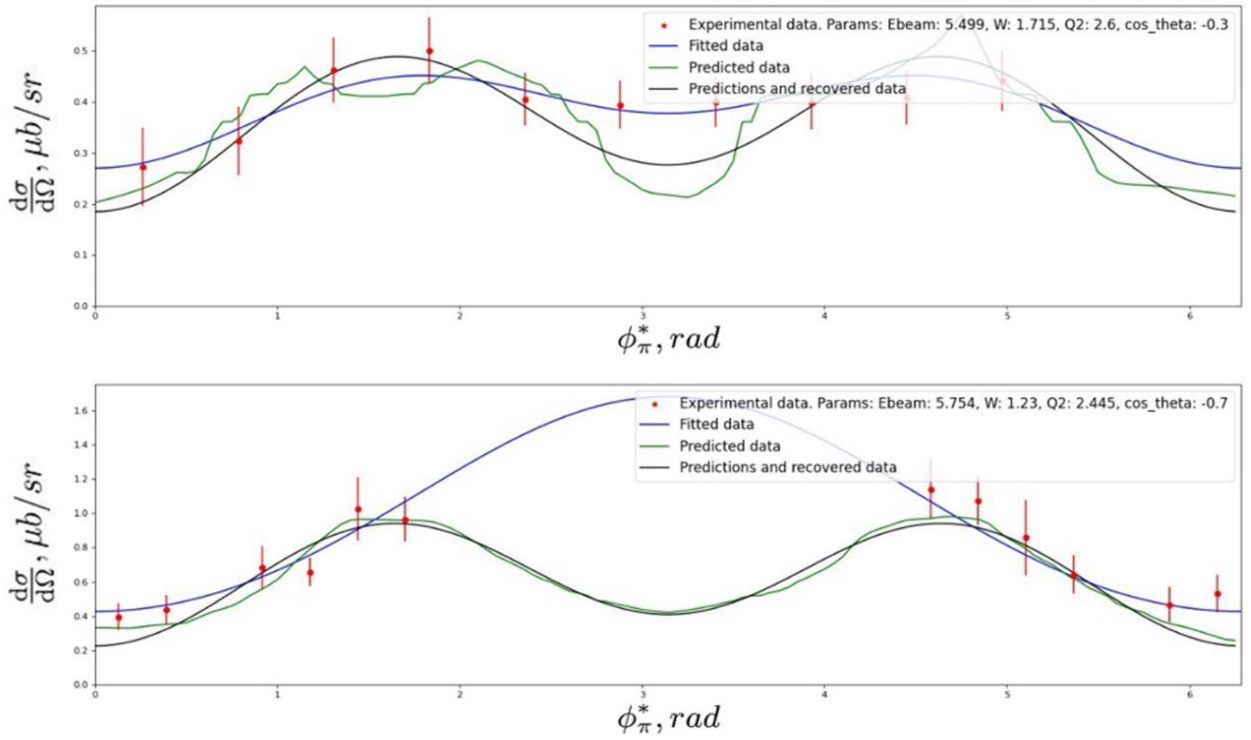


Рисунок 1 – Сравнение значений дифференциальных сечений $\frac{d\sigma}{d\Omega}$, полученных при помощи разработанного алгоритма (зеленая кривая) и измеренных в экспериментах CLAS с учетом погрешностей (красные точки) в фиксированных областях фазового пространства:

$$E = 5.499 \text{ ГэВ}, W = 1.715 \text{ ГэВ}, Q^2 = 2.6 \text{ ГэВ}^2, \cos\theta_{\pi}^* = -0.3 \text{ (верхний)},$$

$$E = 5.754 \text{ ГэВ}, W = 1.53 \text{ ГэВ}, Q^2 = 2.445 \text{ ГэВ}^2, \cos\theta_{\pi}^* = -0.7 \text{ (нижний)}.$$

Синей кривой представлена подгонка экспериментальных данных по ϕ_{π}^* -зависимости (2). Для получения черной кривой моделированные значения дифференциальных сечений восстанавливались посредством интегрирования

$$\phi_{\pi}^* \text{-зависимости (2)}$$

В работе дополнительно выполнен ряд валидаций, направленных на проверку корректности и устойчивости предложенной нейросетевой модели. В частности, проведено сравнение результатов моделирования с феноменологической моделью MAID2007 [7], а также представлена отдельная проверка в режиме обучения на значениях, сгенерированных моделью MAID2007 в кинематических точках экспериментальных данных, что позволило оценить способность нейронной сети корректно восстанавливать заданную функциональную зависимость. Кроме того, реализован метод реплик, основанный на обучении ансамбля моделей на статистически флуктуирующих

данных, что дало возможность количественно оценить устойчивость прогнозов и связанные с ними неопределённости.

