

На правах рукописи



Ребякова Виктория Александровна

**ФОТОРОЖДЕНИЕ ВЕКТОРНЫХ МЕЗОНОВ  
В УЛЬТРАПЕРИФЕРИЧЕСКИХ СТОЛКНОВЕНИЯХ ПРОТОНОВ И  
ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР**

Специальность 01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор Бердников Ярослав Александрович

Официальные оппоненты: **Поздняков Валерий Николаевич**  
доктор физико-математических наук, Объединенный институт ядерных исследований, ведущий научный сотрудник лаборатории физики высоких энергий

**Феофилов Григорий Александрович**  
кандидат физико-математических наук, доцент, ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет», заведующий лабораторией физики сверхвысоких энергий НИИ физики им. В.А. Фока физического факультета СПбГУ

Ведущая организация: ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова», НИЦ «Курчатовский институт»

Защита состоится «19» декабря 2012 г. в 17 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.229.29 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул. 29, главное здание, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «\_\_\_» ноября 2012 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 212.229.29  
кандидат физико-математических наук  
доцент



Ермакова Наталья Юрьевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы диссертационной работы

После завершения в 2007 году экспериментов на коллайдере HERA (DESY, Германия), ультрапериферические столкновения (УПС) протонов и ядер на Большом адронном коллайдере (БАК) являются единственным экспериментальным способом продолжения исследований широкого класса процессов фоторождения векторных мезонов на протонных и ядерных мишенях при высоких энергиях. Актуальность темы диссертационной работы обусловлена необходимостью планирования и оптимизации экспериментов, планируемых и проводимых на БАК, путем оценок их результатов с помощью существующих теоретических методов. Кроме того, актуальность темы обусловлена и научной значимостью ожидаемых результатов.

Процессы фоторождения с образованием тяжелых векторных мезонов ( $J/\psi$ -мезон) относятся к жестким процессам, которые являются одним из основных источников информации о структуре частиц и динамике их взаимодействий на малых расстояниях. Жесткий масштаб обусловлен сравнительно большой массой векторного мезона ( $m_{J/\psi} = 3,096$  ГэВ), что позволяет использовать теорию возмущений квантовой хромодинамики (КХД) для расчета сечений когерентного фоторождения тяжелых кваркониев при высоких энергиях. В лидирующем порядке теории возмущений КХД сечение пропорционально квадрату глюонной плотности. Распределение глюонных плотностей в нуклонах и ядрах является одним из ключевых параметров в формировании экстремальных состояний ядерной материи при высоких температурах. В диссертации показано, что именно на БАК можно тщательно исследовать распределения глюонных плотностей в кинематической области, изученной на HERA, а также продвинуться в области  $x < 10^{-4}$  ( $x$  – доля импульса протона, переносимая глюоном) для нуклонов [1] и  $x < 10^{-2}$  для ядер [2], которые до настоящего времени были недостижимы ни на одном ускорителе.

Процессы когерентного фоторождения легких векторных мезонов ( $\rho$ -,  $\phi$ -мезоны) при малых переданных импульсах относятся к физике мягкого ад-

рон-адронного рассеяния. Описание этих процессов в теории возмущений КХД невозможно, и при их исследовании широко используются феноменологические модели, в частности, основанная на теории Редже модель Доннечи-Лендшоффа. Одной из ключевых гипотез модели является универсальность траектории мягкого померона. Данные, полученные в экспериментах на коллайдере HERA по фоторождению легких векторных мезонов на протонах, ввиду значительных экспериментальных ошибок не позволили однозначно подтвердить или опровергнуть данную гипотезу. Поскольку модель Доннечи-Лендшоффа широко используется как для анализа уже полученных данных по адрон-адронным взаимодействиям, так и для планирования будущих экспериментов, исследование возможности проверки одной из основных ее гипотез является, безусловно, актуальной проблемой.

Работа поддержана в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

### **Цели и задачи диссертационной работы**

Основной целью диссертационной работы является изучение процессов фоторождения векторных мезонов ( $J/\psi$ -,  $\rho$ ,  $\phi$ -мезоны) в УПС протонов при энергиях  $\sqrt{s_{NN}} = 7$  ТэВ, 14 ТэВ, протонов и ядер при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 8,8$  ТэВ и ядер при энергиях  $\sqrt{s_{NN}} = 62,4$  ГэВ, 130 ГэВ, 2,76 ТэВ, 5,5 ТэВ в рамках существующих теоретических подходов. Выполненные в диссертации исследования важны для анализа проводимых на БАК экспериментов, а также для планирования и оптимизации будущих экспериментов на электрон-ионных коллайдерах.

