

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу

Короткова Владислава Александровича

«Изучение азимутальных асимметрий в процессах глубоконеупругого рассеяния электронов (позитронов) на протонах и дейтронах в эксперименте ГЕРМЕС и спиновая структура нуклона»,

представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности **01.04.23** – физика высоких энергий

Диссертация Короткова В.А. **«Изучение азимутальных асимметрий в процессах глубоконеупругого рассеяния электронов (позитронов) на протонах и дейтронах в эксперименте ГЕРМЕС и спиновая структура нуклона»** посвящена измерению азимутальных асимметрий вторичных частиц в процессах глубоко неупругого рассеяния (не)поляризованных электронов и позитронов на протонной и дейтериевой мишени с различными поляризациями для поиска и исследования новых особенностей спиновой структуры нуклона.

Актуальность темы

Введение в 1925 г. понятия спина является одним из важнейших этапов в развитии физики фундаментальных взаимодействий. Однако, несмотря на многочисленные исследования, спиновые эффекты являются одними из наиболее сложных как для теоретического описания, так и для экспериментального измерения. Детальное изучение спиновой структуры нуклона необходимо для развития квантовой хромодинамики и поиска эффектов новой физики за пределами Стандартной модели. Соответствующие исследования обладают высоким приоритетом в физических программах как действующих, так и сооружаемых научно-ускорительных комплексов. Глубоко неупругое лептон-нуклонное рассеяние позволяет выполнять прецизионные измерения спин-зависимых параметров, а использование различных комбинаций поляризаций мишени и пучка на одной установке – проводить систематические исследования и получать новую важную информацию. Все это свидетельствует об актуальности темы диссертации.

Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, включающего 358 наименований, и двух приложений.

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цель работы, научная новизна основных результатов и их практическая значимость, описывается личный вклад автора.

В **первой главе** содержится достаточно подробный обзор литературы по изучаемой проблематике. Представлены современные феноменологические и теоретические подходы к изучению спектра вопросов, рассматриваемого в диссертационной работе. В частности, обсуждается возможность оценки вклада двухфотонного обмена и спин-зависимой структурной функции нуклона в инклюзивных процессах глубоко неупругого рассеяния, представлена систематика функций распределения и функций фрагментации кварков, зависящих от их поперечных импульсов.

Во **второй главе** описана установка ГЕРМЕС (HERMES) и методика эксперимента с использованием пучка электронов (позитронов) при энергии 27.6 ГэВ. Приведены особенности формирования и характеристики продольно и поперечно поляризованных пучков (анти)лептонов. Рассмотрены методы оценки поляризации пучка, достоинства газовой поляризованной мишени с накопительной ячейкой по сравнению с другими экспериментами в данной области исследований. Детальное описание составных частей спектрометра ГЕРМЕС, методов регистрации и идентификации вторичных частиц свидетельствует о необходимом для решения поставленных физических задач качестве экспериментального материала, анализируемого в диссертационной работе.

В **третьей главе** описаны результаты измерения азимутальных асимметрий в инклюзивном глубоко неупругом рассеянии электронов и позитронов на поперечно поляризованной водородной мишени. На основе изучения указанных асимметрий выполнена оценка возможного вклада двухфотонного обмена в инклюзивный процесс глубоко неупругого лептон-протонного рассеяния. Обнаружено, что в пределах экспериментальных погрешностей данный обмен да-

ет нулевой вклад. Используя измеренные азимутальные асимметрии, были извлечены структурная функция протона g_2 и асимметрия рассеяния виртуального фотона на протоне A_2 . Полученные для g_2 результаты не противоречат правилу сумм Буркхардта–Коттингема и расчетам на решетках в квантовой хромодинамике.