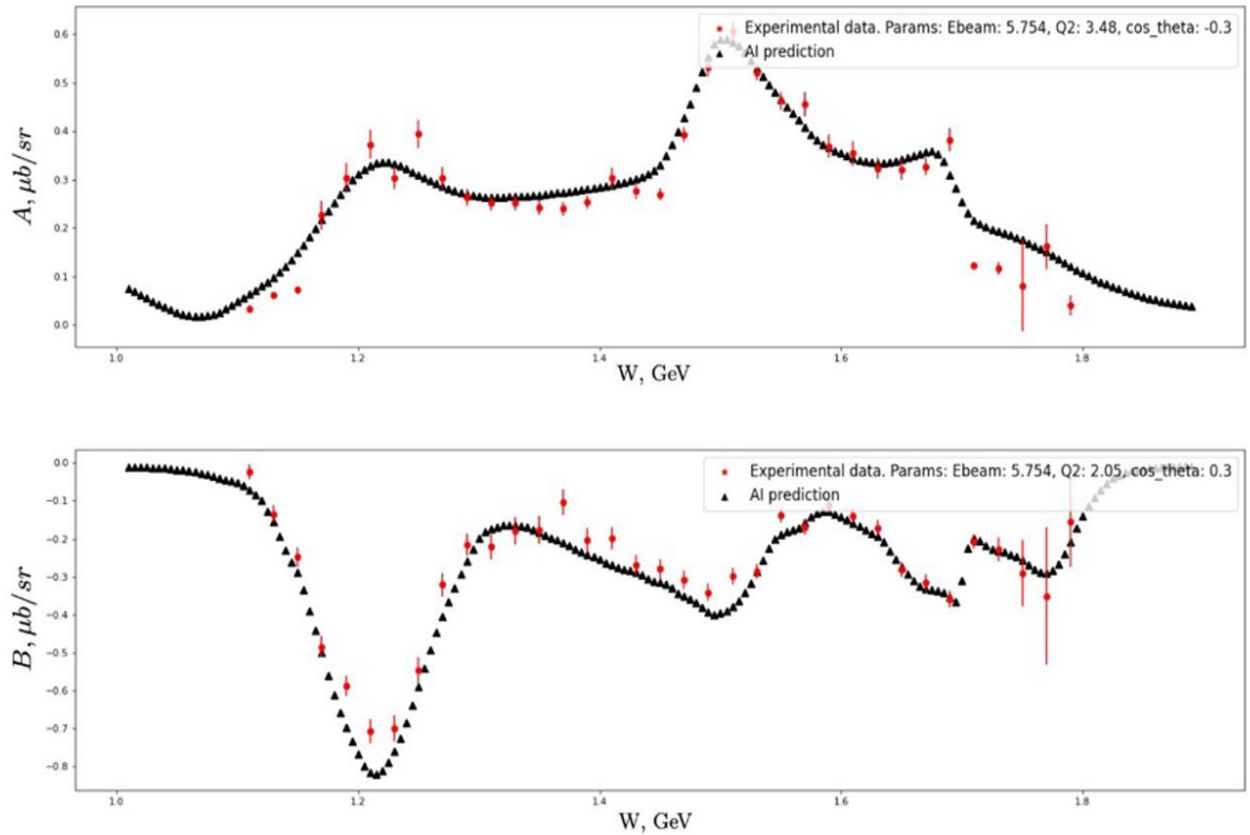


Рисунок 2 - Сравнение результатов работы модели (черные точки) для структурных функций в зависимости от инвариантной массы системы конечных адронов W с экспериментальными данными (красные точки с ошибками) в фиксированной области фазового пространства, а именно:

Функция A при $E = 5.754$ ГэВ, $Q^2 = 3.48$ ГэВ², $\cos\theta_\pi^* = -0.3$ (первый сверху),

Функция B при $E = 5.754$ ГэВ, $Q^2 = 2.445$ ГэВ², $\cos\theta_\pi^* = -0.7$ (второй сверху)

Результаты валидации позволяют сделать вывод, что нейросетевая модель обладает высокой точностью и позволяет интерполировать как значения сечений, так и значения структурных функций в различных областях фазового пространства.

В **третьей главе** описывается метод оценки сечений электророждения $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$ на протонах в области инвариантных масс конечных адронов

$M_K + M_Y < W < 2.65$ ГэВ (M_K и M_Y - массы положительно заряженного каона и рассматриваемого гиперона) и виртуальностей фотона $0 < Q^2 < 5$ ГэВ² на основе экспериментальных данных по дифференциальным сечениям.

В первой части главы дан краткий обзор существующих данных по электровозбуждению нуклонов. Представлены кинематические области и типы реакций, по которым существуют доступные экспериментальные данные электророждения мезонов на протоне, такие как дифференциальные сечения рассеяния, асимметрии, а также амплитуды электровозбуждения N^* . Также представлен формализм описания реакций электророждения $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$ на протонах.

Во второй части главы описывается процесс интерполяции дифференциальных сечений в выбранной области фазового пространства для рассматриваемой реакции. Интерполяция осуществлялась путём представления сечений через структурные функции по формуле (2), а их, в свою очередь, в ряд по полиномам Лежандра:

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_{T/L}}{d\Omega_K} &= A_{T/L} \cdot P_0(\cos \theta_K^*) + B_{T/L} \cdot P_1(\cos \theta_K^*) + C_{T/L} \cdot P_2(\cos \theta_K^*) + D_{T/L} \times \\ &\times P_3(\cos \theta_K^*) + E_{T/L} \cdot P_4(\cos \theta_K^*), \\ \frac{d\sigma_{LT}}{d\Omega_K} &= \sin \theta_K^* [A_{LT} \cdot P_0(\cos \theta_K^*) + B_{LT} \cdot P_1(\cos \theta_K^*) + C_{LT} \cdot P_2(\cos \theta_K^*) + D_{LT} \times \\ &\times P_3(\cos \theta_K^*) + E_{LT} \cdot P_4(\cos \theta_K^*)], \\ \frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega_K} &= \sin^2 \theta_K^* [A_{TT} \cdot P_0(\cos \theta_K^*) + B_{TT} \cdot P_1(\cos \theta_K^*) + C_{TT} \cdot P_2(\cos \theta_K^*) + D_{TT} \times \\ &\times P_3(\cos \theta_K^*) + E_{TT} \cdot P_4(\cos \theta_K^*)], \end{aligned} \quad (3)$$