### **Научная новизна результатов диссертационной работы**

Научная новизна работы состоит в том, что в ней впервые:

1. разработан новый метод, который позволяет из измеренного сечения фоторождения векторного мезона с ненулевой быстротой в симметричном УПС тяжелых ядер выделить вклады от рождения мезона низкоэнергетическими и

высокоэнергетическими фотонами, испущенными сталкивающимися ядрами. Ценность предложенного подхода в том, что на данный момент это единственный способ извлечь из данных сечение фоторождения тяжелого векторного мезона фотоном высоких энергий и, следовательно, исследовать поведение ядерной глюонной плотности в области меньших  $x$ ;

2. предсказаны величины сечений фоторождения  $J/\psi$ -мезона в УПС ядер свинца с учетом эффектов глюонных экранировок в ядрах и электромагнитного возбуждения ядер, приводящих к их диссоциации, сопровождающейся эмиссией нейтронов;

3. в лидирующем порядке теории возмущений КХД вычислены сечения фоторождения  $J/\psi$ -мезонов в УПС протонов при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 7$  ТэВ и показано, что экспериментальное измерение зависимости сечения от быстроты рожденного мезона в области больших быстрот  $y > 2$  позволит определить значения глюонной плотности в протоне, вплоть до  $x \approx 10^{-5}$ ;

4. вычислены сечения фоторождения  $\rho$ - и  $\phi$ -мезонов в ультрапериферических протон-протонных и протон-ядерных столкновениях на БАК и предложен способ проверки гипотезы универсальности траектории мягкого померона и исследования роли жесткого померона в модели Доннечи-Лендшоффа.

#### **Достоверность результатов диссертационной работы**

Результаты диссертационной работы подтверждены первыми экспериментальными данными по фоторождению чармония в ультрапериферических ядро-ядерных столкновениях на БАК, полученными в 2012 году [3].

#### **Практическая значимость результатов диссертационной работы**

Полученные в диссертации результаты уже использованы при анализе первых данных по фоторождению чармония в ультрапериферических столкновениях ядер свинца на БАК и цитируются в публикации коллаборации ALICE [3]. Предложенный в диссертации новый метод выделения когерентного рождения векторных мезонов фотоном высоких энергий в симметричных ядро-ядерных столкновениях будет использован в анализе данных после накопления большой статистики, поскольку на данный момент это единст-

венный способ исследования ядерных глюонных плотностей при очень малых  $x$ .

### **Научные положения, выносимые на защиту**

На защиту выносятся результаты и выводы диссертационной работы.

### **Публикации и апробация диссертационной работы**

По материалам диссертации опубликовано 5 печатных работ, список которых приведен в конце автореферата.

Результаты работы были доложены:

1. на XV Всероссийской конференции «Фундаментальные исследования и инновации в национальных исследовательских университетах» (2011 г., Санкт-Петербург);
2. на 61 международной конференции «ЯДРО-2011» по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (2011 г., Саров);
3. на 62 международной конференции «NUCLEUS 2012» (2012 г., Воронеж);

Результаты работы докладывались на научных семинарах кафедры экспериментальной ядерной физики СПбГПУ, Неделях науки СПбГПУ.

### **Личный вклад автора**

Личный вклад автора в работы, вошедшие в диссертацию, является определяющим в реализации расчетов, а так же в интерпретации и анализе полученных результатов.

### **Содержание и объем диссертационной работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка используемой литературы. Объем диссертации составляет 129 страниц, в том числе 57 рисунков и 9 таблиц. Список литературы включает 114 наименований.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, поставлены её цели и задачи. Показана научная новизна и практическая значимость результатов диссертационной работы, обоснована их достоверность. Отражено личное участие автора, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, и кратко изложено содержание её разделов.

**В первой главе** в краткой форме дано описание физики ультрапериферических процессов столкновения протонов и ядер при высоких энергиях [4] и рассмотрен метод эквивалентных фотонов [5]. Этот метод позволяет представить дифференциальное сечение фоторождения векторного мезона в ультрапериферическом столкновении двух заряженных ионов  $A_1 A_2 \rightarrow A_1 V A_2$  с массовыми числами  $A_1$  и  $A_2$  в виде произведения потока фотонов, излученных одним ядром, и сечения фоторождения частицы на втором из сталкивающихся ядер:

$$\frac{d\sigma_{A_1 A_2 \rightarrow A_1 V A_2}}{dt dy} = \frac{dN_{\gamma/A_1}(y)}{dy} \cdot \frac{d\sigma_{\gamma A_2 \rightarrow A_2 V}(y, t)}{dt} + \frac{dN_{\gamma/A_2}(-y)}{dy} \cdot \frac{d\sigma_{\gamma A_1 \rightarrow A_1 V}(-y, t)}{dt}, \quad (1)$$

