

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию 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.

Изучение структуры нуклона неразрывно связано с экспериментами по рассеянию лептонов на ядерных мишенях, инициированными Р. Хофштадтером более 60 лет назад. В последующие годы такие эксперименты привели к созданию партонной модели и в конечном итоге к квантовой хромодинамике.

Дальнейший прогресс в изучении структуры нуклона связан с созданием поляризованных лептонных пучков и поляризованных ядерных мишеней нового поколения. В середине 1970-х годов в SLAC (СЛАК, Стэнфорд, США) были выполнены первые эксперименты по изучению глубоконеупругого рассеяния продольно поляризованных электронов на продольно поляризованных протонах. Эти эксперименты открыли новую эру в изучении нуклона, его спиновой структуры. В 1986-м году эксперимент ЕМС в ЦЕРН (Швейцария) обнаружил, что кварки суммарно переносят довольно малую часть спина протона. Этот удивительный эффект получил название "спиновый кризис".

Позже, эксперимент E704 в лаборатории Ферми (США) обнаружил, что спиновые эффекты не вымирают с ростом энергии, а это противоречило предсказанию пертурбативной КХД. Для разрешения этого противоречия были введены новые функции распределения (Д. Сиверс, 1990) и фрагментации кварков (Дж. Коллинз, 1993), зависящие как от продольной, так и от поперечной компонент импульса кварка. Такая зависимость эффективно учитывает конечный размер адронов.

Полное описание структуры нуклона в лидирующем твисте требует существования трех функций распределения кварков: функция распределения неполяризованных кварков в неполяризованном нуклоне, $f_1^q(x)$, функция распределения продольно поляризованных кварков в продольно поляризованном нуклоне, $g_1^q(x)$ и функция распределения поперечно поляризованных кварков в поперечно поляризованном нуклоне, $h_1^q(x)$. К середине 1990-х годов, первые две из этих функций были уже довольно хорошо измерены экспериментально. Однако третья функция лидирующего твиста была совершенно неизвестна. Экспериментальные проявления ненулевых значений этой функции в виде азимутальных асимметрий Коллинза и двухадронных асимметрий впервые были измерены в эксперименте HERMES (ГЕРМЕС) в DESY (ДЕЗИ, Гамбург, ФРГ), выполненном в период с 1996 по 2007 годы. Эти измерения, совместно с данными из e^+e^- экспериментов, привели к извлечению первых экспериментальных сведений о функции $h_1^q(x)$.

Таким образом можно сказать, что изучение спиновой структуры нуклона является фундаментальной проблемой в физике элементарных частиц. Актуальность диссертации В.А. Короткова связана именно с пионерскими измерениями асимметрий, из которых извлекаются функция распределения Сиверса, функция фрагментации Коллинза для кварков в нуклоне, а также структурная функция g_2 .

Основу диссертации Короткова В.А. составляют результаты исследований, выполненных в эксперименте ГЕРМЕС, использовавшем поляризованный электронный пучок накопителя ГЕРА и (не)поляризованную газовую водородную и дейтериевую мишени с накопительной ячейкой.

Основным методом получения экспериментальных результатов, представленных в диссертации, является изучение азимутальных асимметрий рассеянного электрона (в инклюзивном процессе $eN \rightarrow e'X$) или адронов (в полуинклюзивном процессе $eN \rightarrow e'hX$) в процессах

взаимодействия электронов и нуклонов в различных комбинациях их поляризационных состояний.

Целью диссертационной работы В.А. Короткова является изучение спиновой структуры нуклона. В его работе извлечены спиновая структурная функция g_2 и виртуальная асимметрия A_2 , изучены односпиновые азимутальные асимметрии адронов, образованных в полуинклюзивных глубоконеупругих процессах рассеяния электронов на нуклонах. Эти асимметрии связаны с функциями распределения кварков в нуклоне, зависящими от их продольного и поперечного импульса. В частности изучались асимметрии, которые определяют функцию распределения кварков, $h_1^q(x)$, так называемую трансверсити. Также найдены новые более жесткие ограничения на эффект вклада двухфотонного обмена в инклюзивных глубоконеупругих процессах.

Диссертация изложена на 281 странице, состоит из введения, шести глав, заключения и двух приложений.