Четвертая глава посвящена измерениям азимутальных асимметрий адронов, образованных в полуинклюзивных процессах глубоко неупругого рассеяния неполяризованных электронов (позитронов) на продольно поляризованных протонах и дейтронах. Односпиновые азимутальные асимметрии были измерены для $\pi^{+,0}$ и K^+ мезонов в случае поляризованной дейтериевой мишени. Асимметрии были извлечены двумя методами, что повышает надежность полученных результатов. Оценены односпиновые азимутальные асимметрии в полуинклюзивном электророждении заряженных пионов на протонной мишени при определении продольной поляризации мишени по отношению к направлению виртуального фотона. Ненулевые значения таких асимметрий указывают на вклад высших твистов, сопоставимый по величине с вкладом лидирующего твиста, в кинематической области эксперимента ГЕРМЕС для полуинклюзивного глубоко неупругого рассеяния неполяризованных электронов на продольно поляризованной водородной мишени.

В **пятой** главе представлены результаты измерений азимутальных асимметрий адронов, образованных в процессах глубоко неупругого рассеяния продольно поляризованных электронов и позитронов на неполяризованных протонах. Обсуждаются кинематические зависимости асимметрий, полученных для вторичных пионов. Выполняется сравнение результатов данной работы с экспериментом КЛАС (CLAS), на основании которого делается вывод о слабой зависимости односпиновой асимметрии от энергии пучка и переменной Бьеркена x .

В **шестой** главе рассматриваются результаты изучения азимутальных асимметрий вторичных адронов в столкновениях неполяризованных электронов (позитронов) с поперечно поляризованной водородной мишенью. Указанные измерения позволили изучать механизмы Сиверса и Коллинза в рамках одного

эксперимента, что представляется важным с методической точки зрения и приводит к более корректному учету систематических погрешностей. Обсуждаются кинематические зависимости асимметрии Сиверса для пионов и каонов, а также разностной асимметрии для пионов. Выполняется измерение односпиновой асимметрии пар разноименно заряженных пионов для поиска корреляции между поперечной поляризацией мишени и азимутальной ориентацией плоскости, содержащей импульсы указанной пары адронов, образованных в полуинклюзивном глубоко неупругом рассеянии лептонов на протонах. Полученные результаты накладывают дополнительные ограничения на модели, что представляет определенный интерес для дальнейших феноменологических и теоретических исследований спиновой структуры нуклона.

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

В **приложениях** содержится детальная информация по измерениям структурной функции g_2 и асимметрии A_2 , а также асимметрий Сиверса и Коллинза.

Новизна исследований определяется тем, что в диссертации

- впервые спин-зависимая структурная функция нуклона g_2 и виртуальная асимметрия A_2 извлечены при использовании газовой поляризованной водородной мишени;
- впервые выполнены измерения односпиновых азимутальных асимметрий в полуинклюзивном образовании мезонов при рассеянии неполяризованных электронов на поперечно поляризованной водородной мишени, позволившие разделить механизмы Сиверса и Коллинза, ответственные за такие асимметрии;
- впервые измерены односпиновые азимутальные асимметрии в полуинклюзивном образовании пар заряженных пионов при рассеянии неполяризованных электронов на поперечно поляризованной водородной мишени, что дает новый способ извлечения функции распределения поперечно поляризованных кварков в поперечно поляризованном нуклоне;
- получено новое ограничение сверху на вклад двухфотонного обмена в инклюзивное глубоко неупругое рассеяние электронов (позитронов) на протонах.

Значимость полученных в диссертации результатов

Полученные в диссертации результаты вносят существенный вклад в систематическое изучение спиновой структуры нуклона. Измерения азимутальных односпиновых асимметрий в процессах глубоко неупругого рассеяния позволили, совместно с данными по электрон-позитронной аннигиляции, извлечь спин-зависимую функцию распределения g_2 протона. Получены свидетельства в пользу того, что эффекты высших твистов при измерении азимутальных асимметрий могут быть существенны. Это имеет важное значение для развития теоретических методов изучения спиновой структуры нуклона. Представленные в диссертации результаты использованы для извлечения, в частности, функции распределения поперечно поляризованных u - и d -кварков в поперечно поляризованном нуклоне, а также функции фрагментации Коллинза. 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 физического анализа и согласованностью выводов. Материалы диссертации многократно докладывались на российских и международных конференциях и семинарах. 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 экспериментальный и феноменологический уровень работы. К несомненным достоинствам диссертационной работы можно отнести, в частности, подробный обзор современной ситуации в исследовании глубоко неупругих процессов лептон-нуклонного рассеяния, являющийся дополнительным свидетельством деталь-

ной проработки автором выбранной темы. Личный вклад автора в основные результаты исследования не вызывает сомнения.