где θ_K^* – полярный угол эмиссии конечного каона в системе центра масс конечных адронов; $\frac{d\sigma_i}{d\Omega_K}$ – компоненты дифференциального сечения рассеяния электророждения $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$ на протонах, где $i \in \{T, L, LT, TT\}$, T/L обозначает соответственно поперечную или продольную компоненты, LT – продольно-

поперечную, а TT – поперечно-поперечную компоненту); $P_n(\cos \theta_K^*)$ – многочлены Лежандра (где $n \in \{0, \dots, 4\}$); коэффициенты A_i, B_i, C_i, D_i, E_i (где $i \in \{T, L, LT, TT\}$) являются компонентами разложения соответствующих сечений в ряд по многочленам Лежандра.

Для полученных из экспериментальных данных коэффициентов разложения по полиномам Лежандра использовалась линейная интерполяция по переменным W и Q^2 . Неопределенности структурных функций получены из неопределенностей экспериментальных результатов при их интерполяции кубическим сплайном. Данная процедура позволила получить результаты на сетке по W и Q^2 в пределах, где имеются экспериментальные данные (рис. 3).

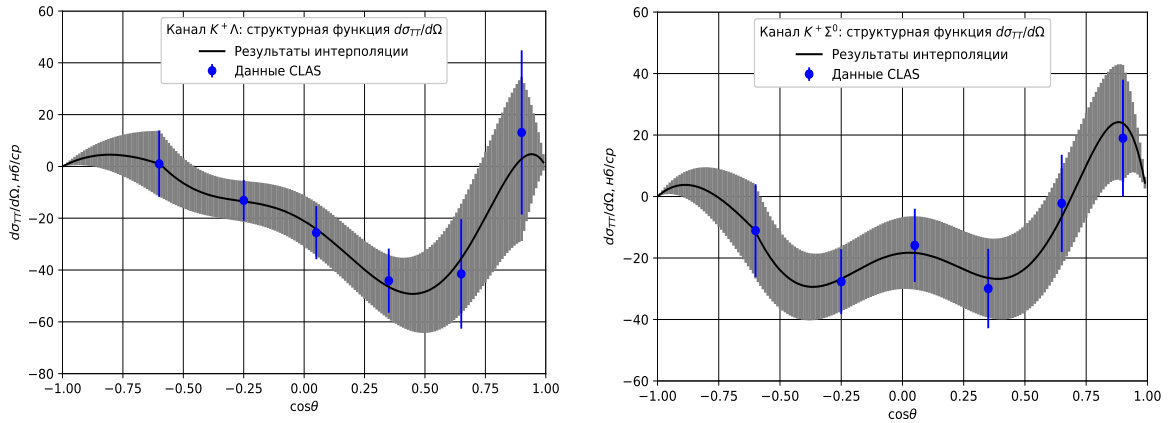


Рисунок 3 - Сравнение результатов интерполяции структурных функций (чёрная линия) и экспериментальных данных CLAS с учетом неопределенностей (синие точки с неопределённостью) для канала $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$ (справа) при $W = 1.95$ ГэВ, $Q^2 = 1.0$ ГэВ².

Неопределенности интерполяции представлены серой областью

В третьей части главы описывается процесс экстраполяции структурных функций каналов электроорождения $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$ на протонах. Экспериментальные данные CLAS по структурным функциям электроорождения рассматриваемых каналов ограничены в основном кинематической областью $W < 2.4$ ГэВ и $0 < Q^2 < 3.6$ ГэВ². В данной главе описан процесс экстраполяции представленных экспериментальных данных до пределов в $W < 2.65$ ГэВ и $0 < Q^2 < 5$ ГэВ². Экстраполяция структурных функций в область W

до 2.575 ГэВ для интервала $Q^2 < 3.6 \text{ ГэВ}^2$ выполнена в предположении, что при любом значении Q^2 отношение структурных функций в соседних значениях по W , W_j и W_{j+1} , такое же, как для измерений при $Q^2 = 1.8 \text{ ГэВ}^2$. Это дает возможность экстраполяции структурных функций по W в области W до 2.575 ГэВ и $Q^2 < 3.6 \text{ ГэВ}^2$ следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_i}{d\Omega_K}(W_{j+1}, Q_{curr}^2, \cos\theta_K^*) &= \frac{d\sigma_i}{d\Omega_K}(W_{j+1}, Q^2 = 1.8 \text{ ГэВ}^2, \cos\theta_K^*) \times \\ \frac{d\sigma_i}{d\Omega_K}(W_j, Q_{curr}^2, \cos\theta_K^*) &: \frac{d\sigma_i}{d\Omega_K}(W_j, Q^2 = 1.8 \text{ ГэВ}^2, \cos\theta_K^*), \end{aligned} \quad (4)$$

где Q_{curr}^2 – текущее значение виртуальности фотона, $i \in \{U, T, LT, TT\}$.

В области $3.45 < Q^2 < 5 \text{ ГэВ}^2$ используется экстраполяция (рис. 4) всех структурных функций из области интерполяции с помощью степенной функции:

$$\frac{d\sigma_i}{d\Omega_K}(Q^2) = A + \frac{B}{Q^2} + \frac{C}{Q^4}. \quad (5)$$

Использование данной зависимости основано на предположении, что эволюция эксклюзивных структурных функций описывается теми же степенными зависимостями, что и Q^2 -эволюция моментов инклюзивных структурных функций [8].