Во **введении** обсуждается актуальность изучения структуры нуклона и в особенности ее спиновой составляющей, приведены цель работы, научная новизна и ее практическая ценность. Кратко изложено содержание диссертации, представлены работы, на основе которых она написана.

В первой главе кратко представлены теория и феноменология процессов, изучаемых в диссертации.

Вторая глава диссертации посвящена описанию постановки эксперимента ГЕРМЕС. Изложены основные сведения о пучке электронов (позитронов) накопителя ГЕРА, о конструкции поляризованной мишени с накопительной ячейкой и структуре детекторов спектрометра установки ГЕРМЕС. Представлена методика идентификации электронов и адронов различного типа.

В третьей главе обсуждаются результаты изучения азимутальных асимметрий рассеянного электрона в инклюзивных глубоконеупругих процессах рассеяния электронов на поперечно поляризованной водородной мишени $ep \rightarrow e'X$. Односпиновая азимутальная асимметрия в таких процессах, в приближении однофотонного обмена, запрещена комбинацией Т-инвариантности, сохранением Р-четности и эрмитовостью оператора электромагнитного тока. Наблюдение такой асимметрии свидетельствовало бы о существенном вкладе двухфотонного обмена в инклюзивном процессе рассеяния. Проведенные измерения на уровне экспериментальных неопределенностей дают значения асимметрии сопоставимые с нулем. Измерения двухспиновой азимутальной асимметрии рассеянного электрона позволили извлечь структурную функцию протона g_2 и виртуальную асимметрию A_2 . Экспериментальные данные согласуются с ранее проведенными измерениями этих величин в СЛАК. Важной особенностью измерений, проведенных в эксперименте ГЕРМЕС, является использование газовой водородной мишени. Все более ранние измерения были выполнены на твердотельных ядерных мишенях, в которых надо дополнительно учитывать ядерные эффекты, чтобы получить физические результаты.

В четвертой главе представлены результаты изучения азимутальных асимметрий в полуинклюзивных глубоконеупругих процессах образования пионов и каонов на продольно поляризованных водородной и дейтериевой мишенях $eN \rightarrow e'hX$. Измерялись два типа асимметрий возможных в этих процессах, асимметрия ведущего твиста $A_{UL}^{\sin 2\phi}$ и асимметрия твиста 3 $A_{UL}^{\sin \phi}$. Асимметрия $A_{UL}^{\sin 2\phi}$ для всех типов адронов, образованных как на протонах, так и на дейтронах, сопоставима с нулем. Асимметрия $A_{UL}^{\sin \phi}$ для π^+ , π^0 и K^+ мезонов положительна, а для π^- мезонов сопоставима с нулем. Асимметрия для π^+ мезонов, образованных на протонах, примерно в два раза больше асимметрии, измеренной на дейтронах. Для π^0 мезонов асимметрии для обеих мишеней имеют сопоставимые значения.

Продольная поляризация мишени по отношению к направлению падающего пучка электронов (экспериментальное определение направления поляризации) приводит к некоторому несоответствию с теоретическим определением направления поляризации, т. е. по отношению к направлению виртуального фотона. Это приводит к вкладу асимметрий Сиверса и Коллинза в экспериментально измеряемую асимметрию $A_{UL}^{\sin\phi}$. В данной главе сделана поправка учитывающая этот эффект, что позволило извлечь значение асимметрии $A_{UL}^{\sin\phi}$ в соответствии с теоретическим определением направления поляризации мишени. Это дает перспективы для более простого феноменологического анализа этих данных.

В пятой главе обсуждаются результаты изучения азимутальных асимметрий в полуинклюзивных глубоконеупругих процессах образования пионов при рассеянии поляризованных электронов на неполяризованной водородной мишени. Величина асимметрии $A_{LU}^{\sin\phi}$ отлична от нуля для π^+ - и π^0 -мезонов, но сопоставима с нулем для π^- -мезонов. Проведено сравнение асимметрии для π^+ мезонов с результатами измерений в эксперименте CLAS (КЛАС, лаборатория Джефферсона, США), которые выполнены при существенно меньшей энергии электронов 4,3 ГэВ. Введение фактора, учитывающего различие кинематических областей этих экспериментов, приводит к сопоставимости их результатов.

В шестой главе рассматриваются результаты изучения азимутальных асимметрий адронов, образованных в процессах рассеяния неполяризованных электронов на поперечно поляризованных протонах. Представлены результаты извлечения асимметрий Сиверса и Коллинза для пионов и заряженных каонов.

