

ОТЗЫВ официального оппонента

Кима Виктора Тимофеевича

на диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук **Голды Андрея Васильевича** на тему:

«Методы машинного обучения в исследовании электромагнитных процессов рождения мезонов на протонах»

по специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий

В настоящее время в современной фундаментальной физике наиболее успешной теорией является Стандартная модель (СМ) элементарных частиц и их взаимодействий. Одной из важнейших составляющих СМ является квантовая хромодинамика (КХД), описывающая сильные взаимодействия кварков и глюонов, которым присуща весьма нетривиальная динамика. На малых расстояниях, много меньших размеров адронов ($< 0.1 \text{ Фм}$) кварки и глюоны слабо взаимодействуют (асимптотическая свобода) и применима теория возмущений с разложением по малой константе связи (пертурбативная область). В области больших расстояний ($> 1 \text{ Фм}$, непертурбативная область) действуют сложные взаимодействия, приводящие к невыезданию кварков и глюонов из адронов, которые в настоящее время представляется возможным описывать только приближенными подходами и моделями КХД.

Поэтому, тема диссертационного исследования, связанная с экспериментальным изучением, с помощью электромагнитных процессов образования мезонов, возбужденных состояний нуклона, энергетические уровни которых соответствуют промежуточной области взаимодействий кварков и глюонов ($0.1 \text{ Фм} \div 1 \text{ Фм}$) представляется весьма значимой для проверки и уточнения предлагающихся КХД подходов. При этом современные эксперименты по изучению возбужденных состояний нуклона генерируют огромные объемы данных, которые содержат информацию о

взаимодействиях кварков и глюонов в различных энергетических режимах. Эти данные содержат дифференциальные сечения эксклюзивных процессов как функции энергетических и угловых переменных, а также поляризационные наблюдаемые. Анализ подобных данных представляет собой сложную задачу из-за высокой размерности фазового пространства, наличия нелинейных зависимостей и значительной зашумленности данных.

Однако большая сложность структуры данных, а также необходимость учета множества факторов приводят к тому, что стандартные методы обработки данных не всегда позволяют эффективно получить исчерпывающую информацию о физических процессах, лежащих в основе наблюдаемых явлений. Методы искусственного интеллекта, включающие методы машинного обучения, с успехом применяющихся в фундаментальной физике (например, на Большом адронном коллайдере) и в других научных областях, в настоящее время становятся незаменимым инструментом для анализа больших данных в адронной физике. Это способствует повышению точности существующих результатов, а также надёжному определению новых.

Все вышеупомянутое делает **тему диссертационного исследования** весьма значимой и **актуальной**.

Целью диссертационной 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 поставленной цели автором решались следующие **задачи**:

1. Разработка метода вычисления значений структурных функций и дифференциальных сечений рассеяния реакции $\gamma^* p \rightarrow n \pi^+$ в резонансной области. Построение (валидационной) схемы проверки достоверности для определения качества работы предложенного метода.

2. Создание метода вычисления эксклюзивных структурных функций и дифференциальных сечений электророждения $K^+ \Lambda$ и $K^+ \Sigma^0$ на протонах. Оценка погрешности полученных результатов, а также области применимости данного метода. Проведение сравнения оценок с экспериментальными данными.

3. Разработка метода, позволяющего устранять детекторные эффекты и выявлять корреляции в многомерном фазовом пространстве кинематических переменных для процессов фоторождения пар заряженных пионов на протонах. Проведение процедуры тестирования метода на синтетических данных и определение систематических погрешностей.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и перечня цитируемой литературы, содержащего 84 ссылки. В диссертации содержится 40 рисунков и 2 таблицы. Общий объем диссертации составляет 135 страниц текста.

Введение содержит краткую характеристику темы исследования и обоснование ее актуальности, формулировку цели и направлений работы, обсуждение новизны результатов, методов и апробацию работы, практическую значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В Первой главе дается обзор методов машинного обучения.

Вторая глава посвящена описанию исследования нейронных сетей в задаче моделирования дифференциальных сечений рассеяния и структурных функций для реакции электророждения одиночного пиона на протоне в резонансной области.

В **Третьей главе** описывается метод оценки сечений электророждения $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$ на протонах.