Для экстраполяции структурных функций в области $Q^2 < 0.65 \text{ ГэВ}^2$ использовались ограничения, налагаемые данными по реакциям фоторождения. Измеренные сечения фоторождения $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$ в реакциях с неполяризованными фотонами на неполяризованной мишени обеспечивают информацию о структурной функции $\frac{d\sigma_T}{d\Omega_K}$ в фотонной точке при $Q^2 = 0 \text{ ГэВ}^2$. Структурная функция $\frac{d\sigma_T}{d\Omega_K}$ интерполировалась по Q^2 в области $0 < Q^2 < 0.65 \text{ ГэВ}^2$ с использованием полинома:

$$\frac{d\sigma_T}{d\Omega_K}(Q^2) = A \cdot Q^4 + B \cdot Q^2 + C. \quad (6)$$

Структурная функция $\frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega_K}$ в фотонной точке оценена из данных по поляризационной асимметрии пучка фотонов Σ в экспериментах по фоторождению $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$ с пучком линейно-поляризованных фотонов на неполяризованной мишени:

$$\frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega_K}(W, Q^2 = 0 \text{ ГэВ}^2, \cos\theta_K^*) = (-1) \cdot \Sigma \cdot \frac{d\sigma_T}{d\Omega_K}(W, Q^2 = 0 \text{ ГэВ}^2, \cos\theta_K^*). \quad (7)$$

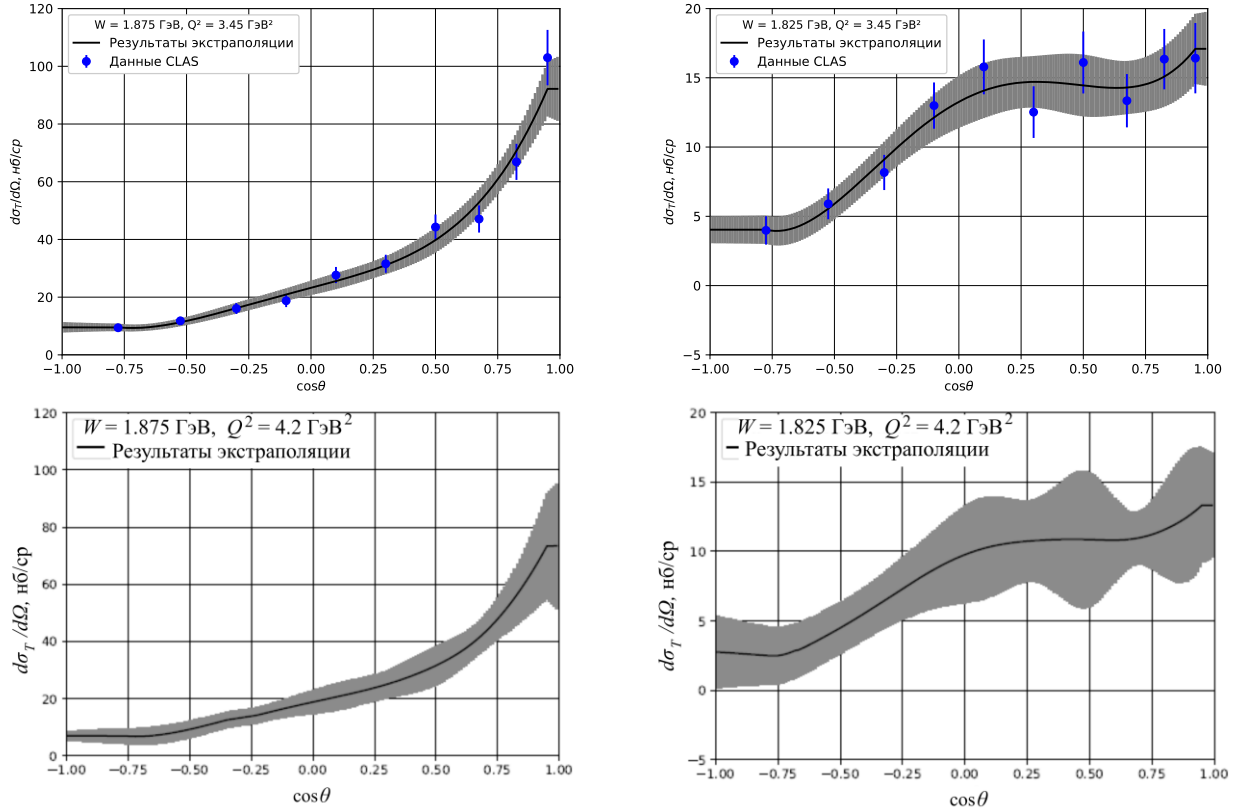


Рисунок 4 - Экстраполяция структурной функции $\frac{d\sigma_T}{d\Omega_K}$ в область $Q^2 > 3.45 \text{ ГэВ}^2$: для каналов $K^+\Lambda$ (слева) и $K^+\Sigma^0$ (справа). Экспериментальные данные и их неопределенности при $Q^2 = 3.45 \text{ ГэВ}^2$ показаны синими точками, результаты интерполяции показаны черной линией, а результаты экстраполяции показаны черными линиями - при $Q^2 = 4.2 \text{ ГэВ}^2$.

