ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ИНСТИТУТ ФИЗИКИ имени Б.И. СТЕПАНОВА
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

УДК 530.145 + 539.1

СИЛЕНКО
Александр Яковлевич

ОПИСАНИЕ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ КВАНТОВОЙ ДИНАМИКИ СПИНОВЫХ ЧАСТИЦ ВО ВНЕШНИХ ПОЛЯХ И В ВЕЩЕСТВЕ НА ОСНОВЕ НОВОГО МЕТОДА ПЕРЕХОДА К ПРЕДСТАВЛЕНИЮ ФОЛДИ-ВАУТХОЙЗЕНА

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Минск 2012

Работа выполнена в Научно-исследовательском учреждении «Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета»

Официальные оппоненты: **Левчук Михаил Иванович**, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории теоретической физики, Государственное научное учреждение «Институт физики имени Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси»;

Максименко Николай Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры теоретической физики, Учреждение образования «Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины»;

Шалыт-Марголин Александр Эммануилович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией квантовой теории поля, Научно-исследовательское учреждение «Национальный научно-учебный центр физики частиц и высоких энергий БГУ»

Оппонирующая организация Государственное научное учреждение «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси»

Защита состоится 12 октября 2012 г. в 16.30 на заседании совета по защите диссертаций Д 01.05.02 при Научно-исследовательском учреждении «Институт физики имени Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси» по адресу: 220072, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 68; тел.: 8 (017) 284-15-59.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси.

Автореферат разослан «___» июня 2012 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций
кандидат физ.-мат. наук Выблый Ю. П.

ВВЕДЕНИЕ

Основой современной физики фундаментальных взаимодействий является Стандартная модель, базирующаяся на релятивистской квантовой теории поля и дающая исчерпывающее описание поведения релятивистских и ультрарелятивистских частиц с различными спинами во внешних, в том числе сильных, полях. Однако во многих практически важных случаях можно получить необходимые результаты на базе релятивистской квантовой механики, часто дающей адекватную картину явлений уже в одночастичном подходе, когда можно не рассматривать рождение пар и другие эффекты квантовой теории поля. Описание взаимодействия частиц с внешними полями в этом приближении и вывод квантово-механических и квазиклассических уравнений, определяющих динамику их импульса и спина, является исключительно важным для широкого круга практических приложений, как в экспериментальной практике, так и в современных технологиях.

Переход к представлению Фолди-Ваутхойзена (ФВ) – преобразование ФВ зарекомендовал себя как наилучший способ нахождения квазиклассического приближения и классического предела релятивистской квантовой теории при одночастичном подходе. Он широко используется при расчете процессов всех фундаментальных взаимодействий. Поскольку большинство измерений квантовых эффектов производится с помощью классических приборов, проблема соответствия классических и квантово-механических результатов является одной из важнейших. Она относительно легко решается в нерелятивистской области, например, методом Венцеля-Крамерса-Бриллюэна. Сравнение результатов релятивистской квантовой механики и классической физики является существенно более сложной задачей. Уравнение Дирака – первого порядка в частных производных – принципиально отличается от уравнений классической и нерелятивистской квантовой механики. Уже для свободных частиц возникает проблема построения операторов, соответствующих классическим наблюдаемым. Поэтому долгое время оставалась нерешенной задача установления классического предела уравнений релятивистской квантовой механики (Дирака, Клейна-Гордона и др.) для частиц во внешних полях. Ее решение является основной целью данного диссертационного исследования.

Для этого на основе обобщения и развития ранее предлагавшихся подходов предложен оригинальный метод перехода к представлению ФВ. Существовавшие методики [1,2] не позволяют получить явное выражение для релятивистского оператора Гамильтона в представлении ФВ, поскольку операторы преобразований имеют громоздкий вид и содержат квадратные корни из дираковских матриц. Нахождение оператора Гамильтона в виде ряда релятивистских поправок [1,2] недостаточно для конкретных расчетов эффектов взаимодействия релятивистских и ультрарелятивистских частиц с внешними полями. Некоторые из методов преобразования ФВ, разработанные ранее для релятивистских

частиц, не удовлетворяют сформулированным в [1,3] условиям и по существу приводят к иным представлениям. Наиболее обоснованными являются методы, предложенные в [4], а также в работах [5-8], появившихся уже после наших публикаций [6-A,30-A,48-A]. Однако полученные на их основе результаты нуждаются в независимой проверке, поскольку они базируются на ряде специфических формализмов квантовой механики, для которых переход к представлению ФВ исследован недостаточно. Кроме того, в формализме работ [4-8] рассматриваются только частицы со спином 1/2 во внешних полях, в то время как развитый в диссертации переход к представлению ФВ применим для частиц с любым спином.

Путем такого перехода был решен ряд практически важных задач: дано точное квантово-механическое описание частиц со спинами 1/2 и 1 в однородном магнитном поле; проанализированы нетривиальные характеристики поляризации частиц в аксиально симметричном магнитном поле; дано квантово-механическое описание частиц с электрическими дипольными моментами (ЭДМ), используемое коллаборацией по поиску ЭДМ в накопительных кольцах для подготовки международного эксперимента; выведено уравнение движения спина частиц в накопительных кольцах, использующее удобную для аналитических расчетов цилиндрическую систему координат; рассчитана динамика спина, обусловленная тензорными электрической и магнитной поляризуемостями дейтронов, и определены условия проведения эксперимента для их измерения; разработана теория спин-изохронного накопительного кольца, в котором частота прецессии спина не зависит от импульсов частиц, с прерывным и неоднородным магнитным полем. Использование представления ФВ для квантово-механического описания взаимодействия спиновых частиц с веществом позволило получить результаты, которые могут быть использованы в прикладных исследованиях.

Построение последовательного перехода к представлению ФВ позволило устранить трудности описания и интерпретации взаимодействия релятивистских дираковских частиц со статическим гравитационным полем [9,10], приводящие к появлению спин-гравитационного взаимодействия, нарушающего *CP*-инвариантность и не имеющего аналога в классической теории гравитации. Полученные нами релятивистские уравнения движения спина обобщают известные квантово-механические формулы, выведенные только для нерелятивистского случая. Неучет важности выбора тетрад для описания динамики спина не позволил, в частности, вывести корректные релятивистские формулы для прецессии спина в гравитационном поле вращающегося источника, описываемом метрикой Лензе-Тирринга. Эти обстоятельства также обусловливают актуальность диссертационных исследований.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Тема диссертации соответствует утвержденному научному плану работ НИУ Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета и следующим приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь:

6. Математическое и физическое моделирование систем, структур и процессов в природе и обществе, информационные технологии, создание современной информационной инфраструктуры:

6.1. математические модели и их применение к анализу систем и процессов в природе и обществе;

6.2. физика фундаментальных взаимодействий, ядерных реакций, квантовых систем и топологически нетривиальных объектов.

Исследования по диссертационной работе проводились в рамках выполнения следующих научно-технических программ, тем и проектов:

– **научно-исследовательских республиканских программ:**

Государственной программы фундаментальных исследований (ГПФИ) «Физика взаимодействий», задание 22а «Теоретические и экспериментальные исследования нового физического явления Т-неинвариантного явления вращения плоскости поляризации и циркулярного дихроизма в газах, помещенных в электрическое поле», номер государственной регистрации (№ гос. рег.) 20015203 (2001–2005);

ГПФИ «Поля и частицы», задание 28 «Исследование неинвариантности законов природы относительно изменения знака времени в макроскопических и микроскопических процессах», № гос. рег. 20062614 (2006–2010), задание 30 «Теоретические и экспериментальные исследования когерентных и квазиоптических явлений во взаимодействии электронов, γ-квантов, поляризованных частиц и ядер», № гос. рег. 20062606 (2006–2010);

Программы Министерства образования Беларуси «Микромир и вещество», задание «Теоретические и экспериментальные исследования новых коллективных явлений при взаимодействиях элементарных частиц в земных условиях и звездном веществе», № гос. рег. 20015202 (2001–2005);

НИР Министерства образования Беларуси «Исследование взаимодействия релятивистских частиц со спином 1/2 с внешними полями», № гос. рег. 200361 (3 кв. 2002–2003);

ГПНИ «Конвергенция», подпрограмма «Физика фундаментальных взаимодействий и плазма», задание «Разработка теории и исследование когерентных и квазиоптических явлений во взаимодействии поляризованных частиц больших энергий в накопителях и на выведенных пучках и методов управления движением частиц высоких энергий при помощи кристаллов в экспериментах

на коллайдерах нового поколения» (2011–2015), № гос. рег. 20111381; задание «Исследование формирования, эволюции, физических свойств сингулярных астрофизических объектов и описание особенностей спиновой динамики в гравитационных полях с целью моделирования темной энергии и темной материи» (2011–2015), № гос. рег. 20111384;

Проектов БРФФИ: № Ф06Р-074 «Нейтронная оптика нецентросимметричных кристаллов вблизи брэгговского отражения. Новые методы поиска ЭДМ нейтрона и исследования Т-нечетных взаимодействий нейтрона с ядром» № гос. рег. 20063540 (2006–2008);

№ Ф06-129 «Феноменологические модели с неевклидовой метрикой для астрофизики и физики квантоворазмерных структур», № гос. рег. 20063678 (2006–2008);

№ Ф06Д-002 «Адронные процессы в пертурбативной и непертурбативной квантовой хромодинамике», № гос. рег. 20063854 (2006–2008);

№ Ф08Д-001 «Анализ правил сумм глубоконеупругого рассеяния на основе новых подходов в квантовой хромодинамике», № гос. рег. 20082038 (2008–2010);

№ Ф10Д-001 «Анализ результатов и предсказания для современных экспериментов по распадам тау-лептона, Z-бозона и правилам сумм с поляризованными частицами в аналитической теории возмущений», № гос. рег. 20101689 (2010–2012).

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка нового метода приведения базовых квантово-механических уравнений для релятивистских бесспиновых частиц и частиц со спином во внешних электромагнитных, слабых и гравитационных полях к представлению Фолди-Ваутхойзена (ФВ), вывод операторов Гамильтона и квантово-механических уравнений, описывающих динамику импульса и спина, и нахождение их классического предела.

Для достижения этой цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Обобщить методы Ахиезера-Берестецкого-Ландау [11,12] и унитарных преобразований для приведения исходных уравнений к представлению ФВ и описания релятивистских эффектов во внешних полях.

2. Вывести в представлении ФВ оператор Гамильтона и динамические уравнения для импульса и спина релятивистских частиц со спинами 1/2 и 1, обладающих электрическими и магнитными дипольными моментами, и со спином 0, взаимодействующих с электрослабыми и электромагнитными полями, и определить их классический предел.

3. Построить оператор Гамильтона и динамические уравнения для импульса и спина дираковских частиц в гравитационном поле в представлении ФВ и определить их классический предел.

4. Найти достаточное условие, при котором гамильтониан допускает точное преобразование к представлению ФВ, и, при его выполнении, установить связь между собственными волновыми функциями в представлениях Дирака и ФВ.

5. Рассчитать обусловленную спин-тензорным взаимодействием динамику поляризации релятивистских частиц и ядер в накопительных кольцах и определить параметры прецизионных экспериментов для измерения тензорных электрической и магнитной поляризуемостей дейтрона.

6. Развить методы определения поляризации парамагнитных пленок и наноструктур путем наблюдения аннигиляции в них поляризованных атомов ортопозитрония и измерения тензорной поляризации позитрония.

7. Разработать теорию спин-изохронного, в котором частота прецессии спина не зависит от импульсов частиц, накопительного кольца с неоднородным магнитным полем.

8. Вывести релятивистские формулы для прецессии спина в гравитационном поле вращающегося источника, описываемом метрикой Лензе-Тирринга, в классической теории гравитации и квантовой механике частиц со спином 1/2.

Предметом исследования была релятивистская квантово-механическая динамика импульса и спина частиц и ядер во внешних полях и в веществе в представлении ФВ. Объектами исследования являлись частицы и ядра со спинами 0, 1/2 и 1. Выбор объектов исследования определялся наличием для них экспериментальных данных, их широкой распространенностью в природе и перспективами использования получаемых результатов в экспериментальных и прикладных исследованиях.

Положения, выносимые на защиту

1. Новый метод приведения уравнений для релятивистских частиц с произвольным спином к представлению Фолди-Ваутхойзена, позволяющий, в отличие от известных ранее, последовательно описывать релятивистские эффекты во внешних полях.

2. Полученные на основе разработанного метода оператор Гамильтона и квантово-механические уравнения движения для импульса и спина, описывающие электромагнитное и электрослабое взаимодействие релятивистских частиц со спинами 0, 1/2 и 1, а также с электрическими и магнитными дипольными моментами, используемые при подготовке экспериментов по поиску электрических дипольных моментов частиц в накопительных кольцах.

3. Оператор Гамильтона, квантово-механические уравнения движения для импульса и спина релятивистских дираковских частиц в гравитационных полях и их классический предел.

4. Достаточное условие точного преобразования недиагонального гамильтониана общего вида к представлению Фолди-Ваутхойзена, позволившее уста-

новить связь между собственными волновыми функциями в представлениях Дирака и Фолди-Ваутхойзена и построить примеры его реализации для частиц со спином 1/2 и аномальным магнитным моментом, со спином 1 и нормальным магнитным моментом в статическом однородном магнитном поле и для дираковских частиц во вращающейся системе отсчета.

5. Впервые разработанный метод измерения тензорной поляризации позитрония и метод определения поляризации парамагнитных пленок и наноструктур путем наблюдения аннигиляции в них поляризованных атомов ортопозитрония, более чувствительный по сравнению с наблюдением аннигиляции позитронов.

6. Новый метод расчета влияния спин-тензорного взаимодействия на динамику поляризации релятивистских частиц и ядер в накопительных кольцах и определение параметров прецизионных экспериментов для измерения тензорных электрической и магнитной поляризуемостей дейтрона и условий их измерения в рамках планируемого эксперимента по поиску электрического дипольного момента дейтрона в накопительных кольцах.

7. Теория спин-изохронного, в котором частота прецессии спина не зависит от импульсов частиц, накопительного кольца с неоднородным магнитным полем, обосновывающая его перспективность для использования в экспериментальных установках, в частности, по измерению аномального магнитного момента мюона.

8. Релятивистские формулы для прецессии спина в гравитационном поле вращающегося источника, описываемом метрикой Лензе-Тирринга.

Личный вклад соискателя

Содержание диссертации отражает вклад автора в разработку теории преобразования ФВ и определения с помощью данного преобразования релятивистской динамики импульса и спина частиц во внешних полях и в веществе. Все основные результаты, определяющие научную и практическую значимость работы, получены автором или при его непосредственном участии.

В работах [33-A,65-A,66-A] изложен новый метод измерения электрических дипольных моментов (ЭДМ) частиц и ядер в накопительных кольцах, разработанный Международной коллаборацией по поиску ЭДМ в накопительных кольцах, в которую входит автор. Доктор физ.-мат. наук, профессор В.Г. Барышевский участвовал в постановке задач и интерпретации полученных результатов в работе [69-A]. Доктор физ.-мат. наук В.П. Незнамов участвовал в постановке задач, интерпретации полученных результатов и сформулировал условие перехода к представлению ФВ в работе [60-A]. Доктор физ.-мат. наук О.В. Теряев участвовал в постановке задач в работах [34-A,46-A,56-A,58-A,63-A,67-A,86-A,90-A,92-A], обсуждении методов их решения и интерпретации полученных результатов. Доктор физ.-мат. наук Ю.Н. Обухов участвовал в постановке

задач, обсуждении методов их решения, интерпретации полученных результатов и произвел вывод оператора Гамильтона в представлении Дирака в работах [56-A,58-A,63-A,67-A,86-A,90-A,92-A], а также провел общий анализ классических уравнений движения спина (работы [58-A,92-A]) и принимал участие в квадрировании уравнения Дирака (работа [63-A]).

Апробация результатов диссертации

Основные результаты работы были представлены на ряде республиканских и международных конференций: II и III Конгрессах физиков Беларуси (Минск, 2008, 2011), XXIV, XXV, XXVI, XXVII, XXVIII, XXIX, XXX, XXXII, XXXIV, XXXVI и XL Международных конференциях по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2002, 2004, 2006 и 2010), XLVI, XLVIII и LVI Международных совещаниях по физике ядра (Москва, 1996 и 1998, Саров, 2006), XIV, XVI, XVII и XVIII Международных школах-семинарах по физике высоких энергий и квантовой теории поля (Москва, 1999, 2001, Самара – Саратов, 2003, Санкт-Петербург, 2004), XIII, XVI и XIX Международных симпозиумах по физике спина (Протвино, 1998, Триест, Италия, 2004, Юлих, Германия, 2010), X, XI, XII, XIII и XIV Международных совещаниях по физике спина при высоких энергиях (Дубна, 2003, 2005, 2007, 2009, 2011), Международном совещании по квантовым системам. Новые направления и методы (Минск, 1999), Международным конференциям по структуре ядра и смежным проблемам (Дубна, 2006, 2009), совместном АЦТФ - ЛТФ ОИЯИ совещании «Современные проблемы физики черных дыр» (Дубна, 2009), IX и XI Международных школах-семинарах «Актуальные проблемы физики микромира» (Гомель, 2007, 2011), Боголюбовской конференции «Проблемы теоретической и математической физики» (Дубна, 2004), XXI, XXII, XXIII и XXIV Международных конференциях «Симметрии и спин» (Прага, Чехия, 2005, 2006, 2007, 2008), XIV ежегодном семинаре «Нелинейные проблемы в сложных системах» (Минск, 2007), VII Международной конференции «Симметрия в нелинейной математической физике» (Киев, 2007), Международной конференции «Мирон Маттиссон: его жизнь, работа и влияние на современные исследования» (Варшава, Польша, 2007), XIII Международной конференции «Избранные проблемы современной теоретической физики» (Дубна, 2008), XXIII Российской гравитационной конференции – международной конференции по гравитации, космологии и астрофизике (Москва, 2008), XIV Международной школе-конференции «Основы и достижения в нелинейной науке» (Минск, 2008), XIX и XX Международных Балдинских семинарах по проблемам физики высоких энергий (Дубна, 2008, 2010), Международной конференции «Структура ядра и смежные проблемы» (Дубна, 2009), XVI Международном конгрессе по математической физике (Прага, 2009), Международной конференции в честь 95-летия со дня рождения Я.Б. Зельдовича «Солнце, звезды, Вселенная и общая теория

относительности» (Минск, 2009), Боголюбовских чтениях (Дубна, 2010), Рабочем совещании «Современные ядерно-физические методы исследования в физике конденсированных сред» (Минск, 2011) и 4-м Всероссийском совещании по прецизионной физике и фундаментальным физическим константам (Дубна, 2011), а также на семинаре Международного центра перспективных исследований при Гомельском государственном университете им. П.О.Сухого (Гомель, 2012).

