

# **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

на диссертационную работу

**Годизова Антона Александровича**

**«Изучение дифракционного взаимодействия адронов при высоких энергиях в эйкональном подходе с нелинейными траекториями Редже»**, представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности **1.3.3.** – теоретическая физика

Диссертация Годизова А.А. **«Изучение дифракционного взаимодействия адронов при высоких энергиях в эйкональном подходе с нелинейными траекториями Редже»** посвящена разработке общего теоретического подхода к описанию различных типов дифракционных взаимодействий легких адронов при высоких энергиях и получению для них оценок некоторых важных физических параметров, доступных для измерений.

## **Актуальность темы**

На протяжении последних лет уже получен значительный массив новых экспериментальных данных по различным дифракционным процессам, и работы в этом направлении продолжаются. Однако, несмотря на многочисленные исследования, указанный тип процессов в адронной физике является одним из наиболее сложных для описания в рамках квантовой теории поля (КТП). В связи с этим, особый интерес представляет разработка общего теоретического подхода, позволяющего с единых позиций описывать различные процессы дифракционного взаимодействия и строить модели таких процессов с высокой предсказательной значимостью. Все это свидетельствует об актуальности темы диссертации.

## **Структура и содержание диссертации**

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, включающего 216 наименований, и приложений.

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цель работы и методология исследования, научная новизна основных результатов и их практическая значимость, выносимые на защиту положения.

В **первой главе** содержится достаточно подробный обзор литературы по изучаемой проблематике. Обсуждаются современные феноменологические подходы к описанию процессов мягких адронных взаимодействий с акцентом на модели, использующие понятие реджеона, и на соответствующие аналитические методы КХД. Основное внимание уделено процессам (квази)упругого взаимодействия нуклонов и эксклюзивного дифракционного образования мезонов, которые изучаются в диссертационной работе и для которых подробно описаны некоторые важнейшие свойства.

**Вторая** глава посвящена упрощенной версии редже-эйконального формализма для рассеяния легких адронов, учитывающей некоторые следующие непосредственно из квантовой хромодинамики (КХД) выводы. Использование КХД приводит к феноменологической картине с нелинейными в рассматриваемой кинематической области траекториями Редже, которая позволила в рамках диссертационной работы получить модели дифракционных процессов с высокой предсказательной значимостью. Построена иерархия простейших реджеонных приближений для эйконала упругого дифракционного рассеяния нуклонов при высоких и сверхвысоких энергиях взаимодействия. Эта иерархия учитывает аналитические и асимптотические свойства траекторий Редже лидирующих реджеонов, следующие, в том числе, из дуального приближения КХД. В рамках используемого приближения эйконал упругого протон-протонного рассеяния сведен к сумме вкладов мягкого померона и  $f$ -реджеона, для которых описано асимптотическое поведение траекторий Редже и эффективных вершинных функций.

В **третьей** главе представлены результаты моделирования процессов дифракционного рассеяния нуклонов на нуклонах и антинуклонах в реджевском режиме на основе простейших эйкональных приближений с учетом одного и двух реджеонов. Используются гиперболические параметризации для траекторий Редже мягкого померона,  $f$ -реджеона и соответствующих эффективных

вершинных функций, удовлетворяющие асимптотическим соотношениям. Представлен детальный анализ вкладов поперонного и  $f$ -реджеонного обмена для различных диапазонов по энергии столкновений в системе центра масс ( $\sqrt{s}$ ). На основе сравнения с экспериментальными данными установлены границы областей применимости рассматриваемых в диссертационной работе простейших редже-эйкональных приближений. Использование в качестве базиса общих принципов КТП и положений КХД позволило, в ряде случаев, достичь статистически приемлемой предсказательной значимости моделей, предложенных в диссертации.

**Четвертая** глава посвящена феноменологическому изучению распределений по кинематическим переменным для процессов одиночной дифракционной диссоциации (ОДД) протона и эксклюзивного центрального рождения (ЭЦР) легких вакуумных резонансов при высоких энергиях. Сравнение модели трехреджеонного взаимодействия, учитывающей результаты диссертационной работы, с экспериментальными данными выявило эффект существенного влияния  $f$ -реджеона на характеристики ОДД протона вплоть до энергий Большого адронного коллайдера (БАК). Полученные результаты позволили объединить в рамках универсальной феноменологической схемы двухреджеонного взаимодействия легких адронов процессы ОДД протона и упругого рассеяния протонов на (анти)протонах. Построена модель центрального рождения глюбола, который представляет собой резонансное состояние спина 2, лежащее на траектории Редже мягкого померона.

