

На правах рукописи



Павлов Федор Федорович

**Спиновые явления в нуклон-нуклонном взаимодействии:
релятивистские спиновые эффекты в дейтроне и спиновая
фильтрация в накопительных кольцах**

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2014

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

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник Института
теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН
Николаев Николай Николаевич

Официальные оппоненты: **Узиков Юрий Николаевич**
доктор физико-математических наук,
Объединенный институт ядерных исследований,
ведущий научный сотрудник лаборатории
ядерных проблем им. В.П. Джелепова
Новинский Дмитрий Валерьевич
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник лаборатории
мезонной физики ФГБУ «Петербургский
институт ядерной физики им. Б.П.
Константинова», НИЦ «Курчатовский
институт»

Ведущая организация: ФГБУ «Государственный научный центр
Российской Федерации — Институт физики
высоких энергий»

Защита состоится «04» июня 2014 г. в 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.229.29 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, ауд. 118 главного учебного корпуса.

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

Автореферат разослан «_____» апреля 2014 года.

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



Ермакова Наталья
Юрьевна

Актуальность темы диссертационной работы

В диссертационной работе рассмотрены два класса спиновых явлений, возникающих в нуклон-нуклонном (NN) взаимодействии: релятивистские спиновые эффекты на примере составной системы — дейтрона и поляризационные эффекты в накопительных кольцах, возникающие в результате поляризации нуклонов за счет механизма спиновой фильтрации в поляризованной атомарной водородной мишени.

Релятивистские спиновые эффекты в дейтроне – это и релятивистские поправки к свойствам связанного NN -состояния, и эффекты, возникающие в высокоэнергетических процессах с участием поляризованного дейтрона, в процессах в кинематической области, соответствующей малым междуклонным расстояниям, в процессах с большой передачей импульса. Поэтому требуется адекватное релятивистское описание дейтрона: построение и анализ релятивистской вершинной волновой функции дейтрона при больших относительных импульсах в дейтроне; построение спиновой вершины перехода дейтрона в протон-нейтронную пару в диаграмматике Фейнмана, правильно учитывающую релятивистскую структуру, отвечающую протон-нейтронной системе в S - и D -волновых состояниях; расчет и анализ релятивистских поправок в реакциях с участием дейтрона в релятивистских областях энергий и т.д. В данной диссертационной работе рассматривается ряд ядерных реакций с участием дейтрона, а именно: упругое рассеяние поляризованного нуклона на поляризованном дейтроне при промежуточных и высоких энергиях, глубоконеупругое рассеяние лептонов на дейтроне, упругое электрон-дейтронное рассеяние.

Одним из наиболее важных вопросов современной физики элементарных частиц и атомного ядра является развитие методов релятивистского описания дейтрона как составной системы. Конечно, в целом дейтрон давно и достаточно надежно описан в рамках нерелятивистской квантовой механики, но определенный интерес представляет исследование влияния возможных релятивистских эффектов на его структуру – в полной аналогии с атомной физикой, где, например, малые спин-орбитальные взаимодействия, имеющие релятивистскую природу, являются причиной так называемой тонкой структуры атомных спектров, играющей важную роль в атомной спектроскопии. Большая по объему часть диссертационной работы автора посвящена релятивистским эффектам в спиновой структуре дейтрона. Связанное состояние хорошо определено в нерелятивистской квантовой механике при малой энергии связи. В силу малой энергии связи приближение дейтрона двухнуклонным состоянием должно быть хорошим при переданных импульсах много меньше массы нуклона. Уже в собственно двухнуклонном состоянии возникает проблема релятивистских поправок

типа релятивистской P -волновой нижней компоненты в волновой функции – биспиноре электрона в $1S$ -состоянии атома водорода. Последовательный анализ их роли в дейтроне представляет отдельную интересную и актуальную задачу. Примерами являются релятивистские поправки к такой прецизионной наблюдаемой, как магнитный момент дейтрона, или поправка к спиральной структуре дейтрона, знание которой важно для количественной интерпретации глубоконеупругого рассеяния на продольно поляризованном дейтроне в терминах рассеяния на нейтроне и протоне, и для проверок фундаментального правила сумм Бьёркена.

Как известно, прецизионные измерения NN -рассеяния являются одной из главных задач на всех протонных ускорителях мира. Исследования поляризационных эффектов в NN -взаимодействиях проводятся на встречных пучках и ускорителях высокой энергии в крупнейших международных центрах физики высоких энергий. При извлечении спиновых амплитуд малоизученного протон-нейтронного рассеяния из прецизионных данных по протон-дейтронному и дейтрон-дейтронному рассеянию при релятивистских энергиях дейтрон требует адекватного теоретического описания с выходом за привычное нерелятивистское приближение.

Также имеют огромное значение эксперименты с поляризованными антипротонами, которые могут дать уникальный шанс исследовать малоизученные функции распределения партонной структуры нуклона. Механизм спиновой фильтрации (спинового фильтра) основывается на многократном прохождении накопленного пучка через поляризованную внутреннюю атомарную газовую мишень и отборе компоненты с заданной проекцией спина, и приводит к эффекту поляризации нуклонов только за счет ядерного взаимодействия, а не за счет сверхтонкого взаимодействия с электронами поляризованного атома мишени. Спиновая структура самого нуклона исследована не до конца. Инициированная спиновым кризисом ЕМС (European Muon Collaboration) и необходимостью проверки фундаментального правила сумм Бьёркена, спиральная партонная структура нуклона изучена хорошо. Из всех структурных функций нуклона остается полностью неизученной так называемая трансверсити – функция распределения партонов с поперечной поляризацией в поперечно поляризованном протоне. Прямое измерение трансверсити возможно только в процессе Дрелла-Яна с поперечно поляризованными антипротонами, взаимодействующими с поперечно поляризованными протонами. Именно это основная задача эксперимента, проводимого коллаборацией PAX (Polarized Antiproton eXperiment) на ускорительном комплексе FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) в Центре по изучению тяжелых ионов им. Гельмгольца GSI (Gesellschaft für Schwerionenforschung), г. Дармштадт, Германия. Получить пучки поляри-

зованных антипротонов высокой интенсивности можно только с помощью механизма спиновой фильтрации в накопительных кольцах с внутренней поляризованной мишенью. Однако полное понимание механизма спиновой фильтрации для используемых на опыте атомных мишеней до выполненных в диссертации работ отсутствовало.

Релятивистские поправки в дейтроне ранее оценивались в лестничном приближении к уравнению Бете–Солпитера, в квазипотенциальном подходе в рамках мгновенной, точечной динамики, при учете мезонных токов, в подходе Гросса и т.д. В диссертационной работе используется формализм динамики на световом фронте, в котором дейтрон трактуется как двухнуклонное фоковское состояние. Существенная часть подхода диссертации – это полностью релятивистская проекция связанного состояния на чисто S - и D -волновые состояния, что открывает новые возможности для изучения спиновых и релятивистских явлений в дейтроне.

