

## ОТЗЫВ официального оппонента

на диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук Прохорова Андрея Александровича на тему «Процессы с образованием тяжелых кваркониев и калибровочных бозонов при высоких энергиях» по специальности 1.3.15 – «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий»

Диссертация А.А. Прохорова посвящена актуальной теме: изучению процессов с образованием тяжелых кваркониев и калибровочных бозонов при энергиях ЛНС. Имеющиеся экспериментальные данные для процессов парного рождения  $J/\psi+J/\psi$  мезонов и ассоциативного рождения  $J/\psi$  мезонов и калибровочных бозонов  $Z/W$  до сих пор не смогли получить хорошего теоретического описания в рамках модели нерелятивистской квантовой хромодинамики (КХД), которая учитывает образование тяжелых кваркониев не только через синглетные, но и октетные по цвету промежуточные состояния. При этом в рамках этой модели удалось описать имеющиеся экспериментальные данные для процессов одиночного рождения для всего семейства тяжелых кваркониев, что подчеркивает важность и актуальность исследования других процессов, в том числе рассматриваемых в диссертации. Исследования такого рода позволяют проверить подход нерелятивистской КХД, поскольку включают в себя новые более сложные механизмы образования связанных состояний тяжелых кварков.

Кроме того, в диссертации А.А. Прохорова рассматриваются механизмы двойного партонного рассеяния (ДПР), которые в последнее время являются предметом активного изучения. С одной стороны, большие энергии взаимодействия частиц на ЛНС позволяют исследовать области малых долей продольных импульсов  $x$ , где партонные плотности

значительны, что приводит к увеличению роли вкладов ДПР для широкого ряда процессов. С другой же стороны, вклады механизмов двойного партонного рассеяния в процессы с участием тяжелых кваркониев необходимы для описания экспериментальных данных ЛНС, причем для некоторых процессов они являются определяющими. Помимо этого, стоит отметить проблему несогласованности величины параметра эффективного сечения ДПР. Ее оценки, извлекаемые из экспериментальных данных Tevatron и ЛНС, значительно разнятся для ряда процессов с участием тяжелых кваркониев (в том числе для процессов парного рождения  $J/\psi + J/\psi$  и ассоциативного рождения  $J/\psi + Z/W$ ) и большого количества других конечных состояний. В настоящее время, этот вопрос требует дальнейшего изучения.

Таким образом, актуальность темы исследования, представленной в диссертации А.А. Прохорова, не вызывает сомнений.

**Целью** диссертации является теоретическое изучение новых механизмов, дающих вклады в сечения процессов парного рождения  $J/\psi + J/\psi$  мезонов и ассоциативного рождения  $J/\psi + Z/W$ . **Новизна представленных результатов** заключается в применении подхода  $k_t$ -факторизации КХД для вычисления сечений процессов, в рамках которого впервые были учтены фрагментационные вклады от множественных глюонных излучений в начальном состоянии. При этом используемые в расчетах зависящие от поперечного импульса глюонные распределения подчиняются эволюционному уравнению Катани-Чиафалони-Фиорани-Маркезини (CCFM). Это уравнение позволяет просуммировать вклады пропорциональные не только  $\sim \ln 1/x$ , но и  $\sim \ln 1/(1-x)$ , которые играют важную роль в области малых и промежуточных долей импульсов  $x$  и определяют сечение жестких процессов КХД при энергиях ЛНС. Таким образом, эффективно включается часть поправок высших порядков, при этом

амплитуда жесткого взаимодействия рассчитывается в ведущем порядке теории возмущений. Помимо этого, впервые был предложен метод вычисления дополнительных фрагментационных вкладов в механизм ДПР. Было показано, что такие вклады значительны как для процесса парного рождения  $J/\psi+J/\psi$ , так и ассоциативного рождения  $J/\psi+Z/W$ .

### **Общая характеристика диссертации**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка цитированной литературы. Объем диссертации составляет 124 страницы, включая 42 рисунка и 2 таблицы. Список литературы содержит 152 наименования.

**Введение** содержит краткую характеристику темы исследования, обоснование ее актуальности, формулировку цели и задач работы, обсуждение новизны работы и основных положений, выносимых на защиту. Приведена апробация работы.

В **первой главе** диссертации кратко излагаются основные положения  $kt$ -факторизационного подхода КХД, в том числе поднимается вопрос о калибровочной инвариантности амплитуд вне массовой поверхности. Приведены основные уравнения эволюции партонных распределений, обсуждаются их области применения. Помимо этого описаны используемые в работе неинтегрированные распределения глюонов.

**Вторая глава** посвящена процессам рождения  $S$ - и  $P$ -волновых чармониев. Приводится описание формализма нерелятивистской КХД, представлены основные формулы для вычисления амплитуд и сечений процессов  $2 \rightarrow 1$  и  $2 \rightarrow 2$  в подходе  $kt$ -факторизации. Помимо этого рассматривается механизм фрагментационного рождения чармониев от очарованных кварков и глюонов; поднимаются вопросы о применимости фрагментационного подхода в кинематических ограничениях экспериментов

ЛНС. Приведена схема и результаты вычислений функций фрагментации в чармонии как функции энергетического масштаба.