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 131 работе: 64 статьях в реферируемых научных журналах, 28 статьях в материалах конференций и сборниках статей и 39 тезисах докладов на конференциях. Общее количество страниц опубликованных материалов составляет 699 страниц (около 32 а. л.), в том числе в 64 статьях в научных журналах, входящих в перечень ВАК – 456 страниц (около 21 а. л.)

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, шести глав, заключения, библиографического списка и семи приложений. Она изложена на 347 страницах, включает 7 иллюстраций, 2 таблицы, список использованных источников из 298 наименований, а также список публикаций соискателя по теме диссертации, состоящий из 131 работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается обзор требующих своего решения проблем перехода к представлению ФВ и его использования для описания релятивистской квантовой динамики импульса и спина частиц во внешних полях и в веществе. Обосновывается актуальность диссертационных исследований, показывается необходимость их проведения для решения поставленных задач и отражается место диссертации среди других работ в этой области.

В общей характеристике работы показана связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами, сформулированы цель и задачи исследования, положения диссертации, выносимые на защиту. Приведены сведения о личном вкладе соискателя, апробации и опубликованности результатов диссертации, а также о ее структуре и объеме.

Первая глава «Преобразование Фолди-Ваутхойзена и его использование для описания взаимодействия частиц с внешними полями. Обзор литературы» носит обзорный характер. В ней приведен анализ состояния и перспектив использования преобразования ФВ для описания релятивистской кван-

товой динамики импульса и спина частиц во внешних полях и в веществе. В результате проведения данного преобразования уравнение Дирака и соответствующие уравнения для частиц с другими спинами во внешних полях приобретают вид уравнения Шредингера, в котором операторы координат, импульса, спина и другие операторы определяются теми же формулами, что и для нерелятивистских частиц. Указанное свойство является важнейшим преимуществом представления ФВ. Однако ранее разработанные методы перехода к данному представлению применимы только для частиц со спином 1/2, причем они либо дают ряд релятивистских поправок к нерелятивистскому выражению для оператора Гамильтона в представлении ФВ, либо базируются на специфических формализмах квантовой механики. Например, метод Блаунта [4] основан на не использующем операторов подходе Мойала, для которого условия перехода именно к представлению ФВ, а не к одному из отличных от него представлений, в которых гамильтониан также блок-диагонален, не формулировались и не исследовались.

Аналитический обзор литературы показывает важность разработки имеющего строгое обоснование метода преобразования ФВ, применимого для квантово-механического описания взаимодействия релятивистских частиц с любым спином с сильными внешними полями. На основе проведенного анализа выявлены оставшиеся неразрешенными вопросы, и, исходя из этого, определены предмет и задачи диссертационных исследований, а также место данных исследований среди других работ по проблематике диссертации.

Основным содержанием **второй главы «Преобразование Фолди-Вауthойзена для релятивистских частиц во внешнем поле»** является изложение разработанного автором нового метода приведения квантово-механических уравнений для релятивистских частиц с различными спинами в сильных внешних полях к представлению ФВ.

Автором был предложен метод преобразования, позволяющий, в отличие от подхода Ахиезера-Берестецкого-Ландау (АБЛ) [11,12], найти явный вид оператора Гамильтона в представлении ФВ для релятивистских частиц со спином 1/2. При этом, как и в подходе АБЛ, вводится нормированная на единицу волновая функция ψ (верхний спинор в представлении ФВ), связанная с дираковским биспинором $\begin{pmatrix} \phi \\ \chi \end{pmatrix}$ ($\chi = Q\phi$) неунитарным оператором P: $\psi = P\phi$. Он удовлетворяет соотношению $PP^{\dagger} = 1 + QQ^{\dagger}$.

После исключения нижнего спинора исходное уравнение Дирака (или Дирака-Паули) приобретает вид:

$$i\frac{\partial \phi}{\partial t} = H_0 \phi, \qquad (1)$$

где H_0 – некоторый эрмитов оператор, содержащий производную по времени

$i\frac{\partial}{\partial t}$. Для релятивистских частиц в стационарном внешнем поле ему сопоставляется оператор Гамильтона H, действующий на волновую функцию ψ :

$$H = \frac{1}{2}\left[PH_0P^{-1} + \left(P^{-1}\right)^{\dagger} H_0P^{\dagger} \right].$$

В приближении слабого поля

$$P = \sqrt{\frac{E}{E+m}}\left(1+\Gamma\right),$$

где Γ – эрмитов оператор, среднее значение которого удовлетворяет условию $\left|\langle\Gamma\rangle\right| << 1$. В этом случае $H \approx H_0$. Явный вид оператора H можно найти, приближенно разрешив уравнение (1) относительно $i\frac{\partial}{\partial t}$.

Аналогичным образом можно определить оператор Гамильтона H', действующий на нижний спинор в представлении ФВ, описывающий состояния с отрицательной полной энергией, и построить искомый блок-диагональный оператор Гамильтона в представлении ФВ $H_{FW} = \begin{pmatrix} H & 0 \\ 0 & H' \end{pmatrix}$.

Однако, методы, использующие исключение одного из спиноров, являются в значительной степени интуитивными. Они были строго обоснованы в [2] только путем сравнения гамильтонианов, получаемых с их помощью и при использовании теории представлений. Поэтому в диссертационных исследованиях был также разработан новый метод приведения уравнений для релятивистских частиц к представлению ФВ, использующий унитарные преобразования. При помощи унитарных преобразований можно производить преобразование ФВ для частиц с любым спином после предварительного приведения исходных релятивистских волновых уравнений к гамильтоновой форме, содержащей соответствующие спиновые матрицы. В этом случае исходное выражение для оператора Гамильтона можно записать в следующем общем виде:

$$H = \beta M + E + O, \quad \beta M = M\beta, \quad \beta E = E\beta, \quad \beta O = -O\beta, \qquad (2)$$

где операторы M и E – четные, а O – нечетный. Оператор H не является блок-диагональным, а соответствующие волновые функции являются аналогами дираковских биспиноров. Для частиц со спином 1/2 (m – масса покоя):

$$H_D = \beta m + E + O, \quad \beta E = E\beta, \quad \beta O = -O\beta. \qquad (3)$$

В уравнениях (2),(3) β – матрица Дирака или, для частиц с отличным от 1/2 спином, матрица Паули σ_3, действующая на аналоги спиноров.

Преобразование к новому представлению производится с помощью унитарного оператора U:

$$\Psi' = U\Psi = e^{iS}\Psi, \qquad H' = UHU^{-1} - iU\frac{\partial U^{-1}}{\partial t}.$$

Оператор S может быть определен выражением $S = -i\frac{\beta O}{C}\theta$, где C и θ являются функциями от O^2 и четный оператор C удовлетворяет условию $C^2 = O^2$. В этом случае $U = \cos\theta + \frac{\beta O}{C}\sin\theta$.

В диссертации найдено достаточное условие точного преобразования ФВ — внешнее поле стационарно и операторы E и O коммутируют. Тогда

$$U = \frac{\varepsilon + m + \beta O}{\sqrt{2\varepsilon(\varepsilon + m)}}, \tag{4}$$

а оператор Гамильтона в представлении ФВ определяется точно

$$H_{FW} = \beta\varepsilon + E, \qquad \varepsilon = \sqrt{m^2 + O^2}. \tag{5}$$

Для частиц с произвольным спином достаточное условие точного преобразования ФВ при стационарности внешнего поля имеет вид

$$[E, O] = 0, \qquad [M, E] = 0, \qquad [M, O] = 0, \tag{6}$$

а преобразование определяемого уравнением (2) исходного оператора Гамильтона к представлению ФВ приводит к следующему результату

$$H_{FW} = \beta\varepsilon + E, \qquad \varepsilon = \sqrt{M^2 + O^2}. \tag{7}$$

Использование уравнений (5) – (7) позволило впервые выполнить точное преобразование к представлению ФВ для ряда важных задач, в том числе для частиц со спином 1/2 и аномальным магнитным моментом (АММ) и со спином 1 и нормальным магнитным моментом в статическом однородном магнитном поле, а также для дираковских частиц во вращающейся системе отсчета.

Доказано также, что при выполнении достаточного условия точного преобразования существует определенная связь между собственными волновыми функциями в представлениях Дирака и ФВ. Верхние (для состояний с отрицательной полной энергией – нижние) спиноры в представлениях Дирака и ФВ пропорциональны, т.е. различаются только на постоянный множитель. В этом случае весьма удобно определять собственные волновые функции в представлении ФВ, используя соответствующие функции в представлении Дирака. После этого легко рассчитать средние значения необходимых операторов и вывести операторные и квазиклассические уравнения движения. Для тех случаев, когда преобразование ФВ не является точным, связь между волновыми функциями в представлениях Дирака и ФВ найдена в работе автора [6-А].

Одним из важнейших результатов, полученных в диссертации, является разработка нового метода преобразования ФВ для релятивистских частиц с произвольным спином в сильных нестационарных внешних полях. Нахождение оператора Гамильтона в представлении ФВ позволяет определить классический

предел релятивистской квантовой механики. В классической физике характерным является одночастичный подход. Поэтому для перехода к указанному пределу необходимо квантово-механическое описание взаимодействия частиц с сильными полями в одночастичном приближении. Отказ от приближения слабого поля важен также для определения динамики импульса и спина частиц в неинерциальных системах отсчета, в которых нет рождения пар и других эффектов квантовой теории поля.

Для частиц со спином 1/2, описываемых гамильтонианом (3), преобразование ФВ на первом шаге производится с помощью оператора (4). Для частиц с произвольным спином, описываемых гамильтонианом (2), естественное обобщение этого оператора имеет вид:

$$U = \frac{\beta\varepsilon + \beta M - O}{\sqrt{(\beta\varepsilon + \beta M - O)^2}}\beta, \qquad U^{-1} = \beta\frac{\beta\varepsilon + \beta M - O}{\sqrt{(\beta\varepsilon + \beta M - O)^2}}, \qquad \varepsilon = \sqrt{m^2 + O^2}, \tag{8}$$

причем для частиц с целочисленным спином $U^{-1} = \beta U^{\dagger}\beta$. Преобразованный гамильтониан определяется следующей точной формулой:

$$\begin{aligned} H' = \beta\varepsilon + E + \frac{1}{2T}\Big(\big[T,\big[T,(\beta\varepsilon + F)\big]\big] + \beta\big[O,[O,M]\big] - \\ -\big[O,\big[O,F\big]\big] - \big[(\varepsilon + M),\big[(\varepsilon + M),F\big]\big] - \big[(\varepsilon + M),\big[M,O\big]\big] - \\ -\beta\big\{O,\big[(\varepsilon + M),F\big]\big\} + \beta\big\{(\varepsilon + M),\big[O,F\big]\big\}\Big)\frac{1}{T}, \end{aligned} \tag{9}$$

где $F = E - i\hbar\dfrac{\partial}{\partial t}$, $T = \sqrt{(\beta\varepsilon + \beta M - O)^2}$. Он содержит не только четные, но и нечетные слагаемые, обозначаемые далее E' и O' соответственно. Приближенная формула для конечного гамильтониана в представлении ФВ имеет вид:

$$H_{FW} = \beta\varepsilon + E' + \frac{1}{4}\beta\left\{O'^2, \frac{1}{\varepsilon}\right\}. \tag{10}$$

Приближение слабого поля не используется, а процедура диагонализации базируется на формальном разложении в ряд по степеням постоянной Планка $\hbar$.

Когда длина волны де Бройля значительно меньше характерного размера области неоднородности внешнего поля (что является известным условием квазиклассичности [13]), использование представления ФВ, как нетрудно показать, сводит нахождение классического предела квантово-механических уравнений к тривиальной замене операторов соответствующими классическими величинами. Квантово-механические уравнения движения для импульса и спина релятивистских частиц определяются коммутаторами оператора Гамильтона с операторами кинетического импульса $\boldsymbol{\pi}$ и поляризации $\boldsymbol{\Pi}$:

$$\frac{d\boldsymbol{\pi}}{dt} = \frac{i}{\hbar}[H_{FW}, \boldsymbol{\pi}] + \frac{\partial\boldsymbol{\pi}}{\partial t}, \tag{11}$$

$$\frac{d\boldsymbol{\Pi}}{dt}=\frac{i}{\hbar}[H_{FW},\boldsymbol{\Pi}]=\frac{1}{2}\big(\boldsymbol{\Omega}\times\boldsymbol{\Pi}-\boldsymbol{\Pi}\times\boldsymbol{\Omega}\big), \tag{12}$$

где $\boldsymbol{\Omega}$ – оператор угловой скорости прецессии спина. Соответствие классической теории проверяется не только для слагаемых нулевой степени по $\hbar$, но и для зависящих от спина слагаемых первой степени по $\hbar$ (спиновый момент частиц, являющийся аналогом классического спина, равен $\hbar S$).

В **третьей главе «Использование представления Фолди-Ваутхойзена для описания электромагнитного и электрослабого взаимодействия релятивистских частиц со спином 1/2»** переход к представлению ФВ производится для частиц со спином 1/2. Разработанные методы преобразования ФВ для релятивистских частиц во внешнем поле позволяют найти оператор Гамильтона и уравнения движения, описывающие электромагнитное и электрослабое взаимодействие релятивистских частиц со спином 1/2. В приближении слабого поля (в общем случае нестационарного) искомый оператор определяется выражением ($\hbar=c=1$):

$$\begin{aligned}
H_{FW}&=\beta\varepsilon'+e\Phi+\frac{1}{4}\left\{\left(\frac{\mu_0 m}{\varepsilon'+m}+\mu'\right)\frac{1}{\varepsilon'},(\boldsymbol{\Sigma}\cdot[\boldsymbol{\pi}\times\mathbf{E}]-\boldsymbol{\Sigma}\cdot[\mathbf{E}\times\boldsymbol{\pi}]-\nabla\cdot\mathbf{E})\right\}+\\
&+\frac{\mu_0 m}{16}\left\{\frac{2\varepsilon'^2+2\varepsilon' m+m^2}{\varepsilon'^4(\varepsilon'+m)^2},\boldsymbol{\pi}\cdot\nabla(\boldsymbol{\pi}\cdot\mathbf{E}+\mathbf{E}\cdot\boldsymbol{\pi})\right\}-\frac{1}{2}\left\{\left(\frac{\mu_0 m}{\varepsilon'}+\mu'\right),\boldsymbol{\Pi}\cdot\mathbf{B}\right\}+\\
&+\frac{\mu'}{4}\left\{\frac{1}{\varepsilon'(\varepsilon'+m)},[(\mathbf{B}\cdot\boldsymbol{\pi})(\boldsymbol{\Pi}\cdot\boldsymbol{\pi})+(\boldsymbol{\Pi}\cdot\boldsymbol{\pi})(\boldsymbol{\pi}\cdot\mathbf{B})+2\pi(\boldsymbol{\pi}\cdot\mathbf{j}+\mathbf{j}\cdot\boldsymbol{\pi})]\right\}+\frac{G_F}{4\sqrt{2}}\left\{\frac{1}{\varepsilon'},W\right\},\\
\varepsilon'&=\sqrt{m^2+\boldsymbol{\pi}^2},\quad W=C_1\{\boldsymbol{\Sigma}\cdot\boldsymbol{\pi},n(r)\}-C_2\{\boldsymbol{\sigma}'\cdot\boldsymbol{\pi},n(r)\}+C_2[\boldsymbol{\Sigma}\times\boldsymbol{\sigma}']\cdot\nabla n(r),
\end{aligned} \tag{13}$$

где $\mu_0=e/(2m)$ – дираковский магнитный момент.

Формула (13) согласуется с результатами, полученными в [4,14,15], и, в отличие от последних, включает в качестве частных случаев точные выражения для оператора Гамильтона в представлении ФВ, найденные в [1,16,17]. Отметим, что в [4] рассматривались только дираковские частицы без АММ, в [14] не учитывались производные от напряженностей поля, а в [15] были найдены релятивистские поправки к нерелятивистскому гамильтониану.

Квантово-механические уравнения движения для кинетического импульса (без учета влияния слабого взаимодействия на движение частицы) и для спина имеют вид:

$$\frac{d\boldsymbol{\pi}}{dt} = e\mathbf{E} + \beta\frac{e}{4}\left\{\frac{1}{\varepsilon'},\left([\boldsymbol{\pi}\times\mathbf{B}]-[\mathbf{B}\times\boldsymbol{\pi}]\right)\right\}+$$

$$+\frac{1}{4}\left\{\left(\frac{\mu_0 m}{\varepsilon'+m}+\mu'\right)\frac{1}{\varepsilon'},\left[\nabla(\boldsymbol{\Sigma}\cdot[\mathbf{E}\times\boldsymbol{\pi}])-\nabla(\boldsymbol{\Sigma}\cdot[\boldsymbol{\pi}\times\mathbf{E}])+\Delta\mathbf{E}\right]\right\}-$$

$$-\frac{\mu_0 m}{16}\left\{\frac{2\varepsilon'^2+2\varepsilon' m+m^2}{\varepsilon'^4(\varepsilon'+m)^2},(\boldsymbol{\pi}\cdot\nabla)\nabla(\boldsymbol{\pi}\cdot\mathbf{E}+\mathbf{E}\cdot\boldsymbol{\pi})\right\}+\frac{1}{2}\left\{\left(\frac{\mu_0 m}{\varepsilon'}+\mu'\right),\nabla(\boldsymbol{\Pi}\cdot\mathbf{B})\right\}- \quad (14)$$

$$-\frac{\mu'}{4}\left\{\frac{1}{\varepsilon'(\varepsilon'+m)},\left[(\boldsymbol{\Pi}\cdot\boldsymbol{\pi})\nabla(\boldsymbol{\pi}\cdot\mathbf{B})+(\nabla(\mathbf{B}\cdot\boldsymbol{\pi}))(\boldsymbol{\Pi}\cdot\boldsymbol{\pi})+2\pi\nabla(\boldsymbol{\pi}\cdot\mathbf{j}+\mathbf{j}\cdot\boldsymbol{\pi})\right]\right\},$$

$$\frac{d\boldsymbol{\Pi}}{dt} = \left\{\left(\frac{\mu_0 m}{\varepsilon'+m}+\mu'\right)\frac{1}{\varepsilon'},\left[\boldsymbol{\Pi}\times[\mathbf{E}\times\boldsymbol{\pi}]\right]\right\}+\left\{\left(\frac{\mu_0 m}{\varepsilon'}+\mu'\right),[\boldsymbol{\Sigma}\times\mathbf{B}]\right\}-$$

$$-\frac{\mu'}{2}\left\{\frac{1}{\varepsilon'(\varepsilon'+m)},\left([\boldsymbol{\Sigma}\times\boldsymbol{\pi}](\boldsymbol{\pi}\cdot\mathbf{B})+(\mathbf{B}\cdot\boldsymbol{\pi})[\boldsymbol{\Sigma}\times\boldsymbol{\pi}]\right)\right\}- \quad (15)$$

$$-\frac{G_F}{2\sqrt{2}}\left\{\frac{1}{\varepsilon'},\left(C_1\left\{[\boldsymbol{\Sigma}\times\boldsymbol{\pi}],n(r)\right\}+C_2\left[\boldsymbol{\Sigma}\times[\boldsymbol{\sigma}'\times\nabla n(r)]\right]\right)\right\}.$$

В (15) G_F – константа Ферми, $\boldsymbol{\sigma}'$ – матрица Паули для частиц среды, $n(r)$ – их плотность, а коэффициенты C_1, C_2 различны для разных пар взаимодействующих частиц.