Поскольку на данный момент не существует общепризнанной однозначной процедуры учета релятивистских эффектов в дейтроне и поскольку диссертационная работа посвящена одному из возможных альтернативных подходов к разумному описанию упомянутых эффектов, то тема диссертационной работы является, безусловно, актуальной.

Цели диссертационной работы

Основной целью диссертационной работы является исследование релятивистских спиновых эффектов в дейтроне, описание различных процессов с его участием при высоких энергиях в формализме светового конуса и оценка релятивистских поправок к нерелятивистским характеристикам дейтрона, а также теоретическое исследование механизма спиновой фильтрации.

Задачи диссертационной работы

Задачами диссертационной работы являются:

- релятивистское описание дейтрона как двухнуклонного фоковского состояния в переменных светового конуса;
- развитие технического аппарата для описания упругого рассеяния поляризованного нуклона на поляризованном дейтроне в переменных светового конуса в области высоких и промежуточных энергий;
- вычисление полного набора спиральных амплитуд NN -рассеяния в базисе светового конуса в реакции однократного упругого рассеяния поляризованного нуклона на одном из нуклонов в дейтроне, и исследование поведения инвариантных амплитуд NN -рассеяния в зависимости от кинетической энергии и переданного импульса;
- теоретическое исследование механизма спиновой фильтрации в накопительных кольцах для получения пучков поляризованных антипротонов;

— расчет структурных функций двухнуклонного фоковского состояния в глубоконеупругих процессах рассеяния лептонов на дейтроне и релятивистских поправок к средней спиральности нуклонов в дейтроне и первому моменту спин-зависимой структурной функции, входящему в правило сумм Бьёркена;

— теоретическое исследование электромагнитных форм-факторов дейтрона и расчет релятивистской поправки к магнитному моменту дейтрона.

Научная новизна результатов диссертационной работы

Автором развит и усовершенствован подход для описания релятивистской теории двухнуклонного фоковского состояния и различных процессов с его участием в переменных светового конуса. Впервые продемонстрирована эффективность данного подхода для описания релятивистских эффектов. Все основные теоретические результаты и релятивистские выражения получены впервые.

Автором показано, что в релятивистской теории продольный 4-вектор поляризации (4-мерное обобщение трёхмерной спиновой волновой функции частицы в её системе покоя) двухнуклонного фоковского состояния неизбежно зависит от инвариантной массы протон-нейтронной пары M , зависящей от относительного импульса нуклонов. Релятивистское описание двухнуклонного фоковского состояния улучшено путем введения такого «бегущего» вектора поляризации, который не использовался в ранних оценках релятивистских эффектов в дейтроне. В предшествующих работах, посвященных исследованию релятивистской теории дейтрона, использовался «внешний» продольный 4-вектор поляризации, зависящий от фиксированной массы дейтрона M_D .

Автором получено разложение амплитуды NN -рассеяния по фермиевским вариантам, и с учетом каждого варианта взаимодействия вычислена полная система спиральных амплитуд в базисе светового конуса. Такое представление спиральных амплитуд в базисе светового конуса ранее не использовалось. Впервые продемонстрирована методика вычисления амплитуды упругого рассеяния поляризованного нуклона на поляризованном дейтроне в формализме светового конуса.

Представлено исчерпывающее по полноте теоретическое исследование и понимание механизма спиновой фильтрации в накопительных кольцах – метода поляризации протонов за счет взаимодействия с внутренней газовой мишенью, который будет применен для получения пучков поляризованных антипротонов на ускорительном комплексе FAIR. Сечение взаимодействия с атомами мишени зависит от взаимной ориентации спинов атома и пучка. Это приводит к спиновому фильтру – преимущественному поглощению частиц с одной поляризацией, так что первоначально неполяризованный

пучок поляризуется. Поляризованные атомы водорода содержат как поляризованные электроны, так и протоны со спинами, поляризованными за счет сверхтонкого взаимодействия в атоме. Задачей диссертационной работы было выяснить относительную роль рассеяния пучка на поляризованных электронах и протонах атома. Основной вывод: в поляризацию пучка в накопительном кольце дает вклад только ядерное взаимодействие пучка с протонами атома, и указан механизм полной взаимной компенсации эффектов взаимодействия с поляризованными электронами атома. Это актуальный вывод, полностью изменивший стратегию эксперимента PAX, предназначенного для ускорительного комплекса FAIR.

Впервые получены следующие релятивистские поправки: к средней спиральности нуклонов в дейтроне; к первому моменту спин-зависимой структурной функции дейтрона, что позволило обобщить известное нерелятивистское выражение, которое экспериментаторы используют в своих расчетах; к магнитному моменту дейтрона, выражение для которого в нерелятивистском приближении переходит в известную формулу Швингера.

Используемый автором подход позволил получить в аналитическом виде релятивистские выражения для форм-факторов двухнуклонного фоковского состояния, что является фундаментальной задачей ядерной физики.

Достоверность результатов диссертационной работы

Достоверность результатов подтверждается согласием теоретических расчетов с экспериментальными данными, совпадением релятивистских выражений в предельных случаях с ранее известными нерелятивистскими выражениями.

Практическая значимость результатов диссертационной работы

Значительный прогресс в создании поляризованных пучков частиц высоких энергий в крупнейших лабораториях мира и исследование спиновых эффектов в дейтроне может дать основу для прямого применения результатов, полученных в данной диссертационной работе. Предложен механизм спиновой фильтрации антипротонов для эксперимента, проводимого коллаборацией PAX (Polarized Antiproton eXperiment) на ускорительном комплексе FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) в Центре по изучению тяжелых ионов им. Гельмгольца GSI (Gesellschaft für Schwerionenforschung), г. Дармштадт, Германия. Результаты данной диссертационной работы можно использовать в будущих экспериментах по получению поляризованных пучков антипротонов в ускорительном комплексе FAIR и экспериментах по рассеянию поляризованных антипротонов на газовых мишенях с поляризованными протонами и дейтронами, которые кардинально улучшат базу экспериментальных данных по спиновым эффектам в антипротон-дейтронном рассеянии. Также результаты, полу-

ченые в данной диссертационной работе, могут быть применены для будущих экспериментов по рассеянию поляризованных протонов и дейтронов, ускоренных в синхротроне COSY (Cooler Synchrotron) в исследовательском центре Юлих (Forschungszentrum Jülich), г. Юлих, Германия.

Научные положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся результаты и выводы диссертационной работы, которые приведены в заключении.

