

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий им. А.А.Логонова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
(НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ)

21 декабря 2017 г.

Заседание Диссертационного совета

Д 201.004.01

Протокол № 2017-8

Стенограмма заседания Диссертационного совета Д 201.004.01

Защита диссертации на соискание учёной степени доктора физико-математических наук Коротковым Владиславом Александровичем
«Изучение азимутальных асимметрий в процессах глубокоэластичного рассеяния электронов (позитронов) на протонах и дейтронах в эксперименте ГЕРМЕС и спиновая структура нуклона»
по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий

Председательствующий: председатель Диссертационного совета Д 201.004.01 д.ф.-м.н., профессор, Тюрин Николай Евгеньевич.

Секретарь: учёный секретарь Диссертационного совета Д 201.004.01 канд.ф.-м.н. Рябов Юрий Григорьевич

Всего членов совета: 22 человека.

Присутствует: 19 человек.

На заседании присутствуют следующие члены Диссертационного совета Д 201.004.01:

1. Тюрин Н.Е., доктор ф.-м.н., 01.04.02 – председатель;
2. Зайцев А.М., доктор ф.-м.н., 01.04.23 – заместитель председателя;
3. Рябов Ю.Г., канд. ф.-м.н., 01.04.23 – ученый секретарь диссовета;
4. Арбузов Б.А., доктор ф.-м.н., 01.04.02;
5. Балакин В.Е., доктор ф.-м.н., 01.04.20;
6. Герштейн С.С., доктор ф.-м.н., 01.04.20;
7. Денисов С.П., доктор ф.-м.н., 01.04.23;
8. Иванов С.В., доктор ф.-м.н., 01.04.20;
9. Качанов В.А., доктор ф.-м.н., 01.04.23;
10. Мочалов В.В., доктор ф.-м.н., 01.04.23;
11. Образцов В.Ф., доктор ф.-м.н., 01.04.23;
12. Петров В.А., доктор ф.-м.н., 01.04.02;
13. Петрухин А.А., доктор ф.-м.н., 01.04.23;
14. Саврин В.И., доктор ф.-м.н., 01.04.02;
15. Селезнев В.С., доктор ф.-м.н., 01.04.20;

16. Сенько В.А., доктор ф.-м.н., 01.04.20;
17. Ткаченко Л.М., доктор ф.-м.н., 01.04.20;
18. Трошин С.М., доктор ф.-м.н., 01.04.02;
19. Чесноков Ю.А., доктор ф.-м.н., 01.04.20.

Диссертационный совет Д 201.004.01 утверждён приказом по Федеральной службе по надзору в сфере образования и науки № 105/нк от 11 апреля 2002 года в составе 22-х человек. На заседании присутствуют 19 членов совета, из них 6 докторов наук по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий, кворум имеется. На заседании присутствуют также официальные оппоненты доктор физ.-мат. наук Дорохов Александр Евгеньевич, доктор физ.-мат. наук Куденко Юрий Григорьевич и доктор физ.-мат. наук Огороков Виталий Алексеевич.

Тюрин Н.Е.: объявляет повестку дня: На повестке дня - защита докторской диссертации по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий Коротковым Владиславом Александровичем, сотрудником лаборатории структуры адронов отделения экспериментальной физики нашего института, «Изучение азимутальных асимметрий в процессах глубоконеупругого рассеяния электронов (позитронов) на протонах и дейтронах в эксперименте ГЕРМЕС и спиновая структура нуклона». Юрий Григорьевич, пожалуйста справочные данные.

Рябов Ю.Г. представляет материалы, которые имеются в деле:

Соискатель Коротков Владислав Александрович, 1951 года рождения, гражданин России, в 1974 году окончил Факультет теоретической и экспериментальной физики Московского инженерно-физического института (НИЯУ МИФИ) и пришел на работу в ИФВЭ. Кандидатскую диссертацию В.А. Коротков защитил в 1987 году по теме «Исследование структуры нуклонов и ядер в нейтринных взаимодействиях на камере СКАТ» и получил степень кандидата физико-математических наук в Диссертационном совете, созданном при Институте физики высоких энергий, Протвино. Работает старшим научным сотрудником в Отделении экспериментальной физики НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ. Диссертация выполнена в Отделении экспериментальной физики НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ.

Диссертационный совет 11 сентября 2017 г. (Протокол № 2017-5) принял к защите диссертацию Короткова и утвердил официальными оппонентами доктора физ.-мат. наук Дорохова Александра Евгеньевича, ведущего научного сотрудника Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, доктора физ.-мат. наук, профессора Куденко Юрия Григорьевича, заведующего отделом физики высоких энергий Института ядерных исследований РАН, г. Москва, доктора физ.-мат. наук, доцента Огорокова Виталия Алексеевича, профессора кафедры физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». Совет

утвердил в качестве ведущей организации Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова. Соискатель имеет 546 опубликованных работ, из них 23 работы по теме диссертации, в том числе 12 работ опубликовано в высоко цитируемых научных журналах. Я не буду перечислять все эти работы, соискатель представит их сам. В деле имеются все документы. Все документы соответствуют требованиям ВАК о присуждении ученых степеней. У меня все.

Тюрин Н.Е.: Уважаемые члены совета, какие есть вопросы по доложенному содержанию документов? Нет вопросов? Тогда переходим к выступлению. Владислав Александрович – вам слово.

Коротков В.А.: Добрый день! Позвольте представить Вам диссертацию «Изучение азимутальных асимметрий в процессах глубоконеупругого рассеяния электронов (позитронов) на протонах и дейтронах в эксперименте ГЕРМЕС и спиновая структура нуклона».

Вначале я бы хотел представить небольшое введение в тему диссертации и ее актуальность. Изучение структуры нуклона – это фундаментальная задача современной физики, однако одна из ее составляющих, спиновая структура нуклона, изучена пока еще не достаточно хорошо. Например, измерение спин-зависимой структурной функции протона g_1 в эксперименте EMC в 1986 году привело к удивительному открытию – кварки переносят весьма незначительную часть спина протона. Эксперимент E704 в лаборатории Ферми показал, что спиновые эффекты не вымирают с ростом энергии, как ожидалось в рамках обычной коллинеарной пертурбативной КХД. Описание структуры нуклона в лидирующем твисте требует существования трех функций распределения кварков: f_1 , g_1 и h_1 . Функции f_1 и g_1 изучаются уже много лет и известны с неплохой точностью, особенно функция f_1 . Третья функция распределения, h_1 , была абсолютно экспериментально неизвестна до измерений, выполненных в эксперименте HERMES.

Большая часть данной диссертации посвящена первому наблюдению и изучению эффектов существования ненулевых неколлинеарных функций распределения и функций фрагментации кварков, в частности, функций распределения Сиверса и трансверсити, а также функции фрагментации Коллинза в полуинклюзивном электро рождении адронов.

Изучение всех наблюдаемых, исследованных в диссертации, проведены посредством измерения азимутальных асимметрий рассеянного электрона (в инклюзивном процессе) или адрона (в полуинклюзивном процессе) в процессах взаимодействия электронов и нуклонов в различных комбинациях их поляризационных состояний.

Диссертационная работа основана на 12 публикациях в рецензируемых журналах «Phys. Rev. Lett.», «Phys. Lett. B», «Phys. Rev. D», «Eur. Phys. J. C», «JHEP», а также на ряде докладов на международных конференциях. Список всех этих работ приведен на этих четырех слайдах. Большинство выступления на конференциях было сделано по поручению сотрудничества ГЕРМЕС.

Перед представлением результатов диссертации, я бы хотел сказать несколько слов о

постановке эксперимента ГЕРМЕС.

В эксперименте использовался электронный пучок ускорительно-накопительного комплекса ГЕРА, расположенного в г. Гамбурге (Германия). Ускоритель работал попеременно с электронами и позитронами с энергией 27.5 ГэВ. Во время движения по кольцу ускорителя пучок электронов получает поперечную поляризацию благодаря эффекту Соколова-Тернова. Для проведения эксперимента требовалась продольная поляризации, поэтому перед установкой и после нее были установлены ротаторы спина, которые преобразовывали

поперечную поляризацию на продольную и обратно. Для измерения поляризации пучка использовались два независимых поляриметра электронов. Один из них измерял величину поперечной поляризации, а второй измерял величину продольной поляризации. Измеренные величины обоих типов поляризации находились в хорошем согласии.

