

На правах рукописи

Рютин Роман Анатольевич

**Дифракционные процессы эксклюзивного  
центрального рождения, диссоциации и перезарядки в  
Редже-эйкональном подходе**

01.04.02 — теоретическая физика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Протвино 2018

УДК 539.1.07

Работа выполнена в НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ (г. Протвино).

Научный руководитель (консультант) – доктор физ.-мат. наук, профессор, НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, г. Протвино, начальник Отдела теоретической физики, В.А. Петров.

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук, Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, О.В. Селюгин,

доктор физ.-мат. наук, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, И.М. Дремин,

доктор физ.-мат. наук, Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, г. Москва, В.А. Окороков .

Ведущая организация – Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. Почтовый адрес: 119991, ГСП-1, Москва, Воробьевы горы, д.1, стр.2.

Защита диссертации состоится “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2019 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 201.004.01 при НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ по адресу: 142281, Московская область, г. Протвино, площадь Науки, дом 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте [http://ihep.ru/files/ryutin\\_thesis.pdf](http://ihep.ru/files/ryutin_thesis.pdf)  
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ .

Автореферат разослан “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 201.004.01

Ю. Г. Рябов

## Общая характеристика работы

### Актуальность работы.

Исследования дифракционных процессов занимают видное место в программе исследований мирового физического сообщества, что отражено в значительном количестве публикаций. Самые главные причины интереса к дифракционным процессам - это возможность изучить сочетание резко различных масштабов («жесткая» и «мягкая» дифракция) и экспериментальная «чистота» сигналов данных событий, а также некоторые упрощения при теоретических расчетах. Дифракция является настолько удобным инструментом, что большинство экспериментов при высоких энергиях включают ее в свои физические программы. В ЦЕРНе на базе специальной физической программы идет активный анализ данных экспериментальных измерений сечений дифракционных процессов рождения фундаментальных состояний. Как в рамках эксперимента CMS, так и в рамках совместных измерений CMS/TOTEM, планируется дальнейшее совершенствование детекторов в рамках проектов ST-PPS, HPS, FSC.

В данной области исследований имеется несколько (С.-Петербургский институт ядерной физики НИЦ КИ (Россия), Физический институт РАН им. П.Н. Лебедева (Москва, Россия), ЛТФ им. Н.Н. Боголюбова, ОИЯИ (Дубна, Россия), МГУ им. М.В. Ломоносова и НИИ ЯФ им. Д.В. Скобельцина (Москва), НИЯУ МИФИ (Москва), Durham (UK), Manchester (UK), Paris University (France) и т.д.) групп, специализирующихся в предсказаниях построенных этими группами моделей и подходов сечений дифракционных процессов для энергий и условий БАК. Основной проблемой, общей для всех групп, является недостаточная ясность зависимости предсказаний от общих принципов КХД и от дополнительных упрощающих предположений. В этом смысле одна из главных целей данной диссертационной работы

- найти по возможности более прямую физическую интерпретацию результатов сравнения данных эксперимента и теоретических предсказаний в терминах свойств и параметров фундаментальной теории сильных взаимодействий, КХД. Это отвечает задачам имеющегося мирового уровня в данной области исследований.

Если говорить о конкретных проблемах, решение которых в данный момент является важным для дифракционной физики, то можно выделить несколько базовых направлений:

- В свете гипотезы об универсальном асимптотическом поведении адронных сечений чрезвычайно важно иметь данные по всем процессам при сверхвысоких энергиях. Однако, на данный момент хорошо исследованными являются только процессы протон-протонного, протон-антипротонного, фотон-протонного рассеяния. При достаточно низких энергиях есть данные по рассеянию пионов и каонов, но в этой области «вакуумные эффекты» еще не настолько сильны. Встает вопрос: где взять сечения рассеяния для фундаментальных частиц, участвующих в сильных взаимодействиях? Прямые пучки пионов, к примеру, сложно получить для энергий больше нескольких десятков ГэВ. Остается надеяться на косвенные методы получения сечений, которые и представлены в данной диссертационной работе.
- Хотя адронная дифракционная физика начала стремительно развиваться больше 50 лет назад, особенно после открытия «Серпуховского эффекта» роста полных сечений, мы еще недостаточно хорошо понимаем механизмы взаимодействия. Это связано с тем, что фундаментальная теория сильных взаимодействий, КХД (квантовая хромодинамика) позволяет нам проводить вычисления в ограниченной («жесткой») области, где можно осуществлять разложение наблюдаемых величин в теории возмущений по константе сильного взаимодействия. В области же дифракционных («мягких») процессов теория возмущений перестает работать, и нужно использовать другие методики (непертурбативные, феноменологические). Причем нуж-

но обеспечить переход от одного режима к другому, согласованно склеить «жесткие» и «мягкие» процессы, соотнести параметры феноменологических моделей со строгими вычислениями квантовой теории поля. В контексте различных феноменологических подходов возникают объекты, которые называются реджеонами. Одной из самых важных задач является исследование структуры данных объектов (спиновая структура, составляющие и их распределения, соотнесение с базовыми объектами квантовой теории поля) и их взаимодействия с адронами (дифференциальные сечения процессов рассеяния реджеонов на адронах). Ведь по сути реджеоны представляют из себя проявление совокупности некоторого ряда адронов (резонансов), которые «лежат на траекториях Редже», поэтому дифференциальным сечениям их рассеяния на реальных адронах должны быть присущи те же свойства, что и самим адронам. Либо, если величины и поведения реджеонных сечений отличаются, нужно дать объяснение, почему это происходит. Это чрезвычайно важный и актуальный вопрос, который, в частности, рассмотрен в одной из глав данного исследования.

- Направлением, в котором работают сейчас практически все дифракционные группы, является разработка адекватных моделей дифракции. Среди них выделяются реджевский, редже-эйкональный, U-матричный, квазиклассический, БФКЛ, реджеонная теория поля, модели «струнного» типа и «мешков». В связи с тем, что последние данные коллаборации TOTEM с БАК показали несостоятельность предсказаний всех моделей во всей исследуемой области, возникла так называемая проблема фальсификации моделей. И тут нам очень могут помочь измерения процессов ЭРВМ и ЭДЦР, где имеются четкие сигнатуры различий в предсказаниях моделей, даже если они близки в описании полных и упругих сечений. Здесь играют роль «тонкие» эффекты взаимодействия различных пространственно-временных масштабов, о которых говорилось ранее. И важной актуальной задачей является выделить переменные, описыва-

ющие процессы, и распределения по ним, которые будут давать однозначный ответ, применима какая-либо модель, или нет. Этот вопрос также рассмотрен в диссертации.

- Во многих феноменологических моделях при сверхвысоких энергиях приходится учитывать так называемые эффекты перерассеяния или «поглощения». Обычно необходимость учета «унитарных поправок» выявляется, если асимптотическое поведение модели не удовлетворяет соотношениям типа ограничения Фруассара-Мартэна или их модификациям. Если в эйкональных и  $U$ -матричных моделях этот вопрос решается просто правильным определением амплитуды рассеяния, то в других моделях может возникнуть сумма дополнительных вкладов, которая существенно меняет конечный результат. Но во всех моделях, даже в эйкональных и  $U$ -матричных, возникает много вопросов при расчетах процессов дифракционной диссоциации и процессов с участием «виртуальных» частиц. Попытки ввести различные «корректирующие факторы», «вероятности выживания» (survival probabilities), которые на прямую не привязаны к основной теории, приводят к полному размытию физической интерпретации моделей. Все результаты должны быть получены строго в рамках одного подхода, без «привлечения дополнительных сущностей», как указывает нам всем известная «бритва Оккама». В диссертации рассмотрены процессы дифракционной диссоциации и эффекты унитаризации (их влияние на конечные результаты по извлечению Померон-протонных сечений).
- Другая проблема, уже более близкая к постановке экспериментов типа СТ-PPS и ТОТЕМ, заключается в сложности прецизионных измерений, которая обусловлена прежде всего высокой светимостью (много «грязных» событий), редкостью исследуемых событий типа ЭДЦР и долгим набором статистики, «выживаемостью» детекторов в жестких условиях облучения и их модернизацией. Для получения ощутимых результатов, как было написано в самом начале, нужно пройти много шагов.