где  $t$  – квадрат переданного импульса,  $\text{ГэВ}^2$ ;  $y$  – быстрота образовавшегося векторного мезона;  $\frac{dN_{\gamma/A_1}(y)}{dy}$  – поток квазиреальных фотонов, испускаемых одним из сталкивающихся ядер;  $\frac{d\sigma_{\gamma A_2 \rightarrow A_2 V}(y, t)}{dt}$  – сечение когерентного фоторождения мезона на втором ядре. Появление второго слагаемого в (1) связано с симметрией ультрапериферических столкновений. Именно благодаря возможности использовать метод эквивалентных фотонов ультрапериферические столкновения релятивистских ионов оказались одним из наиболее эффективных методов исследования сечений фоторождения векторных мезонов при высоких энергиях. Однако, это в свою очередь предъявляет серьезные требования к точности вычисления потоков эквивалентных фотонов. В первой главе проведено изучение этой проблемы и показано, что поток фотонов, излученных ультрарелятивистским тяжелым ядром, может быть вычислен с погрешностью не более 5% .

**Во второй главе** в лидирующем порядке теории возмущений КХД вычислено сечение когерентного фоторождения  $J/\psi$ -мезона в УПС протонов при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 7$  ТэВ на БАК. Исследована возможность регистрации  $J/\psi$ -мезонов в эксперименте ALICE (A Large Ion Collider Experiment). Произведены оценки возможного числа когерентно рожденных  $J/\psi$ -мезонов, заре-

гистрированных в эксперименте ALICE в УПС протонов при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=7$  ТэВ в условиях накопленной светимости БАК. Учтен вклад фоновых процессов рождения  $J/\psi$ -мезонов в сильных взаимодействиях протонов и  $J/\psi$ -мезонов, рожденных в дифракционных процессах фоторождения, сопровождающихся диссоциацией мишени.

С лидирующей логарифмической точностью сечение фоторождения  $J/\psi$ -мезона на протоне пропорционально квадрату глюонной плотности  $x \cdot g_p(x, \bar{Q}^2)$ , где  $\bar{Q}^2 = (Q^2 + M_{J/\psi}^2) / 4$ ,  $x = (Q^2 + M_{J/\psi}^2) / (W_{\gamma p}^2 + M_{J/\psi}^2)$ ,  $Q^2$  - виртуальность фотона,  $M_{J/\psi}$  - масса  $J/\psi$ -мезона,  $W_{\gamma p}$  - энергия протон-фотонного взаимодействия [6].

$$\frac{d\sigma_{\gamma p \rightarrow p J/\psi}}{dt} = \frac{\Gamma_{ee} M_{J/\psi}^3 \pi^3}{48\alpha} \cdot \frac{\alpha_s(\bar{Q}^2)}{\bar{Q}^8} \cdot [x g_p(x, \bar{Q}^2)]^2 \cdot \exp(B_{J/\psi}(s) \cdot |t|), \quad (2)$$

где  $\Gamma_{ee}$  - ширина электронного распада  $J/\psi$ -мезона, наклон  $B_{J/\psi}$  параметризован выражением  $B_{J/\psi} = 3,1 + 0,25 \cdot \lg(s / s_0)$ ,  $s_0 = 100$  ГэВ<sup>2</sup>.

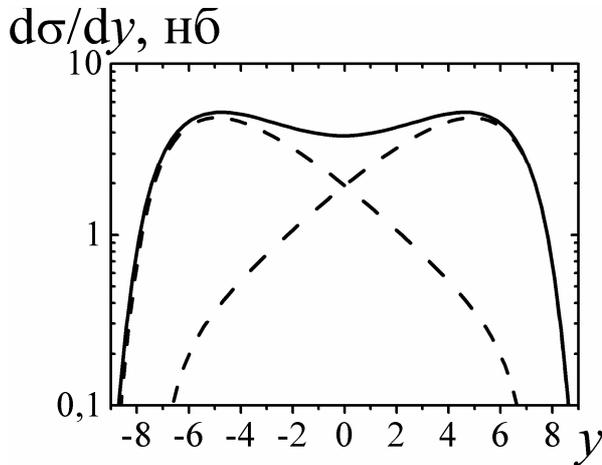


Рисунок 1 Зависимость сечения когерентного фоторождения  $J/\psi$ -мезона от его быстроты в УПС протонов при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=7$  ТэВ (сплошная линия). Штриховая линия - односторонние вклады