Спектрометр установки ГЕРМЕС состоял из двух идентичных половин, одна из них располагалась выше, а вторая ниже плоскости пучков электронов и протонов. На показанном слайде представлена структура спектрометра. В качестве трековых детекторов использовались дрейфовые камеры DVC, FC1/2, BC1/2, BC3/4 и набор пропорциональных камер MC1-3. Для идентификации частиц использовались спектрометр колец черенковского излучения (на первом этапе эксперимента использовался пороговый черенковский счетчик), детектор переходного излучения, предливневый детектор и электромагнитный калориметр. В качестве триггера полезных событий использовалось совпадение сигналов о прохождении частицы в трех годоскопах и в электромагнитном калориметре. Дипольный магнит спектрометра обеспечивал интеграл напряженности магнитного поля 1.3 Тм, что приводило к измерению импульсов заряженных частиц с точностью порядка 1%. Апертура магнита составляла 140 мрад в направлении оси Y и 170 мрад в направлении оси X. Уникальной составляющей установки являлась газовая поляризованная мишень с накопительной ячейкой. Мишень обеспечивала частую и быструю смену направления поляризации через каждые 60 (90) с для продольной (поперечной) поляризации. Это очень важно для минимизации систематических неопределенностей измерения асимметрии.

На данном слайде представлена схематическая диаграмма процесса глубоконеупругого рассеяния (ГНР) лептонов на нуклонах. Выписаны определения кинематических переменных используемых при анализе таких процессов.

Первая тема диссертации, которую я начинаю представлять, это – поиски сигнала двухфотонного обмена в инклюзивном процессе ГНР электронов на протонах. Хорошо известно, что уже в течение примерно пятнадцати лет существует проблема несогласованности результатов измерений отношения упругих, электрического и магнитного, формфакторов протона, проведенных двумя методами. Современное состояние измерений показано на данном слайде. Показаны результаты измерений этого отношения методом Розенблюта и методом передачи поляризации в зависимости от переменной Q^2 . Измерения методом Розенблюта дают отношения формфакторов не зависящие от переменной Q^2 , а измерения методом передачи поляризации показывают сильную зависимость этого отношения от данной переменной. Разногласие результатов измерений этими методами привело к

предположению, что это разногласие вызвано вкладом двухфотонного обмена, который не учитывался при анализе данных упругого рассеяния. В процессе инклюзивного ГНР вклады двухфотонного обмена пока не наблюдались. Существует теорема (N. Christ, N.D. Lee, 1966), что в рамках однофотонного обмена, односпиновые азимутальные асимметрии рассеянного электрона в таких процессах запрещены комбинацией Т-инвариантности, Р-четности и эрмитовостью оператора электромагнитного тока. Наблюдение ненулевой односпиновой асимметрии могло бы указывать на наличие вкладов 2γ обмена. Феноменологический анализ, учитывающий интерференцию 1γ и 2γ обменов, показал (A. Metz et al., 2006), что в этом случае односпиновая азимутальная асимметрия пропорциональна знаку заряда электрона, вымирает с ростом Q^2 как M/Q и ведет себя в зависимости от азимутального угла электрона как $\sin \phi$. На данном слайде представлены результаты измерения асимметрии $A_{UT}^{\sin \phi}$ в зависимости от переменной x для двух областей Q^2 , $Q^2 > 1 \text{ ГэВ}^2$ и $Q^2 < 1 \text{ ГэВ}^2$. Слева показаны результаты измерений в пучке электронов, а справа показаны результаты измерений в пучке позитронов. Значения асимметрии как в пучке электронов, так и в пучке позитронов, а также в обеих областях Q^2 сопоставима с нулем. В таблице приведены значения асимметрии, усредненные по измеренной области переменной x . Результат данного исследования – в пределах экспериментальных неопределенностей на уровне 10^{-3} , эффектов вклада двухфотонного обмена в процессы инклюзивного ГНР электронов на поперечно поляризованном протоне не обнаружено.

Тема следующего исследования, представленного в диссертации, измерение структурной функции протона $g_2(x)$ и виртуальной асимметрии $A_2(x)$. На этом слайде приведены общие выражения для сечения процесса инклюзивного ГНР электронов на нуклонах при произвольных поляризационных состояниях нуклона.

На рисунке показаны определения углов α , ϕ и θ . Для измерения функции g_2 наиболее выгодным состоянием является поперечная поляризация нуклона.

На этом слайде приводятся краткие сведения о функции g_2 .

В противоположность к структурной функции g_1 , функция g_2 не имеет аналогичной вероятностной интерпретации и соотносится к матричным элементам как твист-2, так и твист-3 операторов. Вклад операторов твиста 2 выражается формулой Вандзура-Вильчека. Вклад операторов твиста 3 обусловлен кварк-глюонными корреляциями в нуклоне. Второй момент, d_2 , этого вклада к функции g_2 может быть вычислен на КХД решетке. Существует правило сумм Буркхардта-Коттингема: интеграл от функции g_2 по всей области изменения переменной x от 0 до 1 равен нулю. Вместо структурных функций нуклона $F_{1,2}$ и $g_{1,2}$ можно рассматривать сечения поглощения виртуального фотона нуклоном. Исходя из этих сечений можно определить виртуальные асимметрии, т.е. асимметрии сечений рассеяния виртуального фотона на поляризованном нуклоне $A_{1,2}$. Эти асимметрии можно выразить через структурные функции g_1 и g_2 . Величины виртуальных асимметрий ограничены условиями положительности.

Измерение сечений рассеяния продольно поляризованных электронов на поперечно поляризованных протонах при значениях угла рассеяния ϕ и $\phi + \pi$ позволяет измерить амплитуду асимметрии $A_T(x, Q^2)$. Величина этой амплитуды, в свою

очередь, позволяет извлечь значения структурной функции $g_2(x)$ и виртуальной асимметрии $A_2(x)$.

На данном слайде представлена структурная функция xg_2 в зависимости от переменной Q^2 для некоторых областей переменной x . Кроме результатов эксперимента ГЕРМЕС (красные квадратики) показаны также результаты экспериментов E143 (треугольники) и E155 (кружочки), проведенных в СЛАК. Кривые показывают твист 2 часть функции xg_2 , т.е. вклад который выражается формулой Вандзура-Вильчека. Данные ГЕРМЕС согласуются как с данными измерений, проведенных в СЛАК, так и с предсказанием формулы Вандзура-Вильчека. На следующем слайде представлены виртуальная асимметрия A_2 и функция xg_2 , усредненные по измеренной области Q^2 , в зависимости от переменной x . Показаны также результаты измерений в экспериментах E143 и E155 в СЛАК и эксперимента EMC в ЦЕРН. Кривые показывают вклад Вандзура-Вильчека. Результаты всех экспериментов в хорошем согласии друг с другом.

Результаты измерений в эксперименте ГЕРМЕС в согласии с предсказанием формулы Вандзура-Вильчека. Результаты измерений функция $g_2(x)$ в эксперименте ГЕРМЕС использованы для оценки интеграла Буркхардта-Коттингема и второго момента d_2 при $Q^2 = 5 \text{ ГэВ}^2$. Численные значения указаны на слайде. Значение интеграла Буркхардта-Коттингема по измеренной области переменной x сопоставимо с нулем. Второй момент d_2 также сопоставим с нулем в пределах экспериментальных погрешностей. Это не противоречит расчетам в рамках КХД на решетке, где ожидается очень малое значение этого момента. Для сравнения на слайде приведены значения интеграла Буркхардта-Коттингема и второго момента d_2 , извлеченные из данных СЛАК.

Главная ценность измерения структурной функции g_2 и виртуальной асимметрии A_2 в эксперименте ГЕРМЕС состоит в том, что они выполнены на газовой водородной мишени и, следовательно, не требуют каких либо поправок на ядерные эффекты. Все остальные измерения были выполнены с использованием сложных ядерных мишеней.