Интересной особенностью измеренных асимметрий Сиверса является превышение асимметрии для K^+ мезона над асимметрией для π^+ мезона. Такое различие возможно свидетельствует о важной роли морских кварков в этих асимметриях. Данные об асимметрии Сиверса, представленные в диссертации, уже использовались в литературе для извлечения функции распределения Сиверса для валентных u - и d -кварков.

Важной особенностью измеренных асимметрий Коллинза является их величина для π^- мезонов. Она противоположна по знаку асимметрии для π^+ мезонов, но превышает ее по абсолютной величине. Возможным объяснением такого поведения асимметрии является большая величина подавленной функции фрагментации Коллинза с противоположным знаком по отношению к предпочтительной функции фрагментации Коллинза.

Измерены асимметрии образования пары пионов, образованных в полуинклюзивных глубоконеупругих процессах. Эти асимметрии, также как и асимметрии Коллинза, вызваны ненулевыми значениями третьей функции распределения кварков лидирующего твиста, трансверсити h_1 .

Результаты, представленные в данной главе, как для асимметрий Коллинза, так и для двухадронных асимметрий, уже использовались в литературе для первого извлечения функции $h_1(x)$.

В целом по главам, там, где это возможно, дано сравнение результатов, полученных в эксперименте ГЕРА, с результатами экспериментов КЛАС, COMPAS (КОМПАС, ЦЕРН, Швейцария), RHIC (Брукхэйвен, США) и других, выполненных позднее и в некоторых случаях с более высокой точностью.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

В приложении А представлены результаты изучения структурной функции g_2 и виртуальной асимметрии A_2 в виде таблиц.

В приложении Б приведены табличные значения асимметрий Сиверса и Коллинза, изученные в диссертации.

Представленная диссертация является плодом многолетней работы автора в эксперименте ГЕРМЕС, начиная с 1996 года. Большое внимание Коротков В.А. уделял разработке про-

граммы исследований с поперечно поляризованной мишенью в эксперименте ГЕРМЕС. Эта программа неоднократно обсуждалась автором на международных конференциях. Разрабатывались методы извлечения функции распределения трансверсити используя асимметрии Коллинза и двухадронные асимметрии.

В настоящее время программа извлечения функции распределения трансверсити успешно выполняется. Получена первая, пока далеко не полная информация об этой ранее неизвестной функции.

В качестве критических замечаний можно отметить следующее:

- в тексте диссертации встречается до некоторой степени вольное использование знаков препинания;
- список результатов диссертации, которые выносятся на защиту, представлен в слишком длинной, очень подробной форме;
- уместно было бы сделать в тексте диссертации краткий обзор планируемых экспериментов нового поколения, где данные полученные в эксперименте ГЕРА и других будут уточнены и расширены по кинематике.

В то же время указанные замечания не умаляют ценности диссертации.

Текст автореферата диссертации правильно отражает ее содержание. Все результаты, представленные в диссертации, опубликованы в рецензируемых научных журналах с высоким импакт-фактором. Материалы диссертации многократно докладывались автором на международных конференциях по физике высоких энергий. Работы на основании которых написана диссертация широко цитируются в научной литературе. Результаты диссертации могут быть использованы при анализе ведущихся и планировании будущих экспериментов как в России (СПАСЧАРМ в ИФВЭ, проект НИКА в Дубне), так и в зарубежных научных центрах физики высоких энергий.

Диссертация Короткова В.А. отвечает всем требованиям Высшей аттестационной комиссии, установленными п.9 Положения о порядке присуждения ученых степеней в части, касающейся докторских диссертаций, а ее автор, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.23–физика высоких энергий.

Официальный оппонент:
д.ф.-м.н.

А.Е. Дорохов

Подпись внс Дорохова А.Е. заверяю:
ученый секретарь ЛТФ ОИЯИ,



А.В. Андреев

«01» декабря 2017 г.

Сведения об оппоненте:

Дорохов Александр Евгеньевич
доктор физико-математических наук, без звания,
ведущий научный сотрудник
Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова

Объединенного института ядерных исследований,
адрес: 141980, Московская обл.,
г.Дубна, ул. Жолио-Кюри д.6,
Телефон: +7(496)2162730
Адрес электронной почты: dorokhov@theor.jinr.ru