рот  $y > 2$  односторонние вклады хорошо разделены и отличаются более, чем на порядок. Таким образом, в кинематических условиях экспериментов на

На рисунке 1 приведено рассчитанное сечение когерентного фоторождения  $J/\psi$ -мезона в УПС протонов при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=7$  ТэВ в зависимости от быстроты рожденного  $J/\psi$ -мезона. Полное сечение составляет 65 нб.

В УПС протонов большой вклад в сечение фоторождения  $J/\psi$ -мезона вносит взаимодействие высокоэнергетичных фотонов и глюонов с малыми  $x$  (штриховая линия на рисунке 1). В области больших быстрот

БАК при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 7$  ТэВ из рассмотрения процессов когерентного фоторождения  $J/\psi$ -мезона возможно исследование поведения плотности глюонов в протоне в области малых  $x$ , вплоть до  $x \approx 10^{-5}$ .

В работе оценены величины геометрического аксептанса мюонного спектрометра детектора ALICE и эффективности регистрации векторных мезонов по димюонному каналу распада  $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$  рожденных в УПС протонов (4%). Предсказано число зарегистрированных  $J/\psi$ -мезонов при значении интегральной светимости  $5,377$  пбн<sup>-1</sup>, накопленной в экспериментах с протонными пучками в эксперименте ALICE в 2010 – 2011 годах ( $\sim 10^2$  событий).

**В третьей главе** вычислены сечения фоторождения легких векторных мезонов на протонах в кинематике коллайдера HERA и в ультрапериферических протон-протонных и протон-ядерных взаимодействиях в кинематике БАК в рамках подхода, основанного на использовании метода эквивалентных фотонов. Произведены оценки числа зарегистрированных мезонов в условиях накопленной светимости в эксперименте ALICE.

В отличие от когерентного рождения  $J/\psi$ -мезона, большая масса которого оправдывает применение теории возмущений КХД, когерентное фоторождение  $\rho$ - и  $\phi$ -мезонов при высоких энергиях и малых переданных импульсах относится к процессам мягкой физики адрон-адронных взаимодействий, в которых доминирует обмен помероном между взаимодействующими адронами. Для описания этих процессов широко используется основанная на теории Редже феноменологическая модель Доннечи–Лендшоффа (ДЛ-модель) [7].

Одной из ключевых гипотез этой модели является универсальность траектории мягкого померона  $\alpha_{P_1}(t) = \alpha_{P_1}(0) + \alpha_{P_1}' \cdot t = 1,095 + 0,25 \cdot t$ , т.е. независимость параметров траектории от типа взаимодействующих адронов. Эта гипотеза подкреплена обширной совокупностью экспериментальных данных по полным сечениям адрон-адронного рассеяния, однако, из анализа последних данных по когерентному рождению  $\rho$ - и  $\phi$ -мезонов в экспериментах на кол-

лайдере HERA [8], были получены значения параметра наклона в интервале  $\alpha' = 0,12 \div 0,15$ .

Попытка расширить область применения модели с целью описания когерентных процессов при больших переданных импульсах и процессов фоторождения тяжелых векторных мезонов потребовала модификации модели. Жесткий померон с траекторией  $\alpha_{p_0}(t) = \alpha_{p_0}(0) + \alpha_{p_0}' \cdot t = 1,44 + 0,1 \cdot t$  был включен в ДЛ-модель [7] с параметрами траектории определенными из условия наилучшего описания экспериментальных данных по фоторождению  $J/\psi$ -мезона и легких векторных мезонов при  $|t| > 0,5 \text{ ГэВ}^2$  на HERA. Роль жесткого померона с ростом энергии должна возрастать благодаря сравнительно большому значению интерсепта  $\sim 1,4$ .

В рамках ДЛ-модели были рассчитаны сечения фоторождения  $\rho$ - и  $\phi$ -мезонов на протонах в кинематике HERA и проведен анализ экспериментальных данных по фоторождению легких векторных мезонов на протонах, полученных в экспериментах ZEUS и H1 на коллайдере HERA.

Показано, что однозначный вывод о нарушении универсальности траектории мягкого померона в связи с большими экспериментальными ошибками сделать нельзя. Описание существующих экспериментальных данных в равной степени достигается, как при уменьшении наклона траектории мягкого померона для обеспечения роста сечения с энергией и одновременным отказом от гипотезы жесткого померона, так и при вводе в модель жесткого померона с довольно большим интерсептом в предположении универсальности траектории мягкого померона.