Далее я перехожу к изучению азимутальных асимметрий в полуинклюзивных процессах ГНР электронов на нуклонах при различных комбинациях их поляризационных состояний. На данном слайде показана схематическая диаграмма образования адрона h в таких процессах. Показаны определения азимутальных углов ϕ_h , угол между плоскостью рассеяния и плоскостью образования адрона, и ϕ_S , угол между плоскостью рассеяния и поперечной компонентой спина нуклона мишени. На следующем слайде выписана общая формула сечения полуинклюзивного образования адрона h при различных комбинациях поляризационных состояний электрона и нуклона мишени. В общем случае сечение зависит от 18-ти структурных функций. В рамках неколлинеарной КХД, эти структурные функции выражаются через функции распределения (ФР) и функции фрагментации (ФФ) кварков, зависящих от поперечного импульса. Существует восемь ФР кварков твиста 2 и 16 ФР кварков твиста 3. На данном слайде показана популярная картинка, которая объясняет классификацию ФР кварков твиста 2. Указаны поляризации нуклона и кварков посредством обозначений U (неполяризованный), L (продольно

поляризованный) и Т (поперечно поляризованный). Так, например, ФР f_1 – это обычная ФР неполяризованных кварков в неполяризованном нуклоне, ФР f_{1T}^\perp – это ФР Сиверса – распределение неполяризованных кварков в поперечно поляризованном нуклоне. ФР и ФФ классифицируются как Т-четные и Т-нечетные, а также как кирально-четные и кирально-нечетные. Функция Сиверса является Т-нечетной, поскольку она меняет знак под действием операции наивного обращения времени, которая определена как обычная операция обращения времени, но без обмена начального и конечного состояний. Функция Сиверса долгое время считалась несуществующей из-за нарушения Т-инвариантности. Позднее было показано, что в процессах полуинклюзивного ГНР (ПИГНР) функция Сиверса отлична от нуля вследствие эффекта взаимодействия в конечном состоянии посредством обмена глюоном между рассеянным кварком и остатком нуклона мишени. В процессе Дрелла-Яна функция Сиверса отлична от нуля из-за взаимодействий в начальном состоянии. Это приводит к фундаментальному предсказанию КХД – функция Сиверса в процессе ПИГНР и функция Сиверса в процессе Дрелла-Яна различаются знаком. Аналогичная классификация существует для ФФ кварков, в частности ФФ Коллинза H_1^\perp является Т-нечетной функцией. Она описывает корреляцию между поперечным спином фрагментирующего кварка и поперечным импульсом образованного адрона. На следующих нескольких слайдах выписаны формулы связывающие структурные функции сечения ПИГНР с ФР и ФФ кварков. Эта связь выражается посредством свертки ФР и ФФ кварков по поперечным импульсам. Таким образом, извлечение ФР и ФФ кварков из измеренных сечений или асимметрий является нетривиальной задачей.

Рассмотрим измерение азимутальных асимметрий образования адронов при рассеянии неполяризованных электронов на продольно поляризованных протонах.

На данном слайде показана конфигурация импульсов электронов и образованного π мезона. Указано определение азимутального угла образованного адрона ϕ . Здесь же выписаны возможные виды азимутальных асимметрий в исследуемых процессах, $A_{UL}^{\sin \phi}$ и $A_{UL}^{\sin 2\phi}$. Первый тип асимметрии является величиной твиста 3 и вымирает с ростом Q^2 как M/Q . Асимметрия зависит от четырех ФР и четырех ФФ кварков. Второй тип асимметрии является величиной лидирующего твиста.

Для анализа использовались данные 1996-1997 годов с продольно поляризованной водородной мишенью. Изучалась кинематическая область $1 \text{ ГэВ}^2 < Q^2 < 15 \text{ ГэВ}^2$, $W > 2 \text{ ГэВ}$, $0.023 < x < 0.4$, $y < 0.85$. Во время набора статистики использовался газовый черенковский счетчик и пионы идентифицировались в области импульсов $4.5 \text{ ГэВ} < E < 13.5 \text{ ГэВ}$. На данном слайде показаны первые результаты извлечения асимметрии A_{UL}^W , где функция W равна $\sin \phi$ или $\sin 2\phi$. На рисунке слева показана асимметрия A_{UL}^W для π^+ мезона в зависимости от переменной x. Можно видеть, что асимметрия $A_{UL}^{\sin \phi}$ отлична от нуля и положительна, а асимметрия лидирующего твиста $A_{UL}^{\sin 2\phi}$ сопоставима с нулем при всех значениях переменной x. На рисунке справа представлена асимметрия $A_{UL}^{\sin \phi}$ для π^+ и π^- мезонов в зависимости от их поперечного импульса P_\perp . Для π^+ мезонов асимметрия положительна, а для π^- мезонов сопоставима с нулем. Представленные данные являлись первым

наблюдением ненулевых односпиновых азимутальных асимметрий в полуинклюзивных процессах образования адронов в ГНР лептонов на нуклонах. Это наблюдение подтвердило, вслед за экспериментом E704 (и рядом аналогичных ему), необходимость введения ФР и ФФ кварков, зависящих от поперечного импульса. На следующем слайде показана зависимость асимметрии $A_{UL}(\phi)$ от угла ϕ для всех типов пионов. Явно видно синусоидальное поведение асимметрии $A_{UL}(\phi)$. На рисунке приведены также значения асимметрии $A_{UL}^{\sin \phi}$, полученные фитированием асимметрии $A_{UL}(\phi)$ в виде $P_1 + P_2 \sin \phi$. На следующем слайде показана асимметрия $A_{UL}^{\sin \phi}$ для всех типов пионов в зависимости от трех разных переменных z , x и P_{\perp} . Хорошо видно, что асимметрия для π^- мезонов сопоставима с нулем по всей области изменения всех трех переменных. Асимметрии для π^+ и π^0 мезонов очень близки друг к другу как по величине, так и по поведению в зависимости от переменных. Показаны результаты феноменологических оценок (De Sanctis E. et al., 2000) асимметрии, которые хорошо согласуются с экспериментальными данными.

В таблице указаны численные значения асимметрий $A_{UL}^{\sin \phi}$ и $A_{UL}^{\sin 2\phi}$, усредненных по всей кинематической области измерений, для всех типов пионов.

Аналогичное исследование было проведено для ПИГНР рассеяния неполяризованных электронов на продольно поляризованной дейтериевой мишени. Нужно отметить, что данные для этого исследования были получены в сеансах 1998-2000 годов и пороговый черенковский счетчик был заменен на детектор колец черенковского излучения. Это позволило изучить асимметрии не только для пионов, но и для каонов. На данном слайде показана асимметрия $A_{UL}(\phi)$ в зависимости от угла ϕ для всех типов пионов и положительно заряженных каонов. Показаны результаты фитирования данных функциями вида $P_0 + P_1 \sin \phi$ и $P_0 + P_1 \sin \phi + P_2 \sin 2\phi$. Значения всех параметров P_0 оказались сопоставимы с нулем. Значения параметров P_2 , т.е. асимметрий $A_{UL}^{\sin 2\phi}$ также близки к нулю. На следующем слайде показано сравнение асимметрий $A_{UL}^{\sin \phi}$, извлеченных на водородной и дейтериевой мишенях. Можно видеть, что асимметрия для π^+ мезона измеренная на дейтериевой мишени, практически в два раза меньше асимметрии измеренной на водородной мишени. Ввиду недостатка времени, я не буду сейчас обсуждать результаты этого сравнения и перейду к следующему предмету.

