

ОТЗЫВ

официального оппонента

кандидата физико-математических наук Федорова Никиты

Александровича

о диссертационной работе Голды Андрея Васильевича «Методы машинного обучения в исследовании электромагнитных процессов рождения мезонов на протонах»,

представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15. - «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий».

В работе Голды А.В. рассматривается применение методов машинного обучения (ММО) к задачам обработки данных и моделирования событий эксперимента CLAS, посвященного исследованиям структуры адронов с помощью электромагнитных процессов. Важность информации о структуре нуклонов и, в частности, о свойствах возбужденных состояний этих частиц для тестирования КХД трудно переоценить. Как справедливо указывает автор работы, современные эксперименты как по ядерной физике, так и по физике высоких энергий, генерируют значительные объемы многомерных данных, анализ которых с помощью традиционных подходов может вызывать затруднения. Действительно, зачастую особенности/многомерные корреляции и различные систематические эффекты в эксперименте обнаруживаются человеком “на глаз”, для чего требуется представлять данные в виде функции одной или двух переменных. Правильное применение ММО позволяет снизить влияние человеческого фактора на процедуру анализа экспериментальных данных и с большей вероятностью обнаруживать и отфильтровывать систематические эффекты. Также следует отметить, что ММО можно

применять для генерации модельных данных, что порой может быть более эффективно с вычислительной точки зрения, чем традиционное моделирование с помощью методов Монте-Карло. Это приводит к тому, что ММО все шире применяется при обработке данных в ядерной физике и физике частиц. Все это характеризует диссертационную работу, выполненную Голдой А.В. как несомненно **актуальную для физики ядра и частиц.**

В первой главе диссертации автор достаточно подробно обсуждает понятие ММО, приводит обзор основных подходов классических ММО, а также т.н. глубокого обучения. Впрочем, следует отметить, что классификация, приводимая автором, не является общепринятой, и в литературе под глубоким обучением зачастую понимается работа с нейронными сетями, имеющими большое количество скрытых слоев. Особое внимание уделяется обсуждению подготовки исходных данных для обучения моделей, а также проблеме переобучения. Упоминаются различные подходы к оптимизации параметров модели, такие как ADAM, RMSprop и SGD, но, к сожалению, не приводятся ссылки на их описание.

Во второй главе описывается процесс электророждения пионов на нуклонах, вводится понятие структурных функций и ставится задача предсказания зависимости дифференциального сечения этого процесса от 5 кинематических переменных: E (энергии фотона), W (инвариантная масса конечной системы), Q^2 (квадрата переданного импульса), а также полярного и азимутального углов вылета пиона θ_π , ϕ_π . Для ее разрешения, в принципе, вполне возможно использовать ММО, более того, в соответствии с теоремой Колмогорова-Арнольда, для решения этой задачи достаточен перцептрон с одним скрытым слоем и достаточным (но заранее неизвестным) количеством нейронов в скрытом слое (автор же ссылается на теорему Цыбенко). Автор рассматривает различные алгоритмы машинного обучения, тестирует подход XGBoost (ансамбль из

деревьев решений) и многослойную нейронную сеть. XGBoost показал себя не очень хорошим вариантом для работы с непрерывными данными, и автор убедительно объясняет, почему. Дальнейшая работа ведется с полносвязной нейронной сетью: выполняется обучение модели на наборе экспериментальных данных, приводится сравнение результатов работы обученной модели с избранными экспериментальными данными. На Рис. 2.7. хорошо заметны “артефакты” работы модели, связанные с тем, что на выходе сети получаются значения дифференциальных сечений, а не коэффициенты при многочленах Лежандра. К сожалению, в тексте диссертации эти артефакты не обсуждаются. На основе предсказанных дифференциальных сечений выполнялось вычисление структурных функций, которые затем снова использовались для получения уже более “гладких” дифференциальных сечений. Делается утверждение о достаточной близости к предсказанным результатам к экспериментальным данным. Было бы желательно привести количественную характеристику этой близости. Для оценки устойчивости нейросетевых аппроксимаций автор использовал метод реплик, достаточно часто применяемый для этих целей.