Для частиц во внешних полях обратное преобразование от представления ФВ к представлению Дирака меняет вид операторов импульса $\mathbf{p}$ и кинетического импульса $\boldsymbol{\pi}$. В частности, уравнение движения спина в представлении Дирака зависит от оператора $\boldsymbol{\pi}_D = U^{-1}\boldsymbol{\pi}U$ так же, как соответствующее уравнение в представлении ФВ зависит от оператора $\boldsymbol{\pi}$. Однако уравнения в двух представлениях различаются видом функциональной зависимости от $\boldsymbol{\pi}$ и, по той же причине, от $\mathbf{p}$. В результате может возникнуть иллюзия изменения характера движения спина или даже появления новых эффектов. Использование представления ФВ позволяет избежать как ошибок при выводе уравнений движения частиц и их спина, так и некорректной интерпретации этих уравнений.

С помощью преобразования ФВ была также решена важная проблема корректного квантово-механического описания взаимодействия спина частиц, имеющих ЭДМ, с сильным электромагнитным полем. При использовании для описания ЭДМ тензора $G^{\mu\nu} = (-\mathbf{B}, -\mathbf{E})$, дуального тензору электромагнитного поля $F^{\mu\nu} = (-\mathbf{E}, \mathbf{B})$, обобщенное уравнение Дирака-Паули имеет вид [37-А]:

$$[\gamma^\mu\pi_\mu - m + \frac{\mu'}{2}\sigma^{\mu\nu}F_{\mu\nu} - \frac{d}{2}\sigma^{\mu\nu}G_{\mu\nu}]\Psi = 0, \quad (16)$$

где μ' – АММ, d – ЭДМ. Соответствующий гамильтониан в представлении ФВ для частиц в сильном электромагнитном поле при учете слагаемых нулевого и первого порядков по $\hbar$ определяется выражениями:

$$H_{FW} = \beta\varepsilon' - \mu'\boldsymbol{\Pi}\cdot\mathbf{B} - \frac{\mu_0}{2}\left\{\frac{mc^2}{\varepsilon'}, \boldsymbol{\Pi}\cdot\mathbf{B}\right\} + \frac{\mu' c}{4}\left\{\frac{1}{\varepsilon'}, \left[\boldsymbol{\Sigma}\cdot(\boldsymbol{\pi}\times\mathbf{E}) - \boldsymbol{\Sigma}\cdot(\mathbf{E}\times\boldsymbol{\pi})\right]\right\} +$$

$$+e\Phi + \frac{\mu_0 mc^3}{\sqrt{2\varepsilon'(\varepsilon'+mc^2)}}\left[\boldsymbol{\Sigma}\cdot(\boldsymbol{\pi}\times\mathbf{E}) - \boldsymbol{\Sigma}\cdot(\mathbf{E}\times\boldsymbol{\pi})\right]\frac{1}{\sqrt{2\varepsilon'(\varepsilon'+mc^2)}} + \qquad (17)$$

$$+\frac{\mu' c^2}{2\sqrt{2\varepsilon'(\varepsilon'+mc^2)}}\left\{(\boldsymbol{\Pi}\cdot\boldsymbol{\pi}), (\mathbf{B}\cdot\boldsymbol{\pi} + \boldsymbol{\pi}\cdot\mathbf{B})\right\}\frac{1}{\sqrt{2\varepsilon'(\varepsilon'+mc^2)}} + H_{EDM},$$

$$H_{EDM} = -d\boldsymbol{\Pi}\cdot\mathbf{E} + \frac{dc^2}{2\sqrt{2\varepsilon'(\varepsilon'+mc^2)}}\left\{(\boldsymbol{\Pi}\cdot\boldsymbol{\pi}), (\mathbf{E}\cdot\boldsymbol{\pi} + \boldsymbol{\pi}\cdot\mathbf{E})\right\}\frac{1}{\sqrt{2\varepsilon'(\varepsilon'+mc^2)}} - \qquad (18)$$

$$-\frac{dc}{4}\left\{\frac{1}{\varepsilon'}, \left[\boldsymbol{\Sigma}\cdot(\boldsymbol{\pi}\times\mathbf{B}) - \boldsymbol{\Sigma}\cdot(\mathbf{B}\times\boldsymbol{\pi})\right]\right\}, \qquad \varepsilon' = \sqrt{m^2c^4 + c^2\boldsymbol{\pi}^2}.$$

Отсюда выводятся уравнения движения для импульса и спина, причем классический предел уравнения движения спина совпадает с соответствующим классическим уравнением, найденным в [18].

Произведено точное квантово-механическое описание движения частиц со спином 1/2, имеющих АММ, и их спина в постоянном и однородном магнитном поле. Использовалась система отсчета, в которой движение частицы ортогонально направлению поля. Задача о движении частицы с ненулевой составляющей импульса вдоль поля может быть приведена к этому случаю преобразованием Лоренца. Проведение точного преобразования ФВ позволяет найти точные формулы для операторов, определяющих угловую скорость прецессии спина в декартовых координатах и относительно направления импульса частицы. Последний зависит только от АММ и равен $-2\beta\mu'\mathbf{B}$.

Определена ориентация оси квантования спина при наличии движения частиц с АММ вдоль направления магнитного поля (ось z). Направление оси квантования определяется оператором $\mathbf{b} = \mathbf{B} - \frac{1}{2\varepsilon'(\varepsilon'+m)}\left[(\mathbf{B}\cdot\boldsymbol{\pi})\boldsymbol{\pi} + \boldsymbol{\pi}(\boldsymbol{\pi}\cdot\mathbf{B})\right]$, не зависит от соотношения дираковского и аномального магнитных моментов, имеет постоянные проекции на оси цилиндрической системы координат и лежит в плоскости векторов $\mathbf{e}_\phi$ и $\mathbf{e}_z$.

Найдены законы сохранения для оператора поляризации дираковских частиц. Показано, что сохраняются проекции данного оператора не только на направления ***B*** и ***π*,** что было доказано ранее другими авторами, но и на направления $\boldsymbol{\pi}\times\mathbf{B}$ и $\mathbf{B}\times(\boldsymbol{\pi}\times\mathbf{B})$.

Показано также, что в аксиально симметричном магнитном поле (при на-

личии дополнительного магнитного поля вдоль траектории движения частиц, ортогональной оси z) спин прецессирует вокруг направления, имеющего фиксированную ориентацию относительно осей цилиндрической системы координат. Это направление составляет с осью z угол θ, определяемый выражением:

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{g}{|g-2|\gamma}\cdot\left|\frac{B_\phi}{B_z}\right|.$$

Для электронов, позитронов и мюонов, для которых $(g-2)/2 \ll 1$, изменение характера квантования спина при наличии поперечного магнитного поля является экстремально сильным. Полученный результат позволил предложить метод изменения поляризации пучков частиц в накопительных кольцах с помощью продольного магнитного поля, включаемого на заданный промежуток времени.

Выведено общее уравнение движения спина релятивистских частиц в накопительных кольцах, учитывающее наличие у частиц ЭДМ и использующее удобную для аналитических расчетов цилиндрическую систему координат:

$$\frac{d\mathbf{s}}{dt} = \boldsymbol{\omega}_a \times \mathbf{s}, \qquad \boldsymbol{\omega}_a = -\frac{e}{m}\left\{a\mathbf{B} - \frac{a\gamma}{\gamma+1}\boldsymbol{\beta}(\boldsymbol{\beta}\cdot\mathbf{B}) + \left(\frac{1}{\gamma^2-1} - a\right)(\boldsymbol{\beta}\times\mathbf{E}) + \right.$$
$$\left. + \frac{1}{\gamma}\left[\mathbf{B}_{\parallel} - \frac{1}{\beta^2}(\boldsymbol{\beta}\times\mathbf{E})_{\parallel}\right] + \frac{\eta}{2}\left(\mathbf{E} - \frac{\gamma}{\gamma+1}\boldsymbol{\beta}(\boldsymbol{\beta}\cdot\mathbf{E}) + \boldsymbol{\beta}\times\mathbf{B}\right)\right\} + o\mathbf{e}_z, \qquad a = \frac{g-2}{2}, \tag{19}$$

где символом $\parallel$ обозначены горизонтальные проекции, $\boldsymbol{\beta} = \mathbf{v}/c$, $\eta = 4dm/e$, d – это ЭДМ,

$$o = \frac{(\omega_x N_x + \omega_y N_y)N_z}{1-N_z^2} = \frac{(\omega_\rho N_\rho + \omega_\phi N_\phi)N_z}{1-N_z^2}, \qquad \boldsymbol{\omega} = -\frac{e}{\gamma m}\left(\mathbf{B} - \frac{\mathbf{N}\times\mathbf{E}}{\beta}\right). \tag{20}$$

В уравнении (20) $\boldsymbol{\omega}$ – угловая скорость вращения частиц в накопительном кольце, $\mathbf{N} = \mathbf{p}/p$ – единичный вектор, определяющий направление их движения.

Уравнение (19) точно учитывает все линейные по спину взаимодействия, но не описывает эффекты, связанные с наличием у частиц и ядер квадрупольных моментов и тензорных электрической и магнитной поляризуемостей. Данные эффекты определяются квадратичными по спину слагаемыми в гамильтониане и рассматриваются в двух следующих главах. Использование уравнения (19), в частности, дало возможность найти дополнительное осциллирующее слагаемое для условий, соответствующих проведенному эксперименту по измерению АММ мюона.

Детальный анализ динамики импульса и спина частиц в магнитном поле позволил впервые разработать теорию спин-изохронного накопительного кольца с неоднородным магнитным полем. В таком кольце частота прецессии спина не зависит от импульсов частиц. Разработка базируется на оригинальной идее компенсации зависимости действующего на частицы магнитного поля от их импульса. Когда импульс растет ($p > p_0$, см. рисунок 1), магнитное поле

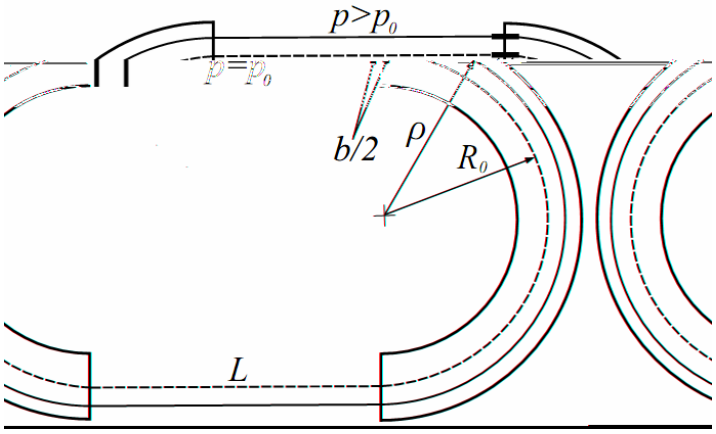

Рисунок 1 – Спин-изохронное накопительное кольцо

становится слабее, но время пролета через изгибающие секции увеличивается. При выполнении условия $L = L_0 = \frac{n}{1-n}\pi R_0$, где L – длина прямой секции, $n = -\frac{R_0}{B_0}\left(\frac{\partial B_z}{\partial \rho}\right)_{\rho=R_0}$ – индекс поля, а R_0 соответствует p_0 и B_0, среднее магнитное поле и средняя угловая скорость прецессии спина в линейном приближении не зависят от изменения импульса частиц. Обоснована перспективность использования данного кольца в экспериментальных установках по измерению АММ мюона. В этом случае не требуется весьма трудоемкой юстировки для создания локальной однородности поля, необходимой в схеме с ранее предложенным [19] для тех же целей спин-изохронным накопительным кольцом с прерывным *локально однородным* магнитным полем.

В **четвертой главе «Использование представления Фолди-Ваутхойзена для описания взаимодействия релятивистских частиц со спинами 0 и 1 с электромагнитным полем»** переход к представлению ФВ позволил получить ряд принципиально важных результатов для релятивистских частиц со спинами 0 и 1. Уравнение Клейна-Гордона впервые приведено для релятивистских скалярных частиц в электромагнитном поле к форме уравнения Гамильтона в представлении ФВ. Метод преобразования применим и для безмассовых частиц. Найденный оператор Гамильтона имеет вид:

$$H_{FW} = \varepsilon + e\Phi + \frac{e\hbar^2}{8\varepsilon^4}(\boldsymbol{\pi}\cdot\nabla)(\boldsymbol{\pi}\cdot\mathbf{E}) - \frac{e^2\hbar^2}{8\varepsilon^4}\boldsymbol{\pi}\cdot(\mathbf{E}\times\mathbf{B}) - \frac{e^2\hbar^2}{8\varepsilon^5}(\boldsymbol{\pi}\cdot\mathbf{E})^2, \qquad \varepsilon = \sqrt{m^2+\boldsymbol{\pi}^2},$$

в то время как соответствующий классический гамильтониан содержит только два первых слагаемых. Полученный результат позволил впервые вывести квантово-механические уравнения движения как массивных, так и безмассовых частиц в электромагнитном поле и определить их классический предел.

Найдена взаимно-однозначная связь между релятивистскими волновыми уравнениями первого и второго порядков, использование которой упрощает решение релятивистских уравнений для оператора Гамильтона в представлении ФВ.

Для релятивистских частиц со спином 1 в неоднородном электрическом и однородном магнитном полях выведены оператор Гамильтона

$$H_{FW} = \rho_3\varepsilon' + e\Phi + \frac{e}{4m}\left[\left\{\left(\frac{g-2}{2} + \frac{m}{\varepsilon'+m}\right)\frac{1}{\varepsilon'}, (\mathbf{S}\cdot[\boldsymbol{\pi}\times\mathbf{E}] - \mathbf{S}\cdot[\mathbf{E}\times\boldsymbol{\pi}])\right\} - \right.$$

$$\left. -\rho_3\left\{\left(g-2+\frac{2m}{\varepsilon'}\right), \mathbf{S}\cdot\mathbf{B}\right\} + \rho_3\left\{\frac{g-2}{2\varepsilon'(\varepsilon'+m)}, \{\mathbf{S}\cdot\boldsymbol{\pi}, \boldsymbol{\pi}\cdot\mathbf{B}\}\right\}\right] + \frac{e(g-1)}{4m^2}\left\{(\mathbf{S}\cdot\nabla - \right.$$

$$-\frac{1}{\varepsilon'(\varepsilon'+m)}(\mathbf{S}\cdot\boldsymbol{\pi})(\boldsymbol{\pi}\cdot\nabla)), \left.\left(\mathbf{S}\cdot\mathbf{E} - \frac{1}{\varepsilon'(\varepsilon'+m)}(\mathbf{S}\cdot\boldsymbol{\pi})(\boldsymbol{\pi}\cdot\mathbf{E})\right)\right\} +$$

$$+\frac{e}{4\varepsilon' m^2(\varepsilon'+m)}\left(g-1+\frac{m}{\varepsilon'+m}\right)\{\mathbf{S}\cdot[\boldsymbol{\pi}\times\nabla], \mathbf{S}\cdot[\boldsymbol{\pi}\times\mathbf{E}]\} - \frac{e(g-1)}{2m^2}\nabla\cdot\mathbf{S} +$$

$$+\frac{e}{2\varepsilon'^2 m^2}\left(g-1+\frac{m^2}{4\varepsilon'^2}\right)(\boldsymbol{\pi}\cdot\nabla)(\boldsymbol{\pi}\cdot\mathbf{E}), \qquad \varepsilon' = \sqrt{m^2+\boldsymbol{\pi}^2}$$

и операторное уравнение движения спина в представлении ФВ. Проведено также преобразование ФВ и дано квантово-механическое описание динамики импульса и спина частиц в сильных однородных электрическом и магнитном полях. Показано, что в классическом пределе уравнение движения спина в таких полях совпадает с уравнением Томаса-Баргманна-Мишеля-Телегди. Для частиц с нормальным магнитным моментом в однородном магнитном поле полученный оператор Гамильтона в представлении ФВ является точным. Впервые найдено, что в этом случае, как и для частиц со спином 1/2, сохраняются проекции оператора поляризации на направления $\boldsymbol{B}$, $\boldsymbol{\pi}$, $\boldsymbol{\pi}\times\mathbf{B}$ и $\mathbf{B}\times(\boldsymbol{\pi}\times\mathbf{B})$.

Важной задачей является измерение тензорных электрической и магнитной поляризуемостей дейтрона и других ядер. Диссертационные исследования включают дальнейшее развитие и усовершенствование впервые разработанных В.Г. Барышевским и сотрудниками [20-23] методов экспериментального измерения этих важных характеристик ядер в накопительных кольцах, а также детальный теоретический анализ сложной динамики спина в предлагаемых экспериментах. Проведенный анализ базировался на уравнении для матричного гамильтониана, составленного из матричных элементов оператора Гамильтона $<i|H|j>$ (i, j – комбинирующие состояния). Адекватное описание спиновых эффектов для релятивистских ядер требует, чтобы оператор Гамильтона был задан в представлении ФВ. Исходное уравнение имеет вид:

$$i\hbar\frac{\partial\Psi}{\partial t} = \mathsf{H}\Psi, \qquad \mathsf{H}_{ij} = <i|H|j>. \tag{21}$$

При анализе только спиновых состояний метод, использующий уравнение (21), часто называется методом спиновых амплитуд.