Тем не менее, уже получены «сырые» неопубликованные данные, которые позволят получить ответы на фундаментальные вопросы. Для экспериментаторов важно иметь готовые инструменты численного моделирования процессов, такие как Монтекарло генераторы событий. В данный момент «на рынке» очень мало таких генераторов, поэтому их написание тоже является актуальной задачей.

- После совершения глобальных сенсационных открытий типа обнаружения бозона Хиггса и гравитационных волн научное сообщество переключилось на другие популярные темы, связанные с расширениями стандартной модели, теорией струн, темной материей и энергией, суперсимметрией. Однако последние годы в этих областях не было получено ответов на ключевые вопросы. И многие сейчас задумываются о том, чтобы переключиться на исследования более практичных, и, может быть, даже прикладных вещей типа дифракционных процессов. Все, что мы знаем о дифракции в оптике, принесло свои плоды в развитии технологий. И в области адронной дифракции при высоких энергиях однозначно можно получать «осязаемые» результаты уже в ближайшем будущем, если направить туда достаточные силы. Это направление становится все более востребованным как с точки зрения развития точнейших технологий измерения, так и с точки зрения развития теории сильных взаимодействий.

### **Практическая ценность работы**

В свете проблем, стоящих перед дифракционной физикой, результаты, полученные в данной диссертационной работе, действительно практичны и востребованы в научном сообществе. Детальная разработка схемы расчета процессов ЭРВМ и ЭДЦР проведена с общей точки зрения, не привязываясь к определенной модели. И только потом применена в редже-эйкональном подходе. Это дало возможность рассмотреть фундаментальные вещи, которые относятся не к конкретной модели, а к свойствам исследуемых процессов и состав-

ляющих их структур. Цель исследований - максимально отделить модельные предположения от получаемых экспериментальных результатов, что является в физике высоких энергий одной из самых сложных задач. До этого авторы проводили исследования только в рамках какого-то одного, узкого подхода, что лишало их возможности проследить модельную зависимость предсказаний.

### **Цель диссертационной работы**

Данная диссертация посвящена отдельным аспектам изучения дифракционных процессов, которые могут быть использованы в высокоточных измерениях как инструмент для получения фундаментальных свойств адронной материи и сильных взаимодействий. В экспериментах на БАК (CMS, TOTEM, ATLAS, LHCb, ALICE) были получены сечения различных дифракционных процессов: упругое рассеяние, одиночная (ОДД) и двойная (ДДД) дифракционная диссоциация, эксклюзивное рождение векторных мезонов (ЭРВМ), эксклюзивное двойное центральное рождение (ЭДЦР). Это послужило толчком к пересмотру некоторых основ теоретических моделей.

В эксперименте LHCf недавно были получены сечения перезарядки с лидирующими нейтронами. В настоящий момент проводится анализ новейших уникальных данных из совместного эксперимента ST-PPS. Основываясь на данных прошлых экспериментов (HERA, CDF, STAR), сделаны предсказания для процессов ЭДЦР и ЭРВМ на БАК.

Подробно рассмотрен ряд методологических вопросов, связанных со спиновыми эффектами в процессах ЭДЦР, ОДД, ДДД. Даны предсказания для азимутальных распределений процессов ЭДЦР при рождении резонансов с малыми и большими массами. Основываясь на фундаментальных теоретических положениях, выведены формулы для сечений процессов ОДД и ДДД при условии сохранения «реджевских токов». Исходя из этих формул проанализированы разные возможности поведения Померон-протонных сечений и извлечение их из экспериментальных данных по ОДД и ДДД.

Разработан точный метод извлечения пион-протонных сечений из



процессов с лидирующими нейтронами (одиночная и двойная перезарядка). Этим методом получены пион-протонные сечения в широком диапазоне энергий, начиная с десятков ГэВ и заканчивая величиной в несколько ТэВ.

В теоретическом анализе экспериментальных данных диссертационной работы используется подход, направленный на получение реальных физических наблюдаемых, таких как адронные сечения, размеры и форма области взаимодействия и самих адронов, спиновая структура взаимодействующих частиц. Четко прописана их взаимосвязь и физическая значимость для дальнейшего развития исследований дифракции. Этот момент часто упускается в больших экспериментах, где ученые используют для анализа программное обеспечение, не вникая в суть реальных физических процессов. В конце диссертационной работы рассмотрены такого рода программы для численного моделирования процессов ЭДЦР и перезарядки.

### **Научная новизна**

В диссертационной работе впервые получены сечения процессов, которые было раньше невозможно получить прямыми методами. Это касается, например, сечений пион-протонного рассеяния при энергиях в несколько ТэВ. Это произошло благодаря разработке и усовершенствованию метода непрямого извлечения адронных сечений из процессов перезарядки. К тому же проведена детальная разработка эксперимента, который планируется осуществить на БАК. Результатом этого эксперимента будут значения адронных сечений в неисследованных областях по энергии. Метод успешно протестирован на данных эксперимента LHCf.

В работе приведена полная методика расчета реджезованных амплитуд для различных спиновых состояний, которая используется для извлечения Померон-протонных сечений. Строго доказаны следствия предположения о сохраняющихся токах и их влияние на извлеченные сечения. Такие исследования до этого не проводились, и могут быть в дальнейшем использованы для дальнейших предсказаний. Основным плюсом данного подхода является «прозрачность»

математической модели и её следствий для наблюдаемых фундаментальных величин.

Приведено также описание программ численного моделирования исследованных процессов. Написание таких программ - достаточно сложный и длительный процесс. Тем не менее удалось это сделать и провести сам процесс моделирования, включающий детекторы БАК. Результаты моделирования приводятся в диссертации.

### **Личный вклад автора**

Автор диссертации был основным разработчиком общего подхода к описанию процессов эксклюзивного дифракционного центрального рождения, методик извлечения адрон-адронных и реджеон-адронных сечений из процессов перезарядки и дифракционной диссоциации. Эта работа проводится с 2004 года совместно с коллегами из Курчатовского Института, НИИЯФ и физического факультета МГУ (Москва), ОИЯИ (Дубна), CNRS (Анси, Франция), CERN (Женева, Швейцария), Fermilab (Батавия, США), JLAB (Ньюпорт-Ньюс, США), INFN (Турин, Италия). Автор принимал участие в нескольких совместных международных проектах по разработке дифракционных экспериментов на БАК.

Автор также является активным членом коллаборации CMS и эксперимента CT-PPS, делает доклады на совместных заседаниях групп “LHC Forward Physics”, является по сути главным разработчиком трёх программных продуктов для численного моделирования дифракционных процессов в коллаборации CMS-TOTEM.

### **Публикации**

Основные результаты диссертации опубликованы в научных реферируемых журналах [1]-[14].

### **Структура и объём диссертации.**

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, девяти приложений, а также списка принятых сокращений и обозначений.

Диссертация содержит 229 страниц, в том числе 116 рисунков и 18 таблиц. Список литературы содержит 280 ссылок.

## Краткое содержание работы

**Во введении** описаны стратегии проведения современных экспериментов в физике высоких энергий. Также рассмотрены основные задачи современной дифракционной физики, в частности: разработка адекватной модели дифракционных процессов, извлечения конкретных наблюдаемых величин, имеющих прозрачную физическую интерпретацию, уменьшение модельной зависимости при данных процедурах извлечения. Рассмотрены примеры физических величин (размеры и форма области взаимодействия, спиновая структура рождающихся частиц), используемых в дифракции, и их интерпретации. Обсуждается ситуация присутствия различных пространственно-временных масштабов в процессах. Представлены также возможности, которые предоставляют для исследований процессы ЭРВМ и ЭДЦР, рассмотрены исследования, которые проводились и проводятся в данной области. Кратко обсуждаются вопросы извлечения адронных сечений (пион-протонных, пион-пионных, протон-реджеонных) из экспериментальных данных.