Публикации и апробация диссертационной работы

По результатам настоящей диссертационной работы опубликовано девять печатных работ [1–9], включенных в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией («Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета», «Журнал экспериментальной и теоретической физики», «AIP Conference Proceedings»), и три тезиса докладов [10–12].

Результаты диссертационной работы представлены на рабочем совещании «8th PAX Meeting Workshop on Spin Filtering in Storage Rings» (31 августа–2 сентября 2005 г., г. Хаймбах, Германия); на международном совещании «The International Workshop on Transverse Polarisation Phenomena in Hard Processes Transversity 2005» (Transversity 2005, 7–10 сентября 2005 г., Вилла Ольмо, г. Комо, Италия); на 11-ом международном рабочем совещании по физике спина при высоких энергиях SPIN-05 (DUBNA-SPIN-05, 27 сентября–1 октября 2005 г., г. Дубна, Россия); на 17-ом международном симпозиуме по спиновой физике SPIN-2006 (SPIN-2006, 2–7 октября 2006 г., г. Киото, Япония); на международном рабочем совещании «Workshop on Polarised Antiproton Beams-How?» (29–31 августа 2007 г., г. Уоррингтон, Великобритания); на 21-ом Балдинском международном семинаре по проблемам физики высоких энергий «Релятивистская ядерная физика и квантовая хромодинамика» в Объединенном институте Ядерных Исследований в Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова (Baldin ISHEPP XXI, 10–15 сентября 2012 г., г. Дубна, Россия); на 47-ой Школе ФГБУ «ПИАФ» по физике конденсированного состояния (ФКС-2013, 11–16 марта 2013 г., г. С.-Петербург, Россия).

Содержание и объем диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и пяти приложений. Объем диссертационной работы составляет 160 страниц основного текста, 35 рисунков и 15 таблиц. Список литературы включает 158 наименований. Каждая глава содержит краткие

вводную часть и заключение.

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

В первой главе представлен подход релятивистского описания дейтрона как двухнуклонного фоковского состояния, основанный на известном формализме динамики на световом конусе, при помощи которого был получен ряд интересных результатов в квантовой хромодинамике (КХД) – современной теории сильных взаимодействий. Обосновывается актуальность данного подхода. На дейтрон обобщается техника, развитая ранее в работе [13], для квантово-хромодинамического описания спиновых явлений в эксклюзивном рождении векторных мезонов в глубоконеупругом рассеянии лептонов на протонах. Подробно показана техника светового конуса для описания одночастичных и двухчастичных состояний, рассмотрена параметризация Судакова для расчетов фейнмановских диаграмм. Построены релятивистские вершинные волновые функции перехода дейтрона в протон-нейтронную пару. Рассмотрена спиновая структура двухнуклонного фоковского состояния; построены спиральные состояния для двухнуклонного фоковского состояния в калибровке светового конуса (4-векторы поляризации); рассматриваются матричные элементы оператора спина. Показана нормировка волновой функции двухнуклонного фоковского состояния; проведен анализ матричных элементов вершинных функций двухнуклонного фоковского состояния; для справок приведены различные виды параметризаций нерелятивистских волновых функций дейтрона.

Во второй главе показана методика вычисления амплитуды упругого рассеяния поляризованного нуклона на поляризованном дейтроне в формализме светового конуса. Приводятся результаты вычисления набора спиральных амплитуд NN -рассеяния в базисе светового конуса и методика вычисления релятивистской амплитуды однократного упругого нуклон-дейтронного рассеяния (ND -рассеяния) с применением этого формализма [4, 9]. Вычисление амплитуды NN -рассеяния требует представления её в виде релятивистски-инвариантного разложения по фермиевским вариантам, зависящим от биспиноров взаимодействующих нуклонов, и инвариантным амплитудам F_1-F_5 : $\varphi_{\lambda_2 \nu_2 \lambda_1 \nu_1} = F_1 \cdot S + F_2 \cdot P + F_3 \cdot V + F_4 \cdot A + F_5 \cdot T$, где скалярный вариант: $S = [\bar{u}(p_2, \lambda_2) I u(p_1, \lambda_1)] [\bar{u}(q_2, \nu_2) I u(q_1, \nu_1)]$, псевдоскалярный вариант: $P = [\bar{u}(p_2, \lambda_2) \gamma_5 u(p_1, \lambda_1)] [\bar{u}(q_2, \nu_2) \gamma_5 u(q_1, \nu_1)]$, векторный вариант: $V = [\bar{u}(p_2, \lambda_2) \gamma_\alpha u(p_1, \lambda_1)] [\bar{u}(q_2, \nu_2) \gamma_\alpha u(q_1, \nu_1)]$, аксиально-векторный вариант: $A = [\bar{u}(p_2, \lambda_2) \gamma_5 \gamma_\alpha u(p_1, \lambda_1)] [\bar{u}(q_2, \nu_2) \gamma_5 \gamma_\alpha u(q_1, \nu_1)]$, тензорный вари-

ант: $T = [\bar{u}(p_2, \lambda_2)\sigma_{\alpha\beta}u(p_1, \lambda_1)][\bar{u}(q_2, \nu_2)\sigma_{\alpha\beta}u(q_1, \nu_1)]$; λ_1 и ν_1 — спиральности относительно направлений импульсов \vec{p}_1 и \vec{q}_1 начальных нуклонов, λ_2 и ν_2 — спиральности относительно направлений импульсов \vec{p}_2 и \vec{q}_2 рассеянных нуклонов; $u(p_1, \lambda_1)$, $u(q_1, \nu_1)$ — биспинорные амплитуды начальных, а $\bar{u}(p_2, \lambda_2)$, $\bar{u}(q_2, \nu_2)$ — конечных нуклонов.

Исследовано поведение инвариантных амплитуд в зависимости от кинетической энергии T_{lab} одного из нуклонов в лабораторной системе отсчета и от переданного импульса q [4].

Автором приводится расчет NN -матричных элементов и пяти фермиевских вариантов в зависимости от спиральностей нуклонов; рассматриваются глобальные свойства спиральных амплитуд в зависимости от квадрата полной энергии сталкивающихся нуклонов [9].

Энергетическая зависимость вещественной и мнимой части инвариантной амплитуды $f_S = \frac{4m^2}{j}F_1$, приведена на рисунке 1, где $j = \frac{p}{4\pi}$, p — импульс нуклона в системе центра инерции (СЦИ), m — масса нуклона.

