

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Голды Андрея Васильевича
«Методы машинного обучения в исследовании электромагнитных
процессов рождения мезонов на протонах»,
представленную на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности
1.3.15 физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких
энергий

Изучение возбужденных состояний нуклона в электромагнитных процессах рождения мезонов на протонах остается одним из основных источников информации о непертурбативной динамике сильного взаимодействия: там, где параметр разложения теории возмущений квантовой хромодинамики перестает быть малым, именно эксклюзивные реакции фото- и электророждения мезонов дают экспериментальный доступ к спектру и внутренней структуре резонансов и к амплитудам их электровозбуждения. Основной массив таких данных получен коллаборацией CLAS Национальной лаборатории им. Т. Джефферсона, и по мере роста статистики и размерности измеряемых распределений извлечение из них физической информации становится все более трудоемким: фазовое пространство эксклюзивной реакции многомерно, аксептанс детектора неоднороден, а заполнение многомерных ячеек событиями невелико. Методы машинного обучения позволяют здесь строить многомерную интерполяцию наблюдаемых без явного модельного анзаца и корректировать детекторные эффекты на событийном уровне. Работа А.В. Голды посвящена разработке и валидации таких методов на трех задачах: нейросетевом описании дифференциальных сечений и структурных функций реакции $\gamma^* + p \rightarrow n + \pi^+$, оценке сечений каналов электророждения $K^+ \Lambda$ и $K^+ \Sigma^0$ на протонах и восстановлении истинных многомерных распределений в реакции $\gamma + p \rightarrow p + \pi^+ \pi^-$ методом генеративно-состязательных сетей. Актуальность работы обусловлена востребованностью результатов в анализе данных CLAS и в подготовке программы CLAS12, а также тем, что развитые подходы допускают перенос на другие эксклюзивные каналы и эксперименты.

Диссертационная работа оформлена в виде введения, четырех глав, заключения и списка литературы общим объемом 136 страниц текста,

включает 40 рисунков, 2 таблицы и 84 ссылки на литературу. Во введении показана актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость, приведены сведения об апробации, личном вкладе автора и публикациях; первая глава представляет собой обзор методов машинного обучения.

Вторая глава содержит основной методический результат работы — нейросетевую модель дифференциальных сечений и структурных функций реакции электророждения положительного пиона на протоне в резонансной области. Определены структурные функции A , B , C и их связь с азимутальной зависимостью сечения, описан набор данных CLAS Physics Database (98027 измеренных значений сечений с погрешностями). Переход от классических алгоритмов к глубокой полносвязной сети аргументирован тем, что градиентный бустинг дает негладкий по ϕ_π^* прогноз, несовместимый с аналитической структурой сечения. Описаны итоговая архитектура (19 скрытых слоев, около $5 \cdot 10^6$ параметров, PyTorch) и эвристики обучения — аугментация с учетом экспериментальных погрешностей, взвешенная функция потерь, ранняя остановка, настройка скорости обучения. Ценно, что автор сообщает и об отрицательном результате: штраф за отклонение от аналитической ϕ_π^* -зависимости качества не улучшил. Валидация выполнена тремя независимыми способами — сравнением с данными CLAS, контрольным обучением на псевдоданных модели MAID2007 в узлах экспериментальной сетки и оценкой устойчивости прогноза методом реплик с ансамблем из 100 сетей. Средняя абсолютная ошибка модели, усредненная по трем поднаборам данных и 30 разбиениям, составила 0.08 мкб/ср при средней экспериментальной погрешности 0.2 мкб/ср.

В третьей главе построен метод оценки дифференциальных сечений и структурных функций каналов электророждения $K^+\Lambda$ и $K^+\Sigma^0$ на протонах в области $W < 2.65$ ГэВ и $Q^2 < 5$ ГэВ². Обоснована необходимость независимого извлечения амплитуд N^* из каонных каналов в дополнение к $N\pi$ и $\pi\pi N$ и описана интерполяция — разложение по полиномам Лежандра по $\cos\theta_K^*$ с линейной интерполяцией коэффициентов по W и Q^2 . Наиболее содержательная часть главы посвящена экстраполяции за пределы измеренной области: по W — через отношения структурных

функций в соседних интервалах, по большим Q^2 — степенной зависимостью, мотивированной Q^2 -эволюцией моментов инклюзивных структурных функций, в область малых Q^2 — по данным фоторождения и поляризационной асимметрии фотонного пучка. Практически важно, что метод доведен до комплекса программ с открытым исходным кодом и веб-интерфейсом на сайте НИИЯФ МГУ, пригодного для использования другими группами и для настройки генераторов событий.