Замечания

В качестве замечаний необходимо отметить следующее.

1. В табл. 2.2 на стр. 58 приведены значения импульса лептонного пучка без погрешностей.

2. В табл. 2.3, 3.1, 3.2, 4.2, 4.6, 5.2, А.2 и А.3 приложения А, Б.1 – Б.20 приложения Б погрешности и, соответственно, результаты приведены с избыточным количеством значащих цифр, что не согласуется с правилами записи результатов измерений.

3. Из рис. 4.5 видно, что в случае заряженных пионов феноменологические кривые для асимметрии, соответствующей лидирующему твисту, демонстрируют тенденции противоположные экспериментальным данным, что приводит к заметному различию между расчетами и измерениями при значениях переменной Бьеркена $x > 0.2$. Поэтому вывод на стр. 124 о том, что результаты измерений удовлетворительно согласуются с обоими типами асимметрий, требует корректировки и / или дополнительного обоснования.

4. В тексте пп. 4.1.1, 4.1.2 отсутствуют значения $\chi^2 / \text{степень свободы}$ и обсуждение качества аппроксимаций экспериментальных данных, представленных на рис. 4.6, 4.7 соответственно. Данное замечание справедливо и для рис. 5.2 в п. 5.1.

5. Сравнение результатов экспериментов ГЕРМЕС и КОМПАСС (COMPASS) в гл. 5, даже на качественном уровне, крайне затруднительно из-за того, что соответствующие рис. 5.3 (стр. 160) и рис. 5.9 (стр. 170) расположены далеко друг от друга по тексту диссертации.

6. Асимметрия Сиверса, измеренная для K^+ мезонов в зависимости от переменной Бьеркена x (рис. 6.7), отличается для малых Q^2 и больших Q^2 только в двух точках при $x > 0.1$, что не позволяет говорить о какой-либо зависимости даже на качественном уровне. Поэтому вывод на стр. 190 о том, что асиммет-

рии для K^+ мезонов в области больших Q^2 систематически ниже асимметрий в области малых Q^2 , требует корректировки и / или дополнительных пояснений.

7. В списке литературы в качестве основных приводятся, как правило, ссылки на переводные версии российских журналов (например, [33, 34, 36] и др.). Учитывая, что язык диссертационной работы – русский, в качестве основных должны приводиться ссылки на оригинальные российские журналы, соответствующие англоязычные версии могли быть использованы как дополнительные.

8. В главе 3 нарушено соответствие между нумерацией таблиц в приложении А и порядком ссылок на них: ссылка на табл. А.3 появляется в основном тексте ранее ссылки на табл. А.1, при этом ссылка на табл. А.2 отсутствует (стр. 104). В тексте встречаются опечатки (стр. 17, 50, 59, 80, 104, 197 и т.д.).

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

Заключение

Диссертация Коротков В.А. «**Изучение азимутальных асимметрий в процессах глубоконеупругого рассеяния электронов (позитронов) на протонах и дейтронах в эксперименте ГЕРМЕС и спиновая структура нуклона**» представляет собой законченную научно-квалификационную работу. 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 азимутальных асимметрий в процессах глубоконеупругого рассеяния электронов (позитронов) на протонах и дейтронах в эксперименте ГЕРМЕС и спиновая структура нуклона**» удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней, а автор работы, **Коротков Владислав Александрович**, за измерение спин-зависимой структурной функции и односпиновых азимутальных асимметрий адронов, соответственно, в инклюзивных и полу-

инклюзивных процессах глубоко неупругого рассеяния при различных поляризациях пучка и мишени заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий.

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

г. Москва, «04» декабрь 2017 г.

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

Подпись удостоверено
Заместитель начальника
документационного отделения
НИЯУ МИФИ



Маша Николаевна Сервиса