Определение динамики спина может быть разделено на несколько этапов: а) определение собственных значений и собственных векторов (собственных волновых функций) матричного гамильтониана H; б) нахождение спиновой

волновой функции; в) расчет эволюции вектора и тензора поляризации. Спиновых эффекты удобно рассматривать в системе отсчета, вращающейся с мгновенной частотой орбитального вращения ядер. В этом случае оператор Гамильтона имеет вид: $H = H_0 + \mathbf{S}\cdot\boldsymbol{\omega}_a + V$, где H_0 является суммой всех не зависящих от спина операторов, $\boldsymbol{\omega}_a$ – угловая скорость вращения спина в накопительном кольце относительно направления импульса (с учетом ЭДМ), $V = -\frac{\alpha_T}{\gamma}(\mathbf{S}\cdot\mathbf{E}')^2 - \frac{\beta_T}{\gamma}(\mathbf{S}\cdot\mathbf{B}')^2$ – поправка, обусловленная тензорными электрической (α_T) и магнитной (β_T) поляризуемостями, а $\mathbf{E}',\mathbf{B}'$ – поля в системе покоя ядра. Выражение $\mathbf{E}',\mathbf{B}'$ через поля в лабораторной системе показыва

ляризации частиц со спинами 1/2 и 1, позволило разработать простой и достаточно легко реализуемый метод определения тензорной поляризации позитрония путем измерения зависимости среднего времени жизни от направления однородного магнитного поля. Для этого достаточно произвести только три измерения. Время жизни ортопозитрония в веществе $\tau_{\pm}$ определяется при выключенном поле и не зависит от тензорной поляризации. Два других времени жизни, $T(B,0)$ и $T(B,\theta)$, измеряются в магнитных полях, ориентированных параллельно и под углом θ к направлению поляризации пучка (ось *z*). Тензорная поляризация рассчитывается по формуле:

$$P_{zz} = \frac{2[T(B,0) - T(B,\theta)]}{3\tau_{\pm}\sin^2\theta + (3\cos^2\theta - 1)T(B,0) - 2T(B,\theta)}.$$

Предложенный метод обеспечивает высокую точность и не требует наличия вакуума.

Разработана теория и произведен расчет, как методами квантовой механики, так и в рамках классической электродинамики, токовых электрических мультипольных моментов ядер и атомов. Эти моменты возникают при движении магнитных мультиполей и дают релятивистские поправки к энергии взаимодействия последних. Так, движение магнитных моментов нуклонов и электронов вносит вклад в квадрупольные моменты и среднеквадратичный зарядовый радиус ядер и атомов. Найденные релятивистские формулы для операторов токовых электрических дипольных (**d**) и квадрупольных (Q_{ij}) моментов и токового электростатического контактного взаимодействия ($\tau = Ze < r^2 >$) имеют вид ($\hbar = c = 1$):

$$d = \frac{1}{4}\left\{\kappa, \left([\mathbf{v}\times\boldsymbol{\sigma}] - [\boldsymbol{\sigma}\times\mathbf{v}]\right)\right\},$$

$$Q_{ij} = \frac{3}{8}\left\{\kappa, \left\{(e_{jkl}x_i + e_{ikl}x_j), \{v_k, \sigma_l\}\right\}\right\} - \frac{1}{4}\delta_{ij}\left\{\kappa, \left\{\boldsymbol{\sigma}, \left([\mathbf{r}\times\mathbf{v}] - [\mathbf{v}\times\mathbf{r}]\right)\right\}\right\},$$

$$\tau = \frac{1}{4}\left\{\kappa, \left\{\boldsymbol{\sigma}, \left([\mathbf{r}\times\mathbf{v}] - [\mathbf{v}\times\mathbf{r}]\right)\right\}\right\}, \quad \kappa = \frac{\mu_0 m}{\varepsilon' + m} + \mu' = \frac{\mu_0 m}{\sqrt{m^2 + \boldsymbol{\pi}^2} + m} + \mu'.$$

Также рассчитаны приводящие к *P*-неинвариантному взаимодействию токовые электрические моменты, возникающие при движении анаполя. Найден простой способ экспериментального обнаружения токовых электрических квадрупольных моментов путем измерения электростатического поля, генерируемого вращательным движением имеющих магнитные моменты атомов.

В **пятой главе «Использование представления Фолди-Ваутхойзена для описания взаимодействия релятивистских частиц и ядер с веществом»** использование представления ФВ позволило получить ряд результатов, имеющих теоретическое и прикладное значение, при анализе спиновых эффектов для частиц и ядер, взаимодействующих с веществом. Произведено квантово-

механическое описание поворота спина частиц при каналировании, что, в частности, позволило рассчитать и проанализировать поворот спина частиц при плоскостном каналировании в прямых кристаллах, обусловленный взаимодействием магнитного момента с неоднородным полем. В приближении малого переданного импульса рассчитан поворот спина релятивистских заряженных частиц в кристаллах, обусловленный *P*-неинвариантным взаимодействием, переносимым нейтральными токами.

Путем использования матричного гамильтониана и уравнения (21) произведен детальный расчет спин-тензорных эффектов при каналировании пучков поляризованных ядер в изогнутых кристаллах. Для каналирования в прямых кристаллах аналогичный расчет был выполнен В.Г. Барышевским и А.А. Сокольским [24]. Каналирование в прямых кристаллах предлагалось использовать для измерения квадрупольного момента Ω-гиперона [25]. Применение изогнутых кристаллов имеет то важное преимущество, что позволяет избежать попадания в поляриметр квазиканалированных и деканалированных ядер. Показано, что плоскостное каналирование в изогнутых кристаллах позволяет измерить квадрупольные моменты нестабильных ядер с временем жизни до 10^{-7} с, в то время как при использовании для этой цели оптических методов время жизни ядер должно превышать 10^{-6} с.

С помощью полученных в главах 3 и 4 результатов проведен детальный квантово-механический анализ динамики импульса и спина частиц, а также эволюции поляризации атомов ортопозитрония в поляризованных средах (средах с поляризованными электронами). Учтены все квазимагнитные поля, действующие на спины частиц, в том числе на электрон и позитрон позитрония, и рассчитана их величина. Дана оценка углов поворота спина частиц. Корректное описание динамики поляризации атомов ортопозитрония (o-Ps) и мюония в поляризованных средах было впервые произведено в работе В.Г. Барышевского и А.В. Ивашина [26], в которой была продемонстрирована важность учета обменного взаимодействия. Расчет в диссертации квазимагнитных полей позволяет более точно описать эволюцию поляризации атомов ортопозитрония. Одним из важнейших эффектов, причиной которого является обменное взаимодействие, является переход из орто- в пара-состояние с последующей быстрой аннигиляцией на два гамма-кванта. Доказано, что он приводит к заметному уменьшению времени жизни ортопозитрония с проекциями спина -1, 0 на направление поляризации поляризованных электронов вещества и в результате к поляризации позитрония поляризованными средами.

Показано также, что поляризованные атомы ортопозитрония могут успешно использоваться для определения поляризации парамагнетиков (пленок и наноструктур). В настоящее время для этой цели используются пучки поляризованных позитронов. Позитрониевый метод определения поляризации может оказаться более эффективным, чем позитронный. Высокая чувствительность метода обусловлена прежде всего тем, что вследствие большой величины об-

менного взаимодействия и его ярко выраженной зависимости от взаимной ориентации спинов ортопозитрония и электрона вещества время жизни компоненты o-Ps, поляризованной параллельно спину неспаренных электронов парамагнетика, на 1–2 порядка превышает время жизни остальных компонент. Помимо этого, аннигиляционный гамма-спектр компоненты с S_z=1 характеризуется существенно большей шириной линии, чем аналогичные спектры компонент с S_z=-1, 0. Причиной является то обстоятельство, что для o-Ps с S_z=1 основной канал распада – это pick-off-аннигиляция. В ней участвуют только электроны кора, разброс которых по импульсам весьма велик. Для o-Ps с S_z=-1, 0 процессы pick-off-аннигиляции не играют существенной роли вследствие значительно большей скорости конверсии орто- в парапозитроний, ширина аннигиляционной линии которого весьма мала. Химические реакции (формирование позитрониевых комплексов и окисление позитрония) могут иметь большую скорость, чем pick-off-аннигиляция, но характеризуются существенно меньшей шириной аннигиляционной линии гамма-спектра. В результате для o-Ps с S_z=-1, 0 эта линия должна быть весьма узкой, что увеличивает чувствительность метода. Для позитрониевого метода определения поляризации парамагнетиков существует естественное ограничение, связанное с тем, что позитроний образуется и может существовать в связанном состоянии далеко не во всех средах.

В **шестой главе «Использование преобразования Фолди-Ваутхойзена для описания динамики импульса и спина релятивистских частиц в гравитационном поле»** преобразование к представлению ФВ производится для анализа гравитационного взаимодействия дираковских частиц, описываемого ковариантным уравнением Дирака:

$$\left(i\hbar\gamma^a D_a - mc\right)\psi = 0, \quad D_a = e_a^\mu \partial_\mu + \frac{i}{4}\sigma^{bc}\Gamma_{bca}, \quad \sigma^{bc} = \frac{i}{2}(\gamma^b\gamma^c - \gamma^c\gamma^b), \quad a,b,c = 0,1,2,3.$$

Здесь γ^a – матрицы Дирака, $\Gamma_{abc} = -\Gamma_{bac}$ – коэффициенты связности (коэффициенты вращения Риччи). Мы используем греческий алфавит, первые (a,b,c,…) и последующие (i,j,k,…) буквы латинского алфавита для обозначения мировых, тетрадных и пространственных индексов соответственно, а отдельные тетрадные индексы выделяем шляпками. В диссертационных исследованиях рассматривалась пространственно изотропная метрика вида

$$ds^2 = V^2c^2dt^2 - W^2\delta_{ij}(dx^i - K^i cdt)(dx^j - K^j cdt), \qquad (22)$$

которая, в частности, описывает ускоренную и вращающуюся неинерциальные системы отсчета, метрики Шварцшильда и Лензе-Тирринга в изотропных координатах и приближенно – метрику Керра. Неунитарное преобразование позволяет найти точное выражение для эрмитового гамильтониана в представлении Дирака, соответствующего метрике (22) [58-А]:

$$H = H^{(1)} + H^{(2)}, \qquad H^{(1)} = \beta mc^2 V + \frac{c}{2}\left[(\boldsymbol{\alpha}\cdot\mathbf{p})F + F(\boldsymbol{\alpha}\cdot\mathbf{p})\right],$$

$$H^{(2)} = \frac{c}{2}\left(\mathbf{K}\cdot\mathbf{p} + \mathbf{p}\cdot\mathbf{K}\right) + \frac{\hbar c}{4}\boldsymbol{\Sigma}\cdot(\nabla\times\mathbf{K}), \qquad F = \frac{V}{W}. \tag{23}$$

Оператор $H^{(1)}$ определяется статической частью метрики $\left(g_{00}, g_{ij}\right)$, в то время как $H^{(2)}$ – компонентами g_{0i}. Для статической метрики $\left(\mathbf{K}=0\right)$ преобразование ФВ приводит к гамильтониану:

$$\begin{aligned} H_{FW} = {} & \beta\varepsilon + \frac{\beta}{2}\left\{\frac{m^2}{\varepsilon}, V-1\right\} + \frac{\beta}{2}\left\{\frac{\mathbf{p}^2}{\varepsilon}, F-1\right\} - \frac{\beta m}{4\varepsilon(\varepsilon+m)}[\boldsymbol{\Sigma}\cdot(\boldsymbol{\varphi}\times\mathbf{p}) - \boldsymbol{\Sigma}\cdot(\mathbf{p}\times\boldsymbol{\varphi}) + \nabla\cdot\boldsymbol{\varphi}] + \\ & + \frac{\beta m(2\varepsilon^3 + 2\varepsilon^2 m + 2\varepsilon m^2 + m^3)}{8\varepsilon^5(\varepsilon+m)^2}(\mathbf{p}\cdot\nabla)(\mathbf{p}\cdot\boldsymbol{\varphi}) + \frac{\beta}{4\varepsilon}\left[\boldsymbol{\Sigma}\cdot(\mathbf{f}\times\mathbf{p}) - \boldsymbol{\Sigma}\cdot(\mathbf{p}\times\mathbf{f}) + \nabla\cdot\mathbf{f}\right] - \\ & - \frac{\beta(\varepsilon^2+m^2)}{4\varepsilon^5}(\mathbf{p}\cdot\nabla)(\mathbf{p}\cdot\mathbf{f}), \quad \varepsilon = \sqrt{m^2+\mathbf{p}^2}, \quad \mathbf{f} = \nabla F, \quad \boldsymbol{\varphi} = \nabla V. \end{aligned} \tag{24}$$

Во всех предшествующих исследованиях использовалось нерелятивистское приближение. Формула (24) демонстрирует отсутствие нарушающего *CP*-инвариантность дипольного спин-гравитационного взаимодействия, для метрики Шварцшильда в приближении слабого поля ($\mathbf{f} = 2\boldsymbol{\varphi} = -2\mathbf{g}$, где $\mathbf{g}$ – ньютоновское ускорение) пропорционального $\boldsymbol{\Sigma}\cdot\mathbf{g}$. Ее вывод позволил установить согласие между классическими и квантово-механическими результатами. Впервые произведены расчет и сравнение динамики импульса и спина релятивистских дираковских частиц в статических гравитационных полях и однородно ускоренных неинерциальных системах отсчета.

Для вращающейся системы отсчета найдено точное преобразование ФВ и определен релятивистский оператор Гамильтона $H_{FW} = \beta\sqrt{m^2+\mathbf{p}^2} - \boldsymbol{\omega}\cdot\mathbf{j}$, где $\mathbf{j} = \mathbf{l} + \mathbf{s}$ – полный момент. Полученное уравнение движения спина соответствует формуле Горбацевича-Машхуна, а впервые выведенное релятивистское уравнение для оператора ускорения является точным аналогом классической формулы для суммы кориолисового и центробежного ускорений.

Разработаны новые способы экспериментального исследования влияния вращения и тяготения Земли на динамику спина. Путем использования данных ранее выполненного эксперимента найдено первое экспериментальное ограничение (порядка нескольких процентов) на аномальный гравитомагнитный момент [46-A].

Произведен детальный анализ зависимости уравнения движения спина от выбора тетрад. Общий вид уравнения движения спина в классической теории гравитации был найден в работе Померанского и Хрипловича [27]:

$$\frac{d\mathbf{s}}{dt} = \boldsymbol{\Omega}\times\mathbf{s}, \quad \Omega_{\hat{i}} = ce_{ikl}\left(\frac{1}{2}\Gamma_{klc} + \frac{u^{\overset{\Lambda}{k}}}{u^{\hat{0}}+1}\Gamma_{0lc}\right)\frac{u^c}{u^0}, \tag{25}$$

где e_{ikl} – антисимметричный тензор с пространственными компонентами. В этой работе было также показано, что для произвольной метрики и произвольного выбора тетрад гравитоэлектрическое и гравитомагнитное поля имеют вид:

$$E_{\hat{i}} = c\Gamma_{0ic}u^c, \quad B_{\hat{i}} = -\frac{c}{2}e_{ikl}\Gamma_{klc}u^c. \tag{26}$$

В диссертационных исследованиях было показано, что в уравнении (25) угловая скорость прецессии спина зависит от выбора тетрад. Тетрада, соответствующая наблюдателю, покоящемуся по отношению к определяемой заданной метрикой системе отсчета, должна удовлетворять калибровке Швингера $e_i^{\hat{0}} = 0$ и (для дуальной формы) $e_{\hat{0}i} = 0$. Другие калибровки, в частности, используемая в [27] симметричная калибровка $e_{\overset{\wedge}{\alpha}\overset{\wedge}{\beta}} = e_{\overset{\wedge}{\beta}\overset{\wedge}{\alpha}}$ и калибровка Ландау-Лифшица ([28], с. 378) $e_i^{\hat{0}} = g_{0i}, \quad e_0^{\hat{i}} = 0,$ отвечают наблюдателям, движущимся с ускорением по отношению к указанной системе отсчета. Продемонстрирована неэффективность таких калибровок для описания динамики спина. В частности, в приближении слабого поля уравнение (25) приводит к следующей формуле для угловой скорости прецессии спина во вращающейся системе отсчета:

$$\mathbf{\Omega} = -\boldsymbol{\omega} + \lambda\frac{\mathbf{u}\times(\mathbf{u}\times\boldsymbol{\omega})}{u^0(u^0+1)},$$

в которой для симметричной калибровки и калибровки Ландау-Лифшица λ=1/2 и λ=1 соответственно, в то время как только калибровка Швингера (при λ=0) согласуется с формулой Горбацевича-Машхуна.

Для дираковских частиц в пространстве-времени с метрикой Лензе-Тирринга, в которую переходит метрика Керра на расстояниях от вращающегося источника гравитационного поля, значительно превышающих гравитационный радиус, найден релятивистский оператор Гамильтона в представлении ФВ:

$$H_{FW} = H_{FW}^{(1)} + H_{FW}^{(2)}, \quad H_{FW}^{(1)} = \beta\varepsilon - \frac{\beta}{2}\left\{\frac{\varepsilon^2+\mathbf{p}^2}{\varepsilon}, \frac{GM}{r}\right\} - \frac{\beta(2\varepsilon+m)}{4\varepsilon(\varepsilon+m)}\left[2\mathbf{\Sigma}\cdot(\mathbf{g}\times\mathbf{p}) + \nabla\cdot\mathbf{g}\right],$$

$$H_{FW}^{(2)} = \frac{2G}{c^2r^3}\mathbf{J}\cdot\mathbf{l} + \frac{\hbar G}{2c^2r^3}\left[\frac{3(\mathbf{r}\cdot\mathbf{J})(\mathbf{r}\cdot\mathbf{\Sigma})}{r^2} - \mathbf{J}\cdot\mathbf{\Sigma}\right] -$$

$$-\frac{3\hbar G}{8}\left\{\frac{1}{\varepsilon(\varepsilon+mc^2)}, \left[\frac{2\{(\mathbf{J}\cdot\mathbf{l}),(\mathbf{\Sigma}\cdot\mathbf{l})\}}{r^5} + \frac{1}{2}\left\{\left(\mathbf{\Sigma}\cdot(\mathbf{p}\times\mathbf{l}) - \mathbf{\Sigma}\cdot(\mathbf{l}\times\mathbf{p})\right), \frac{(\mathbf{r}\cdot\mathbf{J})}{r^5}\right\} + \right.\right. \tag{27}$$

$$\left.\left. + \left\{\mathbf{\Sigma}\cdot(\mathbf{p}\times(\mathbf{p}\times\mathbf{J})), \frac{1}{r^3}\right\}\right]\right\} - \frac{3\hbar^2c^2G}{8}\left\{(5p_r^2 - \mathbf{p}^2)\frac{2\varepsilon^2+\varepsilon mc^2+m^2c^4}{\varepsilon^4(\varepsilon+mc^2)^2}, \frac{(\mathbf{J}\cdot\mathbf{l})}{r^5}\right\},$$

где $\mathbf{g} = -\frac{GM}{r^3}\mathbf{r}$, $\mathbf{l} = \mathbf{r} \times \mathbf{p}$ – оператор углового момента, а оператор $p_r^2 = -\frac{\hbar^2}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2 \frac{\partial}{\partial r}\right)$ пропорционален радиальной части оператора Лапласа. Использованы изотропные координаты, в которых расстояние от источника *r* связано с соответствующим расстоянием ρ в сферических координатах преобразованием $\rho = r\left(1 + \frac{GM}{2c^2 r}\right)^2$. Вывод уравнения (27) позволил определить релятивистскую динамику импульса и спина. Уравнения для силы, действующей на частицу, прекрасно согласуются с соответствующими классическими формулами. Релятивистское квантово-механическое уравнение движения спина имеет вид:

$$\frac{d\mathbf{\Pi}}{dt} = \mathbf{\Omega}^{(1)} \times \mathbf{\Sigma} + \mathbf{\Omega}^{(2)} \times \mathbf{\Pi}, \qquad \mathbf{\Omega}^{(1)} = \frac{GM}{r^3} \cdot \frac{2\varepsilon + m}{\varepsilon(\varepsilon + m)}(\mathbf{r} \times \mathbf{p}), \tag{28}$$

где $\mathbf{\Omega}^{(1)}$ – угловая скорость вращения спина, определяемая статической частью метрики, а вклад эффекта Лензе-Тирринга описывается формулой:

$$\mathbf{\Omega}^{(2)} = \frac{G}{c^2 r^3}\left[\frac{3(\mathbf{r}\cdot\mathbf{J})\mathbf{r}}{r^2} - \mathbf{J}\right] - \frac{3G}{4}\left\{\frac{1}{\varepsilon(\varepsilon + mc^2)}, \left[\frac{2\{\mathbf{l}, (\mathbf{J}\cdot\mathbf{l})\}}{r^5} + \right.\right.$$
$$\left.\left. + \frac{1}{2}\left\{(\mathbf{p}\times\mathbf{l} - \mathbf{l}\times\mathbf{p}), \frac{(\mathbf{r}\cdot\mathbf{J})}{r^5}\right\} + \left\{(\mathbf{p}\times(\mathbf{p}\times\mathbf{J})), \frac{1}{r^3}\right\}\right]\right\}. \tag{29}$$

С помощью уравнения (25) путем использования калибровки Швингера была впервые выведена и соответствующая классическая формула, в которой обе составляющие угловой скорости вращения спина, $\mathbf{\Omega}^{(1)}$ и $\mathbf{\Omega}^{(2)}$, полностью согласуются с квантово-механическими операторами (28),(29). В предшествующих работах [27,29], в которых рассчитывался данный эффект, использовалась симметричная калибровка, что не позволило получить требуемых результатов.

