



Аксентьев Александр Евгеньевич

**Метод замороженного спина для поиска
электрического дипольного момента дейтрона в
накопительном кольце**

Специальность 01.04.20 —
«Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в **Forschungszentrum Jülich GmbH**.

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук, профессор
Сеничев Юрий Валерьевич
кандидат физ.-мат. наук, доцент
Полозов Сергей Маркович

Официальные оппоненты: **Фамилия Имя Отчество**,
доктор физико-математических наук, профес-
сор,
Не очень длинное название для места работы,
старший научный сотрудник
Фамилия Имя Отчество,
кандидат физико-математических наук,
Основное место работы с длинным длинным
длинным длинным названием,
старший научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное об-
разовательное учреждение высшего професси-
онального образования с длинным длинным
длинным длинным названием

Защита состоится **DD mmmmmmmm YYYY** г. в **XX** часов на заседании
диссертационного совета **Д 123.456.78** при **Название учреждения** по адре-
су: **Адрес**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке **Название библиотеки**.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учре-
ждения, просьба направлять по адресу: **Адрес**, ученому секретарю диссер-
тационного совета **Д 123.456.78**.

Автореферат разослан **DD mmmmmmmm YYYY** года.
Телефон для справок: **+7 (0000) 00-00-00**.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 123.456.78,
д-р физ.-мат. наук

Фамилия Имя Отчество

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Данное диссертационное исследование является частью проекта, посвящённого поиску ЭДМ элементарных частиц.

Одной из основных проблем современной физики является барионная асимметрия Вселенной, т.е. преобладание числа частиц над числом античастиц в наблюдаемой Вселенной. На текущий момент нет никаких свидетельств существования первичной антиматерии в нашей галактике; количество наблюдаемой антиматерии согласуется с её производством во вторичных процессах. Также не наблюдается фонового гамма-излучения от нуклон-антинуклонных взаимодействий, которое можно было бы ожидать, если бы вещество и антивещество во Вселенной были бы разделены на кластеры галактик. [Trodden:Baryogenesis]

В своей статье 1967 года, академик АН СССР А.Д. Сахаров сформулировал три необходимых условия, которым должен был удовлетворять процесс бариогенеза, чтобы материя и антиматерия в первичной Вселенной производились с разными скоростями. Побудительным мотивом формулировки стало открытие космического фонового излучения и нарушение CP четности в системе нейтральных K-мезонов. [Fitch:Kaon-CP-violation-1964] Три необходимых условия Сахарова таковы:

- несохранение барионного числа;
- нарушение зарядовой симметрии C- и CP-симметрии;
- взаимодействие вне теплового равновесия.

Если они существуют, перманентные ЭДМ частиц нарушают P- и T-симметрии, а значит, по теореме CPT — их существование можно связать с нарушением CP-симметрии. Стандартная Модель (СМ) элементарных частиц позволяет учесть CP-нарушение посредством матрицы Кабиббо-Кабаяши-Масакавы, однако значения ЭДМ, предсказываемые ей для, например, нейтрона, лежат в диапазоне от 10^{-33} до 10^{-30} е·см. [Harris:Neutron2007] К примеру, теория SUSY (суперсимметрия) предсказывает наличие ЭДМ гораздо большей величины (на уровне $10^{-29} - 10^{-24}$ е·см). Таким образом, ЭДМ элементарных частиц являются чувствительным индикатором физики за гранью СМ.

Поиск ЭДМ частиц был начат более 50-ти лет назад. Первый эксперимент по измерению ЭДМ нейтрона был проведён др. Н.Ф. Рэмзи (dr. N.F. Ramsey) в конце 1950-х годов. По результатам эксперимента, верхняя граница ЭДМ нейтрона была ограничена величиной $5 \cdot 10^{-20}$ е·см. [Ramsey:Neutron1957] С тех пор было проведено множество более точных экспериментов, и на данный момент, верхняя граница на ЭДМ нейтрона находится на уровне $2.9 \cdot 10^{-26}$ е·см. [Baker:nEDM:Main; Baker:nEDM:Reply]

Большинство экспериментов проводятся на зарядово-нейтральных частицах, таких как нейтрон или атомы. ЭДМ заряженных частиц, таких как протон или дейтрон, можно измерить в накопительном кольце, на основе прецессии поляризации пучка в электрическом поле в системе центра масс пучка.

Идея использования накопительного кольца для детектирования ЭДМ заряженных частиц появилась в процессе разработки $g - 2$ эксперимента [BNL:g-2:2001] в Брукхейвенской Национальной Лаборатории (BNL, США). По результатам экспериментов в BNL, верхняя граница электрического дипольного момента мюона была установлена на уровне 10^{-19} е·см. [BNL:muon_ANA:2009] В 1990-х годах, дискуссия преимущественно велась вокруг мюонного эксперимента [Farley:SREDM:Muon], однако также рассматривался и дейтрон, у которого похожее отношение аномального магнитного момента к массе.

