

О Т З Ы В

**официального оппонента д.ф.-м.н. Красникова Николая Валерьевича
на диссертацию Годизова Антона Александровича**
«Изучение дифракционного взаимодействия адронов при высоких энергиях в
эйкональном подходе с нелинейными траекториями Редже»,
представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук
по специальности 1.3.3. – «теоретическая физика».

Актуальность темы диссертационной работы.

Изучение взаимодействия адронов в дифракционном кинематическом режиме исключительно важно, поскольку эти процессы относятся к непертурбативному сектору адронной физики высоких энергий. В последние годы измерения дифференциальных и интегрированных сечений различных дифракционных процессов, таких как упругое рассеяние, одиночная и двойная диссоциация нуклонов, эксклюзивное дифракционное рождение лёгких резонансов и др., проводились как на Большом адронном коллайдере (коллаборации TOTEM, CMS, ATLAS, ALICE, LHCb), так и на коллайдере RHIC (коллаборация STAR). Поэтому **актуальность** темы диссертации как с теоретической, так и с экспериментальной точек зрения не вызывает сомнений.

В диссертации А.А. Годизова рассмотрены основные мягкие дифракционные процессы адронной физики высоких энергий. Теоретическое исследование этих процессов проводится в рамках редже-эйконального формализма, где взаимодействие адронов описывается в терминах реджеонных обменов между взаимодействующими частицами. Характерная особенность редже-эйконального подхода — явный учёт условия унитарности для матрицы рассеяния. Ключевыми моментами применяемого метода исследования являются

- 1) использование нелинейных приближений к траекториям Редже лидирующих реджеонов, обоснованное в рамках квантовой хромодинамики (КХД);
- 2) использование одних и тех же траекторий Редже и реджеонных форм-факторов нуклона при описании разных реакций дифракционной физики;
- 3) опора на дуальное приближение КХД при определении реджеонной структуры эйконала (борновской амплитуды);
- 4) проверка предсказательной значимости построенных моделей мягких дифракционных процессов;
- 5) использование метода Лавлэйса при теоретических расчётах интерсептов вторичных траекторий Редже.

Обоснованность научных положений и выводов.

Методология исследования основана на применении теории Редже, известной своей надёжностью в качестве теоретического подхода в рамках адронной физики, а также, КХД. Используемые в ходе исследования приближения к траекториям Редже и реджеонным форм-факторам основаны на учёте корректного, с точки зрения КХД, асимптотического поведения этих функций в области больших значений переданного импульса. Используемые для описания протон-протонного рассеяния одно- и двухреджеонные приближения для эйконала основаны на апелляции к дуальному приближению КХД. Результаты применения этих приближений в рамках моделей

дифракционного взаимодействия адронов при высоких энергиях проверяются путём верификации предсказательной значимости построенных моделей. Выдвигаемые автором предположения не только обоснованы теоретически, но и подтверждаются доступными экспериментальными данными по различным дифракционным процессам. Результаты теоретического расчёта интерсептов вторичных траекторий Редже, связанных со спектрами мезонов, обладают калибровочной и ренорм-инвариантностью. Всё это указывает на **обоснованность** используемых приближений, полученных результатов и соответствующих выводов как с теоретической, так и с феноменологической точек зрения.

Достоверность и новизна полученных результатов.

Автором впервые предложена версия редже-эйконального подхода с существенно нелинейными траекториями Редже лидирующих реджеонов и корректным, с точки зрения правил кваркового счёта, асимптотическим поведением реджеонных форм-факторов нуклона. Использование существенно нелинейных траекторий Редже позволило описывать различные эксклюзивные и инклюзивные дифракционные процессы, используя одни и те же универсальные приближения к траекториям Редже и реджеонным форм-факторам нуклона, что является несомненным преимуществом предлагаемого автором подхода. Впервые было выявлено важное свойство чрезвычайно слабой зависимости поперонных форм-факторов лёгких мезонов от своего аргумента, что позволило определить наиболее вероятного кандидата на роль тензорного состояния мягкого померона, которое представляет собой лёгкий тензорный глюбол. Этот результат очень важен, поскольку глюболы относятся к ещё не открытому виду адронов.

Чётко определены области применимости используемых феноменологических приближений. **Достоверность** результатов моделирования подтверждается сравнением с доступными экспериментальными данными по моделируемым дифракционным процессам в широких кинематических областях. Достоверность полученных аналитических результатов обеспечена корректностью математических расчётов.

Практическая значимость полученных результатов.

Полученные приближения к траекториям Редже лидирующих реджеонов и соответствующим реджеонным форм-факторам адронов могут быть использованы при моделировании любых процессов адронной физики высоких энергий. Построенные модели рассмотренных дифракционных процессов могут применяться при прогнозировании результатов будущих экспериментов на адрон-адронных и лептон-адронных коллайдерах. Такое прогнозирование чрезвычайно важно для детального планирования подобных экспериментов. Построенные автором модели упругого рассеяния и эксклюзивного дифракционного рождения лёгких скалярных и тензорных резонансов были включены в зарегистрированный генератор событий ExDiff и могут быть использованы в других генераторах событий. Генераторы событий — специализированные компьютерные программы, позволяющие моделировать результаты будущих экспериментов физики высоких энергий, что помогает в разработке соответствующих детекторов частиц.

Структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Также, она включает в себя оглавление, список литературы и четыре приложения. В диссертации 183 страницы, 10 таблиц и 50 рисунков. Список литературы содержит 216 ссылок.

Вклад автора в получение результатов и их апробация.

Диссертационная работа А.А. Годизова выполнена автором самостоятельно. Представленные автором результаты опубликованы в одиннадцати статьях в ведущих мировых рецензируемых журналах, таких как Physical Review D, Physics Letters B, European Physical Journal C и Nuclear Physics A, и докладывались на многочисленных международных конференциях, семинарах и рабочих совещаниях. В течение ряда лет автор работал по тематике диссертации в составе коллаборации CMS в ЦЕРНе, а также в составе научного коллектива Particle Data Group.

Общая оценка содержания диссертации и замечания.

Важным достоинством диссертационной работы А.А. Годизова является построение общего подхода к описанию различных мягких дифракционных процессов адронной физики высоких энергий, что позволяет рассматривать эти процессы с единых позиций. Надёжность используемых нелинейных приближений к траекториям Редже и реджеонным форм-факторам лидирующих реджеонов подтверждается верификацией их предсказательной значимости через сопоставление с доступными экспериментальными данными в широких областях кинематических параметров при энергиях от 10 ГэВ до 13 ТэВ. К особо интересным результатам относятся феноменологическая оценка с достаточно высокой точностью значения интерсепта суперкритического реджеона, известного как померон БФКЛ, определение основного кандидата на роль тензорного состояния мягкого померона (лёгкого тензорного глюбола), теоретический расчёт серии интерсептов вторичных траекторий Редже, связанных со спектрами мезонов, и обнаружение такого важного свойства реджеонных форм-факторов, как их слабая зависимость от своего аргумента в дифракционной области. Характерной чертой построенных моделей взаимодействия адронов в дифракционном режиме является их простота и физическая ясность. Также, следует отметить теоретическую обоснованность используемых приближений и корректность математических формулировок.

При общем положительном от диссертационной работы диссертации А.А. Годизова, тем не менее, имеются определённые вопросы и рекомендации для дальнейшей работы. Автор сравнивает предсказания модели упругого рассеяния нуклонов с огромным массивом экспериментальных данных по дифференциальным и интегрированным сечениям этого процесса. Однако, он почти полностью игнорирует доступные данные по полным сечениям (они присутствуют лишь на Рисунке 13), а данные по таким важным характеристикам как отношение реальной части амплитуды рассеяния вперёд к мнимой и логарифмический наклон дифференциального сечения, определяющий поперечный размер области взаимодействия, вообще не упоминаются. С чем это связано?

Следует также отметить, что для демонстрации преимуществ предлагаемого автором подхода над альтернативными теоретическими подходами было бы полезно на некоторых рисунках сравнивать предсказания построенных автором моделей не только с экспериментальными данными, но и с предсказаниями конкурирующих моделей.

В свою очередь, при оформлении списка литературы автором был допущен ряд мелких неточностей. В ссылках на источники [68], [75], [78], [85], [87] и [158] номер статьи указан как номер первой страницы, а в ссылках на источники [58], [138], [139] и [148] — наоборот, номер первой страницы упоминается как номер статьи. В автореферате диссертации имеются опечатки: в первой строке страницы 19 в слове «рассмотренное» пропущена буква «с», а в шестой строке страницы 21 в слове «соответствующих» пропущена буква «ю». В самой диссертации не вполне некорректно оформлен второй абзац на странице 92.

Приведённые вопросы и упомянутые мелкие недостатки в оформлении не снижают общей высокой оценки проделанной работы, её научной и практической значимости. Диссертация является логически целостным и завершённым научным исследованием, в рамках которого получен ряд новых результатов, представляющих несомненный фундаментальный и практический интерес. Автореферат диссертации соответствует её тексту и в полном объёме отражает результаты проделанной работы.

Заключение.

Диссертация Годизова А.А. «Изучение дифракционного взаимодействия адронов при высоких энергиях в эйкональном подходе с нелинейными траекториями Редже» представляет собой законченную научно-квалификационную работу и отвечает всем требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 (в действующей редакции), а её автор Годизов Антон Александрович, безусловно, заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.3. — «теоретическая физика».

Отзыв составил

главный научный сотрудник ОТФ ИЯИ РАН,

доктор физ.-мат. наук

тел. 8-499-135-21-71

25.12.2023

e-mail: Nikolai.Krasnikov@cern.ch



Н.В. Красников

Полный адрес института:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт ядерных исследований Российской академии наук,

117312 Москва, пр. 60-летия Октября 7а

Подпись Н.В. Красникова удостоверяю

Заместитель директора ИЯИ РАН, д.ф.-м.н.



Г.И. Рубцов