Измерения, которые только что рассматривались, имеют один недостаток. Направление поляризации мишени определялось по отношению к направлению налетающего пучка электронов. Это естественное определение при проведении эксперимента. Естественное определение направления поляризации в теории – это направление по отношению к направлению импульса виртуального фотона. В результате такого различия, поляризация мишени в эксперименте по отношению к направлению виртуального фотона имеет две составляющие, как продольную, так и поперечную. Эта ситуация демонстрируется на приведенном рисунке, где указаны вектор спина мишени S и его поперечная компонента S_{\perp} . Величина поперечной компоненты спина нуклона по отношению к направлению виртуального фотона зависит от величины полярного угла, θ_{γ^*} , между направлением пучка лептонов и направлением виртуального фотона. Асимметрии, которые связаны с поперечной

поляризацией мишени – это асимметрии Коллинза и Сиверса. Они могут дать вклад в величину измеренной в эксперименте асимметрии $A_{UL}^{\sin\phi}$. Существует методика (M.Diehl and S.Sapeta, 2005) преобразования асимметрий между случаями, когда поляризация мишени определена по отношению к направлению пучка падающих лептонов и когда по отношению к направлению виртуального фотона. Для этого преобразования необходимо знание асимметрий Коллинза и Сиверса, поэтому оно было выполнено после того как в эксперименте ГЕРМЕС были получены первые результаты об их величинах. На данном рисунке представлены результаты преобразования асимметрий для π^+ и π^- мезонов. Треугольники соответствуют экспериментально измеренным асимметриям $A_{UL}^{\sin\phi}$, а красные квадратные маркеры соответствуют асимметрии $A_{UL}^{\sin\phi}$ при теоретическом определении направления поляризации. Можно видеть, что различие величин этих асимметрий довольно мало. Из этого следует, что экспериментально измеренная асимметрия $A_{UL}^{\sin\phi}$ определена главным образом вкладами высших твистов и не может интерпретироваться исходя из вкладов только ФФ Коллинза и ФР трансверсити или из ФР Сиверса, как было принято в большинстве ранних феноменологических оценок этой асимметрии.

Следующая тема – это измерение асимметрий при рассеянии продольно поляризованных электронов на неполяризованной водородной мишени. В этом случае, также как и при рассеянии неполяризованных электронов на продольно поляризованной мишени, возникающая асимметрия $A_{LU}^{\sin\phi}$ является величиной твиста 3. Она зависит от свертки четырех ФР и четырех ФФ кварков. Анализ этой асимметрии был выполнен на данных 1996-2000 годов с неполяризованной водородной мишенью. На рисунке показана извлеченная асимметрия $A_{LU}^{\sin\phi}$ для пионов различных знаков заряда в зависимости от трех переменных z , x и P_{\perp} . Данные рассматривались в трех областях переменной z . В области малых z ($0.2 < z < 0.5$), в области средних z ($0.5 < z < 0.8$) и в области больших z ($0.8 < z < 1.0$). Такое разделение преследовало цель изучения возможного влияния вклада пионов от распадов эксклюзивно образованных векторных мезонов на асимметрию. Такая же асимметрия $A_{LU}^{\sin\phi}$ была измерена в эксперименте КЛАС для π^+ мезонов. Эти измерения были выполнены при более низкой энергии пучка электронов 4.3 ГэВ. Средние значения переменных x и Q^2 также сильно отличны от значений этих переменных в эксперименте ГЕРМЕС. Для сравнения данных обоих экспериментов, асимметрии умножались на кинематический фактор $\langle Q \rangle / f(y)$. Результаты такого сравнения приведены на рисунке. Кружочки соответствуют данным эксперимента ГЕРМЕС, а треугольники соответствуют данным эксперимента КЛАС. Можно видеть, что такое масштабирование данных приводит к согласию результатов экспериментов друг с другом. Это согласие позволяет сделать заключение о слабой зависимости асимметрии $A_{LU}^{\sin\phi}$ от энергии пучка.

Теперь переходим к результатам изучения асимметрий, измеренных при рассеянии неполяризованного пучка электронов на поперечно поляризованной водородной мишени. Сечение (а также асимметрия) полуинклюзивного образования адронов в таких реакциях содержит спин-независимую и спин-зависимую части. Первая часть

содержит два слагаемых, зависящих от $\cos \phi$ и $\cos 2\phi$, а вторая часть пропорциональна сумме пяти синусоидальных слагаемых. Три (среди них асимметрия Сиверса и асимметрия Коллинза) из пяти асимметрий выражаются через ФР и ФФ ведущего твиста, оставшиеся две асимметрии – величины твиста 2.

Асимметрия Сиверса зависит от свертки ФР Сиверса f_{1T}^\perp и обычной ФФ D_1 . Асимметрия Коллинза зависит от свертки ФР трансверсити h_1 и ФФ Коллинза H_1^\perp .

Первые результаты измерения асимметрий на поперечно поляризованной мишени были основаны на статистике событий менее одного миллиона, полученные в первые месяцы работы эксперимента ГЕРМЕС с поперечно поляризованной мишенью. Определялась азимутальная асимметрия, которая рассматривалась как функция двух угловых переменных ϕ и ϕ_5 . Эта асимметрия фитировалась суммой двух слагаемых, имеющих два типа синусоидальных зависимостей, соответствующих асимметриям Сиверса и Коллинза. Исследовался также возможный вклад остальных типов асимметрий. На этом рисунке представлены извлеченные асимметрии Коллинза и асимметрии Сиверса для π^+ и π^- мезонов в зависимости от переменных x и z . Это был первый опыт разделения этих асимметрий.

Ненулевые значения асимметрии Коллинза предполагают, что ФР трансверсити и ФФ Коллинза не равны нулю. Интересное наблюдение состояло в том, что асимметрия Коллинза для π^- мезонов имела противоположный знак по отношению к асимметрии Коллинза для π^+ мезонов и, самое главное, ее абсолютная величина превышала абсолютную величину асимметрии для π^+ мезонов. Различие знака асимметрий ожидалось ранее имея в виду аналогию между ФР h_1 и ФР g_1 . Большие отрицательные значения асимметрии для π^- мезонов не ожидались. Одним из объяснений такого наблюдения могло бы быть – наличие существенной величины абсолютного значения подавленной ФФ Коллинза, но с противоположным знаком по отношению к лидирующей ФФ Коллинза.

Средняя величина асимметрии Сиверса для π^+ мезонов отлична от нуля и положительна. Это измерение являлось первым доказательством (хотя и ограниченной статистической точности) существования Т-нечетной функции распределения партонов. Для π^- мезонов величина асимметрии сопоставима с нулем. Далее я покажу результаты измерения асимметрий Сиверса и Коллинза на полной статистике накопленной в эксперименте. Это позволило изучить асимметрии не только для заряженных пионов, но также для нейтральных пионов и заряженных каонов. Ввиду недостатка времени, далее я представлю результаты в несколько сокращенном виде.

На этом рисунке представлена асимметрия Сиверса для пионов и заряженных каонов в зависимости от переменных x , z и P_\perp . Интересным наблюдением здесь является превышение асимметрии для K^+ мезонов над асимметрией для π^+ мезонов. Это вызвало некоторую критику от наших коллег из эксперимента КОМПАСС, которые в то время работали с данными полученными на поперечно поляризованной дейтериевой мишени и все асимметрии были очень малы. В настоящее время, после набора данных на поперечно поляризованной водородной мишени, эксперимент КОМПАСС подтверждает результат о соотношении асимметрий для K^+ и π^+ мезонов.

На данном рисунке представлена асимметрия Коллинза для пионов и заряженных каонов в зависимости от переменных x , z и P_{\perp} . Здесь в принципе все результаты только подтверждают (с существенно лучшей статистической точностью) результаты полученные на малой статистике и которые я уже показывал.

На данном рисунке показано сравнение результатов экспериментов ГЕРМЕС и КОМПАСС по асимметрии Сиверса. Важное наблюдение – асимметрии в эксперименте ГЕРМЕС превышают асимметрии измеренные в эксперименте ГЕРМЕС. Это по-видимому связано с Q^2 -эволюцией функции Сиверса. На следующем рисунке приведено сравнение результатов экспериментов ГЕРМЕС и КОМПАСС по измерению асимметрий Сиверса для K^+ и π^+ мезонов. Как я уже говорил, результаты КОМПАСС подтверждают ранние результаты эксперимента ГЕРМЕС.

Наконец я перехожу к последней теме моего сообщения – измерению азимутальной асимметрии в полуинклюзивном образовании пары пионов. На рисунке приведен схематическая диаграмма, объясняющая используемые кинематические переменные. Я не буду останавливаться на детальном объяснении этих переменных и на выражениях для сечения и асимметрии в этом процессе. Скажу только, что асимметрия зависит от произведения ФР трансверсити и двухадронной ФФ. Таким образом этот процесс обеспечивает более простой метод измерения ФР трансверсити, чем извлечение из асимметрии Коллинза, где трансверсити находится под знаком интеграла по поперечным импульсам. На этом рисунке приведены результаты извлечения этой двухадронной асимметрии для $\pi^+\pi^-$ пары в зависимости от переменных $M_{\pi\pi}$, x и z . Асимметрия положительна во всей области изменения трех переменных. Это противоречит предсказанию модели Джаффе.