Таким образом, изучение когерентного фоторождения легких векторных мезонов в широком диапазоне энергий, доступных на БАК, позволит проверить более надежно гипотезу универсальности мягкого померона и прояснить роль, так называемого, жесткого померона при описании мягких процессов в рамках ДЛ-модели.

В экспериментах на детекторе ALICE с протонными пучками при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 7 \text{ ТэВ}$  в 2010 и 2011 годах значения интегральных светимостей

составили  $0,5 \text{ пбн}^{-1}$  и  $4,877 \text{ пбн}^{-1}$ , соответственно. На основании рассчитанного значения сечения было оценено число зарегистрированных мезонов:  $\sim 1,3 \cdot 10^5 \rho^0$ - мезонов и  $\sim 1,7 \cdot 10^4 \phi$ -мезонов.

Из-за симметрии  $pp$ -взаимодействия, точно извлечь значения сечений фоторождения легких векторных мезонов удастся только при нулевой быстрой роде родившегося мезона.

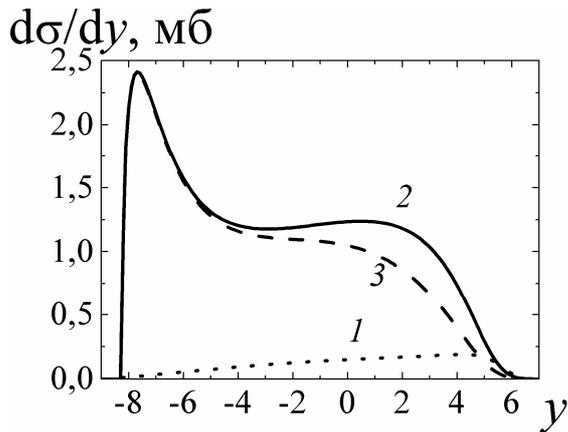


Рисунок 2 Зависимость сечения когерентного фоторождения  $\rho$ - мезона от его быстроты в протон-ядерном столкновении с энергией  $\sqrt{S_{NN}}=8,8 \text{ ТэВ}$ . Результаты расчетов с использованием модели Глаубера (1) и ДЛ-модели (2,3) с учетом (2) и без учета (3) вклада жесткого померона

Изучение ультрапериферических протон-ядерных столкновений, в которых отсутствует симметрия, позволяет продвинуться в область ненулевых быстрот (Рисунок 2). Сечение когерентного фоторождения  $\rho$ -мезона на ядре рассчитывалось в модели Глаубера [9]. Вклад этого слагаемого (пунктирная линия на рисунке 2) может быть надежно рассчитан и не будет влиять на изучение роли жесткого померона, включение которого увеличивает сечение на протонной мишени примерно на 25% при  $y=0$  и почти на

40% при  $y=2$ . Такое изменение сечения вполне может быть обнаружено при погрешности экспериментальных измерений не превышающей 10%.

**В четвертой главе** рассчитаны сечения когерентного фоторождения  $J/\psi$ - и  $\rho$ -мезонов в ультрапериферических столкновениях тяжелых ионов для энергий БАК и коллайдера RHIC. Были вычислены полные сечения когерентного фоторождения и сечения когерентного фоторождения мезонов при наличии электромагнитной диссоциации одного или обоих налетающих ядер, сопровождающейся испусканием определенного количества нейтронов. Учен вклад важных при регистрации  $J/\psi$ -мезонов в эксперименте ALICE фоно-

вых процессов: двухфотонного фоторождения мюонных пар и рождения  $J/\psi$ -мезонов в сильных взаимодействиях ядер.

Значительная часть (~20%) событий когерентного фоторождения векторного мезона в УПС тяжелых ядер сопровождается эмиссией нейтронов ядром, связанной с электромагнитным возбуждением ядер в конечном состоянии УПС. Если в процессе когерентного фоторождения векторного мезона произошла электромагнитная диссоциация ядер, то, просуммировав сечения процессов фоторождения, сопровождающихся испусканием нейтронов, можно получить полное сечение когерентного фоторождения мезона.