**Третья глава** посвящена процессам парного рождения  $J/\psi+J/\psi$ . В начале представлены основные механизмы образования пары  $J/\psi$  мезонов. Обсуждается роль фрагментационных вкладов от множественных глюонных излучений в начальном состоянии. Приведена схема расчета парного рождения  $J/\psi+J/\psi$  с учетом таких вкладов. Помимо этого описывается механизм ДПР, предлагается способ включения фрагментационных вкладов в данный механизм. Обсуждается вопрос несогласованности в оценках величины эффективного сечения ДПР.

Представлены результаты вычислений полного и дифференциальных сечений процесса парного рождения  $J/\psi+J/\psi$  в подходе  $kt$ -факторизации в различных кинематических областях при энергиях ЛНС. Показано, что в центральной области быстрой учет фрагментационных вкладов позволяет значительно улучшить согласие расчетов в рамках нерелятивистской КХД с экспериментальными данными ATLAS, особенно в областях больших инвариантных масс пары  $J/\psi$  мезонов и разности быстрой между ними. При этом отмечается значительное влияние таких вкладов на процессы ДПР в данной кинематической области, что, в свою очередь, влияет на величину эффективного сечения. Напротив, в передней области быстрой при небольших поперечных импульсах фрагментационные вклады пренебрежимо малы. Из наилучшего описания экспериментальных данных ЛНСб по парному рождению  $J/\psi+J/\psi$  получены значения эффективного сечения ДПР  $\sim 15$  мбн для разных TMD распределений глюонов.

В **четвертой главе** исследуется вопрос применимости подхода  $kt$ -факторизации для процессов ассоциативного рождения  $Z$  бозонов и тяжелых  $c/b$ -струй. Вычислены сечения этих процессов и проведено сравнение с экспериментальными данными ATLAS, CMS и предсказаниями Монте-Карло генератора SHERPA. Показано, что в области небольших поперечных



импульсов подход  $kt$ -факторизации хорошо согласуется с расчетами в следующем за лидирующим порядке коллинеарной теории возмущений. Помимо этого затрагивается вопрос о возможном существовании «внутренних» пар тяжелых кварков в протоне (внутреннем очаровании). Показано, что процессы ассоциативного рождения  $Z$  бозонов и тяжелых струй могут быть использованы для попытки обнаружения таких состояний протона. При этом приводятся чувствительные к этому эффекту наблюдаемые, которые могут быть измерены коллаборациями LHC.

**В пятой главе** было рассмотрено фрагментационное рождение  $J/\psi$  мезонов от очарованных кварков в процессах ассоциативного рождения  $J/\psi+Z/W$ . Приведены подпроцессы, в которых возникают такие вклады, а также вклады от множественных глюонных излучений. Представлены результаты расчетов этих вкладов в сечения исследуемых процессов и приведено сравнение с экспериментальными данными ATLAS, а также имеющимися предсказаниями нерелятивистской КХД. Показано, что новые вклады значительно улучшают согласие с экспериментальными данными, особенно в областях больших поперечных импульсов  $J/\psi$  мезонов. Отдельное внимание уделено роли множественных глюонных излучений.

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

Приведенные результаты хорошо **обоснованы** и прошли **апробацию** на различных российских и международных конференциях, а также были опубликованы в 4 статьях в ведущих высокорейтинговых рецензируемых журналах. **Достоверность** результатов подтверждается использованием проверенных методов современной теоретической физики высоких энергий.

В качестве замечаний стоит отметить следующее:

1. В автореферате эффективное сечение ДПР на странице 19 выражается через функцию  $G(b)$  (уравнение 25) без определения этой функции, а о ее

физическом смысле сказано только вскользь. В самом же тексте диссертации на странице 57 для прояснения физического смысла можно было бы привести геометрическое представление этих величин через поперечные плотности партонов в адроне.

2. Есть замечание редакционного плана: помимо ставшего уже привычным в научной литературе обилия жаргона, шероховатости стиля, наличие большого количество сокращений, поясненных только при первом упоминании, делают большой текст диссертации трудно читаемым.

3. Интересно было бы обсудить также возможность обобщения  $kt$ -факторизационного подхода КХД на случай протон-ядерных соударений, которые являются важной частью программы исследований на LHC. В этих столкновениях относительный вклад двойных партонных рассеяний усиливается по сравнению с наивным скейлинговым ожиданием, что открывает новые уникальные возможности для дальнейшего изучения и измерения КХД корреляций в волновой функции адронов.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.15 – «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Прохоров Андрей Александрович несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 – Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник лаборатории сильных взаимодействий  
отдела экспериментальной физики высоких энергий  
научно-исследовательского института ядерной физики имени  
Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова

СНИГИРЕВ Александр Михайлович



10.02.2023

Контактные данные:

тел.: +7(495)9391257, e-mail: snig@mail.cern.ch

Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация:

01.04.16 – Физика ядра и элементарных частиц

Адрес места работы:

119991, г. Москва, Ленинские горы, 1, НИИЯФ МГУ  
Тел.: +7(495)9391818; e-mail: info@sinp.msu.ru

Подпись А.М. Снигирева удостоверяю:

Ученый секретарь НИИЯФ МГУ  
кандидат физико-математических наук