Результаты подтверждены измерениями в эксперименте КОМПАСС.

В заключение я представлю основные результаты диссертационной работы, которые выносятся на защиту:

Впервые изучены односпиновые азимутальные асимметрии в инклюзивном ГНР неполяризованных электронов и позитронов на поперечно поляризованной мишени с целью поиска сигнала двухфотонного обмена. На уровне экспериментальных неопределенностей, составляющих величину порядка 10^{-3} , сигнал двухфотонного обмена не обнаружен.

Впервые измерены спин-зависимая структурная функция g_2 и виртуальная асимметрия A_2 протона с использованием газовой поляризованной водородной мишени. Результаты измерений хорошо согласуются с наиболее статистически обеспеченными на данный момент результатами измерений, выполненными на сложных ядерных мишенях, в СЛАК и сопоставимы с Вандзура-Вильчек вкладом в функцию $g_2(x)$.

Получена экспериментальная оценка величины интеграла от функции $g_2(x)$ по измеренной области переменной x при $Q^2 = 5 \text{ ГэВ}^2$, которая не противоречит правилу сумм Буркхардта-Коттингема. Произведена оценка второго момента твист 3 вклада в функцию $g_2(x)$ при $Q^2 = 5 \text{ ГэВ}^2$, величина которого не противоречит расчетам в рамках КХД на решетке.

Впервые измерены односпиновые азимутальные асимметрии в полуинклюзивном

образовании пионов при рассеянии неполяризованных электронов на продольно поляризованной водородной мишени. Обнаружена положительная асимметрия $A_{UL}^{\sin \phi}$ для π^+ и π^0 мезонов. Асимметрия ведущего твиста $A_{UL}^{\sin 2\phi}$ сопоставима с нулем для всех типов пионов.

Впервые измерены односпиновые азимутальные асимметрии в полуинклюзивном образовании пионов при рассеянии неполяризованных электронов на продольно поляризованной дейтериевой мишени. Асимметрия $A_{UL}^{\sin \phi}$ для π^+ , π^0 и K^+ мезонов положительна. Асимметрия ведущего твиста $A_{UL}^{\sin 2\phi}$, также как и в случае электророждения на протонах, сопоставима с нулем для всех типов мезонов.

Впервые извлечены односпиновые азимутальные асимметрии в полуинклюзивном образовании заряженных пионов на продольно поляризованной, по отношению к направлению виртуального фотона, водородной мишени.

Впервые измерены односпиновые азимутальные асимметрии в полуинклюзивном образовании пионов при рассеянии продольно поляризованных электронов на неполяризованной водородной мишени. Асимметрия $A_{LU}^{\sin \phi}$ для π^+ и π^0 мезонов положительна, но сопоставима с нулем для π^- мезонов.

Впервые измерены односпиновые азимутальные асимметрии в полуинклюзивном образовании пионов и заряженных каонов при рассеянии неполяризованных электронов на поперечно поляризованной водородной мишени. Измерения асимметрии как функции двух угловых переменных ϕ и ϕ_S позволили впервые извлечь асимметрию Сиверса и асимметрию Коллинза.

Асимметрия Сиверса для π^- мезона сопоставима с нулем, а для $\pi^{+(0)}$ и $K^{+(-)}$ мезонов асимметрия положительна. Асимметрия Сиверса для K^+ мезона превышает асимметрию для π^+ мезона.

Асимметрия Коллинза положительна для π^+ и K^+ мезонов, отрицательна для π^- мезонов, сопоставима с нулем для π^0 и K^- мезонов. Асимметрия для π^- мезона имеет противоположный знак по отношению к асимметрии для π^+ мезона и имеет большую абсолютную величину. Такое соотношение можно объяснить, если функции предпочтительной и подавленной фрагментации Коллинза связаны соотношением $H_1^{\perp, unfav} \simeq H_1^{\perp, fav}$.

Впервые измерена односпиновая азимутальная асимметрия в полуинклюзивном образовании пары пионов при рассеянии неполяризованных электронов на поперечно поляризованной водородной мишени. Асимметрия положительна во всей области масс пары мезонов, что противоречит предсказанию модели Джаффе. Измерение данной асимметрии дает второй способ измерения функции $h_1(x)$, который является более простым, чем способ извлечения этой функции из асимметрии Коллинза.

Спасибо за внимание!

Тюрин Н.Е.: Коллеги, вопросы к диссертанту по докладу?

Член Диссертационного совета, Петров В.А.:

В какой области измерялись асимметрии? Где они больше выражены, в области фрагментации тока или в области фрагментации мишени?

Коротков В.А.:

Все измерения проводились только в области фрагментации тока. Область фрагментации мишени – это очень тяжелая область для измерений.

Член Диссертационного совета, Мочалов В.В.:

У меня вопрос: насколько я знаю в этом году опубликованы новые результаты ГЕРМЕСа по двухфотонному вкладу.

Коротков В.А.:

Нет, Вы наверное имеете в виду эксперимент ОЛИМПУС в ДЕЗИ?

Мочалов В.В.:

Да, ОЛИМПУС.

Коротков В.А.:

В ОЛИМПУСе измеряли упругое рассеяние $ep \rightarrow ep$. Проводилось сравнение сечений e^+p и e^-p . Показано, что учет двухфотонного обмена очень существенен. Но к результатам ГЕРМЕСа это не имеет отношения. В диссертации рассматривался вопрос о вкладе двухфотонного обмена в инклюзивный глубоконеупругий процесс, а в ОЛИМПУСе измерялся вклад в упругую реакцию.

Член Диссертационного совета, Герштейн С.С.:

Как вы думаете, решен все-таки вопрос со «спиновым кризисом» или пока еще нет?

Коротков В.А.:

С одной стороны считается, что решен, но решен принципиально – «кризиса» нет. С другой стороны, насколько я понимаю до сих пор идет обсуждение как правильно сделать декомпозицию спина, т.е. как определить часть переносимую глюонами, переносимую орбитальным угловым моментом. Насколько я понимаю есть некоторые неоднозначности в теоретическом понимании декомпозиции. Ну и кроме того, численных значений пока нет, кроме доли переносимой кварками. С глюонами ситуация менее ясная. Ну и например, считается что функция Сиверса связана с орбитальным моментом, но как из этой функции получить часть переносимую орбитальным угловым моментом не ясно.

Герштейн С.С.:

То есть вы считаете, что прежде всего дело за теоретиками?

Коротков В.А.:

Да, пожалуй так. Нет пока ясности как измерить долю спина переносимую орбитальным угловым моментом.

Тюрин Н.Е.:

Давайте закончим с вопросами. Теперь нужно заслушать заключение организации где выполнялась диссертационная работа, а также отзывы ведущей организации и

официальных оппонентов.

Ученый секретарь Диссертационного совета Рябов Ю.Г.

Заключение организации принято на заседании научного семинара Отделения экспериментальной физики НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ. Присутствовало на семинаре 19 человек, среди них один член-корреспондент РАН, 8 докторов и 7 кандидатов физико-математических наук. Результаты голосования: «за» - 19 человек, «против» - 0 человек, «воздержались» - 0 человек, протокол № 10/17 от 8 сентября 2017 г. В заключении говорится:

В диссертационной работе получены следующие результаты:

- Впервые изучены односпиновые азимутальные асимметрии в инклюзивном глубоконеупругом рассеянии электронов и позитронов на поперечно поляризованной водородной мишени с целью поиска сигнала двухфотонного обмена. В пределах экспериментальных неопределенностей, которые составляют величину порядка 10^{-3} , азимутальные асимметрии как в пучке электронов, так и в пучке позитронов сопоставимы с нулем. Сигнал двухфотонного обмена не обнаружен.
- Впервые измерены спин-зависимая структурная функция g_2 и виртуальная асимметрия A_2 с использованием газовой поляризованной водородной мишени. Это выгодно отличает данные измерения от аналогичных измерений в СЛАК, ЦЕРН, лаборатории Джефферсон, где использовались твердотельные мишени для которых необходимы учет ядерных эффектов и коэффициента разбавления существенно меньшего единицы. Измерения проведены в кинематической области $0.004 < x < 0.9$ и $0.18 \text{ ГэВ}^2/c^2 < Q^2 < 20 \text{ ГэВ}^2/c^2$. Интеграл функции $g_2(x)$, в измеренной области переменной x , сопоставим с нулем, что согласуется с правилом сумм Буркхардта-Коттингема. Второй момент твист-3 вклада в функцию $g_2(x)$ в пределах экспериментальных неопределенностей сопоставим с нулем, что согласуется с ожиданием его малости из расчетов на КХД решетке.
- Впервые измерены односпиновые азимутальные асимметрии в полуинклюзивном образовании пионов при рассеянии неполяризованных электронов на продольно поляризованной водородной мишени. Впервые измерены односпиновые азимутальные асимметрии в полуинклюзивном образовании пионов и каонов при рассеянии неполяризованных электронов на продольно поляризованной дейтериевой мишени.
- Впервые измерены односпиновые азимутальные асимметрии в полуинклюзивном образовании пионов при рассеянии продольно поляризованных электронов на неполяризованной водородной мишени. Данная асимметрия представляет существенный интерес с точки зрения изучения роли высших твистов в описании структуры нуклона.
- Впервые измерены односпиновые азимутальные асимметрии в полуинклюзивном образовании пионов и заряженных каонов при рассеянии неполяризованных электронов на поперечно поляризованной водородной мишени. Измерения позволили разделить два существенных механизма ответственных за такие асимметрии. Ненулевые асимметрии Коллинза означают ненулевые значения функции фрагментации Коллинза и функции распределения кварков трансверсити.

Публикация этих данных привела впоследствии к первому определению функции распределения трансверсити. Ненулевые значения асимметрии Сиверса означают ненулевые значения функции распределения Сиверса, что может служить указанием на ненулевой орбитальный угловой момент кварков в нуклоне.

- Впервые измерены односпиновые азимутальные асимметрии в полуинклюзивном образовании пары пионов при рассеянии неполяризованных электронов на поперечно поляризованной водородной мишени. Ненулевое значение этой асимметрии открыло возможность к измерению функции распределения трансверсити вторым независимым способом.

Диссертация «Изучение азимутальных асимметрий в процессах глубоконеупругого рассеяния электронов (позитронов) на протонах и дейтронах в эксперименте ГЕРМЕС и спиновая структура нуклона» рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий.

Тюрин Н.Е.: Спасибо. Рассмотрим отзыв ведущей организации.

Ученый секретарь Диссертационного совета Рябов Ю.Г.:

Ведущая организация – «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» также дала положительное заключение о диссертационной работе Короткова В.А.:

В диссертационной работе В.А. Короткова представлен обширный цикл исследований азимутальных асимметрий и спиновой структуры нуклона на экспериментальной установке ГЕРМЕС в инклюзивном и полу-инклюзивном глубоко-неупругом рассеянии электронов (позитронов) на водородной или дейтериевой мишенях. При этом хотя бы один из участников взаимодействий был поляризован, электронный (позитронный) пучок – продольно, а ядра мишени – или продольно, или поперечно. Результаты исследований опубликованы в 12 журнальных статьях, из которых 11 являются официальными публикациями сотрудничества ГЕРМЕС. Одно-спиновые азимутальные асимметрии в полу-инклюзивных процессах образования пионов, заряженных каонов и пар $\pi^+\pi^-$ измерены впервые. Структурная функция нуклона g_2 и виртуальная асимметрия A_2

впервые измерены на водородной мишени. Значимых отклонений от нуля одно-спиновых асимметрий в инклюзивном ГНР неполяризованных электронов (позитронов) на поперечно поляризованной водородной мишени, к которым может приводить двух-фотонный обмен, найдено не было, при этом точность их измерения была улучшена на порядок величины по сравнению с предыдущими работами.

Далее перечисляются содержания глав диссертации. (Отзыв имеется в диссертационном деле).

Текст автореферата соответствует содержанию диссертации. Все результаты, выносимые автором на защиту, в полной мере представлены в публикациях указанных в автореферате. Основные результаты диссертации являются официальными результатами международного сотрудничества ГЕРМЕС, что подтверждает их достоверность.

В качестве замечаний к диссертационной работе можно отметить следующее:

- Во 2-й главе не указан источник информации и неопределенности импульсов электронного пучка, представленных в Табл. 2.2.
- В 3-й главе на стр. 90 не обсуждается причина и возможное влияние на результаты небольшой, но значимой сдвижки реконструированной величины массы π^0 мезона от ее номинального значения.
- В 4-й и 5-й главах для рождения π^+ и π^0 мезонов на протонах были найдены значимо отличные от нуля асимметрии, а асимметрии для π^- мезонов оказались неотличимы от нуля. Было бы интересно проанализировать вклад и возможное влияние процессов одно-пионного рождения, поскольку для рождения π^+ и π^0 мезонов на протонах такое рождение возможно ($ep \rightarrow ep\pi^+$, $ep \rightarrow ep\pi^0$), а для π^- мезонов нет канала одно-пионного рождения.
- В 4-й и 5-й главах для фитирования, приведенного на рис. 4.6, 4.7, 5.2, не указаны величины χ^2 и числа степеней свободы (NDF). В 6-й главе для фитирования, приведенного на стр. 180, 209 и в Табл. 6.1, приведены только отношения χ^2/NDF , что недостаточно для оценки качества фитирования.
- В 6-й главе на рис. 6.14 видна большая переоценка Монте Карло моделированием вклада K_S^0 мезонов в распределение инвариантных масс пар $\pi^+\pi^-$, но не приведено обсуждения причин и возможного влияния на результаты этого расхождения данных и Монте Карло моделирования.
- В заключении на стр. 219 пункт 3 основных результатов сформулирован как «Вычислен интеграл ...», что может быть понято как теоретический результат. Было бы точнее сформулировать этот пункт как «Получена (извлечена, оценена) экспериментальная величина значения интеграла ...».
- Нет ссылки на «Particle Data Group», хотя аббревиатура PDG дважды встречается в тексте без расшифровки.

Отмеченные выше недостатки не влияют на положительную оценку диссертационной работы, которая является глубоким и детальным научным исследованием. Автор провел цикл измерений и всесторонне проанализировал полученные результаты. Совокупность представленных в диссертации результатов можно оценить как новое крупное научное достижение в развитии физики высоких энергий.

По своей актуальности, новизне полученных результатов и важности научных выводов диссертация Короткова В.А. «Изучение азимутальных асимметрий в процессах глубокоэластичного рассеяния электронов (позитронов) на протонах и дейтронах в эксперименте ГЕРМЕС и спиновая структура нуклона» соответствует всем критериям, установленным в «Положении о порядке присуждения ученых степеней», утвержденном постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 с дополнениями от 21 апреля 2016 года № 335. Коротков Владислав Александрович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий.

Далее подписи лиц ответственных за отзыв.

Председатель Диссертационного совета, Тюрин Н.Е.:

Владислав Александрович, попробуйте дать кратко ответ на замечания.

Коротков В.А. отвечает на замечания:

Данные, приведенные в Табл. 2.2, являлись результатом обсуждений на еженедельных совещаниях сотрудничества ГЕРМЕС. Неопределенность импульсов – порядка нескольких МэВ. Нужно отметить, что величины, представленные в таблице, не использовались для получения каких-либо результатов, приведенных в диссертации. Таблица приведена исключительно в иллюстративных целях.

Центральное значение величины реконструированной массы π^0 мезона действительно сдвинуто на 0.6 МэВ от ее номинального значения. Однако значение этой величины использовалось только для определения π^0 «mass window». Величина асимметрии практически не зависела от некоторых вариаций π^0 «mass window». Это показано, например, на рис. 4.1 (стр. 119).

Вклад процессов одно-пионного рождения сильно вымирает с ростом W^2 , а для анализа данных использовались события с $W^2 > 10 \text{ ГэВ}^2$. Кроме того, данный вопрос относится к интерпретации результатов, а не к самим измерениям асимметрий, приведенным в диссертации.

На рис. 6.14 маркеры соответствуют экспериментальному распределению, которое размыто конечным разрешением реконструированных импульсов пионов. Гистограмма соответствует результатам моделирования распределения инвариантных масс с помощью программы RUTHIA без учета каких-либо экспериментальных искажений. Кажущееся расхождение возможно вызвано не вполне четким описанием представленных на рис. 6.14 результатов.