Третья глава посвящена оценке сечений электророжения $K^+ \Lambda$ и $K^+ \Sigma$ на протонах, а именно интерполяции и экстраполяции структурных функций, которые затем используются для оценки дифференциальных и интегральных сечений. Для интерполяции структурных функций использовались кубические сплайны, для экстраполяции – квадратичные. При экстраполяции используются физические ограничения на зависимость дифференциального сечения от Q , что, по-видимому, призвано исключить нефизичные результаты, которые могут возникать при интерполяции сплайнами. Тем не менее, возникает вопрос, почему именно интерполяция сплайнами, а не аппроксимация какой-нибудь подобранной гладкой функцией, ведь интерполяция сплайнами, с одной стороны, может создавать выбросы, а с другой стороны, полностью

сохраняет статистические флуктуации экспериментальных точек. Автором также разработан комплекс программ для выполнения оценки сечений, что бесспорно является важным результатом, который может быть востребован как для верификации модельных оценок, так и для планирования экспериментов.

В четвертой главе рассматривается применение генеративно-состязательных сетей (GAN, Generative Adversarial Neural Network) для моделирования отклика детектора, а также процедуры анфолдинга экспериментальных данных для фильтрации детекторных эффектов. Подход GAN в настоящее время широко применяется для генерирования модельных данных, которые в дальнейшем можно использовать для обучения нейросетей. Он состоит в том, что совместно обучаются сеть-генератор и сеть-дискриминатор, при этом сеть-генератор должна создавать примеры, максимально близкие к обучающей выборке, а сеть-дискриминатор учится отличать сгенерированные примеры от реальных. Для обучения использовались псевдоданные, сгенерированные с помощью Монте-Карло генераторов, детекторные эффекты оценивались с помощью моделирования в GEANT4, и для их генерации в обучающей выборке использовалась отдельная GAN-нейросеть. Представленные на Рис. 4.11 и 4.12 распределения переменных из псевдоданных и сгенерированных величин демонстрируют хорошее согласие друг с другом. На Рис. 5 показано корректное воспроизведение детекторных эффектов с помощью GAN-моделирования. Вместе с тем, в явном виде не обсуждается влияние детекторных эффектов на генерируемые переменные. Было бы хорошо представить на тех же Рис. 4.11 и 4.12 результат моделирования без учета детекторных эффектов.

В целом, диссертация Голды А. В. производит хорошее впечатление. При ее создании предложены **новые** (и разнородные) **методы для моделирования экспериментальных данных для реакций** $\gamma + p \rightarrow n + \pi^+$ и $\gamma + p \rightarrow p + \pi^+ + \pi^-$, а также для электророждения $K^+ \Lambda$

и $K^+\Sigma$. Применение широко используемых ММО, а также хорошее согласие экспериментальных и модельных данных свидетельствует **об обоснованности и достоверности** достигнутых результатов и основных положений диссертации.

В целом, можно констатировать, что результаты диссертации Голды А. В. являются **новыми и важными** для развития экспериментов по исследованию структуры адронов и совершенствования модельных представлений о процессах электророждения мезонов на нуклонах.

Таким образом, диссертационная работа Голды Андрея Васильевича «Методы машинного обучения в исследовании электромагнитных процессов рождения мезонов на протонах» является законченной научно-квалификационной работой. Она представляет собой **исследование актуальной проблемы, характеризуется научной новизной и практической значимостью. Несомненно, созданный комплекс методов генерации и анализа данных, развитый в диссертации, обладает практической ценностью** для проведения дальнейших исследований в этой области.

Материалы диссертационной работы полностью опубликованы в рецензируемых научных журналах. Они были представлены на ряде авторитетных российских и международных конференций. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Указанные в отзыве замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает 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 (по физико-математическим наукам), 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, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

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

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук,
начальник сектора исследований нейтронно-ядерных взаимодействий
отделения ядерной физики Лаборатории нейтронной физики
Объединенного института ядерных исследований.

Федоров Н. А.

26 августа 2026 г.

Контактные данные:

тел.: +7(496)216 26 73, e-mail: nfedorov@jinr.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.04.16 - «Физика атомного ядра и элементарных частиц»

Адрес места работы:

141980, Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6

Международная межправительственная научно-исследовательская
организация Объединенный институт ядерных исследований,

Лаборатория нейтронной физики

Тел.: +7(496)216 26 73 ; e-mail: nfedorov@jinr.ru

Подпись Федорова Н.А. удостоверяю

Заместитель директора Лаборатории нейтронной
физики Объединенного института
ядерных исследований

Кучерка Норберт

26 августа 2026 г.