Неопределенности интерполяции и экстраполяции показаны серыми областями

Оценки структурной функции $\frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega_K}$ в области $2.17 < W < 2.65 \text{ ГэВ}$ и $Q^2 < 1.8 \text{ ГэВ}^2$ получены в предположении, что при выбранных и фиксированных значениях Q^2 и $\cos\theta_K^*$ отношения $\frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega_K} : \frac{d\sigma_T}{d\Omega_K}$ не зависят от W при $2.17 < W < 2.65 \text{ ГэВ}$. Это предположение соответствует данным CLAS по $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$ фото-

и электророждению. Для каждого из значений W определялись отношения $\frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega_K} : \frac{d\sigma_T}{d\Omega_K}$ и усреднялись по W от 2.0 ГэВ до 2.65 ГэВ. После этого структурные функции в области $2.17 < W < 2.65$ ГэВ и $Q^2 < 1.8$ ГэВ² оценивались следующим образом:

$$\frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega_K}(W, Q^2, \cos\theta_K^*) = \left[\frac{d\sigma_{TT}}{d\Omega_K} : \frac{d\sigma_T}{d\Omega_K} \right](Q^2, \cos\theta_K^*) \cdot \frac{d\sigma_T}{d\Omega_K}(W, Q^2, \cos\theta_K^*). \quad (8)$$

В заключительной части главы представлено описание программ для оценки сечений. Комплекс программ представлен на веб-сайте НИИ ядерной физики имени Д. В. Скобельцына МГУ [9]. Исходный код программы опубликован для общего доступа и может быть найден по ссылке [10].

В **четвертой главе** приводится описание алгоритма генеративно-состязательных нейронных сетей (или сокращенно GAN-сетей, Generative Adversarial Neural Network) в задаче моделирования детекторных эффектов и восстановления экспериментальных данных, разработанного для эксклюзивных реакций с многочастичными конечными состояниями.

В первой части главы приведен формализм описания реакции двухпионного фоторождения. Дано описание реакции и кинематики процесса рассеяния гамма-кванта на протоне с рождением двух пионов:

$$\gamma + p \rightarrow p + \pi^+ + \pi^-. \quad (9)$$

Дан краткий обзор работ, посвящённых моделированию детекторных эффектов и восстановлению истинных физических распределений. Приводится мотивация выбора методов машинного обучения для устранения/коррекции детекторных эффектов методом анфолдинга (раскрытия детекторных эффектов).

Во второй части главы описан сбор псевдоданных для реакции фоторождения двух пионов в эксперименте CLAS с использованием двух Монте-Карло генераторов. Генератор PS-MC них (PS-MC, сокращение от Phase Space - Monte Carlo) моделирует чистое фазовое пространство реакции $p + \pi^+ + \pi^-$, предполагая постоянную амплитуду процесса, тогда как RE-MC учитывает

реалистичную модель с тремя доминирующими промежуточными резонансами. Сгенерированные события пропускались через модель детектора GSIM, включающую геометрию CLAS, разрешение и эффективность регистрации. PS-MC использовался для оценки детекторных эффектов, а RE-MC (сокращение от Realistic - Monte Carlo) - для проверки согласованности. Такой подход снижает зависимость результатов от выбранной модели и воспроизводит условия анализа реальных экспериментальных данных.

Реконструкция событий осуществлялась с использованием программного обеспечения RECSIS (программный пакет, сокращенно от REConstruction and analySIS) [12], применяемого для обработки экспериментальных данных. Термины REC, или "детекторный уровень", обозначают набор псевдоданных после обработки в детекторе, а GEN, или "уровень вершины", - истинные события, сформированные генератором событий до учета эффектов детектора.

В основной части главы представлена методология анфолдинга (раскрытия детекторных эффектов) на основе генеративно-сопоставительных нейронных сетей. Были разработаны и объединены две различные сети GAN. GAN-сеть для моделирования детектора (DS-GAN, сокращенно от Detector Simulation-GAN) была обучена на PS-MC псевдоданных для изучения детекторных эффектов и затем встроена между генератором и дискриминатором GAN-сети для анфолдинга (UNF-GAN, сокращенно от Unfolding-GAN) для восстановления "истинных" (неискаженных детектором) данных на уровне вершин из реконструированных псевдоданных (REC). Суть подобного метода заключается в создании алгоритма UNF-GAN, который обучается на моделированных данных модели DS-GAN с детекторными искажениями, способного восстанавливать многомерное распределение "истинных" кинематических переменных, сохраняя физические корреляции между ними.

В процессе обучения первая сеть (DS-GAN) учится на событийном уровне оценивать влияние детектора на исходные данные. По завершении успешного обучения генератор DS-GAN становится заменой реального моделирования

детектора, которая будет интегрирована в архитектуру UNF-GAN. Таким образом, генератор DS-GAN учится преобразовывать принятые события GEN в события REC, моделируя эффекты разрешения, вызванные детектором, согласно данным симуляции GSIM.

Генератор второй сети (UNF-GAN) получает на вход энергию фотона, сгенерированную RE-MC, а также 100-мерный вектор белого шума с нулевым средним и стандартным отклонением, равным 1. Используемая комбинация входных данных позволяет генератору, реализованному в виде глубокой нейронной сети, трансформировать шум и энергию фотона в минимальный набор переменных, эффективно описывающих процесс фоторождения двух пионов.

В заключительной части главы приводится оценка качества работы DS-GAN и UNF-GAN, путем сравнения синтетических данных с REC и GEN псевдоданными. REC_{SYN} и GEN_{SYN} используются для обозначения синтетических данных на уровне детектора и вершинном уровне соответственно.