Я согласен с остальными замечаниями ведущей организации.

Тюрин Н.Е.:

Спасибо. Заслушаем отзыв официального оппонента Дорохова А.Е.

Выступает официальный оппонент Дорохов А.Е.:

Изучение структуры нуклона – это конечно фундаментальная задача физики.

Это изучение постоянно преподносит сюрпризы, начиная с измерения формфакторов протона и последние результаты о разногласии величины радиуса протона измеренные двумя методами. Диссертация Короткова Владислава Александровича посвящена изучению спиновой структуры нуклона. Это очень актуальная тема, здесь много неизученных до конца проблем. В докладе говорилось

о проблеме обнаруженной в результате изучения структурной функции протона g_1 в эксперименте ЕМС – доля спина протона переносимая кварками оказалась значительно меньше чем ожидалось в некоторых наивных оценках. В наивной кварковой модели весь спин нуклона переносится кварками – 100 %. В моделях, развитых в 60-х годах Боголюбовым, оценивалось что кварки могут переносить 60 %. Однако эксперимент показывает, что кварки переносят только одну треть спина нуклона. Это до сих пор не нашло еще внятного решения. Эксперимент ГЕРМЕС – это конечно эксперимент нового поколения по сравнению с экспериментом ЕМС. Это связано и с наличием газовой поляризованной мишени, которая может иметь как продольную, так и поперечную поляризацию, и с наличием как электронного, так и позитронного пучков. И сотрудничество ГЕРМЕС при существенной роли Короткова

В.А. в обработке и анализе данных вполне использует эти преимущества для изучения новых аспектов спиновой структуры нуклона, в частности изучая новые функции распределения и фрагментации кварков, которые зависят не только от продольного, но и от поперечного импульса. Работоспособность КХД сильно зависит от теоремы факторизации, когда удается разделить эффекты малых и больших расстояний. Эффекты малых расстояний учитываются расчетами жестких реакций в рамках пертурбативной КХД. Большие расстояния не поддаются расчетам и эти эффекты можно учесть только введением некоторых функций которые можно измерить, но не рассчитать. Актуальность данной диссертационной работы заключается в том, что она именно направлена на измерение этих неизвестных функций. Далее я зачитаю результативную часть моего отзыва. Во первых, достоверность результатов приведенных в диссертации не вызывает сомнений, из-за авторитета эксперимента ГЕРМЕС, который здесь представляет Владислав Александрович. Кроме того, представленные результаты подтверждены уже в ряде других экспериментов. Существенных замечаний к диссертации у меня нет. Есть некоторые мелкие недостатки:

- 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 ГЕРМЕС и других будут уточнены и расширены по кинематике.

Мое заключение следующее:

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.

Председатель Диссертационного совета, Тюрин Н.Е.:

Спасибо! Владислав Александрович, вам слово для ответа.

Коротков В.А. отвечает на замечания:

Я согласен с замечаниями оппонента А.Е. Дорохова.

Председатель Диссертационного совета, Тюрин Н.Е.:

Заслушаем отзыв оппонента Куденко Ю.Г.

Выступает официальный оппонент Куденко Ю.Г.:

Много уже сказано, не хочется повторяться. Я наверное еще раз просто хочу подчеркнуть, что диссертация Короткова В.А. – это очень серьезное исследование, очень много интересных результатов, многие из которых получены впервые и прекрасно подтверждены другими экспериментами. Конечно сама актуальность проблемы, важность проблемы не вызывает никаких сомнений. Конечно спиновая

структура нуклона очень важна, спиновый кризис он до конца не решен. Есть определенные движения в эту сторону, но окончательного решения еще нет.

Я хотел бы здесь высказать свое мнение по поводу того, что в диссертации наиболее интересно. Все интересно, но вот что самое интересное – это вот вторая часть выступления, на нее конечно немного больше времени нужно, это измерение односпиновых асимметрий в полуинклюзивном рождении пионов и каонов. Действительно это очень интересные результаты, применялась газообразная мишень причем с разными поляризациями, продольная поляризация, поперечная поляризация. Результаты конечно требуют еще своего осмысления. Конечно наиболее интересная часть исследований – это измерения с поперечно поляризованной мишенью. И здесь важную роль играл Владислав Александрович. Он разрабатывал физическую программу этих исследований и позднее занимался анализом полученного экспериментального материала.

Я не буду надолго задерживать ваше внимание и перейду к ряду замечаний.

Диссертация в целом написана очень качественно, там есть конечно некоторые опечатки, но в целом все тщательно выписано. Но конечно замечания есть, в любой работе можно их найти. Вот я хочу огласить мои замечания:

- Не совсем понятна чувствительность полученных данных к различным теоретическим моделям. Например, на рис. 4.11 три модели (киральная кварк-солитонная, кварк-дикварковая, пертурбативная КХД (pQCD)) практически показывают одинаковую зависимость асимметрии от параметра x . Таким образом, измеренная асимметрия $A_{UL}^{\sin \phi}$ не позволяет сделать какого-либо выбора между моделями даже при существенном уменьшении статистических и систематических ошибок. Возникает вопрос, какую значимую физическую информацию можно получить из этих измерений? В тоже время на рис. 4.12 для асимметрии $A_{UL}^{\sin 2\phi}$ показаны расчеты только для кварк-солитонной модели. Предсказания других моделей почему-то не приводятся.
- На стр. 182-184 приводятся значения асимметрии Коллинза для положительных и отрицательных пионов. Указаны только величины статистических ошибок. На рис. 6.3 также отсутствуют систематические ошибки, и в тексте не обсуждаются их величины, а также их возможная зависимость от параметров x и z . Утверждения о первом доказательстве существования Т-нечетной функции распределения партонов, сделанное на основе величины асимметрии Сиверса на стр. 184, кажется не очень убедительным. Без систематических ошибок эффект составляет 4σ . Какая величина эффекта будет после правильного учета систематических погрешностей – вопрос открытый. Удивительным является то, что и оригинальная статья коллаборации ГЕРМЕС (Phys.Rev.Lett. 94 (2005) 012002) не приводит систематической ошибки.
- На стр. 208, рис. 6.14 показан спектр инвариантных масс $\pi^+\pi^-$ в эксперименте ГЕРМЕС и результат моделирования с использованием RUTHIA6. В эксперименте не наблюдается пик распада короткоживущего нейтрального каона на два пиона, а в моделировании он присутствует. Это различие не пояснено в тексте диссертации.
- Ряд рисунков выполнены в довольно мелком формате, что затрудняет понимание

показанных результатов. Например, рисунки 5.10 и 5.11, хотя они и взяты из журнальных публикаций, можно было бы увеличить. Сейчас кривые на этих рисунках, соответствующие различным моделям, практически неотличимы.

Но все эти замечания не могут изменить общее хорошее впечатление от этой диссертации и никак не влияют на итоговую оценку этого фундаментального труда. По-моему диссертация хорошо логически выстроена и представляет собой логически законченное исследование, которое проводилось на протяжении многих лет и привело к получению важных интересных результатов. Качество работы, уровень и объем исследований оставляет хорошее впечатление. Достоверность результатов не вызывает сомнений. Диссертация представляет собой объемную работу с изложением многих экспериментальных деталей, методов анализа данных и моделирования физических процессов, что отражает высокий экспериментальный уровень автора и его глубокое понимание проблемы. Хочу сказать, что результаты, представленные в диссертации, полезны для дальнейших исследований структуры нуклона и могут быть использованы при проведении экспериментов в различных лабораториях. Работа оформлена довольно аккуратно, хорошо проиллюстрирована, основные положения и полученные результаты ясно изложены, выводы четко сформулированы. Основные результаты и положения, вошедшие в диссертацию, доложены автором на международных конференциях и опубликованы в реферируемых журналах. Библиография полно представляет исследования в этой области и насчитывает 358 публикаций. Это могло бы служить хорошей основой для написания обзора по данной тематике. Автореферат полно и правильно отражает содержание диссертации.