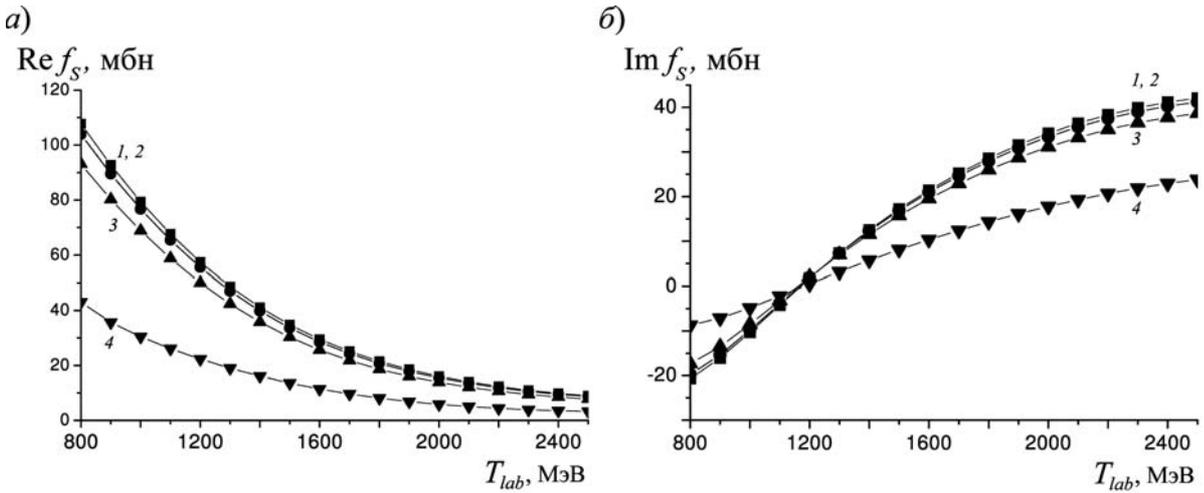


Рисунок 1 — Энергетические зависимости вещественной (а) и мнимой (б) частей инвариантной амплитуды f_S , соответствующей скалярному варианту S , при различных значениях переданного импульса q , МэВ: 0 (1, ■), 100 (2, ●), 200 (3, ▲), 500 (4, ▼)

В третьей главе рассматриваются основы квантово-механической теории механизма спиновой фильтрации в накопительных кольцах. В ее основе строгое уравнение для спиновой матрицы плотности пучка, полученное из квантовой теории многократного рассеяния [1, 2].

Не всякое взаимодействие накопленных частиц с внутренней мишенью в накопителе приводит к спин-зависящему выбыванию из пучка: упруго рассеянные на малый угол протоны теряют так мало энергии, что остаются в пучке. Показано, что необходимо учитывать вклад кулоновской ядерной

интерференции в спин-зависимое рассеяние внутри пучка, которое оказывает существенное влияние на сечение поляризации. Сделан вывод о сокращении вклада электронов мишени при прохождении пучка и вклада, обусловленного рассеянием внутри пучка [1, 2].

На рисунке 2 представлены вычисленные автором предсказания поведения сечений $\sigma_1^T = -\frac{1}{2}\Delta\sigma_T = \sigma_1$ (а) и $\sigma_1^L = -\frac{1}{2}\Delta\sigma_L = \sigma_1 + \sigma_2$ (б) в зависимости от кинетической энергии и угла акцептанса с учетом механизма спиновой фильтрации протонов в ядерном взаимодействии на поляризованном водороде (PIT) для поперечной (Т) и продольной (L) поляризаций.

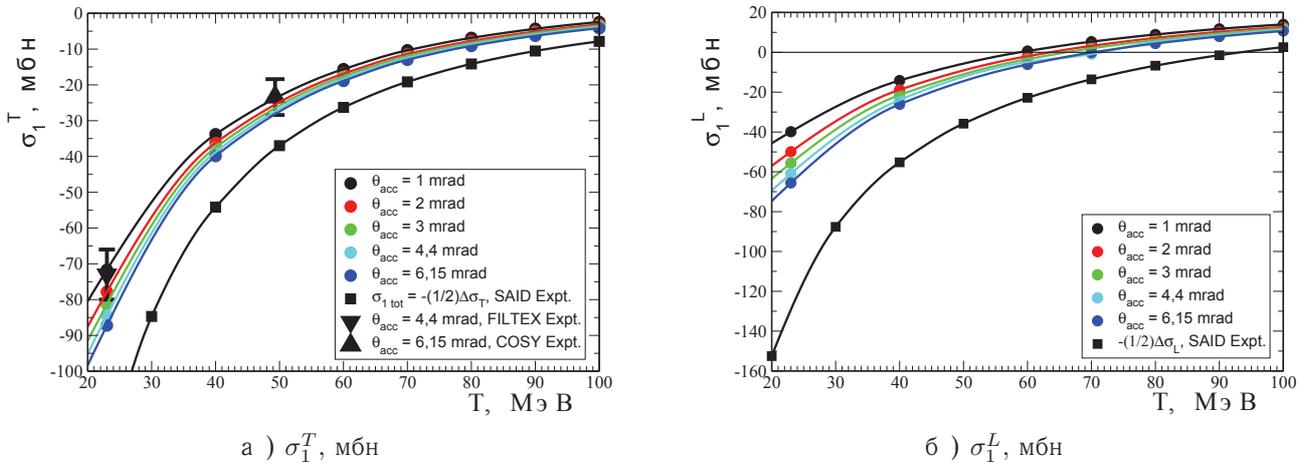


Рисунок 2 — Зависимость сечений σ_1^T (а) и σ_1^L (б) от кинетической энергии в лабораторной системе отсчета ($T = 20 \div 100$ МэВ). Кривые, маркированные черными квадратиками (■) — чистое ядерное pp -взаимодействие; остальные кривые — для разных углов акцептанса: $\theta_{acc} = 1$ мрад (●), $\theta_{acc} = 2$ мрад (●), $\theta_{acc} = 3$ мрад (●), $\theta_{acc} = 4,4$ мрад (●), $\theta_{acc} = 6,15$ мрад (●); экспериментальные данные для сечения σ_1 : эксперимент FILTEX [14] (▼) при угле акцептанса $\theta_{acc} = 4,4$ мрад и кинетической энергии $T = 23$ МэВ, эксперимент на ускорительном комплексе COSY [15] (▲) при угле акцептанса $\theta_{acc} = 6,15$ мрад и кинетической энергии $T = 49,3$ МэВ

Подтверждение данной энергетической зависимости в эксперименте привело к убедительному доказательству доминирования спиновой фильтрации в ядерном взаимодействии и пренебрежения электронного вклада. Данные согласия с экспериментами подтверждают механизм спиновой фильтрации за счет ядерного взаимодействия. Расчет, проведенный автором, хорошо воспроизводит результат эксперимента FILTEX [14]. Для проверки чисто ядерного механизма фильтрации спина предложена энергетическая зависимость эффекта, и коллаборацией PAX такая проверка была успешно проведена на ускорителе COSY в исследовательском центре Юлих (г. Юлих, Германия) [15].