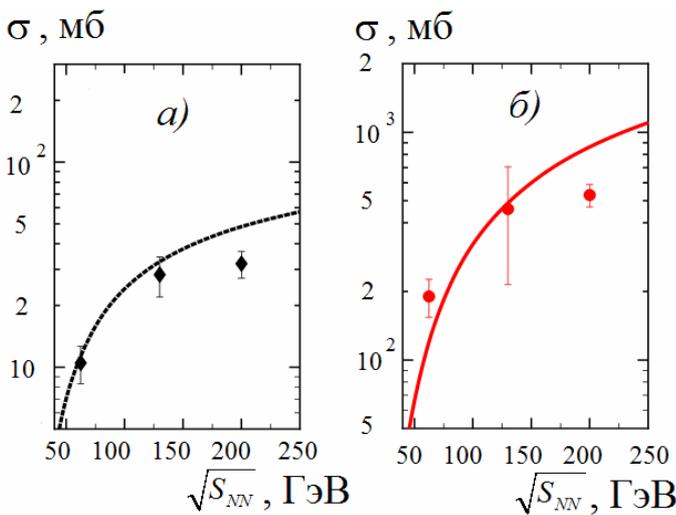


Рисунок 3 Сечение фоторождения  $\rho$ -мезона в УПС ядер золота в зависимости от энергии  $\sqrt{S_{NN}}$ . Точки - экспериментальные данные STAR. (а)-процесс, сопровождающегося эмиссией нейтронов из сталкивающихся ядер; (б)- полное сечение когерентного фоторождения

ответствие с экспериментальными данными, полученными на STAR для энергий 62,4 и 130 ГэВ (Рисунок 3). Также были получены предсказания величин сечения когерентного фоторождения  $\rho$ -мезона при энергиях БАК с учетом электромагнитного возбуждения ядер в конечном состоянии УПС, приводящего к эмиссии нейтронов.

Процесс фоторождения тяжелых кваркониев относится к физике жестких процессов. С точки зрения квантовой хромодинамики, сечение когерент-

В этом случае, поток виртуальных фотонов был рассчитан с учетом подавления сильных взаимодействий ядер и наличия электромагнитной диссоциации ядер по каналам с испусканием определенного количества нейтронов взаимодействующими ядрами.

Сечение когерентного фоторождения  $\rho$ -мезона на ядре рассчитывалось в модели Глаубера. Данный подход позволил получить хорошее со-

ного фоторождения тяжелых кваркониев при высоких энергиях пропорционально квадрату глюонной плотности в ядре  $g_A(x, Q^2)$ . С уменьшением  $x$ , эффект ядерных экранировок становится существенным ( $g_A(x, Q^2) < A \cdot g_N(x, Q^2)$ ), способствует замедлению роста глюонных плотностей в ядрах и должен быть учтен. Эффект ядерных экранировок характеризуется отношением плотности глюонов ядре  $g_A(x, Q^2)$  и плотности глюонов в протоне  $g_N(x, Q^2)$ , которое было рассчитано в приближении лидирующих твистов [10].

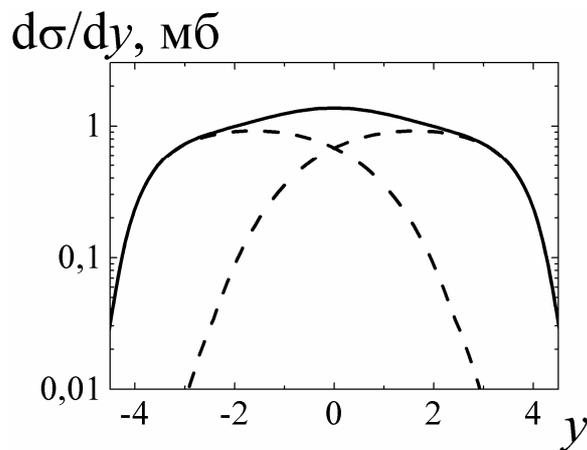


Рисунок 4 Зависимость сечения когерентного фоторождения  $J/\psi$ -мезона от его быстроты в УПС ядер свинца при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=2,76$  ТэВ, при условии, что электромагнитной диссоциации ядер не произошло. Штриховая линия - односторонние вклады

В УПС ядер свинца при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=2,76$  ТэВ, при быстроте рожденного  $J/\psi$ -мезона  $y \approx 2$  исследование глюонной плотности возможно до значения  $x \approx 1,5 \cdot 10^{-4}$ , однако, вклад от рождения векторного мезона низкоэнергетичным фотоном в области  $x \approx 10^{-2}$ , при данных быстротах будет превалировать (Рисунок 4), все это приведет к серьезным погрешностям в определении распределений глюонной плотности в ядре. В данном разделе