Ну и в заключение, принимая во внимание вышеизложенное, считаю, что диссертация Владислава Александровича Короткова «Изучение азимутальных асимметрий в процессах глубоконеупругого рассеяния электронов (позитронов) на протонах и дейтронах в эксперименте ГЕРМЕС и спиновая структура нуклона» полностью удовлетворяет всем требованиям Высшей аттестационной комиссии предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор несомненно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий.

Председатель Диссертационного совета, Тюрин Н.Е.:

Спасибо! Владислав Александрович, вам слово для ответа на замечания.

Коротков В.А. отвечает на замечания:

Согласен, различие между моделями мало, но это скорее проблемы моделей, а не экспериментальных результатов. Значимая физическая информация представленных измерений заключается в том, что они являются первым наблюдением ненулевых односпиновых азимутальных асимметрий в полуинклюзивных процессах ГНР лептонов на нуклонах. По сути они подтвердили (вслед за результатами адронных экспериментов типа E704) существование ФР и ФФ, зависящих от поперечного импульса.

Величина систематической ошибки не указана в самом численном результате, однако на стр. 181 приводится обсуждение систематических неопределенностей измерения.

Отмечается, что наибольший вклад в величину систематической неопределенности вносит неопределенность измерения поляризации мишени равной 8% (нормировочная неопределенность). Величины систематических неопределенностей от других источников (акцептанс, размытие кинематических переменных, радиационные эффекты КЭД) оценивались моделированием эксперимента и оказались пренебрежимо малы по сравнению со статистическими ошибками. Напомню, что речь идет об асимметриях, извлеченных на очень малой статистике (около 10% от полной). В результатах, полученных на полной статистике, значения всех систематических ошибок указаны.

На вопрос о результатах, приведенных на рис. 6.14, я уже ответил ранее.

Недостаточно крупный формат некоторых рисунков связан с тем, что они взяты из публикаций других авторов. Все оригинальные рисунки выполнены в достаточно крупном формате.

Тюрин Н.Е.:

Юрий Григорьевич, Вы удовлетворены ответами на Ваши замечания?

Куденко Ю.Г.:

Да, я удовлетворен.

Тюрин Н.Е.:

Заслушаем третьего оппонента, Виталия Алексеевича Огорокова.

Выступает официальный оппонент Огороков В.А.:

По поводу актуальности исследования уже много было сказано. Хочу дополнить, что проблема изучения структуры нуклона – это один из краеугольных камней программы RHIC. Актуальность исследований не вызывает сомнения. Позволю себе высказаться о новизне исследований, представленных 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 глубоконеупругое рассеяние электронов (позитронов) на протонах.

Таким образом, полученные в диссертации результаты вносят существенный вклад в систематическое изучение спиновой структуры нуклона.

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

В качестве замечаний необходимо отметить следующее.

- В табл. 2.2 на стр. 58 приведены значения импульса лептонного пучка без погрешностей.
- 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.
- 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.
- 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. 4.5, 4.7 соответственно. Данное замечание справедливо и для рис. 5.2 в п. 5.1.
- Сравнение результатов экспериментов ГЕРМЕС и КОМПАСС 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.
- 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 асимметрия для K^+ мезонов в области больших Q^2 систематически ниже асимметрий в области малых Q^2 , требует корректировки и / или дополнительных пояснений.
- 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.
- 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).

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

Диссертация Короткова 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 полуинклюзивных 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.

Председатель Диссертационного совета, Тюрин Н.Е.:

Спасибо! Владислав Александрович, вам слово для ответа.

Коротков В.А. отвечает на замечания:

На вопрос относительно табл. 2.2 я уже ответил ранее.

Я считаю, что термины «тенденции» и «удовлетворительно согласуются» до некоторой степени субъективны. По моему мнению, при уровне экспериментальных погрешностей, указанных на рисунках, и то и другое высказывание можно считать правильным.

В тексте диссертации не предлагается сравнить результаты, приведенные на рис. 5.3 и рис. 5.9. В тексте представлено утверждение приведенное в опубликованной работе эксперимента КОМПАСС.

Имелось в виду, что в двух точках асимметрия для области больших Q^2 существенно ниже асимметрии для области малых Q^2 (различие порядка нескольких σ), а во всех других точках центральное значение асимметрии для области больших Q^2 ниже центрального значения асимметрии для области малых Q^2 (хотя их погрешности перекрываются).

С остальными замечаниями оппонента О कोरोкова В.А. я согласен.

Трошин С.М.:

Я хотел сказать, что я неоднократно пересекался с Владиславом Александровичем на международных конференциях, слушал его доклады. У меня сложилось мнение, что Владислав Александрович давно является доктором наук. Оказывается это не так. Я считаю, что Владислав Александрович уже давно должен быть доктором физ.-мат. наук.

Герштейн С.С.:

Мне кажется, что работа выполнена на очень высоком научном уровне. Автор конечно, безусловно заслуживает искомой степени. Я просто хотел отметить, в заключении указывается, в письме группы ГЕРМЕС подтверждается, что все результаты получены при определяющей роли автора диссертации. Я бы добавил здесь и следующее вот в списке литературы автора видно, что около 10 докладов на различных конференциях были сделаны по поручению этой группы ГЕРМЕС. Это конечно свидетельствует без всякого письма о большой роли диссертанта в получении результатов.

Второе, что я хотел бы сказать, поскольку имеются нерешенные проблемы, то большую ценность для науки представлял бы обзор, обзор ситуации которая сложилась на данный момент. В ряде случаев хорошие обзоры помогали найти правильную теорию. Обзор был бы очень полезен. Конечно, это очень большой труд. Но вот после трудов над диссертацией, может быть с разгону написать такой обзор? Было бы очень полезно.

Тюрин Н.Е.: Спасибо. Владислав Александрович, Вам заключительное слово.

Коротков В.А.: В заключение я хотел бы выразить мою сердечную благодарность сотрудникам ИФВЭ, которые принимали участие в эксперименте ГЕРМЕС, за совместную работу. Всего за время проведения эксперимента принимали участие восемь человек: В.В. Аммосов, В.В. Брызгалов, В.А. Гапиенко, Г.С. Гапиенко, А.А. Иванилов, Ю.И. Саломатин, Б.В. Чуйко. К сожалению многие из них уже ушли из жизни.

Я благодарен многим участникам эксперимента ГЕРМЕС из разных стран, вместе с которыми мы работали над различными вопросами эксперимента, за сотрудничество. Я благодарен многим физикам, которые не участвовали в эксперименте, но обсуждения с которыми помогли глубже понять многие вопросы спиновой физики. Я благодарен официальным оппонентам, которые взяли на себя тяжелый труд по чтению и рецензированию моей диссертационной работы.

Я искренне благодарен руководству ИФВЭ Иванову С.В., Зайцеву А.М., Тюрину Н.Е. за многолетнюю поддержку участия группы ИФВЭ в эксперименте ГЕРМЕС.

Я благодарен также руководству ДЕЗИ Цойтен и ДЕЗИ Гамбург за моральную и финансовую поддержку работы группы ИФВЭ в эксперименте ГЕРМЕС.

Тюрин Н.Е.: Спасибо. Коллеги, переходим к голосованию. Теперь мы выбираем счётную комиссию. Есть предложение: Мочалов Василий Вадимович (председатель), Сенько Владимир Александрович, Трошин Сергей Михайлович.

Перерыв на голосование.

Тюрин Н.Е.: Давайте заслушаем результаты нашего голосования.

Председатель счётной комиссии Мочалов В.В.: Роздано бюллетеней - 19, на присутствующих 19 человек, осталось не розданных – 3, в урне бюллетеней – 19, «за» - 19, «против» - нет, недействительных – нет.

Тюрин Н.Е.: Ну что, утвердим результаты голосования?

Диссертационный совет единогласно утверждает результаты голосования.

Тюрин Н.Е.: Теперь мы должны с вами утвердить проект заключения о научном значении диссертации Владислава Александровича. Члены совета ознакомились с проектом заключения? Есть ли какие-либо замечания? Нет. Проведём открытое голосование по проекту Заключения диссертационного совета.. Прошу проголосовать. Спасибо.

Владислав Александрович, поздравляю вас с успешной защитой и желаю вам новых достижений!

Заседание Диссертационного совета завершено.

Председатель
Диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор



Н.Е. Тюрин

Учёный секретарь
Диссертационного совета,
кандидат физико-
математических наук,


Ю.Г. Рябов