**В первой главе** дается краткое историческое введение в дифракцию адронов и современные представления о ней, включая различные теоретические подходы.

В настоящий момент нет однозначного определения адронной дифракции. Можно подходить к данному вопросу с разных позиций:

- аналогия с обычной оптической дифракцией;
- определение с точки зрения теоретических объектов (таких как Померон, Фруассарон, Реджеон, струна и т.д.) в разных моделях взаимодействий;
- исходя из экспериментальной топологии и кинематики событий.

Однако нужно отдавать себе отчет в том, что все эти подходы являются лишь определением граничной области исследований, в которой можно получить более-менее однозначное описание процессов, названных дифракционными, и дать четкие предсказания.

Ключевыми моментами, по которым можно выделить дифракционные процессы, являются

- Взаимодействия, при которых начальные частицы переходят в конечное состояние «нетронутыми» (как в упругом рассеянии) или диссоциируют в состояния с малой массой (до нескольких ГэВ).
- Распределение по углу рассеяния адронов дает типичный дифракционный рисунок с максимумом при нулевом угле и один (или, иногда больше) максимумов и минимумов при больших углах.
- Взаимодействия, опосредованные  $t$ -канальным обменом объектами с квантовыми числами вакуума (Помероном, несколькими Померонами в различных теоретических представлениях, инстантонами, струнами и т.д.)
- Отсутствие рождения частиц в определенной кинематической области по быстроте (процессы с LRG)

Все эти свойства используются в данной работе одновременно в применении к конкретным дифракционным процессам (см. рис. 1) и с конкретными численными оценками (особенно последнее свойство).

Также в этой главе обсуждаются три основных процесса, представленные в данной диссертации: ЭДЦР, перезарядки и дифракционной диссоциации. Для них рассмотрены: ключевые свойства, существующие теоретические подходы и представления амплитуд и сечений.

**Во второй главе** дается полное описание кинематики, динамики, измеряемых величин, проблематики, экспериментов и предсказаний для ЭДЦР.

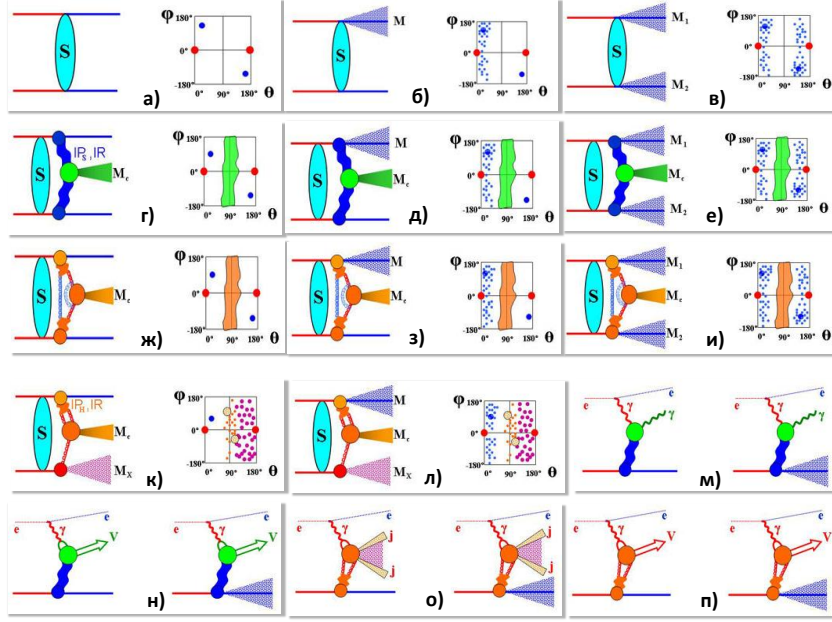


Рис. 1: Дифракционные процессы: а) упругое рассеяние; б) «мягкая» ОДД; в) «мягкая» ДДД; г) «мягкая» ЭДЦР; д) «мягкая» ИДЦР с одиночной диссоциацией; е) «мягкая» ИДЦР с двойной диссоциацией; ж) «жесткая» ЭДЦР; з) «жесткая» ИДЦР с одиночной диссоциацией; и) «жесткая» ИДЦР с двойной диссоциацией; к) эксклюзивная «жесткая» одиночная дифракция; л) инклюзивная «жесткая» одиночная дифракция; м) эксклюзивное (адрон рассеивается упруго) и инклюзивное (адрон диссоциирует) фотон-адронное рассеяние; н) «мягкое» ЭРВМ и ИРВМ (с диссоциацией адрона); о) «жесткое» эксклюзивное (адрон рассеивается упруго) и инклюзивное (адрон диссоциирует) фотон-адронное рассеяние; п) «жесткое» ЭРВМ и ИРВМ (инклюзивное рождение векторных мезонов с диссоциацией адрона). В м)-п) начальный фотон может испускаться лептоном или адроном.

ЭДЦР является процессом типа  $h + h \rightarrow h^* + M + h^*$ , где процесс  $h \rightarrow h^*$  является квазидифракционным,  $M$  - частица или система частиц, рождаемая в центре, и “+” означает LRG. Если взять в качестве  $M$  отдельную частицу, то это первый “подлинно” неупругий процесс, который не только сохраняет много особенностей упругого рассеяния (дифракционную картину), но также ясно показывает, как начальная энергия превращается во вторичные частицы.

ЭДЦР дает нам уникальные экспериментальные возможности для поиска частиц и исследования собственно дифракции. Это связано с несколькими преимуществами данного процесса:

- чёткая сигнатура процесса: центральная система отделена от конечных протонов большими промежутками по быстрой (Large Rapidity Gaps, LRG);
- возможность использовать “метод недостающих масс”, который улучшает разрешение по массе центральной системы;
- сильное подавление фонов (например, в процессе с рождением бозона Хиггса и его последующим распадом на две струи  $b$ -кварков) из-за “правила отбора”  $J_z = 0$ , которое является следствием закона сохранения углового момента;
- возможность спин-четностного анализа центральной частицы или системы с определением квантовых чисел (например, для определения четности бозона Хиггса или других открываемых частиц) [13];
- возможность измерений, которые могут показать взаимодействие “мягких” и “жёстких” масштабов на картину взаимодействия (в частности, на угловые распределения): мы можем получить основные свойства области взаимодействия (форма и размер) из дифракционной картины (углового распределения).

Различные режимы вычислений амплитуд ЭДЦР представлены на рисунке 2.

В пертурбативном режиме мы должны использовать глюон-протонные амплитуды  $T$ , свёрнутые с амплитудой  $F$  глюон-глюонного

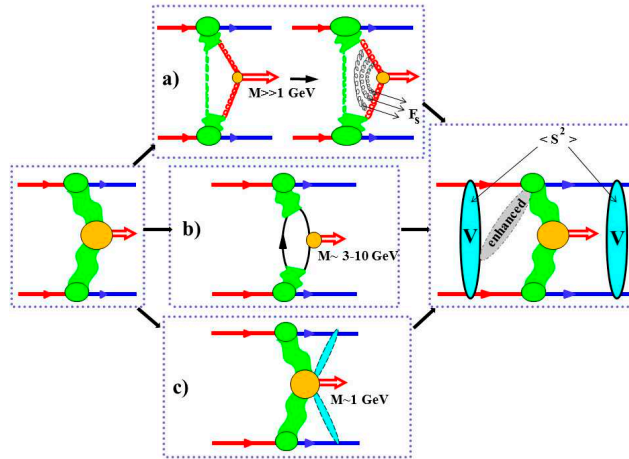


Рис. 2: Различные схемы вычислений полной амплитуды ЭДЦР для случаев большой (а), промежуточной (b) и малой (с) инвариантных масс центральной системы или частицы, то есть пертурбативный, промежуточный и непертурбативный режимы Померон-Померонных взаимодействий.