предложен новый метод однозначного выделения односторонних вкладов в сечение фоторождения векторных мезонов, при совместном рассмотрении нескольких каналов электромагнитной диссоциации ядер. Например, при рассмотрении столкновений, в которых не произошло электромагнитной диссоциации ( $0n0n$ ) и в которых одно из взаимодействующих ядер испустило нейтроны ( $0nXn$ ), решив систему уравнений

$$\begin{cases} \sigma_{0n0n} = F_{0n0n}^L \cdot \sigma_{\gamma A \rightarrow J/\psi A}^L + F_{0n0n}^H \cdot \sigma_{\gamma A \rightarrow J/\psi A}^H \\ \sigma_{0nXn} = F_{0nXn}^L \cdot \sigma_{\gamma A \rightarrow J/\psi A}^L + F_{0nXn}^H \cdot \sigma_{\gamma A \rightarrow J/\psi A}^H \end{cases}, \quad (3)$$

можно определить сечение рождения мезона высокоэнергетическими фотонами, испущенными сталкивающимися ядрами  $\sigma_{\gamma A \rightarrow J/\psi A}^H$ , что позволит исследовать поведение глюонной плотности в ядрах, вплоть до  $x \sim 10^{-4}$ . При этом необходимо, чтобы потоки виртуальных фотонов  $F$  были вычислены с хорошей точностью  $\sim 5\%$ .

**В заключении** изложены основные результаты и выводы диссертационной работы.

Правильность используемой модели подтверждена экспериментально: в статье [3] были опубликованы первые экспериментальные результаты по измерению сечения эксклюзивного фоторождения  $J/\psi$ -мезонов в УПС ионов свинца при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 2,76$  ТэВ на БАК; они подтверждают предсказанное в настоящей работе сечение в пределах экспериментальных погрешностей.

### **Основные результаты диссертационной работы**

В работе получены следующие результаты:

1. сечение фоторождения  $J/\psi$ -мезона в УПС протонов при  $\sqrt{S_{NN}} = 7$  ТэВ, рассчитанное в лидирующем порядке теории возмущений КХД. Предсказаны значения полного сечения и его зависимость от быстроты;
2. сечения фоторождения  $\rho$ - и  $\phi$ -мезонов на протонах, рассчитанные в рамках основанной на теории Редже модели Доннечи-Лендшоффа (ДЛ);
3. сечения фоторождения  $\rho$ - и  $\phi$ -мезонов в ультрапериферических протон-протонных и протон-ядерных столкновениях при энергиях БАК, рассчитанные в рамках ДЛ-модели;
4. сечения фоторождения  $\rho$ -мезонов в УПС ядер при энергиях RHIC и БАК, рассчитанные в рамках модели Глаубера;

5. сечение когерентного фоторождения  $J/\psi$ -мезона на ядре в УПС ядер свинца при энергиях БАК, рассчитанные в лидирующем порядке теории возмущений КХД;
6. разработан новый метод однозначного извлечения значений глюонных плотностей в ядрах при совместном анализе нескольких каналов диссоциации ядер, связанной с электромагнитным возбуждением ядер в конечном состоянии ультрапериферического рассеяния.

### **Основные выводы, полученные в диссертации**

1. экспериментальное измерение зависимости сечения фоторождения  $J/\psi$ -мезонов от быстроты в УПС протонов при энергии  $\sqrt{s_{NN}}=7$  ТэВ позволит определить значения глюонной плотности в протоне, вплоть до  $x \approx 10^{-5}$ ;
2. значительные экспериментальные ошибки ZEUS и H1 не позволяют подтвердить или опровергнуть одну из ключевых гипотез ДЛ-модели – гипотезу универсальности померонной траектории;
3. описание существующих экспериментальных данных ZEUS и H1 в равной степени достигается, как при уменьшении наклона траектории мягкого померона для обеспечения роста сечения с энергией и одновременным отказом от гипотезы жесткого померона, так и при вводе в модель жесткого померона с довольно большим интерсептом ( $\sim 1,2 \text{ ГэВ}^{-2}$ ) в предположении универсальности траектории мягкого померона;
4. измерение сечения фоторождения  $\rho$ - и  $\phi$ -мезонов в ультрапериферических протон-протонных и протон-ядерных столкновениях в экспериментах на БАК позволит проверить гипотезу универсальности померонной траектории и прояснить роль жесткого померона, если сечения фоторождения будут измерены при энергии фотон-протонного взаимодействия  $W_{\gamma p} > 200$  ТэВ с погрешностью не более 10%;
5. применение предложенного в диссертации метода разделения вкладов фоторождения  $J/\psi$ -мезонов фотонами низких и высоких энергий позволит, во-первых, однозначно выделить сечение фоторождения векторного мезона, а

во-вторых, найти значения глюонных плотностей в области малых  $x$ , вплоть до  $x \approx 10^{-4}$  и определить в этой области факторы глюонных экранировок.