Таким образом, доказана полная аналогия квантово-механических и классических уравнений движения для импульса и спина и выведены релятивистские формулы для прецессии спина в гравитационном поле вращающегося источника, описываемом метрикой Лензе-Тирринга.

Аналогия квантово-механических и классических уравнений для импульса и спина обеспечивает аналогию соответствующих уравнений для спиральности ζ – проекции вектора **s**/*s* на направление движения частицы, определяемое тремя пространственными компонентами четырехвектора мировой скорости u^μ. Изменение спиральности частицы, пролетевшей по инфинитной траектории через область гравитационного поля с произвольной метрикой, равно изменению величины ζ' – проекции спина на направление вектора $\hat{\mathbf{u}} = \left(u^{\hat{1}}, u^{\hat{2}}, u^{\hat{3}}\right)$, компоненты которого имеют вид $u^{\hat{i}} = e^{\hat{i}}_{\mu} u^{\mu}$. Найдено, что псевдовектор спина враща-

ется относительно направления вектора $\hat{\mathbf{u}}$ с угловой скоростью $\mathbf{o} = -\dfrac{\hat{\mathbf{u}} \times \mathbf{E}}{u^0 \left|\hat{\mathbf{u}}\right|^2}$ [63-А], зависящей только от гравитоэлектрического поля. Доказано, что спиральность ультрарелятивистской частицы, массой которой можно пренебречь, не изменяется в результате пролета по инфинитной траектории через область гравитационного поля, но меняется при движении частицы по финитной траектории в пространстве-времени со стационарной метрикой.

Весьма важной задачей является сравнение движения спина в электромагнитных и гравитационных полях. Наилучшим способом сравнения является квадрирование исходного ковариантного уравнения Дирака, в котором при наличии электромагнитного поля $D_a = e_a^\mu \left(\partial_\mu + \dfrac{ie}{\hbar c} A_\mu + \dfrac{i}{4} \sigma^{bc} \Gamma_{bca} \right)$. Квадрированное уравнение Дирака преобразуется к виду:

$$\left[\pi^\mu \pi_\mu - \frac{\hbar}{2} \sigma^{ab} \left(\frac{e}{c} F_{ab} + m\Phi_{ab} \right) + \frac{\hbar^2}{4} R + \frac{\hbar^2}{16} \left(2\Gamma_{ab}{}^{\mu} \Gamma^{ab}{}_{\mu} + i\varepsilon^{abcd} \Gamma_{ab}{}^{\mu} \Gamma_{cd\,\mu} \gamma_5 \right) - m^2 c^2 \right] \psi = 0, \tag{30}$$

где $\Phi_{ab} = \dfrac{1}{2m} \left\{ \pi^\mu, \Gamma_{ab\,\mu} \right\}$, $\gamma_5 = -i\gamma^{\hat{0}} \gamma^{\hat{1}} \gamma^{\hat{2}} \gamma^{\hat{3}}$. В квазиклассическом приближении $\pi^\mu = mU^\mu$, и Φ_{ab} совпадает с матрицей транспорта спина (и импульса) в гравитационном поле и с тензороподобными коэффициентами $\gamma_{abc} u^c$, введенными в [27]. Величина Φ_{ab} является аналогом тензора электромагнитного поля и приводит к дираковскому гиро-гравитомагнитному отношению $g_{grav} = 2$, являющемуся проявлением эквивалентности взаимодействия спинов любых частиц с гравитационным полем. Это означает [30] отсутствие как аномальных гравитомагнитных моментов, так и гравитоэлектрических дипольных моментов, являющихся аналогами аномальных магнитных и электрических дипольных моментов соответственно. Вывод уравнения (30) дает прямое доказательство полной аналогии взаимодействия спина релятивистских дираковских частиц с сильными гравитационными и электромагнитными полями *произвольного* вида. Ее косвенное доказательство следует из установленного в [31-33] соответствия между ковариантным уравнением Дирака и уравнениями Матиссона-Папапетру, уравнений Померанского-Хрипловича [27], указывающих на существование такой аналогии в классической физике, и продемонстрированного в [50-А] согласия между уравнениями Матиссона-Папапетру и Померанского-Хрипловича при пренебрежении влиянием спина на траекторию частицы. Данная аналогия является дополнительным обоснованием возможности введения гравитоэлектромагнитных полей для произвольной пространственно-временной метрики.

В **разделе "Заключение"** дается краткое изложение сущности научных результатов диссертации и обсуждаются возможности их практического приме-

нения, а также перспективы дальнейшего развития данного научного направления.

В **приложениях** проанализирован переход к классическому пределу релятивистских квантово-механических уравнений; определены собственные волновые функции в представлении ФВ и эволюция поляризации частиц со спином 1/2 в однородном магнитном поле; путем перехода к релятивистскому волновому уравнению второго порядка получен энергетический спектр частиц со спином 1/2 в поле с гармоническим потенциалом; рассчитана динамика спина в резонансном эксперименте по поиску ЭДМ дейтрона; дано теоретическое описание токовых электрических мультипольных моментов в рамках классической электродинамики; определено взаимодействие спина релятивистских частиц, обусловленное их мультипольными моментами, с электрическим полем кристаллов; найдена связь между представлениями ФВ и Эриксена-Корлсруда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

Полученные научные результаты решают ряд фундаментальных проблем релятивистской квантовой механики частиц с произвольным спином во внешних полях на основе разработки нового метода приведения соответствующих уравнений к представлению ФВ. Выведены уравнения для оператора Гамильтона и динамики импульса и спина, описывающие электромагнитное, слабое и гравитационное взаимодействие релятивистских частиц со спинами 0, 1/2 и 1, и найден классический предел уравнений Дирака, Клейна-Гордона и Корбена-Швингера. Результаты, полученные при помощи развитого метода, использованы для решения практических задач динамики спина частиц в веществе и в накопительных кольцах. На базе полученных результатов предложены методы определения поляризации парамагнетиков, тензорной поляризации позитрония, изменения поляризации пучков частиц в накопительных кольцах и теория спин-изохронного накопительного кольца с неоднородным магнитным полем, а также проведено дальнейшее развитие предложенных в [20-23] методов измерения тензорных электрической и магнитной поляризуемостей дейтрона и других ядер в накопительных кольцах.

1. Разработан новый метод приведения уравнений для релятивистских частиц к представлению ФВ, позволяющий, в отличие от метода Ахиезера-Берестецкого-Ландау и ранее предложенных методов унитарных преобразований, последовательно описывать релятивистские эффекты для частиц с любым спином в произвольных внешних полях. Данный метод определяет оператор Гамильтона в представлении ФВ в виде ряда по степеням постоянной Планка, что позволяет найти его классический предел. С помощью преобразования ФВ найдена взаимно-однозначная связь между релятивистскими волновыми урав-

нениями первого и второго порядков [6-A,25-A,30-A,48-A,51-A,53-A,55-A,60-A,66-A,67-A,68-A,73-A,74-A,75-A,78-A,93-A,104-A,122-A,130-A].

2. Развитый метод перехода к представлению ФВ использован для вывода оператора Гамильтона и квантово-механических уравнений движения, описывающих: а) взаимодействие релятивистских частиц со спином 1/2 с электрослабыми полями при условии, что слабое взаимодействие обусловлено нейтральными токами в приближении малого переданного импульса; б) электромагнитное взаимодействие релятивистских частиц со спинами 0, 1/2 и 1 с учетом ЭДМ для частиц со спином 1/2 и возможной неоднородности электрического поля – для частиц со спином 1. Найдены уравнения движения для импульса и спина и классический предел данных уравнений. Выведенное уравнение движения спина используется коллаборацией по поиску ЭДМ в накопительных кольцах для подготовки международного эксперимента [6-A,12-A,14-A,26-A,30-A,32-A,33-A,37-A,38-A,48-A,51-A,53-A,65-A,66-A,67-A,68-A,70-A,71-A,73-A,74-A,75-A,78-A,93-A,95-A,96-A,98-A,101-A,102-A,105-A,106-A,122-A,130-A].

3. Определено достаточное условие проведения точного преобразования ФВ и, при его выполнении, построена связь между собственными волновыми функциями в представлениях Дирака и ФВ. Произведено точное квантово-механическое описание динамики импульса и спина частиц со спинами 1/2 и 1 в статическом однородном магнитном поле и найдены законы сохранения для оператора поляризации частиц с нормальным магнитным моментом. Для частиц со спином 1/2 и АММ и со спином 1 и нормальным магнитным моментом в статическом однородном магнитном поле, а также для дираковских частиц во вращающейся системе отсчета впервые выполнено точное преобразование к представлению ФВ. При наличии аксиально симметричного магнитного поля для частиц со спином 1/2, движущихся в плоскости, перпендикулярной оси симметрии этого поля, определено направление, проекция спина на которое квантуется [6-A,15-A,16-A,17-A,24-A,29-A,30-A,32-A,37-A,46-A,48-A,51-A,52-A,78-A,118-A,119-A,120-A,122-A,124-A,130-A].

4. При помощи разработанного метода выведены операторы Гамильтона в представлении ФВ и уравнения движения для импульса и спина релятивистских дираковских частиц в пространстве-времени со стационарной метрикой. Получены также соответствующие классические уравнения и доказана их полная аналогия квантово-механическим. Разработаны новые способы экспериментального исследования спиновых явлений, обусловленных вращением и тяготением Земли [34-A,46-A,47-A,50-A,56-A,58-A,63-A,78-A,80-A,83-A,87-A,88-A, 92-A,118-A,119-A,120-A,122-A,124-A,125-A,129-A,131-A].

5. В рамках развиваемого подхода дано квантово-механическое описание поворота спина заряженных частиц при каналировании, что, в частности, позволило рассчитать поворот спина в прямых кристаллах, обусловленный как взаимодействием магнитного момента с неоднородным полем, так и переносимым нейтральными токами *P*-неинвариантным взаимодействием. Определены опера-

торы квазимагнитного взаимодействия и произведено квантово-механическое описание динамики импульса и спина частиц в средах с поляризованными электронами. Проведен анализ возможности использования таких сред для изменения поляризации атомов ортопозитрония, в том числе для поляризации неполяризованных пучков [3-A,4-A,7-A,8-A,9-A,10-A,14-A,21-A,23-A,26-A,28-A,31-A,35-A,36-A,44-A,69-A,93-A,94-A,95-A,96-A,98-A,99-A,101-A,102-A,103-A,105-A,106-A,107-A,108-A,110-A,111-A,114-A].

6. На базе произведенных исследований разработан новый метод определения поляризации парамагнитных пленок и наноструктур путем наблюдения аннигиляции в них поляризованных атомов ортопозитрония. В предлагаемом методе используется существенное превышение величины обменного взаимодействия неспаренных электронов вещества с электроном ортопозитрония над величиной их спин-спинового взаимодействия с позитроном, впервые продемонстрированное В.Г. Барышевским и А.В. Ивашиным [26]. Это обеспечивает увеличение чувствительности по сравнению с известным ядерно-физическим методом, основанном на наблюдении аннигиляции позитронов. Впервые разработан метод определения тензорной поляризации позитрония, базирующийся на измерении зависимости среднего времени жизни от направления однородного магнитного поля. Он может

частиц, накопительного кольца с неоднородным магнитным полем. Обоснована перспективность его использования в эксперименте по измерению аномального магнитного момента мюона. В этом случае не требуется весьма трудоемкая юстировка для создания локальной однородности поля, необходимая в схеме с ранее предложенным спин-изохронным накопительным кольцом с прерывным локально однородным магнитным полем [61-A,86-A,90-A,123-A,127-A].

9. Произведен детальный теоретический анализ спин-тензорного взаимодействия релятивистских частиц с электромагнитным полем и определены возможности прецизионного измерения тензорных электрической и магнитной поляризуемостей дейтрона в накопительных кольцах резонансным методом, методом замораживания спина, а также при наличии только магнитного поля. Дано независимое подтверждение методом, разработанным в диссертации, существования новых эффектов, предсказанных и описанных В.Г. Барышевским и сотр. [20-23], корректности выполненных в указанных работах расчетов величины эффектов и предложенных там методов экспериментального измерения тензорных поляризуемостей дейтрона. Для резонансного метода найдено радикальное (на несколько порядков) увеличение эффекта роста вертикальной поляризации пучка дейтронов с горизонтальной начальной поляризацией (эффекта Барышевского [20-23]) при удвоении резонансной частоты, используемой в ЭДМ-эксперименте. Показано, что пучок дейтронов с начальной тензорной поляризацией в накопительных кольцах при наличии только магнитного поля может приобретать горизонтальную векторную поляризацию порядка 1%, что позволяет измерить тензорную магнитную поляризуемость дейтрона. Продемонстрировано, что метод замораживания спина также может успешно использоваться для измерения тензорных электрической и магнитной поляризуемостей с абсолютной точностью порядка 10^{-43} см^3 [22-A,41-A,42-A,49-A,54-A,57-A,59-A,77-A,79-A,81-A,84-A,85-A,91-A,115-A,116-A,117-A,121-A,128-A].

10. Построена теория токовых электрических мультипольных моментов ядер и атомов, обусловленных движением магнитных диполей, в том числе возникающих при движении анаполя и приводящих к *P*-неинвариантному взаимодействию, рассчитаны токовые электрические квадрупольные моменты ряда ядер, включая дейтрон. Найден простой способ экспериментального обнаружения токовых электрических квадрупольных моментов [1-A,2-A,5-A,11-A,13-A,18-A,19-A,20-A,23-A,97-A,100-A,103-A].

11. В рамках классической теории гравитации и квантовой механики дираковских частиц впервые выведены релятивистские формулы для прецессии спина в гравитационном поле вращающегося источника, описываемом метрикой Лензе-Тирринга. Продемонстрирована особая роль калибровки Швингера. Доказана полная аналогия квантово-механических уравнений движения спина релятивистских дираковских частиц в пространстве-времени со стационарной метрикой соответствующим классическим уравнениям. Определена квантово-механическая динамика импульса релятивистских частиц в гравитационном по-

ле вращающегося источника. Рассчитана эволюция их спиральности в произвольном гравитационном поле и установлены общие закономерности этой эволюции [50-А,56-А,58-А,63-А,88-А,92-А,118-А,119-А,120-А,124-А,129-А].

12. Путем вывода квадрированного обобщенного уравнения Дирака для частиц в гравитационных и электромагнитных полях в общем случае проведено прямое доказательство полной аналогии взаимодействия спина релятивистских дираковских частиц с гравитационными и электромагнитными полями произвольного вида, подтверждающее результаты, полученные другими авторами с помощью других методов, и являющееся дополнительным обоснованием возможности введения гравитоэлектромагнитных полей для произвольной пространственно-временной метрики [63-А,92-А,129-А,130-А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Полученная информация об электромагнитном, слабом и гравитационном взаимодействии релятивистских частиц и ядер со спинами 0, 1/2 и 1 в представлении ФВ может быть востребована в связи с измерением динамики импульса и спина частиц и ядер в современных прецизионных экспериментах, проводимых на ускорителях и в накопительных кольцах.

2. Выведенное уравнение движения спина релятивистских частиц с электрическими и магнитными дипольными моментами в накопительных кольцах может быть использовано для постановки экспериментов, в которых определяется эволюция спина (в частности, готовящихся экспериментов по измерению АММ мюона и поиску ЭДМ ядер и частиц) и для обработки экспериментальных данных.

3. Впервые развитая теория спин-изохронного накопительного кольца, в котором частота прецессии спина в линейном приближении не зависит от импульсов частиц, с неоднородным магнитным полем может быть применена для постановки прецизионного эксперимента по измерению АММ мюона.

4. Выведенные релятивистские формулы для оператора спин-тензорного взаимодействия частиц с электромагнитным полем и произведенный детальный теоретический анализ могут быть положены в основу прецизионного измерения тензорных электрической и магнитной поляризуемостей дейтрона в накопительных кольцах.

5. Полученные результаты могут быть применены для изменения поляризации частиц и атомов ортопозитрония и, в частности, для поляризации неполяризованных пучков путем использования сред с поляризованными электронами. Впервые разработанный метод определения тензорной поляризации позитрония может использоваться для изучения динамики поляризации позитрония в веществе, содержащем парамагнитные атомы, и в анизотропных средах, в том числе при наличии наноструктур.

6. Разработанный новый метод определения поляризации парамагнетиков

путем наблюдения аннигиляции в них поляризованных атомов ортопозитрония может быть востребован при исследовании намагниченных пленок и наноструктур.