столкновения, затем учесть судаковское подавление, отсутствие “мягкого” излучения в области LRG (оно изображено загнутыми глюонными линиями на рис. 2а), и, после всего этого учесть еще абсорбтивные поправки, обозначенные на рисунке как амплитуды  $V$ .

В непертурбативном случае некорректно рассматривать Померон как синглетное двухглюонное состояние. Здесь мы должны представлять его как целостный объект, реджеон. К тому же, мы должны учитывать взаимодействие между центральной частицей (или системой) с малой массой и конечными протонами (овалы, которые обведены штриховой линией на рисунке 2с). Абсорбция в начальном и конечном состоянии учитывается также как в пертурбативном случае. Так называемые “усиленные” (enhanced) диаграммы могут играть значительную роль в вычислениях амплитуды ЭДЦР.

В промежуточном режиме, по видимому, нужно применять сме-

шанный подход. На рисунке 2b показана “кварковая структура” Померона при рождении кваркониев с массой от 3 до 10 ГэВ.

В этой главе детально разобрана модель процесса ЭРВМ для рождения мезонов с большими массами ( $J/\Psi$  и  $\Upsilon$ ). ЭРВМ является одной из “стандартных свеч” для расчета процессов ЭДЦР, так как его амплитуда включает те же элементы. Для расчетов использовались модели нерелятивистской КХД и редже-эйкональный подход. На основе полученных параметров модели сделаны предсказания для отношения  $\mathcal{R}_{th.} = \sigma_{\gamma p \rightarrow \Upsilon p}(W_\Upsilon)/\sigma_{\gamma p \rightarrow J/\Psi p}(W_{J/\Psi})$  (см. табл. 1)

Далее рассмотрена детальная модель ЭДЦР. На основе модели даны предсказания сечений ЭДЦР, измеренных в коллаборации CDF, а также сечений для БАК.

На рисунке 3 показаны предсказания, основанные на данных с HERA, которые находятся в хорошем согласии с данными CDF.

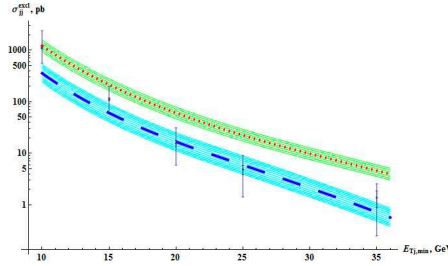


Рис. 3: Данные CDF по рождению двух струй в ЭДЦР в зависимости от нижнего обрезания по поперечной энергии струи  $E_{T,jet}$  и предсказания модели с тремя Померонами. Верхняя пунктирная кривая получена путем фитирования данных с HERA по ЭРВМ. Нижняя штриховая кривая получена при помощи перемасштабирования  $E_{T,jet} = 0.75E_{T,g}$  (см. диссертацию). Заштрихованные области включают ошибки параметров модели.

Предсказание для ЭДЦР с рождением двух гамма квантов показано на рисунке 4. Значение предсказанного сечения после примене-



Таблица 1: Теоретические предсказания и экспериментальные результаты для отношения  $\mathcal{R}$  при различных значениях энергии столкновения фоторождения  $J/\Psi$  и  $\Upsilon$ .

$W_{J/\Psi}$ , ГэВ	$W_{\Upsilon}$ , ГэВ	$\mathcal{R}_{exp.} \times 10^3$	$\mathcal{R}_{th.} \times 10^3$
20-30	60-130	$4.91 \pm 2.23$	$3.49 \pm 0.64$
20-30	130-220	$9.85 \pm 4.37$	$4.43 \pm 0.66$
20-30	60-220	$7.21 \pm 2.45$	$4.06 \pm 1.03$
30-50	60-130	$3.86 \pm 1.55$	$2.89 \pm 0.56$
30-50	130-220	$7.73 \pm 3.0$	$3.68 \pm 0.59$
30-50	60-220	$5.66 \pm 1.49$	$3.37 \pm 0.88$
50-70	60-130	$2.87 \pm 1.15$	$2.47 \pm 0.44$
50-70	130-220	$5.75 \pm 2.24$	$3.13 \pm 0.44$
50-70	60-220	$4.21 \pm 1.12$	$2.87 \pm 0.72$
70-90	60-130	$2.4 \pm 0.99$	$2.2 \pm 0.38$
70-90	130-220	$4.82 \pm 1.9$	$2.79 \pm 0.37$
70-90	60-220	$3.53 \pm 0.96$	$2.56 \pm 0.63$
90-110	60-130	$2.18 \pm 0.88$	$2.01 \pm 0.34$
90-110	130-220	$4.37 \pm 1.7$	$2.56 \pm 0.33$
90-110	60-220	$3.2 \pm 0.85$	$2.34 \pm 0.57$
110-130	60-130	$1.85 \pm 0.74$	$1.87 \pm 0.31$
110-130	130-220	$3.7 \pm 1.44$	$2.38 \pm 0.3$
110-130	60-220	$2.71 \pm 0.71$	$2.18 \pm 0.53$
130-150	60-130	$1.54 \pm 0.63$	$1.76 \pm 0.29$
130-150	130-220	$3.09 \pm 1.23$	$2.24 \pm 0.28$
130-150	60-220	$2.26 \pm 0.63$	$2.05 \pm 0.5$
150-170	60-130	$1.46 \pm 0.61$	$1.67 \pm 0.28$
150-170	130-220	$2.92 \pm 1.19$	$2.12 \pm 0.27$
150-170	60-220	$2.14 \pm 0.62$	$1.94 \pm 0.47$

ния обрезаний CDF

$$\begin{aligned}
 E_T > 5 \text{ ГэВ}, |\eta_\gamma| < 1 &\implies \sigma_{\gamma\gamma}^{excl, th} = 28 \pm 8 \text{ фб}, \\
 E_T > 2.5 \text{ ГэВ}, |\eta_\gamma| < 1 &
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$\implies \sigma_{\gamma\gamma}^{excl, th} = 0.29 \pm 0.08 \text{ пб.} \quad (2)$$

Неопределенности в глюонных распределениях могут привести к фактору порядка  $\frac{\times 3}{\div 3}$  (верхняя и нижняя кривые показаны для иллюстрации этого факта на рисунке 4) в теоретических предсказаниях. Если учесть этот факт, то результаты CDF

$$E_T > 5 \text{ ГэВ}, |\eta_\gamma| < 1 \implies \sigma_{\gamma\gamma}^{excl, CDF} < 410 \text{ фб}, \quad (3)$$

$$E_T > 2.5 \text{ ГэВ}, |\eta_\gamma| < 1$$

$$\implies \sigma_{\gamma\gamma}^{excl, CDF} = 2.48 \begin{matrix} +0.40 \\ -0.35 \end{matrix} (stat) \begin{matrix} +0.40 \\ -0.51 \end{matrix} (syst) \text{ пб} \quad (4)$$

находятся в хорошем согласии с предсказаниями.

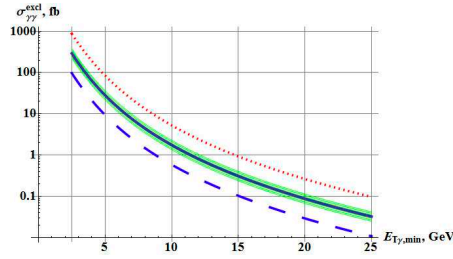


Рис. 4: Данные CDF по сечению ЭДЦР с рождением двух фотонов в зависимости от нижнего обрезания по поперечной энергии фотона  $E_{T,\gamma}$  и предсказания модели. Сплошная кривая основана на параметрах, полученных путем фитирования данных с HERA по ЭРВМ. Заштрихованные области обозначают ошибки в вычислении параметров. Показаны также значения результатов, умноженных на 3 (пунктирная кривая) и деленных на 3 (штриховая кривая).