В 2004 году, коллаборацией srEDM (Storage Ring EDM Collaboration) [BNL:SREDM] в BNL был предложен эксперимент 970 по детектированию ЭДМ дейтрона на уровне 10^{-27} е·см в накопительном кольце.

Тогда же была предложена идея “замороженного спина” (“frozen spin” method [Farley:SREDM:Muon]), в котором направления векторов спина и импульса (референсной) частицы совпадают в каждый момент времени. Это условие должно обеспечивать максимальный рост сигнала электрического дипольного момента при его наличии. Теретически, условие “замороженного спина” означает нулевой спиновый резонанс, при котором ориентация спин-вектора остается пространственно-неизменной при отсутствии электрического дипольного момента. Тогда, любой рост вертикальной компоненты поляризации пучка детектирует наличие электрического дипольного момента. Таким образом, измеряя амплитуду вертикальной компоненты спина, мы определяем величину электрического дипольного момента. Реализация этой концепции потребует специальное накопительное кольцо и определенных параметров пучка.

Однако, в последствии выяснилось, что “замороженный спин” – лишь одно из условий успешного детектирования электрического дипольного момента. В частности, для измерения ЭДМ с требуемой точностью необходимо накопление большой статистики, которое возможно при сохранении поляризации, то есть максимальной однонаправленности спина всех частиц в пучке, в течение достаточно длительного времени, порядка 1000 секунд.

Другим важным условием является требование исключения примешивания к сигналу ЭДМ сигнала магнитного дипольного момента (МДМ), возникающего из-за различного рода несовершенств элементов кольца, и соизмеримого с ЭДМ. Классический метод “замороженного спина” (когда спин-прецессия, связанная с МДМ, исключена полностью) проблематичен в этом отношении по двум причинам: во-первых, при приближении

к состоянию “замороженности” спина малейшие возмущения со стороны магнитного и электрического полей приводят к нарушению ориентации оси стабильного спина, что сразу же вносит неопределенность в измерение вертикальной компоненты спина; во-вторых, для уменьшения скорости МДМ спин-прецессии вокруг радиальной оси до уровня, позволяющего измерить ЭДМ с точностью 10^{-29} , необходимо устанавливать оптические элементы ускорителя с точностью, значительно превышающей технологические возможности современных геодезических методов.

Начиная с 2005 года, на циклотроне AGOR KVI-центра передовых радиационных технологий (KVI-Center for Advanced Radiation Technology) в университете Гронингена была проведена серия тестов по технико-экономическому обоснованию эксперимента.

В 2008 году начались исследования на накопительном кольце COSY в Исследовательском центре “Юлих” (Forschungszentrum Jülich GmbH, Германия). В период с 2015 по 2019 автор принимал непосредственное участие в этих работах. Исследования велись по трем направлениям.

Первое: экспериментальное изучение декогеренции спина частиц в пучке. Поскольку кольцо COSY не отвечает требованиям реализации условия “замороженного спина,” декогеренция изучалась по времени исчезновения средней по пучку асимметрии сечения взаимодействия в реакции рассеяния дейтронного пучка на углеродной мишени [COSY:SCT:IPAC15]. Вектор поляризации пучка при этом быстро прецессировал в плоскости замкнутой орбиты, что, однако, не влияет на сделанные выводы.

Второе направление — экспериментальное детектирование сигнала электрического дипольного момента с помощью возбуждения параметрического резонанса прецессии спина. Сила резонанса при этом пропорциональна величине детектируемого ЭДМ. Резонансный метод не требует условия “замороженного спина,” но его чувствительность на четыре-пять порядков ниже; в лучшем случае, его достижимый предел измерения ЭДМ находится на уровне 10^{-24} .

Третье направление — разработка метода измерения ЭДМ, и его полномасштабное моделирование с целью его совершенствования, а также разработки новых подходов к измерению электрического дипольного момента заряженной частицы с использованием накопительного кольца.

Впоследствии, эти тесты развились в программу по изучению спин-орбитальной динамики пучка для разработки технологий, требуемых для эксперимента по поиску ЭДМ. В этом же году было сделано второе предложение [BNL:Deuteron2008] эксперимента по поиску ЭДМ дейтрона на основе концепции “замороженного спина”; в этот раз — на уровне 10^{-29} при условии накопления результатов измерения в течение года.

В то же время было решено, что эксперимент по детектированию ЭДМ протона, поскольку его можно измерить в полностью электростатическом кольце, обладает некоторыми техническими достоинствами. Среди таковых предполагается возможность одновременной инжекции противоположно-циркулирующих пучков, что позволяет уменьшить систематические ошибки измерения ЭДМ протона, вызванные несовершенством элементов накопительного кольца. Тем не менее, на COSY была продолжена работа над экспериментом с дейтроном, ввиду того, что результаты, полученные для дейтрона, распространяются и на протон.