7. Результаты анализа спин-тензорных эффектов при каналировании пучков поляризованных ядер в изогнутых кристаллах могут быть использованы для измерения квадрупольных моментов нестабильных ядер.

8. Разработанные новые способы экспериментального исследования спиновых явлений, обусловленных вращением и тяготением Земли, могут быть применены для экспериментального подтверждения независимости частоты прецессии от массы и спинового квантового числа частиц.

Разработанный новый метод приведения релятивистских волновых уравнений к представлению ФВ обеспечивает теоретическую основу для получения адекватной и детальной информации о характеристиках частиц и ядер, а также о классическом пределе их взаимодействия с внешними полями и с веществом. Результаты, получаемые с помощью данного метода, могут быть использованы для вывода и решения квантово-механических и квазиклассических уравнений, определяющих динамику импульса и спина релятивистских частиц.

Полученные результаты могут быть использованы в ведущих научно-исследовательских центрах Беларуси (Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Белорусский государственный университет, Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси и др. – в рамках подпрограммы «Физика фундаментальных взаимодействий и плазма» ГПНИ «Конвергенция»), стран СНГ и дальнего зарубежья, а также при чтении спецкурсов и написании учебных пособий для студентов и аспирантов по специальности теоретическая физика.

Дальнейшее развитие данного научного направления представляет интерес не только для физики частиц, но и для решения практически важных задач физики конденсированных состояний, включая наноструктуры. Перспективным представляется проведение дополнительных исследований с целью использования полученных результатов в экспериментальной физике высоких энергий, прежде всего при постановке экспериментов по поиску ЭДМ частиц и ядер, измерению тензорных электрической и магнитной поляризуемостей дейтрона и АММ мюона. Актуальными являются задачи проведения преобразования ФВ для релятивистских частиц со спинами 0 и 1/2 в сильном гравитационном поле с произвольной пространственно-временной метрикой и нахождения явного вида точного преобразования ФВ для релятивистских частиц во внешнем поле.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Eriksen, E. Foldy-Wouthuysen Transformation. Exact Solution with Generalization to the Two-Particle Problem / E. Eriksen // Phys. Rev. – 1958. – V. 111, № 3. – P. 1011-1016.
2. Vries, E. de. Non-relativistic approximations of the Dirac Hamitonian / E. de Vries, J.E. Jonker // Nucl. Phys. B. – 1968. – Vol. 6, Iss. 3. – P. 213-225.
3. Eriksen, E. Canonical transformations of Dirac's equation to even forms. Expansion in terms of the external fields / E. Eriksen, M. Korlsrud // Nucl. Phys. B. – 1960. – Vol. 18, № 1. – P. 1-39.
4. Blount, E.I. Extension of the Foldy-Wouthuysen Transformation / E.I. Blount // Phys. Rev. – 1962. – Vol. 128, Iss. 5. – P. 2454-2458.
5. Gosselin, P. Semiclassical diagonalization of quantum Hamiltonian and equations of motion with Berry phase corrections / P. Gosselin, A. Berard, and H. Mohrbach // Eur. Phys. J. B. – 2007. – Vol. 58, № 2. – P. 137-148.
6. Gosselin, P. Semiclassical Dynamics of Dirac Particles Interacting with a Static Gravitational Field / P. Gosselin, A. Berard, and H. Mohrbach // Phys. Lett. A. – 2007. – Vol. 368, Iss. 5. – P. 356-361.
7. Gosselin, P. Recursive diagonalization of quantum Hamiltonians to all orders in ħ / P. Gosselin, J. Hanssen, and H. Mohrbach // Phys. Rev. D. – 2008. – Vol. 77, Iss. 8. – P. 085008-1–085008-11.
8. Gosselin, P. Diagonal representation for a generic matrix valued quantum Hamiltonian / P. Gosselin and H. Mohrbach // Eur. Phys. J. C. – 2009. – Vol. 64, № 3. – P. 495-527.
9. Obukhov, Yu.N. Spin, gravity, and inertia / Yu.N. Obukhov // Phys. Rev. Lett. – 2001. – Vol. 86, Iss. 2. – P. 192-195.
10. Obukhov, Yu.N. On gravitational interaction of fermions / Yu.N. Obukhov // Fortschritte der Physik. – 2002. – Vol. 50, Iss. 5-7. – P. 711-716.
11. Берестецкий, В.Б. О взаимодействии между электроном и позитроном / В.Б. Берестецкий, Л.Д. Ландау // Журнал экспер. и теор. физики. – 1949. – Т. 19, Вып. 8. – С. 673-679.
12. Ахиезер, А.И., Берестецкий В. Б. Квантовая электродинамика / А.И. Ахиезер, В.Б. Берестецкий. – 3-е изд., перераб. – М.: Наука, 1969. – 623 с.
13. Ландау, Л.Д. Квантовая механика (нерелятивистская теория) / Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшиц. – Издание 4-е. – М. : Наука, 1989. – 768 с.
14. Гроот, С.Р. де. Электродинамика / С.Р. де Гроот, Л.Г. Сатторп. – М.: Наука, 1982. – 560 с.
15. L'vov, A.I. Phenomenon of electric and magnetic polarizability of particles in relativistic theory / A.I. L'vov. – Moscow, 1987. – P. 33. – (Preprint / Lebedev Physical Institute ; № 344).
16. Case, K.M. Some Generalizations of the Foldy-Wouthuysen Transformation / K.M. Case // Phys. Rev. – 1954. – Vol. 95, № 5. – P. 1323-1328.

17. Tsai, W. Energy eigenvalues for charged particles in a homogeneous magnetic field – an application of the Foldy-Wouthuysen transformation / W. Tsai // Phys. Rev. D. – 1973. – Vol. 7, Iss. 6. – P. 1945-1948.
18. Search for an Electric Dipole Moment of the Electron / D.F. Nelson [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 1959. – Vol. 2, № 12. – P. 492-495.
19. Farley, F.J.M. A new ring structure for muon (g-2) measurements / F.J.M. Farley // Nucl. Instr. Meth. A. – 2004. – Vol. 523, Iss. 3. – P. 251-255.
20. Baryshevsky, V.G. The deuteron (nuclei) birefringence effect in a matter and in an electric field and the searches for an EDM of a deuteron (nucleus) rotating in a storage ring / V.G. Baryshevsky, A.R. Shirvel // arXiv:hep-ph/0503214 [Electronic resource] – 2005. – Mode of access : http://arxiv.org/pdf/hep-ph/0503214v2. – Date of access : 22.03.2005.
21. Baryshevsky, V.G. Deuteron birefringence effect in matter and electric fields and experiments for measurement of the EDM of deuterons (nuclei) rotating in a storage ring / V.G. Baryshevsky // STORI 2005 Conf. Proc. – Schriften des Forschungszentrums Jülich. – Matter and Materials. – 2005. – Vol. 30. – P. 227-230.
22. Baryshevsky, V.G. Spin rotation and birefringence effect for a particle in a high energy storage ring and measurement of the real part of the coherent elastic zero-angle scattering amplitude, electric and magnetic polarizabilities / V.G. Baryshevsky, A.A. Gurinovich // arXiv:hep-ph//0506135 [Electronic resource] – 2005. – Mode of access : http://arxiv.org/pdf/hep-ph//0506135v1. – Date of access : 14.06.2005.
23. Baryshevsky, V.G. Rotation of particle spin in a storage ring with a polarized beam and measurement of the particle EDM, tensor polarizability and elastic zero-angle scattering amplitude / V.G. Baryshevsky // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. – 2008. – Vol. 35, № 3. – P. 035102-1–035102-23.
24. Барышевский, В.Г. О существовании эффекта осцилляций поляризации быстрой каналированной частицы, обусловленного ее квадрупольным моментом / В.Г. Барышевский, А.А. Сокольский // Письма в ЖТФ. – 1980. – Т. 6, Вып. 23. – С. 1419-1421.
25. Baryshevsky, V.G. Spin oscillation and the possibility of quadrupole moment measurement for Ω-hyperons moving in a crystal / V.G. Baryshevsky and A.G. Shechtman // Nucl. Instr. Meth. B. – 1993. – V. 83, Iss. 1-2. – P. 250-254.
26. Барышевский, В.Г. Теория взаимодействия атомов (мюоний, позитроний) с намагниченным веществом / В.Г. Барышевский, А.В. Ивашин // Журнал экспер. и теор. физики. – 1973. – Т. 65, Вып. 4. – С. 1467-1472.
27. Померанский, А.А. Уравнения движения релятивистской частицы с внутренним моментом во внешних полях / А.А. Померанский, И.Б. Хриплович // Журнал экспер. и теор. физики. – 1998. – Т. 113, Вып. 5. – С. 1537-1558.
28. Ландау, Л.Д. Теория поля / Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшиц. – Издание 7-е, испр. – М.: Наука, 1988. – 512 с.
29. Dvornikov, M. Neutrino spin oscillations in gravitational field / M. Dvornikov // Int. J. Mod. Phys. D. – 2006. – Vol. 15, № 7. – P. 1017-1033.

30. Teryaev, O.V. Sources of time reversal odd spin asymmetries in QCD / O.V. Teryaev // Czech. J. Phys. – 2003. – Vol. 53. – Suppl. B. – P. 47B-58B.
31. Audretsch, J. Trajectories and spin motion of massive spin-1/2 particles in gravitational fields / J. Audretsch // J. Phys. A: Math. and Gen. – 1981. – Vol. 14, № 2. – P. 411-422.
32. Горбацевич, А.К. Квантовая механика в общей теории относительности: Основные принципы и элементарные приложения / А.К. Горбацевич. – Минск : Университетское, 1985. – 160 с.
33. Cianfrani, F. Dirac equations in curved space-time versus Papapetrou spinning particles / F. Cianfrani and G. Montani // Europhys. Lett. – 2008. – Vol. 84, № 3. – P. 30008-1–30008-6.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1-А. Силенко, А.Я. Токовые электрические квадрупольные моменты атомов и ядер / А.Я. Силенко // Известия вузов. Физика. – 1991. – № 7. – С. 53-58.
2-А. Silenko, A.J. Electric Current Quadrupole Moments of Atoms and Nuclei / A.J. Silenko // Journal of Physics B. – 1992. – Vol. 25, № 7. – P. 1661-1665.
3-А. Силенко, А.Я. Квантовомеханическое описание поворота спина частиц при каналировании / А.Я. Силенко // Журнал экспер. и теор. физики. – 1995. – Т. 107, Вып. 4. – С. 1240-1246.
4-А. Силенко, А.Я. Релятивистское уравнение Шредингера и квантовомеханическое уравнение движения спина для каналирования заряженных частиц / А.Я. Силенко // Поверхность. – 1995. – № 4. – С. 106-107.
5-А. Силенко, А.Я. Квантово-механические выражения для токовых электрических дипольного и квадрупольного моментов и токового электростатического контактного взаимодействия / А.Я. Силенко // Известия вузов. Физика. – 1995. – Т. 38, № 4. – С. 66-71.
6-А. Силенко, А.Я. Уравнение Дирака в представлении Фолди-Ваутхаузена, описывающее взаимодействие релятивистских частиц со спином 1/2 с электромагнитным полем / А.Я. Силенко // Теор. мат. физ. – 1995. – Т. 105, № 1. – С. 46-54.
7-А. Силенко, А.Я. Поворот спина заряженных частиц в кристаллах, обусловленный *P*-неинвариантным взаимодействием / А.Я. Силенко // Поверхность. – 1995. – № 11. – С. 91-96.
8-А. Силенко, А.Я. Квантовомеханическая теория поворота спина частиц при каналировании / А.Я. Силенко // Поверхность. – 1995. – № 12. – С. 62-67.

9-A. Silenko, A.J. Spin rotation of charges particles in crystals caused by parity non-conserving interaction / A.J. Silenko // Nuclear Instr. Meth. in Phys. Res. B. – 1996. – Vol. 114, Iss. 3-4. – P. 259-262.
10-А. Силенко, А.Я. О различии классического и квантового описания вращения спина заряженных частиц при каналировании / А.Я. Силенко // Поверхность. – 1997. – № 2. – С. 111-115.
11-А. Силенко, А.Я. Теоретическое исследование токовых электрических квадрупольных моментов ядер / А.Я. Силенко // Ядерная физика. – 1997. – Т. 60, № 3. – С. 432-438.
12-А. Силенко, А.Я. Использование представления Фолди-Ваутхойзена в стандартной модели электрослабого взаимодействия / А.Я. Силенко // Теор. мат. физ. – 1997. – Т. 112, № 1. – С. 161-169.
13-А. Силенко, А.Я. Расчет токовых электрических квадрупольных моментов некоторых ядер / А.Я. Силенко // Известия РАН. Сер. физическая, 1997. – Т. 61, № 11. – С. 2132-2140.
14-А. Силенко, А.Я. Классическое и квантовое уравнения движения спина частиц, взаимодействующих с кристаллами / А.Я. Силенко // Поверхность. – 1998. – № 5. – С. 97-102.
15-А. Силенко, А.Я. Ориентация спина частиц со спином 1/2 в однородном магнитном поле / А.Я. Силенко // Ядерная физика. – 1998. – Т. 61, № 1. – С. 66-71.
16-А. Силенко, А.Я. Точное квантово-механическое описание движения частиц со спином 1/2 и движения спина в однородном магнитном поле / А.Я. Силенко // Журнал экспер. и теор. физики. – 1998. – Т. 114, Вып. 2. – С. 448-457.
17-А. Силенко, А.Я. Поляризация частиц со спином 1/2 в аксиально симметричном магнитном поле / А.Я. Силенко // Журнал экспер. и теор. физики. – 1998. – Т. 114, Вып. 4. – С. 1153-1161.
18-A. Silenko, A.J. Electric Current Multipole Moments in Classical Electrodynamics / A.J. Silenko // Progress of Theoretical Physics. – 1999. – Vol. 101, № 4. – P. 875-884.
19-А. Силенко, А.Я. Учет конечных размеров нуклонов при расчете квадрупольных моментов ядер / А.Я. Силенко // Известия РАН. Серия физическая. – 1999. – Т. 63, № 5. – С. 996-1004.
20-А. Силенко, А.Я. Релятивистские выражения для токовых электрических моментов ядер / А.Я. Силенко // Ядерная физика. – 2000. – Т. 63, № 2. – С. 257-263.
21-А. Силенко, А.Я. Возможность экспериментальной проверки корректности методов вывода уравнений движения спина путем измерения поворота спина частиц при каналировании / А.Я. Силенко // Ядерная физика. – 2000. – Т. 63, № 11. – С. 2135-2138.
22-А. Силенко, А.Я. Квадрупольное и контактное взаимодействие релятивистских частиц с электрическим полем кристаллов / А.Я. Силенко // Ядерная физика. – 2000. – Т. 63, № 11. – С. 2139-2141.

23-А. Силенко, А.Я. Поворот спина заряженных частиц, имеющих анапольный момент, при плоскостном каналировании / А.Я. Силенко // Ядерная физика. – 2000. – Т. 63, № 11. – С. 2142-2144.
24-А. Silenko, A.J. Dirac particle polarization in uniform magnetic field / A.J. Silenko // Czech. J. Phys. – 2001. – Vol. 51, № 3. – P. 219-222.
25-А. Силенко, А.Я. Преобразование операторных уравнений, описывающих взаимодействие релятивистских частиц с электрическим полем / А.Я. Силенко // Ядерная физика. – 2001. – Т. 64, № 5. – С. 1048-1053.
26-А. Силенко, А.Я. Движение спина частиц и ядер с произвольным спином в электрическом поле кристаллов / А.Я. Силенко // Ядерная физика. – 2001. – Т. 64, № 5. – С. 1054-1060.
27-А. Силенко, А.Я. Изменение поляризации пучков частиц в накопительных кольцах с помощью продольного магнитного поля / А.Я. Силенко // Письма в ЖТФ. – 2003. – Т. 29, Вып. 6. – С. 42-47.
28-А. Силенко, А.Я. Квантовомеханические уравнения движения частиц и спина в поляризованных средах / А.Я. Силенко // Журнал экспер. и теор. физики. – 2003. – Т. 123, Вып. 4. – С. 688-695.
29-А. Силенко, А.Я. Движение спина частиц в неоднородном электромагнитном поле // Журнал экспер. и теор. физики. – 2003. – Т. 123, вып. 5. – С. 883-890.
30-А. Silenko, A.J. Foldy-Wouthuysen transformation for relativistic particles in external fields / A.J. Silenko // J. Math. Phys. – 2003. – Vol. 44, № 7. – P. 2952-2966.
31-А. Силенко, А.Я. Движение частиц и спина в поляризованном веществе / А.Я. Силенко // Поверхность. – 2003. – № 9. – С. 61-67.
32-А. Силенко, А.Я. Проверка уравнений движения спина частиц в неоднородном электрическом поле / А.Я. Силенко // Поверхность. – 2003. – № 9. – С. 68-75.
33-А. Farley, F.J.M. A new method of measuring electric dipole moments in storage rings / F.J.M. Farley, K. Jungmann, J.P. Miller, W.M. Morse, Y.F. Orlov, B.L. Roberts, Y.K. Semertzidis, A. Silenko, and E. J. Stephenson // Phys. Rev. Lett. – 2004. – Vol. 93, Iss. 5. – P. 052001-1–052001-4.
34-А. Silenko, A.J. Semiclassical limit for Dirac particles interacting with a gravitational field / A.J. Silenko and O.V. Teryaev // Phys. Rev. D. – 2005. – Vol. 71, № 6. – P. 064016-1–064016-8.
35-А. Силенко, А.Я. Особенности аннигиляции поляризованного ортопозитрония в поляризованных средах / А.Я. Силенко // Поверхность. – 2005. – № 4. – С. 45-51.
36-А. Силенко, А.Я. Динамика спина ортопозитрония в средах с поляризованными электронами / А.Я. Силенко // Поверхность. – 2005. – № 4. – С. 52-58.
37-А. Силенко, А.Я. Квантово-механическое описание электромагнитного взаимодействия релятивистских частиц с электрическим и магнитным дипольными моментами / А.Я. Силенко // Известия ВУЗ. Физика. – 2005. – Т. 48, № 8. – С. 9-12.