В четвертой главе проведены вычисления и анализ структурных функций двухнуклонного фоковского состояния в процессах глубоконеупругого рассеяния. В данной главе проведен расчет средней спиральности нуклонов в дейтроне, численно оценена релятивистская поправка к средней спиральности [3]. Исследована асимметрия в выражении для распределения средней спиральности $\nu(z)$ по доли импульса системы z [3]. Исследована зависимость спин-зависимой структурной функции

$$g_1^D(x, Q^2) = \int_x^1 \frac{dz}{z} \nu(z) g_1^N\left(\frac{x}{z}, Q^2\right). \quad (1)$$

от бьёркеновской переменной x при значении квадрата переданного импульса виртуального фотона $Q^2 = 5 \text{ ГэВ}^2$ [5, 8]. Проведено сравнение графиков спин-зависимых структурных функций нуклона $g_1^N(x)$ и $(1 - (3/2)w_D)g_1^N(x)$, построенных с использованием различных параметризаций партонных распределений GRSV2000 [16], DNS2005 [17] и LSS2006 [18], со спин-зависимой структурной функцией $g_1^D(x)$ по результатам расчета по релятивистской формуле (1). Спин-зависимая структурная функция $g_1^D(x)$ также сравнивается с результатами экспериментов коллабораций E155 [19], E143 [20] из Национальной ускорительной лаборатории Стэнфордского центра линейного ускорителя SLAC, Стэнфорд, США.

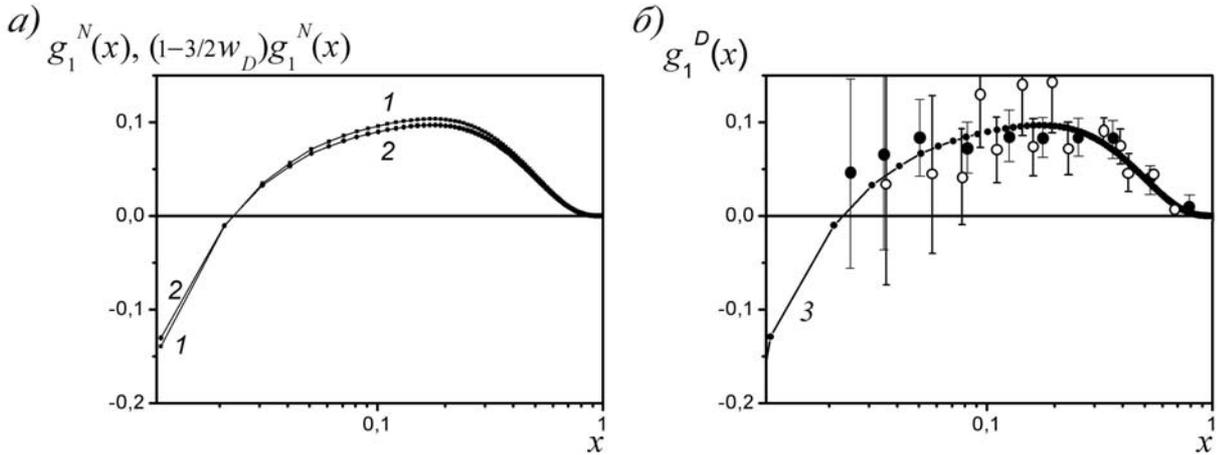


Рисунок 3 — Сравнение графиков спин-зависимых структурных функций $g_1^N(x)$ нуклона (1) и $(1 - (3/2)w_D)g_1^N(x)$ (2), построенные с использованием параметризации партонных распределений GRSV2000 (а) со спин-зависимой структурной функцией $g_1^D(x)$ дейтрона по результатам расчета по формуле (1) с использованием параметризации партонных распределений GRSV2000 (б); для всех случаев $Q^2 = 5 \text{ ГэВ}^2$; экспериментальные данные: E155 [19] (\bullet), E143 [20] (\circ)

Оценена релятивистская поправка к первому моменту спин-зависимой структурной функции двухнуклонного фоковского состояния $\Gamma_1^D(Q^2)$ [5, 8].

Вычислен первый момент спин-зависимой структурной функции нейтрона $\Gamma_1^n(Q^2)$, который извлечен из измеряемых в эксперименте первых моментов спин-зависимых структурных функций дейтрона $\Gamma_1^D(Q^2)|_{\text{эксп}}$ и протона $\Gamma_1^p(Q^2)|_{\text{эксп}}$ с учетом релятивистской поправки. Проверено выполнение правила суммы Бьёркена при значении квадрата переданного импульса $Q^2 = 5 \text{ ГэВ}^2$. В аналитическом виде приведены релятивистские выражения для неполяризованных структурных функций в пределе бьёркеновского скейлинга $F_{1,2}^D(x, Q^2)$, и тензорных структурных функций $b_{1,2}^D(x, Q^2)$.

В пятой главе рассматривается электромагнитная структура двухнуклонного фоковского состояния в реакции упругого электрон-дейтронного рассеяния. Автором вычислены матричные элементы плюсового компонента электромагнитного тока дейтрона $\langle \rho' | J_+ | \rho \rangle$ в зависимости от спиральных состояний поляризаций дейтрона в начальном ($\rho = \pm 1, 0$) и конечном ($\rho' = \pm 1, 0$) состояниях [6]. Использование плюсового компонента электромагнитного тока дейтрона $J_+ = \frac{1}{\sqrt{2}}(J_0 + J_3)$ в системе бесконечного импульса дает правильное пространственно-временное описание релятивистских эффектов. При этом вклады так называемых трансформационных диаграмм (Z -диаграмм; диаграмм, обратных по времени), при которых возникают виртуальные пары, будут сильно подавлены.

Автором получены релятивистские выражения для форм-факторов двухнуклонного фоковского состояния (зарядовый $G_{CH}(Q^2)$, квадрупольный $G_Q(Q^2)$ и магнитный $G_M(Q^2)$). Для форм-факторов $G_{CH}(Q^2)$, $G_Q(Q^2)$ и $G_M(Q^2)$ используется аппроксимация формулами, выраженными через матричные элементы $\langle \rho' | J_+ | \rho \rangle$, и приводится сравнение с экспериментальными данными. Данное сравнение показывает, что наблюдается идеальное согласие с экспериментом.

С использованием полученного магнитного форм-фактора $G_M(Q^2 = 0) = \frac{M_D}{m} \mu_D$, вычисляется релятивистская поправка к магнитному моменту дейтрона $\mu_D = \mu_p + \mu_n - \frac{3}{2} \left(\mu_p + \mu_n - \frac{1}{2} \right) \omega_D + \delta^R$. Вывод поправки к магнитному моменту, в рамках использованного формализма светового конуса и приближения двухнуклонного состояния, исчерпывающий по полноте.