Четвертая глава посвящена раскрытию детекторных эффектов (анфолдингу) в реакции двухпионного фоторождения на основе генеративно-состязательных сетей. Канал $\pi^+\pi^-p$ является основным источником информации о резонансах с массами выше 1.6 ГэВ, а корреляции между инвариантными массами, несущие информацию об интерференции механизмов рождения ρ^0 и Δ^{++} , теряются в одномерных проекциях; при этом заполнение четырехмерных ячеек в данных CLAS обычно менее десяти событий, что делает классические бинированные процедуры малоприспособленными. Описаны данные эксперимента g11, два генератора событий (чисто фазовое пространство и реалистичная модель с некогерентной суммой трех резонансов) и цепочка моделирования и реконструкции GSIM–GPP–RECSIS. Основной результат главы — схема из двух связанных сетей: DS-GAN, воспроизводящая отклик детектора и встраиваемая между генератором и дискриминатором, и UNF-GAN, восстанавливающая распределения вершинного уровня по реконструированным событиям; неопределенность оценена бутстрапом с ансамблями по 20 сетей. Качество метода проверено сравнением синтетических и псевдоданных как по обучающим, так и по производным переменным, а согласие охарактеризовано количественно через pull-распределения. Существенно, что проверка выполнена в схеме closure-теста с двумя различными генераторами событий, то есть когда обучение и «эксперимент» опираются на близкие, но не идентичные модели.

Основные результаты работы, выносимые на защиту, представлены в заключении. Результаты диссертации опубликованы в 5 работах, в том числе в 4 статьях в рецензируемых изданиях. Результаты докладывались автором на пяти научных конференциях.

Ниже приведены замечания и пожелания, которые носят характер вопросов для обсуждения на защите и не затрагивают существа резуль-

татов. Первая глава (стр. 14–25) написана в жанре вводного обзора: часть материала — kNN , SVM, деревья решений, сверточные и рекуррентные сети, трансформеры — далее не используется, а упоминание Нобелевских премий 2024 года (стр. 14–15) выглядит скорее иллюстративным; для читателя-физика полезнее был бы обзор применений машинного обучения в физике возбужденных состояний нуклона и в задачах анфолдинга.

Несколько пожеланий относится к изложению точности модели в главе 2. На стр. 32–33 объем набора данных указан как 98027 объектов, а на стр. 35 отложенная тестовая выборка в 10% названа равной 8197 объектам, тогда как 10% от 98027 составляет около 9803; расхождение, по-видимому, техническое, но в тексте не пояснено. Средняя абсолютная ошибка 0.08 мкб/ср (стр. 52, 122) приведена без нормировки и без разбиения по трем обученным моделям, тогда как сечения в исследуемой области меняются на порядки; интересно было бы увидеть относительную ошибку с разбивкой по кинематическим интервалам, особенно для набора $E = 1.515$ ГэВ (рис. 2.5), поскольку усредненный по всей выборке критерий «MAE меньше экспериментальной погрешности» мало говорит о локальной точности модели. При сопоставлении $MAE = 0.08$ мкб/ср со средней погрешностью 0.2 мкб/ср (стр. 52) стоит учитывать, что эти величины не полностью независимы: функция потерь (2.13) взвешена обратно квадратом той же погрешности, так что обучение по построению точнее описывает точки с малой ошибкой; вопрос об ограничении весов $w_i \propto 1/\varepsilon_i^2$ сверху в работе не обсуждается. При аугментации (стр. 43–44), увеличивающей набор данных в 25 раз гауссовым размытием признаков и целевой переменной, полезно уточнить, выполнялось ли разбиение выборок до или после нее: во втором случае близкие копии одной точки могут попадать в разные подвыборки.

Обучение трех независимых сетей для $E = 1.515$, 5.499 и 5.754 ГэВ (раздел 2.3.1) снимает проблему несбалансированности данных; хотелось бы услышать, как предполагается применять модель при промежуточных энергиях пучка — энергия входит в сечение через поляризацию виртуального фотона ε , а способ интерполяции между тремя моделями не обсуждается. Интересно и то, что в контрольном тесте с MAID2007 (стр. 59) автор от разбиения по энергиям отказался. Утверждение на стр. 56 о том, что в областях с низким или нулевым аксептансом детектора CLAS

сеть интерполирует точнее фитирования и что «построенная модель нейронной сети позволяет получать новую достоверную информацию о физической системе», представляется несколько сильным, поскольку прямая проверка прогноза там невозможна из-за отсутствия данных; естественным дополнением здесь был бы контролируемый тест с исключением части имеющихся узлов из обучения и проверкой прогноза в них.