Абсолютное разрешение по импульсу π^+ по псевдоданным ($p_{REC} - p_{GEN}$), а также его сравнение с синтетическими данными ($p_{REC_{SYN}} - p_{GEN}$) представлено на рисунке 5. Два распределения хорошо согласуются между собой, что указывает на то, что синтетические данные правильно учитывают разрешение детектора. Аналогичные результаты получены для других кинематических переменных всех частиц. Представленные сравнения демонстрируют способность DS-GAN изучать и воспроизводить эффекты детектора в многомерном пространстве, включая хвосты распределений, что подтверждает возможность использования генеративных моделей в качестве эффективных и быстрых заменителей более затратного по ресурсам Монте-Карло моделирования GSIM.

Завершающий этап проверки заключается в использовании REC RE-MC псевдоданных для обучения UNF-GAN, извлечения GEN_{SYN} распределений и их сравнения с GEN псевдоданными. Рисунок 6 показывает сравнение между GEN и GEN_{SYN} для четырех обучающих переменных $M_{p\pi}^2$ – квадрата инвариантной

массы системы $p + \pi^-$, $M_{\pi^+\pi^-}^2$ - квадрата инвариантной массы системы $\pi^+ + \pi^-$, t_{π^+} - квадрат переданного четырехимпульса на этапе рождения π^+ , $\alpha_{[\pi^+p][\pi^-\pi']}$ - угол между плоскостями образованными векторами импульсов начального протона и π^+ и векторами импульсов протона отдачи и π^- .

Можно видеть хорошее соответствие между псевдоданными и синтетическими данными на уровне вершин несмотря на то, что UNF-GAN был обучен на псевдоданных уровня детектора, что прямо демонстрирует эффективность процедуры анфолдинга.

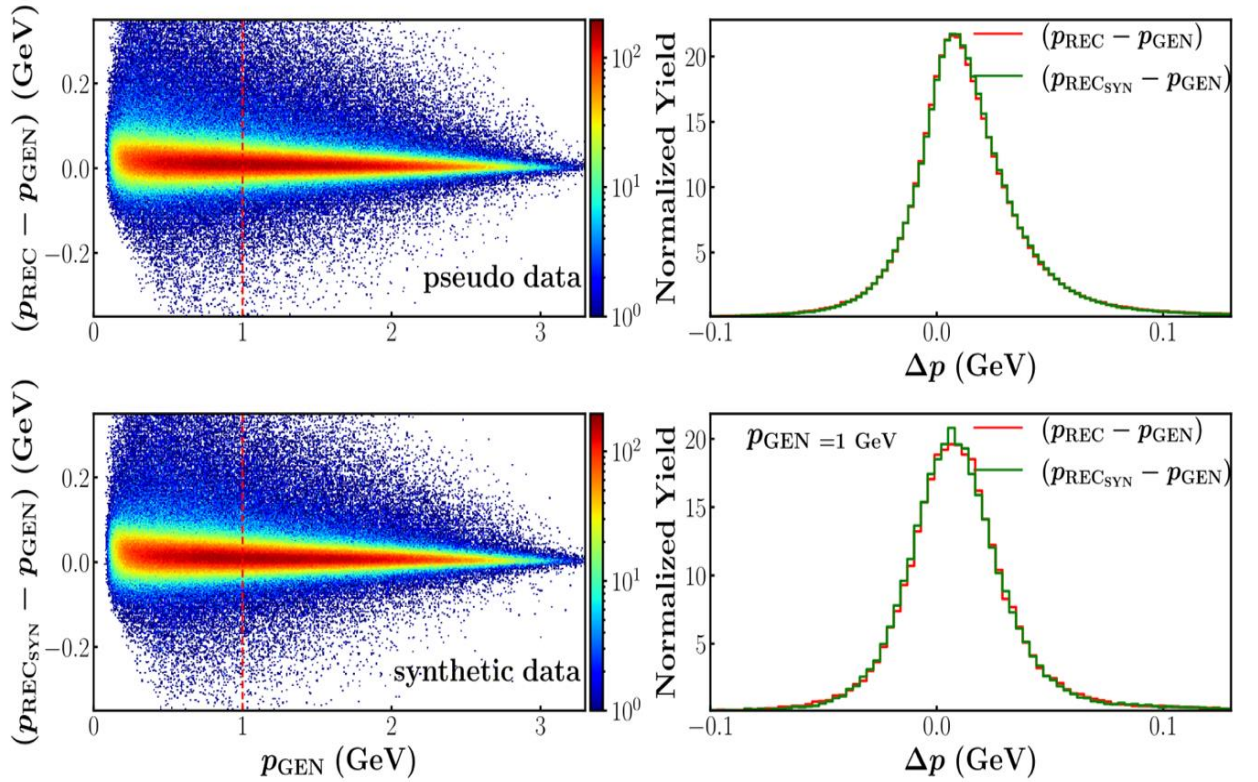


Рисунок 5 - Слева: сравнение абсолютного разрешения по импульсу $(p_{REC} - p_{GEN}$ и $p_{REC_{SYN}} - p_{GEN})$ π^+ для REC-псевдоданных PS-МС (вверху) и синтетических данных DS-GAN (внизу) в зависимости от p_{GEN} . Справа: сравнение абсолютного разрешения по импульсу $(p_{REC} - p_{GEN}$ и $p_{REC_{SYN}} - p_{GEN})$, интегрированного по p_{GEN} (вверху) или для узкого диапазона при $p_{GEN} = 1$ ГэВ (внизу)