Значительная часть главы посвящена анализу так называемого углового условия Грач – Кондратюка [7]. Это условие на электромагнитные форм-факторы было выведено при описании дейтрона как элементарной частицы с фиксированной массой. Показано, что угловое условие неизбежно нарушается при любом описании дейтрона как связанного состояния – в подходе автора дейтрон явно описывается как двухнуклонное фоковское состояние с инвариантной массой, зависящей от относительного импульса нуклонов. До переданных импульсов меньше или порядка массы нуклонов

нарушение углового условия слабое и не нарастает далее в ультрарелятивистскую область.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Основные результаты диссертационной работы могут быть сформулированы следующим образом:

1. Построена и проанализирована релятивистская вершинная волновая функция дейтрона в высокоэнергетических реакциях; построена спиновая вершина перехода дейтрона в протон-нейтронную пару в диаграмматике Фейнмана, правильно учитывающая структуры, отвечающие протон-нейтронной системе в S - и D -волновых состояниях.

Установлено, что при описании дейтрона в виде суперпозиций фоковских состояний с разными инвариантными массами двухнуклонной системы продольный 4-вектор поляризации такой двухнуклонной системы в релятивистской теории неизбежно зависит от инвариантной массы протон-нейтронной пары $M^2 = \frac{\vec{k}^2 + m^2}{z(1-z)}$, зависящей от конусной доли импульса дейтрона $z = p_{1+}/P_+$, которую несет один из нуклонов, и относительного поперечного импульса \vec{k} .

2. Впервые представлен технический аппарат для описания упругого рассеяния поляризованного нуклона на поляризованном дейтроне в формализме светового конуса в области высоких и промежуточных энергий.

Получено разложение амплитуды NN -рассеяния по фермиевским вариантам (скалярного S , псевдоскалярного P , векторного V , аксиально-векторного A и тензорного T), зависящим от биспиноров взаимодействующих нуклонов, и инвариантным амплитудам $F_1—F_5$. Установлен характер поведения инвариантных амплитуд: расчет показал, что в области умеренных переданных импульсов иерархия инвариантных амплитуд сохраняется, инвариантные амплитуды F_1 и F_3 , соответствующие S - и V -вкладам, остаются главными; инвариантная амплитуда F_2 , соответствующая P -вкладу, остается малой; инвариантные амплитуды F_4 и F_5 , соответствующие A - и T -вкладам, проявляют наиболее быструю зависимость от переданного импульса и меняют знак с ростом q . Установлено, что в усредненном по поляризациям разложении полного протон-протонного сечения по вкладам S , P , V , A и T -вариантов вклад P -варианта при $t = 0$ обращается в ноль. Главными при промежуточных энергиях являются вклады S - и V -вариантов, причем с ростом энергии вклад S -варианта становится важнее.

Установлено, что при высоких энергиях имеется определенная зависимость спиральных компонент в фермиевском разложении амплитуды NN -рассеяния, как функции от переменной s , которая играет роль квадрата полной энергии сталкивающихся нуклонов при высоких энергиях. Так, для

S - и P -вариантов все конусные спиральные амплитуды имеют одинаковую зависимость от s . Для V - и A -вариантов главными являются амплитуды без переворота спина φ_{++++} , φ_{----} , φ_{+--+} , φ_{-++-} пропорциональные $s \cdot F_3$ и $s \cdot F_4$, а амплитуды с переворотом спина асимптотически убывают, например, амплитуда φ_{+--+} пропорциональна $\frac{m}{s} \Delta^2$.

3. Автором предсказаны поведения сечений σ_1^T и σ_1^L в зависимости от кинетической энергии в диапазоне $T = 20 \div 800$ МэВ и углов акцептанса. Сделано теоретическое предсказание сечения $\sigma_1^L = -15,1307$ мбн и сечения $\sigma_1^T = -28,1975$ мбн при значении кинетической энергии $T = 49,3$ МэВ и угла акцептанса $\theta_{acc} = 6,15$ мрад. Сечение σ_1^T согласуется с экспериментальным значением $\sigma_{1exp}^T = -23,4 \pm 3,9$ (стат.) $\pm 1,9$ (сист.) мбн, полученным коллаборацией РАХ на ускорительном комплексе COSY в исследовательском центре Юлих (г. Юлих, Германия). При этой энергии в эксперименте РАХ на ускорительном комплексе COSY проводится проверка механизма спиновой фильтрации. Результат автора для поперечных поляризаций подтвержден в эксперименте РАХ. Для полной проверки механизма спиновой фильтрации эксперимент РАХ будет продолжен после установки сибирской змейки на ускорителе COSY с продольно поляризованными протонами и продольно поляризованной мишенью. Также сделано теоретическое предсказание сечения $\sigma_1^T = -85,6$ мбн при значении кинетической энергии $T = 23$ МэВ и угла акцептанса $\theta_{acc} = 4,4$ мрад. Экспериментальное значение, полученное в эксперименте FILTEX на TSR-кольце в институте ядерной физики общества Макса Планка (г. Гайдельберг, Германия), составляет $\sigma_{1exp}^T = -72,5 \pm 5,8$ мбн. Данные согласия с экспериментами подтверждают механизм спиновой фильтрации за счет ядерного взаимодействия.

4. Проведены вычисления и анализ структурных функций дейтрона в процессах глубоконеупругого рассеяния лептонов на дейтроне.

Расчет распределения средней спиральности нуклонов в дейтроне $\nu(z)$ по доли импульса z дейтрона, которую несёт один из нуклонов, показал её асимметрию относительно значения $z = 0,5$. Вычислена релятивистская поправка Δ_{rel} к выражению для релятивистской средней спиральности нуклонов в дейтроне $\langle \nu_p \rangle = \int_0^1 \nu(z) dz = 1 - \frac{3}{2} w_D + \Delta_{rel}$. Расчет показал, что релятивистская поправка составляет 0.4312 % от полного значения средней спиральности $\langle \nu_p \rangle$ для боннской волновой функции и 0.4266 % – для парижской. Сделан вывод, что вклад релятивистской поправки в среднюю спиральность нуклонов в дейтроне мал: $|\Delta_{rel}| = 0,402 \times 10^{-2}$ для боннской волновой функции и $|\Delta_{rel}| = 0,388 \times 10^{-2}$ – для парижской.

Получено релятивистское выражение для спин-зависимой структур-

ной функции дейтрона $g_1^D(x, Q^2)$, которая выражается через распределение средней спиральности $\nu(z)$, и сделаны предсказания о поведении $g_1^D(x, Q^2 = 5 \text{ ГэВ}^2)$ в зависимости от бьёркеновской переменной x . Проведено сравнение спин-зависимой структурной функции $g_1^D(x, Q^2 = 5 \text{ ГэВ}^2)$ с результатами экспериментов коллабораций E155, E143 из Национальной ускорительной лаборатории Стэнфордского центра линейного ускорителя SLAC, Стэнфорд, США, которое показало, что форма кривой спин-зависимой структурной функции, рассчитанной по релятивистской формуле, идеально описывает экспериментальные данные.