Предсказания для рождения  $\chi_{c,0}$  в ЭДЦР

$$\left. \frac{d\sigma_{\chi_{c,0}}^{excl, th}}{dy} \right|_{y=0} = 15.9 \pm 4.1 \text{ нб}, \quad (5)$$

а данные CDF дают

$$\left. \frac{d\sigma_{\chi_{c,0}}^{excl, CDF}}{dy} \right|_{y=0} = 76 \pm 10 (stat) \pm 10 (syst) \text{ нб.} \quad (6)$$

Теоретические предсказания в  $3 \div 5$  раз ниже. Как указано в диссертации, непertурбативные эффекты в столкновении Померонов в этом случае могут играть существенную роль, так как инвариантная масса не достаточно большая.

Модель может быть проверена еще одним способом на процессе эксклюзивного рождения  $J/\Psi$ ,  $p + \bar{p} \rightarrow p + J/\Psi + \bar{p}$ , на CDF, который напоминает фотон-Померонное рассеяние в ЭРВМ. Мы можем получить соответствующее сечение как

$$\begin{aligned} \left. \frac{d\sigma_{J/\Psi}^{excl, th}}{dy} \right|_{y=0} &= C_{CDF} \times \sigma_{\gamma+p \rightarrow J/\Psi+p}(W_0) \\ &= 3.51 \pm 0.45 \text{ нб,} \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$W_0 = \sqrt{m_{J/\Psi} \sqrt{s_{CDF}}} \simeq 78 \text{ ГэВ}, \quad C_{CDF} \simeq 5.3 \times 10^{-5}.$$

Результат CDF

$$\begin{aligned} \left. \frac{d\sigma_{J/\Psi}^{excl, CDF}}{dy} \right|_{y=0} \\ = 3.92 \pm 0.25 (stat) \pm 0.52 (syst) \text{ нб,} \end{aligned} \quad (8)$$

находится в хорошем согласии с предсказаниями.

Основные предсказания для БАК:

- рождение бозона Хиггса в ЭДЦР

$$\sigma_{p+p \rightarrow p+H+p}(M_H = 125 \text{ ГэВ}) \simeq 0.55 \pm 0.15 \text{ фб,} \quad (9)$$

$$10^{-4} < \xi_{1,2} < 0.1, \quad 0.001 \text{ ГэВ}^2 < |t_{1,2}| < 1 \text{ ГэВ}^2. \quad (10)$$

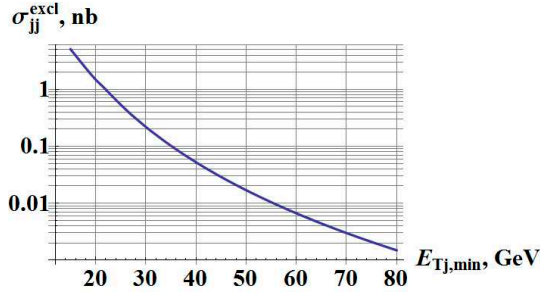


Рис. 5: Сечения ЭДЦР с рождением двух струй на БАК в зависимости от нижнего обрезания по поперечной энергии струи при  $\sqrt{s} = 8$  ТэВ,  $|\eta_{jet}| < 2.5$  с обрезаниями (10).

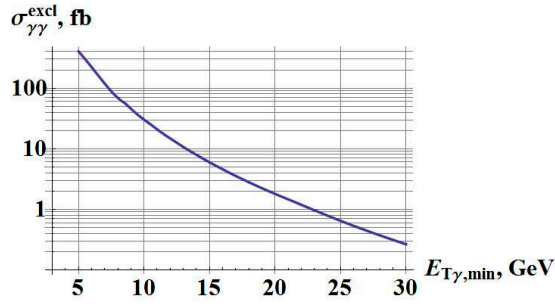


Рис. 6: Сечения ЭДЦР с рождением двух фотонов на БАК в зависимости от нижнего обрезания по поперечной энергии фотона при  $\sqrt{s} = 8$  ТэВ,  $|\eta_\gamma| < 2.5$  с обрезаниями (10).

- рождение двух струй и двух фотонов в ЭДЦР. Результаты представлены на рисунках 5,6. Для случая рождения двух фотонов мы можем предположить более высокие значения сечений (как в CDF) из-за непертурбативных эффектов. Последние результаты с БАК дают верхний предел для процесса с рождением двух фотонов при  $\sqrt{s} = 7$  ТэВ

$$\sigma_{p+p \rightarrow p^* + \gamma\gamma + p^*} < 1.18 \text{ пб},$$

$$E_{T,\gamma} > 5.5 \text{ ГэВ}, |\eta_\gamma| < 2.5, \quad (11)$$

при отсутствии частиц в области  $|\eta_\gamma| < 5.2$ .

- Здесь же рассмотрим предварительные результаты коллаборации LHCb по эксклюзивному рождению  $\chi_{c,0}$  и  $J/\Psi$  при 7 ТэВ:

$$\sigma_{\chi_{c,0}}^{excl, LHCb} = 160.9 \pm 78.8 \text{ нб}, \quad (12)$$

$$\sigma_{J/\Psi}^{excl, LHCb} = 81.9 \pm 18.3 \text{ нб}, \quad (13)$$

Предсказания модели:

$$\sigma_{\chi_{c,0}}^{excl, th} = 212 \pm 53 \text{ нб}, \quad (14)$$

$$\sigma_{J/\Psi}^{excl, th} = 76.3 \pm 19.1 \text{ нб}. \quad (15)$$

Эти результаты лежат близко к экспериментальным данным.

- также даны предсказания для процессов ЭДЦР с рождением “радиона” и гравитонов в модели Рэндалл-Сундрум.

В процессах ЭДЦР с рождением малых масс основные результаты связаны с вычислениями амплитуд и предсказаниями дифференциальных сечений рождения различных мезонов. Нормировка модели основывается на данных коллаборации WA102. В главе приводятся дифракционные картины процессов (распределения по  $t$ ), а также распределения по азимутальному углу (см., например, рис. 7), которые могут быть использованы для спин-четностного анализа.

**В третьей главе** дается полное описание кинематики, динамики, измеряемых величин, проблематики, экспериментов и предсказаний для пион-протонных и пион-пионных сечений в рамках измерений процессов ОП и ДП, методология извлечения сечений из экспериментальных данных.

Основными результатами данной главы стали:

- разработка метода извлечения пион-протонных и пион-пионных сечений из данных по процессам перезарядки. Суть метода в

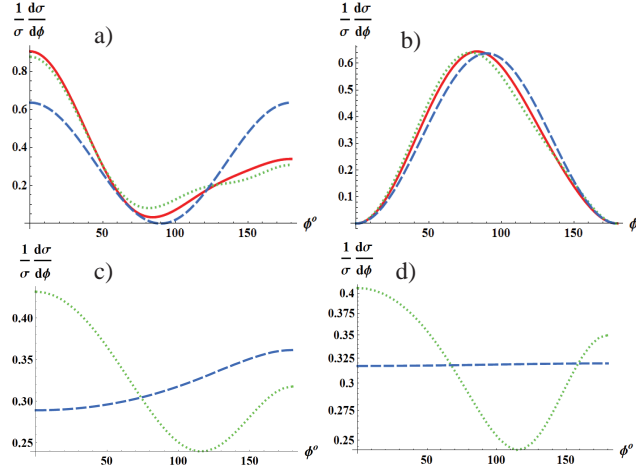


Рис. 7: Азимутальные распределения для разных конечных состояний: а) подобные “глюболам”; б)  $\eta'$ ; в)  $\pi^+\pi^-$ . Сплошные (красные) кривые в а), б) даны для  $\sqrt{s} = 30$  ГэВ, точечные кривые на а), б), в), д) представляют унитаризованные результаты при  $\sqrt{s} = 7$  ТэВ. Штриховые кривые показывают поведение борновских сечений при  $\sqrt{s} = 7$  ТэВ: а)  $\cos^2 \phi$ , б)  $\sin^2 \phi$ , в)  $\pi^+\pi^-$ , д) “плоское”.