В **пятой** главе представлены результаты изучения взаимодействия мягкого померона с легкими мезонами и фотонами. Угловые распределения для упругого рассеяния положительно заряженных каонов на протонах и для фоторождения легких векторных мезонов смоделированы в рамках однореджеонного приближения, аналитический аппарат которого был разработан в диссертационной работе. Полученные оценки констант связи мягкого померона с заряженными каонами и реальными фотонами позволили предложить вакуумный резонанс  $f_2(2010)$  в качестве вероятного кандидата на роль основного реального состояния мягкого померона (легкого тензорного глюбола).

**Шестая** глава посвящена расчету параметров мезонных траекторий Редже, а именно, интерсептов. Вычисления выполнены на основе КХД в рамках аналитического подхода Лавлейса. Найдена серия полюсов 4-кварковой функции Грина и дана их физическая интерпретация как части полного спектра интерсептов вышеупомянутых траекторий, соответствующей семействам резонансов  $\pi$  и  $b$ .

В **заключении** диссертации перечислены основные результаты работы.

В **приложениях** детально описаны используемые в диссертации некоторые аспекты теории Редже и КХД, приведены таблицы и рисунки.

**Новизна исследований** определяется тем, что в диссертации

- впервые была рассчитана в рамках КХД серия интерсептов мезонных траекторий Редже, связанных с  $\pi$  и  $b$  мезонами;
- впервые была обнаружена слабая  $t$ -зависимость вершинных функций, определяющих связь мягкого померона с заряженными каонами и легкими векторными мезонами, в области  $|t| < 1$  ГэВ<sup>2</sup>;
- вакуумный резонанс  $f_2(2010)$  предложен в качестве основного кандидата на статус легкого тензорного глюбола.

### **Значимость полученных в диссертации результатов**

Полученные в диссертации результаты вносят существенный вклад в систематическое изучение дифракционных процессов в адронных взаимодействиях. Детально исследованы свойства мягкого померона и  $f$ -реджеона, являющихся основными переносчиками сильного взаимодействия в режиме дифракционного рассеяния легких адронов при высоких энергиях. На основании КХД получена иерархия реджевских приближений для эйконала упругого рассеяния, определено асимптотическое поведение траекторий Редже и эффективных вершинных функций в области больших значений переданного поперечного импульса. Предложенный вариант редже-эйконального подхода позволяет изучать с единых позиций различные процессы дифракционного взаимодействия. Все это имеет важное значение для развития теоретических методов изучения «мягкой» физики, соответствующей непertурбативному сектору

КХД. Результаты диссертационной работы могут быть полезны для физического анализа данных действующих экспериментов, а также при проектировании будущих установок планируемых ускорительных комплексов. Таким образом, результаты проведенных автором диссертации исследований представляют научную и практическую значимость для физики сильных взаимодействий.

### **Степень обоснованности и достоверность полученных результатов**

Достоверность результатов работы подтверждается применением апробированных методов КТП и согласованностью выводов. Материалы диссертации докладывались на международных и российских конференциях. Основные результаты полно представлены в научной печати. Все это подтверждает высокую степень обоснованности и достоверности полученных в диссертационной работе результатов.

Говоря о диссертации в целом, необходимо отметить высокий теоретический и феноменологический уровень работы. К несомненным достоинствам диссертационной работы можно отнести, в частности, использование в секторе «мягкой» физики методов КХД, как основного кандидата на роль квантово-полевой теории сильных взаимодействий, а также количественную проверку предложенных моделей на основе обширного экспериментального материала, что является дополнительным свидетельством детальной проработки автором выбранной темы. Личный вклад автора в основные результаты исследования не вызывает сомнения.

### **Замечания**

В качестве замечаний необходимо отметить следующее.