Получена релятивистская формула для первого момента спин-зависимой структурной функции дейтрона $\Gamma_1^D(Q^2) = \left(1 - \frac{3}{2}w_D\right) \Gamma_1^N(Q^2) + \Delta_{rel} \cdot \Gamma_1^N(Q^2)$ с учетом релятивистской поправки Δ_{rel} .

Вычислено значение $\Gamma_1^D(Q^2 = 5 \text{ ГэВ}^2) = 0,02797$, которое совпадает с экспериментальным значением $\Gamma_1^D|_{\text{эксп}} = 0,028 \pm 0,004$ (стат.) $\pm 0,005$ (сист.) в пределах погрешности измерений. Релятивистская поправка составляет 0.4326 % от полного значения спин-зависимой структурной функции с использованием боннской волновой функции. Сравнение результатов эксперимента и расчетных исследований позволяет сказать, что теоретическое значение $\Gamma_1^D(Q^2 = 5 \text{ ГэВ}^2)$ отклоняется от измеренного абсолютного значения на 0,11 %.

Вычислен первый момент спин-зависимой структурной функции нейтрона $\Gamma_1^n(Q^2 = 5 \text{ ГэВ}^2) = -0,05621$, который извлечен из измеряемых в эксперименте первых моментов спин-зависимых структурных функций протона и дейтрона с учетом релятивистской поправки. Теоретическое значение $\Gamma_1^n(Q^2 = 5 \text{ ГэВ}^2)$ совпадает с экспериментальным значением $\Gamma_1^n|_{\text{эксп}} = -0,058 \pm 0,005$ (стат.) $\pm 0,008$ (сист.) в пределах погрешности измерений.

Проверено выполнение правила суммы Бьёркена $\Gamma_1^p - \Gamma_1^n = 0,17421$ при значении квадрата переданного импульса $Q^2 = 5 \text{ ГэВ}^2$, которое хорошо согласуется с экспериментальным значением $\Gamma_1^p|_{\text{эксп}} - \Gamma_1^n|_{\text{эксп}} = 0,176 \pm 0,003$ (стат.) $\pm 0,007$ (сист.).

5. Получены релятивистские выражения для форм-факторов двухнуклонного фоковского состояния. Сравнение электромагнитных форм-факторов $G_{CH}(Q^2)$, $G_Q(Q^2)$ и $G_M(Q^2)$ с результатами экспериментов показывает, что наблюдается идеальное согласие теоретического расчета с экспериментом вплоть до значения квадрата переданного импульса $Q^2 = 1,5 \text{ ГэВ}^2$.

Для магнитного момента дейтрона получена релятивистская формула и оценено его численное значение: $\mu_D = 0,8565659$ (я.м.). При этом вклад S -волнового состояния в полное значение магнитного момента составля-

ет $0,8392793$, вклад D -волнового состояния составляет $0,01738$, и вклад SD -интерференционной волновой части составляет $-9,34 \cdot 10^{-5}$ (в ядерных магнетонах). Релятивистская поправка равна $\delta^R = 0,4392 \cdot 10^{-2}$ (я.м.). Показано, что релятивистская поправка имеет правильный знак и величину, в шесть раз уменьшающую расхождение между нерелятивистским теоретическим и экспериментальным значениями магнитного момента: $\frac{\mu_D^{exp} - \mu_D^{NR}}{\mu_D^{exp} - \mu_D} \approx 6$, где $\mu_D^{NR} = 0,8521738$ (я.м.) — значение магнитного момента, вычисленного по нерелятивистской формуле Швингера.

Основные выводы диссертационной работы могут быть сформулированы следующим образом:

1. С учетом релятивистских эффектов, даже в чисто S -волновом спин-триплетном состоянии, спиральность дейтрона не равна сумме спиральностей протона и нейтрона, а возникающая разница между суммой спиральностей нуклонов и спиральностью дейтрона переносится орбитальным угловым моментом пары, что показано автором. Ранее Э.А. Кураевым, Б.Г. Захаровым и Н.Н. Николаевым это свойство было использовано для предсказания несохранения s -канальной спиральности в дифракционном глубоконеупругом рождении векторных мезонов [21] — что полностью подтверждено в экспериментах на электрон(позитрон)-протонном коллайдере HERA в г. Гамбурге, Германия.

Выявлен эффект, состоящий в том, что нуклон, уносящий большую долю импульса дейтрона z , дает больший вклад в распределение средней спиральности дейтрона. При больших поперечных импульсах нуклонов предсказывается резкое отличие среднего значения спиральности от предсказаний нерелятивистского формализма.

2. Проведено теоретическое исследование механизма спиновой фильтрации в накопительных кольцах для получения пучков поляризованных антипротонов для будущих экспериментов по рассеянию поляризованных антипротонов на дейтронах. Одна из задач комплекса FAIR — это интенсивное рождение и накопление антипротонов. В мишени они рождаются неполяризованными. Естественной была идея использовать спиновую фильтрацию — поляризовать антипротоны пропусканием сквозь поляризованную мишень. Инициаторы эксперимента PAX из Института ядерной физики исследовательского центра Юлих (г. Юлих, Германия) полагали воспользоваться имевшейся теоретической интерпретацией результата FILTEX в приложении к антипротонам.

Один из главных выводов: электромагнитный эффект Горовица — Майера, основанный на механизме поляризации за счет сверхтонкого взаимодействия с электронами поляризованного атома, ошибочен, при точном расчете он строго зануляется. Первоначальное предложение PAX было основано

именно на этом механизме Горовица – Майера в эксперименте FILTEX. Сделан вывод, что спиновая фильтрация возможна только за счет ядерного взаимодействия. Проанализирована картина компенсации поляризации пучка за счет когерентного прохождения сквозь мишень и квазиупругого некогерентного рассеяния. Новый расчет автора хорошо воспроизводит результат эксперимента FILTEX. Для проверки чисто ядерного механизма фильтрации спина автором предложена энергетическая зависимость эффекта, и коллаборацией PAX такая проверка была успешно проведена на ускорителе COSY в исследовательском центре Юлих (г. Юлих, Германия).

3. При сравнении расчетных исследований автора с нерелятивистскими выражениями сделан вывод, что учет релятивистских эффектов не приводит к качественным различиям в поведении структурных функций. Вклад релятивистской поправки к спин-зависимой структурной функции дейтрона мал и составляет 0.4326 % от полного значения спин-зависимой структурной функции дейтрона с использованием боннской волновой функции. Полученные релятивистские поправки принципиально важны при извлечении малоизученной спин-зависимой структурной функции нейтрона из измеряемых в эксперименте спин-зависимых структурных функций протона и дейтрона и для последующей проверки фундаментального спинового правила сумм Бьёркена. Точность имеющихся экспериментальных данных по этим структурным функциям недостаточна для решающей проверки предсказываемых релятивистских поправок, но новые прецизионные измерения поляризационных структурных функций будут возможны на электрорядерных коллайдерах следующего поколения.