экстраполяции дифференциальных сечений по переменной  $t$  в область малых значений и, далее, в точку  $t = m_\pi^2$ . Эта процедура похожа на метод экстраполяции Чу-Лоу:

$$\begin{aligned} \sigma_{\pi p}(s; \xi; \{m_p^2, m_\pi^2\}) &= \lim_{t \rightarrow m_\pi^2} \sigma_{\pi_{virt} p}(s; \xi; \{m_p^2, t\}) \frac{S(s/s_0, \xi, t) t}{m_\pi^2} = \\ &= \lim_{t \rightarrow m_\pi^2} E(\xi, t) \frac{d\sigma_{S\pi E}}{dt d\xi}, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\pi\pi}(s; \xi_1 \xi_2; \{m_\pi^2\}, m_\pi^2) &= \\ &= \lim_{t_{1,2} \rightarrow m_\pi^2} \sigma_{\pi_{virt} t \pi_{virt}}(s; \xi_1 \xi_2; \{t_1, t_2\}) \frac{S_2(s/s_0, \xi_{1,2}, t_{1,2}) t_1 t_2}{m_\pi^4} = \end{aligned}$$

$$= \lim_{t_{1,2} \rightarrow m_\pi^2} E(\xi_1, t_1) E(\xi_2, t_2) \frac{d\sigma_{D\pi E}}{dt_1 dt_2 d\xi_1 d\xi_2}, \quad (17)$$

$$F_\pi(\xi, t) \equiv 1/E(\xi, t) = \frac{G_{\pi+pn}^2}{16\pi^2} \frac{-t}{(t - m_\pi^2)^2} e^{2bt} \xi^{1-2\alpha_\pi(t)}, \quad (18)$$

где параметры определяются из низкоэнергетических данных, а функции  $S$  и  $S_2$  соответствуют учету абсорбции во взаимодействии начальных протонов и вычислены в диссертации.

Главный вклад приходит от пионов с очень малыми виртуальностями  $|t_i| < 0.3 \text{ ГэВ}^2$ . Нам интересна кинематическая область  $0.01 \text{ ГэВ}^2 < |t_i| < 0.5 \text{ ГэВ}^2$ ,  $\xi_i < 0.4$ , где доминирует пионный обмен. Здесь  $\sigma_{\pi p}$  и  $\sigma_{\pi\pi}$  означают полное, упругое или любое другое дифференциальное сечение  $\pi p$  и  $\pi\pi$  рассеяния соответственно.

- обобщение метода на случай невозможности измерения точной  $t$ -зависимости. Если предположить достаточно слабую зависимость от  $t$  сечений  $\pi p$  и  $\pi\pi$  рассеяния, то мы можем надеяться извлечь эти сечения (поначалу с достаточно большими ошибками), используя следующую интегральную процедуру:

$$\tilde{S}(s, \xi) = \int_{t_{min}}^{t_{max}} dt S\left(\frac{s}{s_0}, \xi, t\right) F_\pi(\xi, t), \quad (19)$$

$$\sigma_{\pi p}(M_{\pi p}^2) = \frac{d\sigma_{S\pi E}}{d\xi}, \quad \xi \simeq \frac{M_{\pi p}^2}{s}, \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \tilde{S}_2(s, \xi_0) &= \int_{-y_0}^{y_0} dy \int_{t_{min}}^{t_{max}} dt_1 dt_2 S_2\left(\frac{s}{s_0}, \xi_0 e^{\pm y}, t_{1,2}\right) \times \\ &\times F_\pi(\xi_0 e^y, t_1) F_\pi(\xi_0 e^{-y}, t_2), \end{aligned} \quad (21)$$

$$\sigma_{\pi\pi}(M_{\pi\pi}^2) = \frac{d\sigma_{D\pi E}}{d\xi_0}, \quad \xi_0 \simeq \frac{M_{\pi\pi}^2}{\sqrt{s}}, \quad y_0 = \ln \frac{\xi_{max}}{\xi_0}. \quad (22)$$

- расчет фоновых процессов, связанных с  $\rho$  и  $a_2$  обменами. Основные результаты представлены на рисунке 8.
- извлечение сечений пион-протонного рассеяния для энергий до 70 ГэВ. Результаты можно увидеть на рисунке 9.

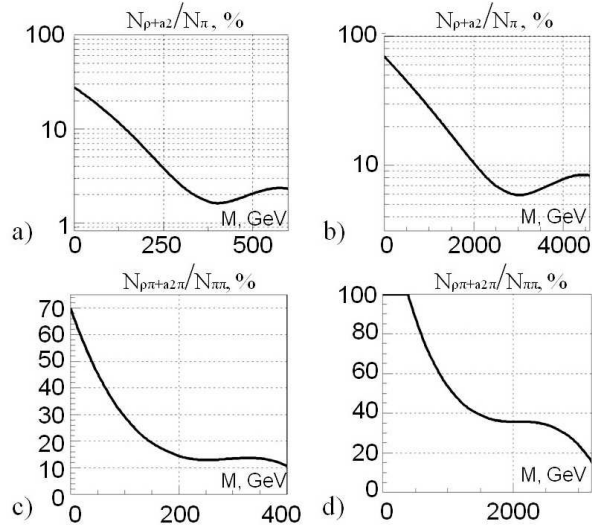


Рис. 8: Отношения количества событий с реджеонными обменами к количеству пионных обменов в области детектирования ZDC (Zero Degree Calorimeter) в зависимости от инвариантной массы реджеон-протонной (реджеон-реджеонной) системы: а)  $(N_{S\rho E} + N_{Sa_2 E})/N_{S\pi E}$ ,  $\sqrt{s} = 900$  ГэВ; б)  $(N_{S\rho E} + N_{Sa_2 E})/N_{S\pi E}$ ,  $\sqrt{s} = 7$  ТэВ; в)  $(N_{D\rho\pi E} + N_{Da_2\pi E})/N_{D\pi E}$ ,  $\sqrt{s} = 900$  ГэВ; д)  $(N_{D\rho\pi E} + N_{Da_2\pi E})/N_{D\pi E}$ ,  $\sqrt{s} = 7$  ТэВ. Результаты для различных моделей похожи.

- проведение детального Монте-Карло моделирования для исследования вопроса о извлечении полных, упругих и “жестких” (с рождением струй) сечений пион-протонного и пион-пионного рассеяния.
- извлечение сечений пион-протонного рассеяния для энергий 2-4 ТэВ. Результаты можно увидеть на рисунке 10 и в таблице 2. Фоны, связанные с реджеонными обменами, учтены, и представлены на рисунке 8.

В четвертой главе дается полное описание кинематики, дина-



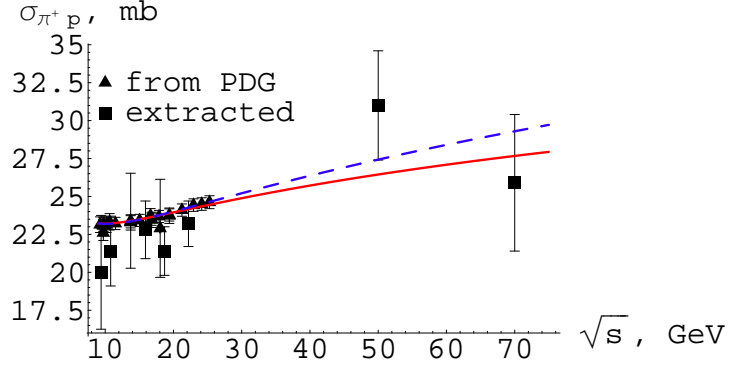


Рис. 9:  $\sigma_{\pi+p}$ , извлеченные из данных HERA, NA49 и PHENIX, и измеренные в реальных экспериментах. Две параметризации (сплошная, Доннаки-Ландсхоф) и (штриховая, СОМРЕТЕ) тоже показаны на рисунке. Точка при 50 ГэВ получена другими авторами из данных HERA (см. диссертацию).