Третья глава машинного обучения не использует; само по себе это не недостаток, однако прямое сравнение ее результатов с нейросетевым подходом главы 2 на одних данных было бы естественным результатом, объединяющим части работы. О принятых в главе допущениях хотелось бы услышать более подробный комментарий: приближение $\sigma_L/\sigma_T = 0.2$ (формула 3.6, стр. 74) применяется со ссылкой на одну работу к обоим каналам во всей области W и Q^2 , причем вносимая им систематическая погрешность не оценивалась; допущение о независимости отношения структурных функций в соседних интервалах W от Q^2 (формула 3.9, стр. 78) распространено на весь диапазон $Q^2 < 3.6 \text{ ГэВ}^2$, тогда как имеющиеся данные, по-видимому, позволяли бы проверить его на независимых Q^2 -срезах; отношение $d\sigma_{LT'}/d\sigma_T$ усредняется по W до 2.65 ГэВ (стр. 81–82), тогда как данные по асимметрии Σ ограничены значениями W около 2.18 ГэВ, то есть присутствует и неявная экстраполяция самого отношения. Кроме того, согласие расчетов с данными в главах 2 и 3 характеризуется словесно и иллюстрируется отдельными графиками; при наличии полной сетки по W , Q^2 и углам сводная мера согласия — например, распределение χ^2 на точку — была бы хорошим дополнением, тем более что в главе 4 такая мера введена.

К главе 4 относятся три пожелания. На стр. 121 гистограмма двумерного pull-распределения аппроксимирована гауссовой функцией со стандартным отклонением 1.3, тогда как в заключении (стр. 122–123) согласие охарактеризовано как достигнутое «в пределах одного стандартного отклонения»; отклонение ширины pull-распределения от единицы обычно указывает на недооценку неопределенностей или на корреляции между ячейками, и хотелось бы услышать комментарий автора о происхождении этого значения. Далее, интересным дополнением было бы сравнение с классическими методами анфолдинга (обращение матрицы отклика, итеративный байесовский анфолдинг, TUnfold/RooUnfold) хо-

тя бы на одномерных проекциях, где оно возможно: оно позволило бы количественно оценить выигрыш генеративного подхода в многомерном случае. Уместным было бы и сопоставление с работой FAT-GAN [83], близкой по постановке задачи. Наконец, вывод о том, что обученные сети могут служить быстрой заменой моделирования GSIM (стр. 114), стал бы наглядней при указании времени работы обеих процедур, а для DS-GAN и UNF-GAN, в отличие от сетей главы 2 (PyTorch, стр. 42), не назван фреймворк. Отмечу также двойное цитирование работы Aznauryan I.G., Burkert V.D. «Electroexcitation of nucleon resonances» — [5] (стр. 125) и [19] (стр. 127).

Высказанные замечания носят характер пожеланий, относятся к полноте изложения, а не к существу полученных результатов, и не влияют на положительную оценку диссертационной работы. Диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, результаты которой являются новыми, а использованные методики обеспечивают их достоверность. Положения, выносимые на защиту, прошли всестороннюю валидацию — сравнение с данными CLAS, проверку на псевдоданных модели MAID2007, оценку устойчивости методом реплик и closure-тест с двумя независимыми генераторами событий, — а также обсуждение в коллаборации CLAS и рецензирование при публикации, в силу чего являются обоснованными и достоверными. Результаты имеют существенное значение для экспериментальной физики элементарных частиц и адронной физики: они применимы для проверки теоретических моделей, извлечения амплитуд электровозбуждения нуклонных резонансов, настройки генераторов событий и коррекции детекторных эффектов в анализе данных CLAS12.

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. Текст автореферата в полной мере отражает содержание диссертации, сформулирован личный вклад автора, материал отражен в публикациях, указанных в автореферате. 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:

Заведующий Лабораторией электрослабых
и новых взаимодействий ОЭФВЭ НИИЯФ
МГУ,
д.ф.-м.н.

Л.В. Дудко

Подпись Л.В. Дудко заверяю

Секретарь Ученого совета НИИЯФ МГУ,
к.ф.-м.н.

Е.А. Сигаева

«___» _____ 2026 г.

Дудко Лев Владимирович, тел.: +7 495 939 58 81, e-mail:
dudko@sinp.msu.ru. Степень д.ф.-м.н. защищена по специальности:
1.3.15 физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких
энергий. Адрес места работы: Московский государственный
университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский
институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ),
119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2,
<http://www.sinp.msu.ru>, info@sinp.msu.ru