4. В аналитическом виде получена релятивистская формула для магнитного момента дейтрона и вычислена релятивистская поправка к данному моменту. Расчет показал, что в случае дейтрона самая большая поправка к магнитному моменту идет от примеси D -волнового состояния. За счет релятивистской поправки уменьшается различие между теоретическим и экспериментальным значениями магнитного момента. Релятивистское описание дейтрона, предложенное автором, существенно улучшает теоретическое исследование упругого электрон-дейтронного рассеяния, из которого извлекается магнитный форм-фактор дейтрона, необходимый для получения релятивистской поправки к магнитному моменту дейтрона.

Публикации автора

1. **Nikolaev, N.** Spin filtering of stored (anti)protons: from FILTEX to COSY to AD to FAIR [Text] / Nikolai Nikolaev, Fyodor Pavlov // AIP Conference Proceedings. – 2007. – Vol. 915. – P. 932–935.
2. **Nikolaev, N.** Spin filtering of stored (anti)protons: from FILTEX to

- COSY to AD to FAIR [Text] / Nikolai Nikolaev, Fyodor Pavlov // AIP Conference Proceedings. – 2008. – Vol. 1008. – P. 34–43.
3. **Павлов, Ф.Ф.** Оценка релятивистской поправки к средней спиральности протона в дейтроне [Текст] / Ф.Ф. Павлов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2011. – № 3 (129). – С. 143–152.
 4. **Павлов, Ф.Ф.** Поведение инвариантных амплитуд нуклон-нуклонного рассеяния [Текст] / Ф.Ф. Павлов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2011. – № 4 (134). – С. 176–185.
 5. **Павлов, Ф.Ф.** Расчет спин-зависимой структурной функции дейтрона в переменных светового конуса [Текст] / Ф.Ф. Павлов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2012. – № 1 (141). – С. 118–128.
 6. **Павлов, Ф.Ф.** Вычисление матричных элементов электромагнитного тока дейтрона в переменных светового конуса [Текст] / Ф.Ф. Павлов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2012. – № 3 (153). – С. 99–110.
 7. **Павлов, Ф.Ф.** Угловое условие для матричных элементов электромагнитного тока дейтрона [Текст] / Ф.Ф. Павлов, Я.А. Бердников // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2012. – № 3 (153). – С. 111–118.
 8. **Павлов, Ф.Ф.** Релятивистские ядерные поправки к спин-зависимой структурной функции дейтрона g_1^D в переменных светового конуса [Текст] / Ф.Ф. Павлов // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2012. – Т. 141. – С. 1084–1092.
 9. **Павлов, Ф.Ф.** Методика вычисления упругого рассеяния поляризованного нуклона на поляризованном дейтроне в переменных светового конуса [Текст] / Ф.Ф. Павлов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2013. – № 1 (165). – С. 144–158.
 10. **Nikolaev, N.N.** Spin filtering in storage rings: scattering within the beam, and the FILTEX results (PAX scrutiny of the filtering process) [Электронный ресурс] / N.N. Nikolaev, F.F. Pavlov. – Режим доступа: <http://theor.jinr.ru/meetings/2005/spin2005> // XI International Workshop On High Energy Spin Physics (DUBNA–SPIN–05), Plenary talk at Conference: C05-09-27, Dubna: Joint Institute for Nuclear Research, 2005. – 28 pp.
 11. **Pavlov, F.F.** Relativistic correction to the first moment of the spin-dependent structure function of the deuteron $\Gamma_1^d(Q^2)$ in the light-cone

formalism [Text] / F.F. Pavlov // Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics: Book of Abstracts of the XXI International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems, Dubna: Joint Institute for Nuclear Research, 2012. – P. 105.

12. **Павлов, Ф.Ф.** Релятивистская ядерная поправка к магнитному моменту дейтрона в формализме светового конуса [Текст] / Ф.Ф. Павлов // Сборник тезисов XLVII школы ФГБУ «ПНЯФ» по физике конденсированного состояния, Секция ФКС–2013, Гатчина: ФГБУ «ПНЯФ», 2013. – С. 87.

Список литературы

13. **Ivanov, I.P.** Diffractive S and D wave vector mesons in deep inelastic scattering [Text] / I.P. Ivanov, N.N. Nikolaev // JETP Lett. – 1999. – Vol. 69. – P. 294–299.
14. **Rathmann, F.** New method to polarize protons in a storage ring and implications to polarize antiprotons [Text] / F. Rathmann, C. Montag, D. Fick [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 1993. – Vol. 71. – P. 1379–1382.
15. **Augustyniak, W.** Polarization of a stored beam by spin-filtering [Text] / W. Augustyniak, L. Barion, S. Barsov [et al.] // Phys.Lett. B. – 2012. – Vol. 718. – P. 64–69.
16. **Glück, M.** Models for the polarized parton distributions of the nucleon [Text] / M. Glück, E. Reya, M. Stratmann [et al.] // Phys. Rev. D. – 2001. – Vol. 63. – P. 094005–1–094005–12.
17. **de Florian, D.** Sea quark and gluon polarization in the nucleon at NLO accuracy [Text] / D. de Florian, G.A. Navarro, R. Sassot // Phys. Rev. D. – 2005. – Vol. 71. – P. 094018–1–094018–12.
18. **Leader, E.** Impact of CLAS and COMPASS data on polarized parton densities and higher twist [Text] / E. Leader, A.V. Sidorov and D.B. Stamenov // Phys. Rev. D. – 2007. – Vol. 75. – P. 074027–1–074027–10.
19. **Anthony, P.L.** Measurement of the deuteron spin structure function $g_1^d(x)$ for $1(\text{GeV}/c)^2 < Q^2 < 40(\text{GeV}/c)^2$ [Text] / P.L. Anthony, R.G. Arnold, T. Averett [et al.] // Phys. Lett. B. – 1999. – Vol. 463. – P. 339–345.
20. **Abe, K.** Measurements of the proton and deuteron spin structure functions g_1 and g_2 [Text] / K. Abe, T. Akagi, P. L. Anthony [et al.] // Phys. Rev. D. – 1998. – Vol. 58. – P. 112003–1–112003–54.
21. **Kuraev, E.V.** Diffractive vector mesons beyond the s-channel helicity conservation [Text] / E.V. Kuraev, N.N. Nikolaev, B.G. Zakharov // JETP Lett. – 1998. – Vol. 68. – P. 696–703.