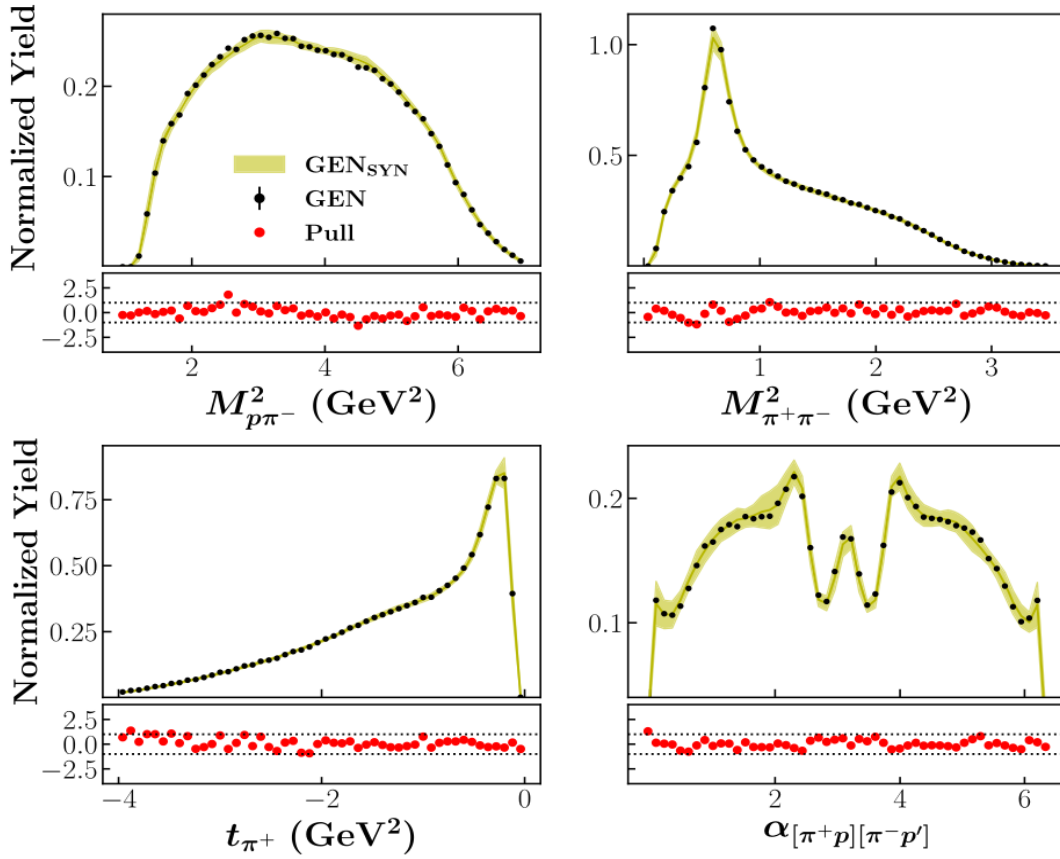


Рисунок 6 - Сравнение распределений GEN и GEN_{SYN} для четырёх обучающих переменных ($M_{p\pi^-}^2$, $M_{\pi^+\pi^-}^2$, t_{π^+} , $\alpha_{[\pi^+p][\pi^-p']}$), полученных с помощью UNF-GAN. Псевдоданные были сгенерированы с использованием RE-MC. Черными точками представлено распределение истинных событий GEN, сформированных генератором событий до учета эффектов детектора. Жёлтой кривой представлено распределение событий, сгенерированных UNF-GAN, желтой областью представлена неопределенность сгенерированных данных, оценённая с помощью бутстрап-процедуры. Красными точками представлено пул-распределение (в нижней части графиков), которое количественно характеризует согласие между двумя наборами данных. Горизонтальные пунктирные линии соответствуют 1σ .

В **заключении** диссертации изложены основные результаты работы:

1. Разработан метод, основанный на полносвязных нейронных сетях и способный вычислять значения структурных функций и дифференциальных сечений рассеяния реакции $\gamma^* + p \rightarrow n + \pi^+$ в области инвариантной массы системы конечных адронов $1.1 < W < 2$ ГэВ, квадрата четырехимпульса виртуального фотона $0.3 < Q^2 < 4.1$ ГэВ² для

различных значений энергии пучка электронов $E = 1.515, 5.499, 5.754$ ГэВ и телесного угла конечных адронов, близкого к 4π , проведена процедура оценки погрешности вычислений. Проведено сравнение с экспериментальными данными, показавшее, что результаты модели воспроизводят их со средней абсолютной ошибкой, равной 0.08 мкб/ср.

2. Получены значения структурных функций и дифференциальных сечений электророждения $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$ на протонах в области квадрата четырехимпульса виртуального фотона $Q^2 < 5$ ГэВ² и инвариантной массы системы конечных адронов $W < 2.65$ ГэВ для различных значений энергии пучка электронов $E = 2.567, 4.056, 5.499$ ГэВ для телесного угла конечных адронов, близкого к 4π . Оценены погрешности полученных результатов. Проведено сравнение с экспериментальными данными, при котором установлено, что результаты модели согласуются с ними в пределах неопределенностей.
3. Разработан метод выявления многомерных корреляций в событиях реакции $\gamma + p \rightarrow p + \pi^+ + \pi^-$ в области инвариантной массы системы конечных адронов $W < 2.9$ ГэВ для телесного угла конечных адронов, близкого к 4π , основанный на генеративных алгоритмах машинного обучения. Независимая генеративно-состязательная нейронная сеть была создана и применена для учета детекторных эффектов. Оценки, полученные нейросетевым методом, демонстрируют согласие с данными Монте-Карло генератора: распределение pull-значений находится в пределах одного стандартного отклонения. Продемонстрирована возможность восстановления четырехимпульсов частиц в реакции $\gamma + p \rightarrow p + \pi^+ + \pi^-$.