Таблица 2: Значения полных сечений  $\pi p$  рассеяния, извлеченные из данных LHCf и изображенных также на рисунке 10. Соответствующие средние значения  $|t|$  и  $q_0$  ( $q_t < q_0$ ) также показаны. Фоны от обменов  $\rho$  и  $a_2$  мезонами уже учтены.

$\sqrt{s}$ , ТэВ	$\sqrt{ t }/m_\pi$	$q_0$ , ГэВ	$\sigma_{\pi p}^{tot}$ , мб
$2.291 \pm 0.382$	$0.91 \pm 0.29$	0.132	$33.15 \pm 13.1$
$2.958 \pm 0.296$	$1.41 \pm 0.166$	0.12	$40.22 \pm 7.76$
$3.5 \pm 0.25$	$1.99 \pm 0.11$	0.112	$65.43 \pm 15.15$

мики, измеряемых величин, проблематики, экспериментов и предсказаний для ОДД и ДДД, с оценкой протон-Померонных сечений, в рамках ковариантного реджевского подхода с учетом унитарных

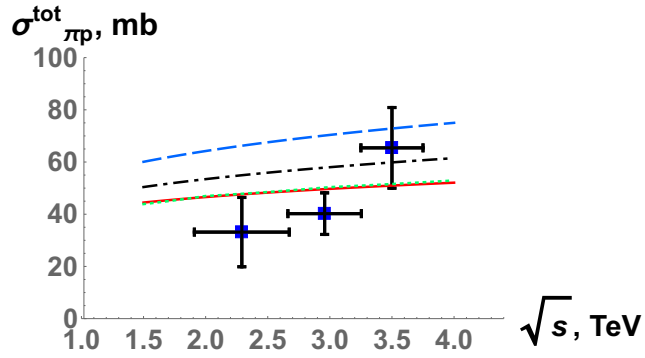


Рис. 10: Извлеченные полные сечения  $\pi^+p$  рассеяния, представленные в таблице 2, а также различные параметризации: Доннаки-Ландсхоф (сплошная), СОМРЕТЕ (штриховая), Борелли-Зофер-Ву (пунктирная) и Годизов (штрих-пунктирная). Интервал по  $t$  определяется интервалом LHCf  $\eta > 10.76$ .

поправок.

Попытки извлечь Померон-протонные и Померон-Померонные сечения из данных по ОДД (SD) и ДДД (DD) были предприняты достаточно давно. Значения сечений оказались очень маленькими (меньше 6 мб) по сравнению, скажем, с пион-протонными сечениями. Это кажется странным, так как Померон, как обычно считается, состоит в основном только из сильно взаимодействующих глюонных полей, и при малых передачах его квадрат “массы” ( $\sim t$ ) лежит не далеко от квадрата массы пиона ( $\sim 0.02 \text{ ГэВ}^2$ ). Из последней точки зрения, эта малость кажется странной. Обычно это связывают с малым значением трехпомеронной вершины при малых квадратах импульсов. До сегодняшнего момента причины этого не до конца ясны. В диссертации детально исследован этот вопрос и возможности его решения.

В рамках подхода ковариантной реджезации получены амплитуды и сечения процессов ОДД и ДДД. В Борновском приближении

они выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{d^2\sigma_{SD}}{d|t| d\xi} &= \frac{(\pi\alpha'_P(t))^2 |\eta_P(t)|^2}{32\pi^2} \xi \times \\ &|F_{\alpha_P}(t)|^2 \left( \frac{m^2}{(m^2 + |t|/4)} \right)^{\alpha_P(t)} \frac{1}{2^{\alpha_P(t)-1}} \times \\ &\left( \frac{|t|}{|t|_{min}} - 1 \right)^{\alpha_P(t)} (2\alpha_P(t) + 1) \sigma_{pP}(M^2). \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^3\sigma_{DD}}{d|t| d\xi_1 d\xi_2} &= \frac{(\pi\alpha'_P(t))^2 |\eta_P(t)|^2}{64\pi^3} s^2 \xi_1 \xi_2 \times \\ &4 \left( \frac{|t|}{|t|_{min}} \right)^{2\alpha_P(t)} \left[ \frac{1 + (1 - |t|_{min}/|t|)^{2\alpha_P(t)}}{2} \right] \times \\ &(2\alpha_P(t) + 1)^2 \sigma_{pP}(M_1^2) \sigma_{pP}(M_2^2), \end{aligned} \quad (24)$$

где  $\alpha_P$  - траектория Померона,  $\sigma_{pP}$  - протон-Померонное сечение.

При высоких энергиях обязательно нужно учитывать абсорбционные поправки. Они усложняют вычисления, и протон-Померонные сечения могут быть извлечены из данных только в рамках определенных модельных предположений. В данной работе рассматривается факторизованная форма

$$\sigma_{pP}(M^2; t) = h(M^2) f(t). \quad (25)$$

В этом случае упрощается учет унитарных поправок, и можно извлечь протон-Померонные сечения, используя формулы

$$\sigma_{pP}(M^2; t) = \frac{\frac{d\sigma_{SD}^U}{d\xi}}{\int_{t_1}^{t_2} \mathcal{H}_{SD}^{(2)U}(t; \xi)} f(t), \quad (26)$$

$$\sigma_{pP}(M_1^2; t) \sigma_{pP}(M_2^2; t) = \frac{\frac{d^2\sigma_{DD}^U}{d\xi_1 d\xi_2}}{\int_{t_1}^{t_2} \mathcal{H}_{DD}^{(2)U}(t; \xi_1, \xi_2)} [f(t)]^2. \quad (27)$$

Чтобы извлечь протон-Померонное сечение из  $\sigma_{SD,DD}^{tot}$ , нам нужны точные выражения для  $f(t)$  и  $h(M^2)$ , или полная формула для  $\sigma_{pP}(M^2; t)$ . Функции  $\mathcal{H}_{SD,DD}^{(2)U}$  подробно вычисляются в диссертации и связаны с перерасеянием при взаимодействии начальных протонов.

Были исследованы несколько случаев:

- I нет унитарных поправок,  $\mathcal{H}_a^{(2)U} = |\mathcal{H}_a|^2$ . В этом случае мы можем напрямую извлечь  $\sigma_{pP}(M^2, t)$  без дополнительных предположений о его поведении;
- II перерасеяние учитывается,  $f(t) \equiv 1$ ;
- III перерасеяние учитывается,  $f(t) = t^{-\alpha_P(0)/2}$ ;
- IV перерасеяние учитывается,  $f(t) = t^{-\alpha_P(t)}$ .

В результате сделаны следующие заключения:

- Первый факт касается сохранения тензорных токов, главный ингредиент вычислений. В случае сохраняющихся токов мы можем получить классические Реджевские формулы наиболее естественным образом. Мы сразу получаем полиномы Лежандра в упругом рассеянии со всеми масштабами, точно определенными в аргументе этих полиномов. Специфическим свойством этого приближения является специальная  $t$ -зависимость дифференциальных сечений в случае неравных масс, SD (23) или DD (24). Это поведение при малых  $t$  может испортить описание данных и приводит к сильной  $t$ -зависимости протон-Померонного сечения.
- Второй факт - необходимость в корректной процедуре унитаризации. Это становится очевидно, если мы попытаемся извлечь протон-Померонное сечение при разных значениях “чужой” энергии  $\sqrt{s}$ . Это случай I в наших тестах. Показано, что если мы извлечем протон-Померонное сечение без унитаризации, оно оказывается зависимым от  $s$ , а это полностью неприемлемо.

- Третий факт - в приближении сохраняющихся токов протон-Померонное сечение по величине близко к обычным адрон-адронным сечениям (несколько десятков миллибарн) и должно иметь существенную  $t$ -зависимость, чтобы описать существующие данные по SD, включая последние экспериментальные результаты коллаборации TOTEM.

Все эти факты проиллюстрированы в диссертации, здесь приведем один наиболее показательный рисунок 11.