38-A. Silenko, A.J. Equation of spin motion in storage rings in the cylindrical coordinate system / A.J. Silenko // Phys. Rev. ST Accel. Beams. – 2006. – Vol. 9, Iss. 3. – P. 034003-1–034003-7.
39-A. Silenko, A.J. Semiclassical equation of spin motion in storage rings and some quantum effects / A.J. Silenko // Czech. J. Phys. – 2006. – Vol. 56. – Suppl. C. – P. C281-C286.
40-A. Silenko, A.J. Investigation of spin dynamics of spin-1/2 and spin-1 particles near resonance with Hamilton approach / A.J. Silenko // Czech. J. Phys. – 2006. – Vol. 56. – Suppl. F. – P. F245-F254.
41-A. Silenko, A.J. Tensor electric polarizability of the deuteron in storage-ring experiments / A.J. Silenko // Phys. Rev. C. – 2007. – Vol. 75, Iss. 1. – P. 014003-1–014003-10.
42-А. Силенко, А.Я. Измерение тензорной электрической поляризуемости дейтрона в накопительных кольцах / А.Я. Силенко // Известия РАН. Сер. физическая. – 2007. – Т. 71, № 9. – С. 1372-1376.
43-А. Силенко, А.Я. Измерение тензорной поляризации позитрония в магнитном поле / А.Я. Силенко // Поверхность. – 2007, № 3. – С. 98-104.
44-А. Силенко, А.Я. Эволюция поляризации позитрония в средах с поляризованными электронами / А.Я. Силенко // Поверхность. – 2007, № 4. – С. 76-80.
45-А. Силенко, А.Я. Метод измерения тензорной поляризации позитрония / А.Я. Силенко // Письма в ЖТФ. – 2007. – Т. 33, вып. 16. – С. 39-45.
46-A. Silenko, A.J. Equivalence principle and experimental tests of gravitational spin effects / A.J. Silenko and O.V. Teryaev // Phys. Rev. D. – 2007. – Vol. 76, № 6. – P. 061101-1–061101-5.
47-А. Силенко, А.Я. Учет вращения Земли в экспериментах по поиску электрического дипольного момента нейтрона / А.Я. Силенко // Письма в ЭЧАЯ. – 2007. – Т. 4, № 6 (142). – С. 784-788.
48-A. Silenko, A.J. Foldy-Wouthyusen transformation and semiclassical limit for relativistic particles in strong external fields / A.J. Silenko // Phys. Rev. A. – 2008. – Vol. 77, № 1. – P. 012116-1–012116-7.
49-A. Silenko, A.J. Potential for measurement of the tensor magnetic polarizability of the deuteron in storage ring experiments / A.J. Silenko // Phys. Rev. C. – 2008. – Vol. 77, Iss. 2. – P. 021001(R)-1–021001(R)-3.
50-A. Silenko, A.J. Classical and quantum spins in curved spacetimes / A.J. Silenko // Acta Phys. Polon. B Proc. Suppl. – 2008. – Vol. 1, № 1. – P. 87-107.
51-А. Силенко, А.Я. Оператор Гамильтона и квазиклассический предел для скалярных частиц в электромагнитном поле / А.Я. Силенко // Теор. мат. физ. – 2008. – Т. 156, № 3. – С. 398-411.
52-A. Silenko, A.J. Polarization of spin-1 particles in a uniform magnetic field / A.J. Silenko // European Physical Journal C. – 2008. – Vol. 57, № 3. – P. 595-599.

53-A. Silenko, A.J. Foldy-Wouthyusen transformation and exact description of spin dynamics in strong external fields / A.J. Silenko // Eur. Phys. J. Special Topics. – 2008. – Vol. 162, № 1. – P. 53-58.
54-A. Silenko, A.J. Manifestation of tensor magnetic polarizability of the deuteron in storage ring experiments / A.J. Silenko // Eur. Phys. J. Special Topics. – 2008. – Vol. 162, № 1. – P. 59-62.
55-A. Silenko, A.J. Connection between Wave Functions in the Dirac and Foldy-Wouthuysen Representations / A.J. Silenko // Письма в ЭЧАЯ. – 2008. – Т. 5, № 6(148). – С. 842-850.
56-A. Obukhov, Yu.N. Motion of Spin in the Gravitational Field of a Rotating Body / Yu.N. Obukhov, A.J. Silenko, O.V. Teryaev // Gravitation and Cosmology. – 2009. – Vol. 15, № 2. – P. 171-173.
57-A. Silenko, A.J. Nonlinear Dynamics of Deuteron Spin in Storage Rings Caused by the Tensor Electric and Magnetic Polarizabilities / A.J. Silenko // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. – 2009. – Vol. 12, № 2. – P. 185-192.
58-A. Obukhov, Yu.N. Spin dynamics in gravitational fields of rotating bodies and the equivalence principle / Yu.N. Obukhov, A.J. Silenko, O.V. Teryaev // Phys. Rev. D. – 2009. – Vol. 80, № 6. – P. 064044-1–064044-10.
59-A. Silenko, A.J. Potential for measurement of the tensor polarizabilities of nuclei in storage rings by the frozen spin method / A.J. Silenko // Phys. Rev. C. – 2009. – Vol. 80, Iss. 4. – P. 044315-1–044315-5.
60-A. Neznamov, V.P. Foldy-Wouthuysen wave functions and conditions of transformation between Dirac and Foldy-Wouthuysen representations / V.P. Neznamov and A.J. Silenko // J. Math. Phys. – 2009. – Vol. 50, Iss. 12. – P. 122302-1–122302-15.
61-A. Silenko, A.J. Potential for a new muon g-2 experiment / A.J. Silenko // Phys. Lett. B. – 2011. – Vol. 695, Iss. 1-4. – P. 55-58.
62-А. Силенко, А.Я. Измерение квадрупольных моментов нестабильных ядер при каналировании и возможность обнаружения эффекта появления векторной поляризации у тензорно-поляризованного пучка ядер / А.Я. Силенко // Письма в ЭЧАЯ. – 2011. – Т. 8, № 4. – С. 615-625.
63-A. Obukhov, Yu.N. Dirac fermions in strong gravitational fields / Yu.N. Obukhov, A.J. Silenko, O. V. Teryaev // Phys. Rev. D. – 2011. – Vol. 84, № 2. – P. 024025-1–024025-10.
64-А. Силенко, А.Я. Эффект появления векторной поляризации у тензорно-поляризованного пучка ядер при каналировании и измерение квадрупольных моментов нестабильных ядер / А.Я. Силенко // Поверхность. – 2012. – № 2. – С. 88-94.

Статьи в сборниках научных трудов и материалов конференций

65-A. Silenko, A.J. Polarization of High-Energy Spin-1/2 Particles in Magnetic Field / A.J. Silenko // Proc. of the 13th Int. Symposium on High Energy Spin Physics, Protvino, Russia, Sept. 8-12, 1998 / World Scientific ; editors: N.E. Tyurin [et al.]. – Singapore, 1999. – P. 516–518.
66-A. Silenko, A.J. Use of Foldy-Wouthuysen Representation in Relativistic Quantum Theory / A.J. Silenko // Proc. of the XIV-th Int. Workshop High Energy Physics and Quantum Field Theory, Moscow, May 27 – June 2, 1999 / SINP MSU ; editors: B.B. Levchenko and V.I. Savrin. – Moscow, 2000. – P. 630-635.
67-A. Silenko, A.J. Foldy-Wouthuysen transformation for high energy spin-1/2 particles / A.J. Silenko // Proc. of the Int. Workshop on Quantum Systems. New Trends and Methods, Minsk, June 9-13, 1999 / Met ; editors: L.M. Tomil'chik, I.D. Feranchuk, S.A. Maksimenko. – Minsk, 2001. – P. 119-128.
68-A. Silenko, A.J. Interaction of Spin-1 Particles with the Electromagnetic Field / A.J. Silenko // Proc. of the XVI-th Int. Workshop on High Energy Physics and Quantum Field Theory, Moscow, Sept. 6-12, 2001 / SINP MSU ; editors: M.N. Dubinin and V.I. Savrin. – Moscow, 2002. – P. 374-381.
69-A. Silenko, A.J. Particle and Spin Motion in Polarized Media / A.J. Silenko // Proc. of X Advanced Research Workshop on High Energy Spin Physics, Dubna, Sept. 16-20, 2003 / JINR ; editors: A.V. Efremov, O.V. Teryaev. – Dubna, 2004. – P. 180-185.
70-A. Miller, J.P. A New Experiment to Measure the Muon Electric Dipole Moment / J.P. Miller, R.M. Carey, V. Logashenko, K.R. Lynch, B.L. Roberts, A. Silenko, G. Bennett, D.M. Lazarus, L.B. Leipuner, W. Marciano, W. Meng, W.M. Morse, R. Prigl, Y.K. Semertzidis, V. Balakin, A. Bazhan, A. Dunikov, B. Khazin, I.B. Khriplovich, G. Sylvestrov, Y. Orlov, K. Jungmann, P.T. Debevec, D.W. Hertzog, C.J.G. Onderwater, C.S. Özben, E. Stephenson, M. Auzinsh, P. Cushman, R. McNabb, N. Shafer-Ray, K. Yoshimura, A. Aoki, Y. Kuno, A. Sato, M. Iwasaki, and F.J.M. Farley // AIP Conf. Proc. – 2004. – Vol. 698, Iss. 1. – P. 196-199.
71-A. Semertzidis, Y.K. A New Method for a Sensitive Deuteron EDM Experiment / Y.K. Semertzidis, M. Aoki, M. Auzinsh, V. Balakin, A. Bazhan, G.W. Bennett, R.M. Carey, P. Cushman, P.T. Debevec, A. Dudnikov, F.J.M. Farley, D.W. Hertzog, M. Iwasaki, K. Jungmann, D. Kawall, B. Khazin, I. B. Khriplovich, B. Kirk, Y. Kuno, D. M. Lazarus, L.B. Leipuner, V. Logashenko, K.R. Lynch, W.J. Marciano, R. McNabb, W. Meng, J.P. Miller, W.M. Morse, C.J.G. Onderwater, Y.F. Orlov, C.S. Ozben, R. Prigl, S. Rescia, B.L. Roberts, N. Shafer-Ray, A. Silenko, E.J. Stephenson, K. Yoshimura // AIP Conf. Proc. – 2004. – Vol. 698, Iss. 1. – P. 200-204.
72-A. Silenko, A.J. Spin oscillations in storage rings / A.J. Silenko // Proc. of 16th Int. Spin Physics Symposium, Trieste, Italy, Oct. 10-16, 2004 / World Scientific ; editors: K. Aulenbacher [et al.]. – Singapore, 2005. – P. 726-729.

73-A. Silenko, A.J. Analysis and verification of relativistic wave equations for spin-1 particles / A.J. Silenko // Proc. of the XVIIth Int. Workshop "High Energy Physics and Quantum Field Theory", Samara-Saratov, Russia, Sept. 4-11, 2003 / SINP MSU; editors: M.N. Dubinin and V.I. Savrin. – Moscow, 2005. – P. 381-387.
74-А. Силенко, А.Я. Оператор Гамильтона и уравнение Даффина-Кеммера для скалярных частиц в электромагнитном поле / А.Я. Силенко // Ковариантные методы в теоретической физике. Физика элементарных частиц и теория относительности / Ин-т физики НАН Беларуси ; редкол.: Л.М. Томильчик (гл. ред.) [и др.]. – Вып. 6. – Минск, 2005. – С. 135-139.
75-A. Silenko, A.J. Interactions of spin zero particles with electromagnetic and gravitational fields / A.J. Silenko // Proc. of the XVIII Int. Workshop "High Energy Physics and Quantum Field Theory", St. Petersburg, Russia, June 17-23, 2004 / MaxPress ; editors: M.N. Dubinin and V.I. Savrin. – Moscow, 2005. – P. 357-363.
76-A. Silenko, A.J. Semiclassical Description of Particle Spin Motion in Storage Rings and Quantum Effects / A.J. Silenko // Proc. of XI Advanced Research Workshop on High Energy Spin Physics, Dubna, Sept. 27 – Oct. 1, 2005 / JINR ; editors: A.V. Efremov and S.V. Goloskokov. – Dubna, 2006. – P. 221-227.
77-A. Silenko, A.J. Manifestation of tensor polarizabilities of the deuteron in storage-ring experiments / A.J. Silenko // Nonlinear Dynamics and Applications: Proc. of the 14th Annual Seminar, Minsk, May 22-25, 2007 / Editors: L.F. Babichev, V.I. Kuvshinov. – Vol. 14. – Minsk, 2007. – P. 187-196.
78-A. Silenko A.J. Foldy-Wouthuysen Transformation for Relativistic Particles in External Fields // Actual Problems of Microworld Physics: Proc. of the Int. School-Seminar, Gomel, July 23 – Aug. 3, 2007 / JINR ; editors: A. Ilychev [et al.]. – Dubna, 2008. – Vol. 2. – P. 46-60.
79-A. Silenko, A.J. Tensor magnetic polarizability of the deuteron in storage-ring experiments / A.J. Silenko // Proc. of XII Advanced Research Workshop on High Energy Spin Physics, Dubna, Sept. 3-7, 2007 / JINR ; editors: A.V. Efremov and S.V. Goloskokov. – Dubna, 2008. – P. 441-444.
80-А. Силенко, А.Я. Динамика классического и квантового спина в искривленном пространстве-времени / А.Я. Силенко // II конгресс физиков Беларуси, Минск, 3-5 ноября, 2008 г. : сб. науч. трудов / ГНУ «Ин-т физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси» ; редкол.: С.Я. Килин [и др.]. – Минск, 2008. – С. 24-25.
81-А. Силенко, А.Я. Тензорная электрическая поляризуемость дейтрона в экспериментах в накопительных кольцах / А.Я. Силенко // Фундаментальные и прикладные физические исследования 2002-2009 гг. : сб. науч. трудов / БГУ ; под ред. проф. В.Г. Барышевского. – Минск, 2009. – С. 25-46.
82-А. Силенко, А.Я. Динамика спина в экспериментах по поиску электрических дипольных моментов частиц, проводимых в накопительных кольцах / А.Я. Силенко // Фундаментальные и прикладные физические исследования 2002-2009 гг. : сб. науч. трудов / БГУ ; под ред. проф. В.Г. Барышевского. – Минск, 2009. – С. 47-70.

83-A. Obukhov, Y.N. Classical and Quantum Equations of Motion of Spin for Particles in Nonstatic Spacetimes / Y.N. Obukhov, A.J. Silenko, and O.V. Teryaev // XIII Int. Conf. on Selected Problems of Modern Physics, dedicated to the 100th anniversary of the birth of D.I. Blokhintsev (1908-1979). Proc. of the Conf., Dubna, June 23-27, 2008 / JINR ; editors: B.M. Barbashov and S.M. Eliseev. – Dubna, 2009. – P. 168-170.
84-A. Silenko, A.J. Possibility of Measurement of the Tensor Electric and Magnetic Polarizabilities of the Deuteron Spin and Other Nuclei in Experiments with Polarized Beams / A.J. Silenko // Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics. Proc. of the XIX Int. Baldin Seminar on High Energy Physics Problems, Dubna, Sept. 23 – Oct. 4, 2008 / JINR ; editors: A.M. Baldin and V.V. Burov. – Dubna, 2009. – Vol. 2. – P. 33-39.
85-A. Silenko, A.J. Potential for Measurement of the Tensor Polarizabilities of Nuclei in Storage Rings by the Frozen Spin Method / A.J. Silenko // Nuclear Structure and Related Topics : Proc. of the Int. Conf., Dubna, June 30 – July 4, 2009 / JINR ; editors: A.I. Vdovin, V.V. Voronov, R.V. Jolos. – Dubna, 2009. – Vol. 2. – P. 285-289.
86-A. Silenko, A.J. Potential for a new muon g-2 experiment / A.J. Silenko // XIII Advanced Research Workshop on High Energy Spin Physics : Proc., Dubna, Sept. 1–5, 2009 / JINR ; editors: A.V. Efremov and S.V. Goloskokov. – Dubna, 2010. – P. 131-134.
87-A. Obukhov, Y.N. Dynamics of spin in nonstatic spacetimes / Y.N. Obukhov, A.J. Silenko, and O.V. Teryaev // XIII Advanced Research Workshop on High Energy Spin Physics : Proc., Dubna, Sept. 1–5, 2009 / JINR ; editors: A.V. Efremov and S.V. Goloskokov. – Dubna, 2010. – P. 455-458.
88-A. Obukhov, Yu.N. Spin in stationary gravitational fields and rotating frames / Yu.N. Obukhov, A.J. Silenko, O.V. Teryaev // AIP Conf. Proc. – 2010. – Vol. 1205. – P. 112-120.
89-A. Silenko, A.J. Spin-tensor Effects at Channeling and a Potential for Measuring Quadrupole Moments of Unstable Nuclei / A.J. Silenko // Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics : Proc. of the XX Int. Baldin Seminar on High Energy Physics Problems, Dubna, Oct. 4-9, 2010 / JINR ; editors: S.G. Bondarenko [et al.]. – Dubna, 2011. – Vol. 2. – P. 176-180.
90-A. Silenko, A.J. Potential for a new measurement of muon g-2 factor / A.J. Silenko // J. Phys.: Conf. Ser. – 2011. – Vol. 295, № 1. – P. 012033-1–012033-5.
91-A. Baryshevsky, V.G. Potential for the measurement of the tensor electric and magnetic polarizabilities of the deuteron in storage-ring experiments with polarized beams / V.G. Baryshevsky and A.J. Silenko // J. Phys.: Conf. Ser. – 2011. – Vol. 295, № 1. – P. 012034-1–012034-5.
92-A. Obukhov, Yu.N. Dirac particle spin in strong gravitational fields / Yu.N. Obukhov, A.J. Silenko, and O.V. Teryaev // Proc. of XIV Advanced Research Workshop on High Energy Spin Physics, Dubna, Sept. 20-24, 2011 / JINR ; editors: A.V. Efremov and S.V. Goloskokov. – Dubna, 2012. – P. 403-406.

Тезисы докладов

93-А. Силенко, А.Я. Релятивистское уравнение Шредингера и квантовомеханическое уравнение движения спина для каналирования заряженных частиц / А.Я. Силенко // Тез. докл. XXIV Межнац. совещ. по физике взаимодействия заряж. частиц с кристаллами, Москва, 30 мая – 1 июня 1994 г. / Изд. МГУ. – Москва, 1994. – С. 32.

94-А. Силенко, А.Я. Поворот спина заряженных частиц в кристаллах, обусловленный P-неинвариантным взаимодействием / А.Я. Силенко // Тез. докл. XXV Межнац. совещ. по физике взаимодействия заряж. частиц с кристаллами, Москва, 29-31 мая 1995 г. / Изд. МГУ. – Москва, 1995. – С. 27.

95-А. Силенко, А.Я. Квантовомеханическая теория поворота спина частиц при каналировании / А.Я. Силенко // Тез. докл. XXV Межнац. совещ. по физике взаимодействия заряж. частиц с кристаллами, Москва, 29-31 мая 1995 г. / Изд. МГУ. – Москва, 1995. – С. 28.