### Список работ, опубликованных по теме диссертации

Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:

**1. Rebyakova, V.** LHC potential for study of the small  $x$  gluon physics in ultraperipheral collisions of 3,5 TeV protons [Text] / V. Rebyakova, M. Strikman, M. Zhalov // Phys. Rev. D. – 2010. – Vol. 81. – № 3. – P. 125–130.

**2. Бердников, Я.А.** Когерентное фоторождение легких векторных мезонов в ультрапериферических протон-протонных столкновениях на Большом адронном коллайдере [Текст] / Я.А. Бердников, М.Б. Жалов, В.А. Ребякова // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки.– 2010.–№ 4(109).–С. 128– 133.

**3. Бердников, Я.А.** Жесткий померон Доннечи – Лендшоффа в когерентном фоторождении  $\rho$ -мезона при малых переданных импульсах [Текст] / Я.А. Бердников, М.Б. Жалов, В.А. Ребякова // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки.–2011.–№ 3(129).–С. 152– 158.

**4. Rebyakova, V.** Coherent  $\rho$  and  $J/\psi$  photoproduction in ultraperipheral processes with electromagnetic dissociation of heavy ions at RHIC and LHC [Text] / V. Rebyakova, M. Strikman, M. Zhalov // Phys. Lett. B. – 2012. – Vol. 710. – № 4-5. – P. 647–653.

**5. Бердников, Я.А.** Фоторождение легких векторных мезонов в ультрапериферических столкновениях на Большом Адронном Коллайдере [Текст] / Я.А. Бердников, М.Б. Жалов, В.А. Ребякова // Известия РАН. Сер. физ.– 2012.–Т.176. –№ 8.–С. 1021– 1024.

### Список литературы

[1] **Martin, A.D.** Small  $x$  gluon from exclusive  $J/\psi$  production [Электронный ресурс] / A.D. Martin, C. Nockles, M. Ryskin, T. Teubner. – Режим доступа: arXiv:0709.4406v1 [hep-ph]. – 2007.

- [2] **Eskola, K.J.** EPS09 – A new generation of NLO and LO nuclear parton distribution functions [Text] / K.J. Eskola, H. Paukkunen, C.A. Salgado // JHEP. – 2009. – Vol.04. – P.65.
- [3] **ALICE Collaboration.** Coherent  $J/\psi$  production in ultra-peripheral Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=2.76$  TeV [Электронный ресурс] / ALICE Collaboration – Режим доступа: arXiv:1209.3715v1 [nucl-ex]. – 2012.
- [4] **Baltz, A.J.** The Physics of Ultraperipheral Collisions at the LHC [Text] / A. J. Baltz, G. Baur, D. d’Enterria, et al. // Phys. Rep. – 2008. – Vol. 458. – P. 1-171.
- [5] **Williams, E.J.** Nature of the high energy particle of penetrating radiation and status of ionization and radiation formulae [Text] / E.J. Williams // Phys. Rev. – 1934. – Vol. 45. – P. 729–730.
- [6] **Ryskin, M.G.** Diffractive  $J/\psi$  electroproduction in LLA QCD [Text] / M.G. Ryskin. // Z. Phys. C. – 1993. – Vol. 57. – P. 89–92.
- [7] **Donnachie, A.** Exclusive vector meson photoproduction: confirmation of Regge theory [Text] / A. Donnachie, P.V. Landshoff // Phys. Lett. – 2000. – Vol. 478. – P. 146–150.
- [8] **Olsson, J.** A new measurement of exclusive  $\rho_0$  photoproduction at HERA [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://arxiv.org/abs/hep-ex/0610077v1>. – 2006.
- [9] **Bauer, T.H.** The hadronic properties of the photon in high-energy interactions [Text] / T.H. Bauer, R.D. Spital, D.R. Yennie, F.M. Pipkin // Rev. Mod. Phys. – 1978. – Vol. 50. – № 2. – P. 261–436.
- [10] **Frankfurt, L.** Leading twist nuclear shadowing phenomena in hard processes with nuclei [Электронный ресурс] / L.Frankfurt, V.Guzey, M.Strikman – Режим доступа: arXiv: 1106.2091v2 [hep-ph]. – 2011.