Публикации автора по теме диссертации:

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ им. М.В. Ломоносова по специальности и отрасли наук:

- [A1] Alghamdi T., Alanazi Y., Battaglieri M., Bibrzycki L., Golda A.V, Hiller Blin A. N., Isupov E.L., Li Y., Marsicano L., Melnitchouk W., Mokeev V.I., Montana G., Pilloni A., Sato N., Szczepaniak. A. P., Vittorini T. Toward a generative modelling analysis of CLAS exclusive 2π photoproduction // Physical Review D. – 2023. – vol. 108, no. 9. – P. 094030. EDN: TVJNEE. Импакт-фактор 5,3 (JIF). 1,45 п.л.
- [A2] Голда А.В., Голубенко А.А., Давыдов М.М., Исупов Е.Л., Мокеев В.И., Савкин С.А., Чистякова В.В. Оценка сечений эксклюзивных каналов электроорождения $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$ на протонах из данных детектора CLAS // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия – 2024. – №4. – С. 2440201. EDN: UAXKEN. Импакт-фактор 0,651 (РИНЦ). 0,75 п.л.
- Golda A.V., Golubenko A.A., Davydov M.M., Isupov E.L., Mokeev V.I., Savkin S.A., Chistyakova V.V. Cross section evaluation for exclusive channels of $K^+\Lambda$ and $K^+\Sigma^0$ electroproduction off protons using CLAS detector data // Moscow University Physics Bulletin. – 2024. – vol. 79, no. 4. – pp. 450-461. EDN: ADTZPZ. Импакт-фактор 0,197 (SJR). 0,75 п.л.
- [A3] 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. – vol. 79, no. 4. – pp. 608-621. EDN: LYGXAN. Импакт-фактор 0,197 (SJR). 0,95 п.л.
- [A4] Голда А.В., Исупов Е.Л., Русова А.А., Чистякова В.В. Нейросетевое моделирование наблюдаемых реакций электроорождения одиночного пиона на протоне в резонансной области // Вестник Московского

Университета. Серия 3: Физика. Астрономия. – 2026. – №2. – С. 2620204.
DOI: 10.55959/MSU0579-9392.81.2620204. Импакт-фактор 0,651
(РИНЦ). 1,04 п.л.

Прочие публикации:

- [A5] 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 // Ученые записки физического факультета Московского Университета – 2025. – №2. URL: <https://uzmu.phys.msu.ru/abstract/2025/2/2520213/>. Импакт-фактор 0,029 (РИНЦ). 0,42 п.л.

Список литературы

- [1] Gross F., Klempt E., Brodsky S.J., et al. 50 Years of quantum chromodynamics // Eur. Phys. J. C — 2023. — vol. 83, no. 1125.
- [2] Carman D. S., Gothe R.W., Mokeev V. I., Roberts C.D. Nucleon Resonance Electroexcitation Amplitudes and Emergent Hadron Mass // Particles — 2023. — vol. 6, no. 1, pp. 416-439.
- [3] Скородумина Ю.А., Буркерт В.Д., Головач Е.Н., Готе Р.В., Исупов Е.Л., Ишханов Б.С., Мокеев В.И., Федотов Г.В. Нуклонные резонансы в эксклюзивных реакциях фото- и электророждения мезонов // Вестник Московского университета. — 2015. — № 6.
- [4] Crede V., Roberts W. Progress towards understanding baryon resonances // Rep Prog Phys. — 2013. — vol. 76, no 7, pp. 076301.
- [5] Aznauryan I.G., Burkert V.D. Electroexcitation of nucleon resonances // Progress in Particle and Nuclear Physics. — 2012. — vol. 67, no. 1, pp. 1-54.

- [6] CLAS Physics Data Base, URL: <https://clas.sinp.msu.ru/cgi-bin/jlab/db.cgi>.
- [7] Drechsel D., Kamalov S.S., Tiator L. Unitary Isobar Model – MAID2007 // Eur. Phys. J. — 2007. vol. A 34. no. 69.
- [8] Melnitchouk W., Ent R., Keppel C.E. Quark–hadron duality in electron scattering // Physics Reports. — 2005. — vol. 406, no. 3–4, pp. 127-301.
- [9] Веб-сайт с интерфейсом для расчета дифференциальных сечений рассеяния, URL: <https://clas.sinp.msu.ru/~maksaska/>.
- [10] Репозиторий исходного кода для экстраполяции и интерполяции дифференциальных сечений рассеяния GitHub, URL: https://github.com/maksaska/Diff_cros_strange/tree/python-version.
- [11] Веб-сайт с руководством по использованию GSIM, URL: <https://www.jlab.org/Hall-B/document/gsim/userguide.html>.
- [12] Freyberger A., Ito M. Веб-сайт с руководством по использованию RECSIS, CLAS collaboration, URL: <https://clonwiki0.jlab.org/wiki/index.php?title=Recsis>.