96-А. Силенко, А.Я. О различии классического и квантового описания вращения спина заряженных частиц при каналировании / А.Я. Силенко // Тез. докл. XXVI Междун. конф. по физике взаимодействия заряж. частиц с кристаллами, Москва, 27-29 мая 1996 г. / Изд. МГУ. – Москва, 1996. – С. 57.

97-А. Силенко, А.Я. Расчет токовых электрических квадрупольных моментов некоторых ядер / А.Я. Силенко // Тез. докл. 46-го Междун. совещ. по физике ядра, Москва, 18-21 июня 1996г. / ПИЯФ. – Санкт-П., 1996. – С. 303.

98-А. Силенко, А.Я. Классическое и квантовое уравнения движения спина частиц, взаимодействующих с кристаллами / А.Я. Силенко // Тез. докл. XXVII Междун. конф. по физике взаимодействия заряж. частиц с кристаллами, Москва, 26-28 мая 1997г. / Изд. МГУ. – Москва, 1997. – С. 23.

99-А. Силенко, А.Я. Расчет движения спина частиц при плоскостном каналировании в прямых кристаллах / А.Я. Силенко // Тез. докл. XXVIII Междун. конф. по физике взаимодействия заряж. частиц с кристаллами, Москва, 25-27 мая 1998г. / Изд. МГУ. – Москва, 1998. – С. 50.

100-А. Силенко, А.Я. Учет конечных размеров нуклонов при расчете квадрупольных моментов ядер / А.Я. Силенко // Тез. докл. 48-го Междун. совещ. по физике ядра, Москва, 16-19 июня 1998 г. / ПИЯФ. – Санкт-П., 1998. – С. 109.

101-А. Силенко, А.Я. Возможность экспериментальной проверки корректности методов вывода уравнений движения спина путем измерения поворота спина частиц при каналировании / А.Я. Силенко // Тез. докл. XXIX Междун. конф. по физике взаимодействия заряж. частиц с кристаллами, Москва, 31 мая – 2 июня 1999 г. / Изд. МГУ. – Москва, 1999. – С. 26.

102-А. Силенко, А.Я. Квадрупольное и контактное взаимодействие релятивистских частиц с электрическим полем кристаллов / А.Я. Силенко // Тез. докл. XXIX Междун. конф. по физике взаимодействия заряж. частиц с кристаллами, Москва, 31 мая – 2 июня 1999г. / Изд. МГУ. – Москва, 1999. – С. 28.

103-А. Силенко, А.Я. Поворот спина заряженных частиц, имеющих анапольный момент, при плоскостном каналировании / А.Я. Силенко // Тез. докл. XXIX Междун. конф. по физике взаимодействия заряж. частиц с кристаллами, Москва, 31 мая – 2 июня 1999г. / Изд. МГУ. – Москва, 1999. – С. 29.
104-А. Силенко, А.Я. Преобразование операторных уравнений, описывающих взаимодействие релятивистских частиц с электрическим полем / А.Я. Силенко // Тез. докл. XXX Междун. конф. по физике взаимодействия заряж. частиц с кристаллами, Москва, 29-31 мая 2000г. / Изд. МГУ. – Москва, 2000. – С. 26.
105-А. Силенко, А.Я. Движение спина частиц и ядер с произвольным спином в электрическом поле кристаллов / А.Я. Силенко // Тез. докл. XXX Междун. конф. по физике взаимодействия заряж. частиц с кристаллами, Москва, 29-31 мая 2000г. / Изд. МГУ. – Москва, 2000. – С. 28.
106-А. Силенко, А.Я. Проверка уравнений движения спина частиц в неоднородном электрическом поле / А.Я. Силенко // Тез. докл. XXXII Междун. конф. по физике взаимодействия заряж. частиц с кристаллами, Москва, 27-29 мая 2002г. / УНЦ ДО. – Москва, 2002. – С. 36.
107-А. Силенко, А.Я. Движение частиц и спина в поляризованном веществе / А.Я. Силенко // Тез. докл. XXXII Междун. конф. по физике взаимодействия заряж. частиц с кристаллами, Москва, 27-29 мая 2002г. / УНЦ ДО. – Москва, 2002. – С. 37.
108-A. Silenko, A.J. Particle and Spin Motion in Polarized Media / A.J. Silenko // X Advanced Research Workshop on High Energy Spin Physics. Abstracts, Dubna, Sept. 16-20, 2003 / JINR. – Dubna, 2004. – P. 29.
109-A. Silenko, A.J. Spin oscillations in storage rings / A.J. Silenko // XVI Int. Spin Physics Symposium. Book of Abstracts, Trieste, Italy, Oct. 10-16, 2004 / INFN. – Trieste, Italy, 2004. – P. 172.
110-А. Силенко, А.Я. Динамика спина ортопозитрония в средах с поляризованными электронами / А.Я. Силенко // Тез. докл. XXXIV Междун. конф. по физике взаимодействия заряж. частиц с кристаллами, Москва, 31 мая – 2 июня 2004 г. / УНЦ ДО. – Москва, 2004. – С. 22.
111-А. Силенко, А.Я. Особенности аннигиляции поляризованного ортопозитрония в поляризованных средах / А.Я. Силенко // Тез. докл. XXXIV Междун. конф. по физике взаимодействия заряж. частиц с кристаллами, Москва, 31 мая – 2 июня 2004 г. / УНЦ ДО. – Москва, 2004. – С. 23.
112-A. Silenko, A.J. Semiclassical Description of Particle Spin Motion in Storage Rings and Quantum Effects / A.J. Silenko // XI Advanced Research Workshop on High Energy Spin Physics: Abstracts, Dubna, Sept. 27 – Oct. 1, 2005 / JINR. – Dubna, 2005. – P. 26.
113-А. Силенко, А.Я. Измерение тензорной поляризации позитрония в магнитном поле / А.Я. Силенко // Тез. докл. XXXVI Междун. конф. по физике взаимодействия заряж. частиц с кристаллами, Москва, 30 мая – 1 июня 2006г. / Изд. МГУ. – Москва, 2006. – С. 29.

114-А. Силенко, А.Я. Эволюция поляризации позитрония в средах с поляризованными электронами / А.Я. Силенко // Тез. докл. XXXVI Междун. конф. по физике взаимодействия заряж. частиц с кристаллами, Москва, 30 мая – 1 июня 2006 г. / Изд-во МГУ. – Москва, 2006. – С. 30.
115-A. Silenko, A.J. Measurement of tensor electric polarizability of deuteron in storage rings / A.J. Silenko // The International Conference "Nuclear Structure and Related Topics". Abstracts, Dubna, June 13-17, 2006 / JINR. – Dubna, 2006. – P. 68.
116-А. Силенко, А.Я. Измерение тензорной электрической поляризуемости дейтрона в накопительных кольцах / А.Я. Силенко // 56 Международная конференция "Ядро-2006" по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Сборник тезисов, Саров, 4-8 сентября, 2006 г. / РФЯЦ-ВНИИЭФ. – Саров, 2006. – С. 100.
117-A. Silenko, A.J. Tensor magnetic polarizability of the deuteron in storage-ring experiments / A.J. Silenko // XII Advanced Research Workshop on High Energy Spin Physics. Abstracts, Dubna, Sept. 3-7, 2007 / JINR. – Dubna, 2007. – P. 32-33.
118-A. Obukhov, Y.N. Spin motion in a gravitational field of a rotating body / Y.N. Obukhov, A.J. Silenko, O.V. Teryaev // 13 Российская гравитационная конф. – междун. конф. по гравитации, космологии и астрофизике: Тезисы докладов, Москва, 23-28 июня 2008 г. / РУДН. – Москва, 2008. – С. 76-77.
119-А. Силенко, А.Я. Динамика классического и квантового спина в искривленном пространстве-времени / А.Я. Силенко // II конгресс физиков Беларуси. Сборник тезисов и программа, Минск, 3-5 ноября 2008 г. / Под ред. П.А. Апанасевича [и др.]. – Минск, 2008. – С. 33.
120-A. Obukhov, Y.N. Spin in stationary gravitational fields and rotating frames. In: The Sun, the stars, the Universe, and general relativity / Y.N. Obukhov, A.J. Silenko, O.V. Teryaev // Int. conf. in honor of Ya.B. Zeldovich 95th anniversary. Abstracts and Program, Minsk, April 20-23, 2009 / Minsk, 2009. – P. 5-6.
121-A. Silenko, A.J. Potential for measurement of the tensor polarizabilities of nuclei in storage rings by the frozen spin method / A.J. Silenko // Nuclear Structure and Related Topics: Contributions of the Int. Conf., Dubna, June 30 – July 4, 2009 / JINR. – Dubna, 2009. – P. 110.
122-A. Silenko, A.J. Foldy-Wouthyusen transformation and semiclassical limit for relativistic quantum mechanics / A.J. Silenko // XVI Int. Congress on Mathematical Physics. Programme. Abstracts. Participants, Prague, August 3-8, 2009 / Prague, 2009. – P. 99.
123-A. Silenko, A.J. Potential for new muon g-2 experiment / A.J. Silenko // XIII Advanced Research Workshop on High Energy Spin Physics: Abstracts, Dubna, Sept. 1-5, 2009 / JINR. – Dubna, 2009. – P. 37-38.
124-A. Obukhov, Y.N. Dynamics of spin in nonstatic spacetimes / Y.N. Obukhov, A.J. Silenko, O.V. Teryaev // XIII Advanced Research Workshop on High Energy Spin Physics: Abstracts, Dubna, Sept. 1-5, 2009 / JINR. – Dubna, 2009. – P. 38.

125-А. Силенко, А.Я. Возможность проверки сохранения CPT-симметрии в гравитационном взаимодействии с помощью метода "замораживания" спина в накопительных кольцах / А.Я. Силенко // Всероссийское совещ. по прецизионной физике и фундаментальным физическим константам. Тезисы докладов, Дубна, 1-4 декабря 2009 г. / ОИЯИ. – Дубна, 2009. – С. 55.
126-А. Силенко, А.Я. Эффект появления векторной поляризации у тензорно поляризованного пучка ядер при каналировании и измерение квадрупольных моментов короткоживущих ядер / А.Я. Силенко // Тез. докл. XL Междун. конф. по физике взаимодействия заряж. частиц с кристаллами, Москва, 25-27 мая 2010 г. / Университетская книга ; под общ. ред. проф. А.Ф. Тулинова. – Москва, 2010. – С. 68.
127-A. Silenko, A.J. Potential for a new measurement of muon g-2 factor / A.J. Silenko // 19th International Spin Physics Symposium: Book of Abstracts, Jülich, Germany, Sept. 27 – Oct. 2, 2010 / Jülich Forschungszentrum. – Jülich, 2010. – P. 107.
128-A. Baryshevsky, V.G. Potential for measurement of the tensor electric and magnetic polarizabilities of the deuteron in storage-ring experiments with polarized beams / V.G. Baryshevsky and A.J. Silenko // 19th International Spin Physics Symposium: Book of Abstracts, Jülich, Germany, Sept. 27 – Oct. 2, 2010 / Jülich Forschungszentrum. – Jülich, 2010. – P. 168.
129-A. Obukhov, Yu.N. Dirac particle spin in strong gravitational fields / Yu.N. Obukhov, A.J. Silenko, and O.V. Teryaev // XIV Advanced Research Workshop on High Energy Spin Physics: Abstracts, Dubna, Sept. 20-24, 2011 / JINR. – Dubna, 2011. – P. 35.
130-А. Силенко, А.Я. Преобразование Фолди-Ваутхойзена для частиц с произвольным спином в сильных внешних полях / А.Я. Силенко // III конгресс физиков Беларуси. Сборник тезисов и программа, 25-27 сентября 2011 г. / Под ред. П.А. Апанасевича [и др.]. – Минск, 2011. – С. 38.
131-А. Обухов, Ю.Н. Возможность проверки сохранения *CPT*-симметрии в гравитационном взаимодействии с помощью электрон-позитронных пучков в накопительных кольцах / Ю.Н. Обухов, А.Я. Силенко и О.В. Теряев // Всероссийское совещ. по прецизионной физике и фундаментальным физическим константам. Тезисы докладов, Дубна, 5-9 декабря 2011 г. / ОИЯИ. – Дубна, 2011. – С. 40.

РЭЗЮМЭ
Сіленка Аляксандр Якаўлевич

Апісанне рэлятывісцкай квантавай дынамікі спінавых часціц ў знешніх палях і ў рэчыве на аснове новага метаду пераходу да прадстаўлення Фолдзі-Ваутхойзена

Ключавыя словы: пераўтварэнне Фолдзі-Ваутхойзена, спін, ўраўненні руху, накапляльныя кольцы, каналіраванне, тэнзарная палярызуемасць, незахаванне цотнасці, эфект Лензе-Тыррынга, пазітроній.

Мэта работы: распрацоўка новага метаду прывядзення базавых квантава-механічных ўраўненняў для рэлятывісцкіх бясспінавых часціц і часціц са спінам ў знешніх электрамагнітных, слабых і гравітацыйных палях да прадстаўлення Фолдзі-Ваутхойзена, вывад аператараў Гамільтона і квантава-механічных ўраўненняў, якія апісваюць дынаміку імпульсу і спіна, і знаходжанне іх класічнай мяжы.

На аснове распрацаванага метаду атрыманы аператар Гамільтона і рэлятывісцкія квантава-механічныя ўраўненні для імпульсу і спіна, якія апісваюць электрамагнітнае і электраслабое ўзаемадзеянні часціц са спінамі 0, 1/2 і 1 і с электрычнымі і магнітнымі дыпольнымі момантамі і гравітацыйнае ўзаемадзеянне дыракаўскіх часціц. Знойдзена іх класічная мяжа. Вызначана дастатковая ўмова дакладнага пераўтварэння да прадстаўлення Фолдзі-Ваутхойзена, ўсталявана сувязь паміж уласнымі хвалевымі функцыямі ў прадстаўленнях Дырака і Фолдзі-Ваутхойзена і знойдзены новыя выпадкі дакладнага пераўтварэння. Атрыманыя вынікі выкарыстаны пры падрыхтоўцы эксперыменту па пошуку электрычных дыпольных момантаў часціц і ядзер у накапляльных кольцах, для вызначэння умоў вымярэння тэнзарных электрычнай і магнітнай палярызуемасцей дэйтрона ў рамках гэтага эксперыменту і рашэння задачы апісання дынамікі спіна часціц у рэчыве і ў знешніх палях, важнай для правядзення эксперыментальных і прыкладных даследаванняў. Распрацавана тэорыя спін-ізахроннага накапляльнага кальца з неаднародным магнітным полем і абгрунтавана перспектыўнасць яго выкарыстання для вымярэння анамальнага магнітнага моманту мюона. Выведзены рэлятывісцкія формулы для прэцэсіі спіна ў гравітацыйным полі вярчальнай крыніцы.

Вобласць прымянення атрыманых вынікаў ўключае рэлятывісцкую квантавую механіку, тэорыю гравітацыі, тэарэтычную і эксперыментальную фізіку высокіх энергій.

РЕЗЮМЕ
Силенко Александр Яковлевич

Описание релятивистской квантовой динамики спиновых частиц во внешних полях и в веществе на основе нового метода перехода к представлению Фолди-Ваутхойзена

Ключевые слова: преобразование Фолди-Ваутхойзена, спин, уравнения движения, накопительные кольца, каналирование, тензорная поляризуемость, несохранение четности, эффект Лензе-Тирринга, позитроний.

Цель работы: разработка нового метода приведения базовых квантово-механических уравнений для релятивистских бесспиновых частиц и частиц со спином во внешних электромагнитных, слабых и гравитационных полях к представлению Фолди-Ваутхойзена, вывод операторов Гамильтона и квантово-механических уравнений, описывающих динамику импульса и спина, и нахождение их классического предела.

На основе разработанного метода получены оператор Гамильтона и релятивистские квантово-механические уравнения движения для импульса и спина в представлении Фолди-Ваутхойзена, описывающие электромагнитное и электрослабое взаимодействия частиц со спинами 0, 1/2 и 1 и с электрическими и магнитными дипольными моментами и гравитационное взаимодействие дираковских частиц. Найден их классический предел. Определено достаточное условие точного преобразования к представлению Фолди-Ваутхойзена, установлена связь между собственными волновыми функциями в представлениях Дирака и Фолди-Ваутхойзена и найдены новые случаи точного преобразования. Полученные результаты использованы при подготовке эксперимента по поиску электрических дипольных моментов частиц и ядер в накопительных кольцах, для определения условий измерения тензорных электрической и магнитной поляризуемостей дейтрона в рамках этого эксперимента и решения задачи описания динамики спина частиц в веществе и во внешних полях, важной для проведения экспериментальных и прикладных исследований. Разработана теория спин-изохронного накопительного кольца с неоднородным магнитным полем и обоснована перспективность его использования для измерения аномального магнитного момента мюона. Выведены релятивистские формулы для прецессии спина в гравитационном поле вращающегося источника.

Область применения полученных результатов включает релятивистскую квантовую механику, теорию гравитации, теоретическую и экспериментальную физику высоких энергий.

SUMMARY
Silenko Alexander Yakovlevich

Description of relativistic quantum dynamics of spinning particles in external fields and in matter on the basis of new method of transition to the Foldy-Wouthuysen representation

Key words: Foldy-Wouthuysen transformation, spin, equations of motion, storage rings, channeling, tensor polarizability, parity violation, Lense-Thirring effect, positronium.

Objective of the research: Development of new method of transformation of quantum mechanical equations for relativistic spinless particles and particles with spin in external electromagnetic, weak, and gravitational fields to the Foldy-Wouthuysen representation, deriving Hamilton operators and quantum mechanical equations describing the momentum and spin dynamics and finding their classical limit.

The Hamiltonian operator and the relativistic quantum mechanical equations of the momentum and spin motion describing electromagnetic and electroweak interactions of particles with spin 0, 1/2, and 1, and electrical and magnetic dipole moments and the gravitational interaction of Dirac particles are obtained in the Foldy-Wouthuysen representation on the base of the elaborated method. Their classical limit is found. The sufficient condition for the exact transformation to the Foldy-Wouthuysen representation is determined, the connection between wave eigenfunctions in the Dirac and Foldy-Wouthuysen representations is established, and new cases of the exact transformation are found. The obtained results are used in the preparation of an experiment to search for the electric dipole moments of particles and nuclei in storage rings, for the determination of conditions to measure the tensor electric and magnetic polarizabilities of the deuteron, and for a solution of the problem of description of the particle spin dynamics in matter and external fields which is important for carrying out experimental and applied research. The theory of spin-isochronous storage ring with a nonuniform magnetic field is developed and the potential for its use for the measurement of the anomalous magnetic moment of the muon is grounded. The relativistic formulas for the spin precession in the gravitational field of a rotating source are derived.

Area of implementation of the results includes the relativistic quantum mechanics, the theory of gravity, and the theoretical and experimental high energy physics.