В **Четвертой главе** приводится описание алгоритма генеративно-сопоставительных нейронных сетей (Generative Adversarial Neural Network - GAN-архитектура) в задаче моделирования детекторных эффектов и реконструкции экспериментальных данных, разработанного для эксклюзивных реакций с многочастичными конечными состояниями. Применение такого алгоритма позволяет уменьшить разрыв между моделированными и экспериментальными данными, обеспечивая более точное и реалистичное моделирование для анализа экспериментов.

В **Заключении** приведены основные результаты диссертационной работы.

Основные положения диссертации, 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 Грибова-Липатова-Альтарелли-Паризи-Докшицера (ГЛАПД) по квадрату четырех-импульса виртуального фотона Q^2 , количественно определяет зависимость дифференциальных сечений рассеяния и структурных функций от кинематических переменных в реакции электророждения $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$ на протонах.

3. Методы анализа и обработки экспериментальных данных, основанные на генеративно-сопоставительных нейронных сетях, выявляют корреляции в многомерном фазовом пространстве кинематических

переменных и корректируют влияние эффектов, обусловленных откликом детектора, в событиях процесса двух-пионного фоторождения.

Научная **новизна** результатов диссертации:

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 процесса двух-пионного фоторождения $\gamma p \rightarrow p \pi^+ \pi^-$ с использованием генеративных алгоритмов машинного обучения, позволяющий корректировать влияние детекторных эффектов и получать достоверные распределения четырех-импульсов исходных частиц.

Практическая значимость результатов диссертации связана с возможностью использования в экспериментальных исследованиях полученных алгоритмов и моделей машинного обучения для проверки точности теоретических КХД подходов, а также для создания или улучшения работы существующих Монте-Карло генераторов физических событий. Также подобные алгоритмы могут послужить основой для систем хранения и распределения экспериментальных данных.

Диссертация написана в сжатом, но довольно ясном стиле, и довольно тщательно оформлена, практически без опечаток. Тем не менее, все же

присутствуют некоторые недостатки. В основном, это касается стилевых особенностей текста, которые, все-таки, несмотря на старания автора, содержат излишние, на мой взгляд, англицизмы и сленг. Конечно, сложновато на данный момент, когда еще не устоялись термины, описать на русском технику «бутстрап-ресемплирования» данных, т.е., процедуру бутстрап-подвыборки исходного набора данных с повторными выборками (стр 112). Но, возможно, «валидация» может быть заменена на «проверка достоверности». Конечно, все эти небольшие недостатки не меняют общей положительной оценки и значимости диссертации.

Диссертация А.В. Голда является законченным научным трудом и выполнена на высоком научном уровне. Полученные автором результаты являются заметным шагом в направлении разработки и применении методов машинного обучения в исследованиях электромагнитных процессов образования мезонов на протонах. Результаты, полученные в диссертации, являются **новыми** и оригинальными, с достаточной полнотой опубликованы в реферируемых научных журналах, неоднократно **апробировались** на международных и российских совещаниях и конференциях. **Достоверность** результатов обеспечивается применением уже использующихся методов машинного обучения в экспериментах и апробированием результатов на конференциях и совещаниях. **Вклад автора** является определяющим в результатах работ, составляющих основу диссертации. Содержание диссертации соответствует опубликованным работам. Автореферат правильно отражает содержание диссертационной работы.

Диссертация отвечает всем требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий, а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено

согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель **Андрей Васильевич Голда** заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Официальный оппонент:
доктор физико-математических наук,
заместитель руководителя отделения физики
высоких энергий, руководитель лаборатории
физики элементарных частиц, ФГБУ Петербургский
институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

Ким Виктор Тимофеевич

28 августа 2026 г.

Контактные данные:

тел.: e-mail: kim_vt@pnpi.nrcki.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.04.02. Теоретическая физика

01.04.16. Физика атомного ядра и элементарных частиц

Адрес места работы:

188300, Ленинградская обл., г. Гатчина, мкр. Орлова роща, д. 1,
ФГБУ Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова

Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

тел.: e-mail: kim_vt@pnpi.nrcki.ru

Подпись В.Т. Кима удостоверяю:

Ученый Секретарь

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

С. И. Воробьев
28 августа 2028 г.