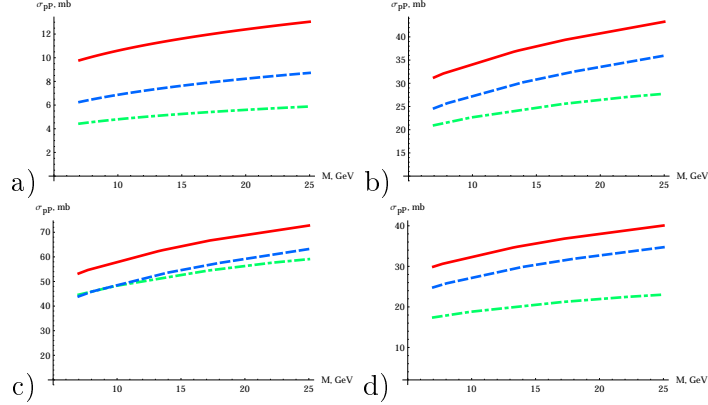


Рис. 11:  $M$ -зависимость извлеченных Померон-протонных сечений для разных случаев: а) I; б) II; в) III; г) IV at  $t = -0.1 \text{ ГэВ}^2$ . Сплошные кривые представляют данные при  $\sqrt{s} = 546 \text{ ГэВ}$ , штриховые кривые соответствуют  $\sqrt{s} = 1800 \text{ ГэВ}$ , и штрих-пунктирные относятся к  $\sqrt{s} = 7 \text{ ТэВ}$ .

**В пятой главе** описаны разработанные на основе модели программы симуляции дифракционных процессов.

**В Заключении** представлены основные результаты диссертации:

1. Детально разработан общий подход к описанию процессов эксклюзивного дифракционного центрального рождения (ЭДЦР).

В рамках подхода с применением редже-эйкональной модели описаны данные экспериментов с ускорителями HERA (DESY) и TeVatron. Получены параметры модели для дальнейших предсказаний.

2. Получены предсказания (полные и дифференциальные сечения) для процессов ЭДЦР на БАК с рождением бозона Хиггса, гравитонов, двух струй, двух гамма-квантов, тяжелых кваркониев  $\chi_{c,b}$ .
3. Получены предсказания для процессов ЭРВМ на БАК с рождением  $J/\Psi$  и  $\Upsilon$  мезонов. Проведено сравнение с последними данными коллаборации LHCb.
4. Подробно разработан спин-тензорный подход в Реджевских моделях с произвольным спином. Получен общий вид распределений по азимутальному углу для рождения резонансов в ЭДЦР со спином 0,1,2. Распределения использованы для нормировки на данные коллаборации WA102. Основываясь на этом подходе, сделаны предсказания полярных и азимутальных распределений для ЭДЦР на БАК.
5. Детально разработана модель одиночной и двойной перезарядки (с рождением лидирующих нейтронов). Проведен полный анализ данных по процессам с рождением лидирующих нейтронов с предыдущих экспериментов (HERA, ISR, RHIC STAR) в рамках разработанной модели.
6. Разработана методика (с минимальными модельными предположениями) извлечения пион-протонных и пион-пионных сечений из данных по экспериментам с рождением лидирующих нейтронов.
7. Детально разработана постановка эксперимента по извлечению пион-протонных и пион-пионных сечений на БАК. Проведено численное моделирование для данного эксперимента с участием детекторов ZDC (Zero Degree Calorimeter) коллаборации CMS.

8. На основе новейших данных коллаборации БАК LHCf, при использовании методики извлечения сечений, впервые в мире получены сечения пион-протонного рассеяния для энергий в области 1-3 ТэВ. Проведено сравнение с имеющимися моделями для пион-протонных сечений.
9. Детально исследованы процессы одиночной и двойной дифракционной диссоциации. На основе точного спин-тензорного анализа в Реджевском подходе с сохраняющимися токами получены выражения для дифференциальных сечений данных процессов. На основе методики извлечения сечений и экспериментальных данных CDF и TOTEM по процессам ОДД и ДДД получены оценки Померон-протонных сечений при разных модельных предположениях.
10. Созданы программы Монте-карло моделирования процессов ЭДЦР, перезарядки (MonChER) и общий генератор эксклюзивных дифракционных процессов ExDiff, который может моделировать любые эксклюзивные процессы типа  $2 \rightarrow 2$ ,  $2 \rightarrow 3$  и  $2 \rightarrow 4$ .

## Список литературы

- [1] R.A. Ryutin, *Visualizations of exclusive central diffraction*, Eur. Phys. J. C **74** (2014) 3162;
- [2] V.A. Petrov, R.A. Ryutin, *Patterns of the exclusive double diffraction*, J. Phys. G **35** (2008) 065004.
- [3] V. Petrov, R. Ryutin and A. Sobol, *LHC as  $\pi p$  and  $\pi \pi$  Collider*, Eur. Phys. J. C **65** (2010) 637.
- [4] A. Sobol, R. Ryutin, V. Petrov, M. Murray, *Elastic  $\pi^+ p$  and  $\pi^+ \pi^+$  scattering at LHC*, Eur. Phys. J. C **69** (2010) 641.

- [5] V.A. Petrov, R.A. Ryutin, A.E. Sobol, M.J. Murray, *Can We Get Deeper Inside the Pion at the LHC?*, Eur. Phys. J. C **72** (2012) 1886.
- [6] R.A. Ryutin, *Total pion–proton cross section from the new LHCf data on leading neutrons spectra*, Eur. Phys. J. C **77** (2017) 114; Erratum: Eur. Phys. J. C **77** (2017) 843.
- [7] V.A. Petrov and R.A. Ryutin, *Single and double diffractive dissociation and the problem of extraction of the proton–Pomeron cross-section*, Int. J. Mod. Phys. A **31** (2016) 1650049.
- [8] V.A. Petrov and R.A. Ryutin, *High-energy scattering versus static QCD strings*, Mod. Phys. Lett. A **30** (2015) 1550081.
- [9] R.A. Ryutin, *Exclusive Double Diffractive Events: general framework and prospects*, Eur. Phys. J. C **73** (2013) 2443.
- [10] R.A. Ryutin, V.A. Petrov and A.E. Sobol, *Towards Extraction of  $\pi^+p$  and  $\pi^+\pi^+$  cross-sections from Charge Exchange Processes at the LHC*, Eur. Phys. J. C **71** (2011) 1667.
- [11] R.A. Ryutin, *Investigation of diffractive processes with the CMS detector: New results*, Phys. Atom. Nucl. **73** (2010) 1956; Yad. Fiz. **73** (2010) 2009.
- [12] A.V. Kisselev, V.A. Petrov and R.A. Ryutin, *5-dimensional quantum gravity effects in exclusive double diffractive events*, Phys. Lett. B **630** (2005) 100.
- [13] V.A. Petrov, R.A. Ryutin, A.E. Sobol and J.-P. Guillaud, *Azimuthal angular distributions in EDDE as spin-parity analyser and glueball filter for LHC*, JHEP **0506** (2005) 007.
- [14] V.A. Petrov, R.A. Ryutin and A.V. Prokudin, *From the exclusive photoproduction of heavy quarkonia at HERA to the EDDE at Tevatron and LHC*, Czech. J. Phys. **55** (2005) 17.

*Рукопись поступила 27 ноября 2018 года.*



Автореферат отпечатан с оригинала-макета, подготовленного автором.

Р.А. Рютин.

Дифракционные процессы эксклюзивного центрального рождения, диссоциации и перезарядки в Редже-эйкональном подходе.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X**.

---

Подписано к печати 27.11.2018. Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.  
Печ.л. 3,02. Уч.-изд.л. 2,81. Тираж 100. Заказ 11. Индекс 3649.

---

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ

142281, Московская область, город Протвино, площадь Науки, дом 1

<http://www.ihep.ru>;

библиотека: <http://web.ihep.su/library/home-w.htm>

Индекс 3649

---

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
НИИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2018

---