1. Подраздел «Личный вклад автора» присутствует только в автореферате.
2. В утверждении «...с пространственными масштабами порядка  $10^{-5}$ – $10^{-3}$  фм...» на стр. 2 автореферата и стр. 6 диссертации, вероятно, присутствует опечатка, поскольку современные измерения образования адронных струй соответствуют пространственным масштабам до  $10^{-4}$  фм по порядку величины.

3. В отдельных случаях перепутаны русско- и англоязычные обозначения (стр. 40, 41 и далее по тексту – для тригонометрических функций; стр. 78, 79, 89), встречаются опечатки в тексте как автореферата (стр. 16), так и диссертации (стр. 42, 45, 73, 89, 158, 159).

4. На стр. 52 для утверждения «...при энергии столкновения  $\sqrt{s} = 7$  ТэВ, которые были опубликованы коллаборацией TOTEM ...» отсутствует ссылка на источник.

5. На стр. 67 утверждение «... из ... оценки  $4 < \alpha'_{\text{HP}}(0)/\alpha'_{\text{HP}}(-M_Z^2) < 100$  следует естественное соотношение  $g_{\text{HP}}(0) \sim g_{\text{SP}}(0)$ ...» требует дополнительного обоснования, по крайней мере, для выбора нижнего ограничения для отношения  $\alpha'_{\text{HP}}(0)/\alpha'_{\text{HP}}(-M_Z^2)$  и уточнения, поскольку заявленное соотношение  $g_{\text{HP}}(0) \sim g_{\text{SP}}(0)$  выполняется только при отношении  $\alpha'_{\text{HP}}(0)/\alpha'_{\text{HP}}(-M_Z^2) \approx 100$  для указанных в диссертации значений параметров.

6. Значения свободных параметров для жесткого померона (стр. 64, 70), мягкого померона и  $f$ -реджеона (табл. 5), а также трехреджеонных констант связи (стр. 78, 79), эффективного мягкопомеронного заряда каона (стр. 89) и легких векторных мезонов (стр. 91) приведены без погрешностей. Вследствие этого для жесткого померона невозможно сделать вывод о соотношении значений свободных параметров, полученных в рамках различных приближений.

7. Численные значения в правых частях формул (103) и (104) на стр. 97 требуют дополнительных пояснений и обоснований.

8. В тексте диссертации (стр. 92, 96, 97; табл. 1, 2, 4 и 9) погрешности и, соответственно, результаты приведены с избыточным количеством значащих цифр.

Указанные недостатки не влияют на положительную оценку диссертационной работы и значимость результатов, выносимых на защиту.

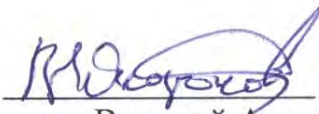
## **Заключение**

Диссертация Годизова А.А. «**Изучение дифракционного взаимодействия адронов при высоких энергиях в эйкональном подходе с нелинейными траекториями Редже**» представляет собой законченную научно-

квалификационную работу, соответствующую паспорту заявленной специальности (п. 1, 7). Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание диссертации. В опубликованных автором работах полно отражены основные результаты и положения диссертации. Диссертационная работа обладает научной и практической значимостью.

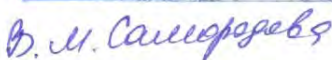
На основании вышеизложенного считаю, что диссертация «**Изучение дифракционного взаимодействия адронов при высоких энергиях в эйкональном подходе с нелинейными траекториями Редже**» удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, **Годизов Антон Александрович**, за расчет в рамках КХД серии интерсептов мезонных траекторий Редже, предположительно связанных с  $\pi$  и  $b$  мезонами, и определение основного кандидата на статус легкого тензорного глюбола заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.3. – теоретическая физика.

Доктор физико-математических наук, доцент, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», кафедра физики

  
Окороков Виталий Алексеевич

Диссертация защищена по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц отрасли науки 01 – физико-математические науки

Подпись удостоверяю  
Заместитель начальника отдела  
документационного обеспечения  
НИЯУ МИФИ



г. Москва, «24» сентября 2024 г.

Почтовый адрес:  
115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31  
тел. +7-499-788-5699 доб. 5818,  
электронная почта: VAOkorokov@mephi.ru