В 2011 году была сформирована коллаборация JEDI (Jülich Electric Dipole moment Investigations). [**JEDI:Website**] Целью коллаборации является не только разработка ключевых технологий для grEDM, но также и проведение предварительного эксперимента прямого наблюдения ЭДМ дейтрона.

В 2018 году, JEDI-коллаборация выполнила первое измерение дейтронного ЭДМ на COSY на основе резонансного метода [**COSY:Partially-Frozen-Spin; COSY:SpinTuneMapping**] с использованием специально разработанного для этой цели RF Wien filter [**JSlim:RFFWF:Design; JSlim:RFFWF:Commissioning**]. В кольце с незамороженным спином ЭДМ генерирует мало-амплитудные осцилляции вертикальной компоненты поляризации пучка; например, при импульсе дейтронов 970 МэВ/с, как на COSY, амплитуда колебаний ожидается на уровне $3 \cdot 10^{-10}$ при величине ЭДМ $d = 10^{-24}$. В связи с малостью амплитуды колебаний, установленный в данном эксперименте предел измерения ЭДМ оценивается на уровне $d = 10^{-24}$.

Целью данной работы является развитие метода поиска электрического дипольного момента дейтрона с использованием накопительного кольца на основе измерения частоты прецессии спина (frequency domain method) с экспериментально подтвержденной точностью.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Формулирование метода измерения электрического дипольного момента дейтрона на основе измерения частоты прецессии спина (frequency domain method).
2. Анализ требований к магнитооптической структуре кольца-накопителя, ориентированного на поиск электрического дипольного момента дейтрона.
3. Исследование явления декогеренции спина пучка дейтронов в окрестности состояния “замороженного” спина.
4. Разработка метода подавления декогеренции спина с помощью нелинейных элементов.
5. Исследование влияния различного рода несовершенств элементов кольца на спин-орбитальную динамику.

6. Математическое моделирование процесса калибровки нормализованной частоты прецессии спина (спин-тюн) при померенной смене полярности ведущего поля.
7. Анализ систематических ошибок в различных предложениях по проведению эксперимента по поиску электрического дипольного момента, и их сравнение с методом frequency domain.
8. Изучение накопления необходимой статистики измерения электрического дипольного момента.

Научная новизна:

1. Впервые предложен метод измерения электрического дипольного момента дейтрона основанный исключительно на измерении частоты прецессии спина в накопительном кольце (frequency domain method), с предположительным ограничением по точности оцениваемым на уровне 10^{-29} .
2. Изучена спин-орбитальная динамика дейтронного пучка в окрестности состояния “замороженного” спина в накопительном кольце для поиска электрического дипольного момента.
3. Предложен метод калибровки средней по пучку нормированной частоты прецессии спина, позволяющий уменьшить вклад систематических ошибок.
4. Введено определение эффективного значения фактора Лоренца, необходимое для определения зависимости частоты прецессии спина от координат в 3-х мерном пространстве.
5. Сделаны статистические оценки предельной чувствительности измерения ЭДМ предложенным методом в накопительном кольце.
6. Проведена общая классификация методов поиска ЭДМ в накопительном кольце; систематизированы их общие проблемы.

Практическая значимость. Результаты исследования вошли в Yellow Report под названием “Feasibility Study for an EDM Storage Ring,” подготавливаемый для CERN коллаборацией CPEDM, в которую входит коллаборация JEDI.

Отметим, что целью экспериментов по поиску ЭДМ является проверка CP-инвариантности. При этом, ЭДМ элементарных частиц нарушают одновременно и P-, и T-симметрию, а следовательно требуют дополнительных модельных предположений, для того, чтобы связать их существование с CP-нарушением. [Aksentev:TRIC]

Альтернативой является эксперимент TRIC (Time Reversal Invariance at Cosy), [Aksentev:TRIC] в котором используется T-нечётное, P-чётное взаимодействие, и следовательно нарушается только T-симметрия. В связи с этим, никаких дополнительных предположений не требуется.

TRIC входит в физическую программу PAX (Polarised Antiproton eXperiments) [Aksentev:PAX], для которой требуются высокоинтенсивные поляризованные пучки. Существует два подхода к получению поляризованных пучков: спин-флиппинг, и спин-филтеринг. Спин-флиппинг позволяет получать более интенсивные пучки, однако на данный момент не существует стабильно-работающих методов спин-флиппинга.

Рассмотренные в настоящей работе особенности спиновой динамики вблизи состояния “замороженного” спина (в частности — подавление спин-декогеренции секступольными полями) представляют большой интерес с точки зрения сохранения поляризации в окрестности нулевого спинового резонанса.

Методология и методы исследования. Основными методами исследования являются математическое и компьютерное моделирование, и численный эксперимент.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод измерения электрического дипольного момента дейтрона, основанный исключительно на измерении частоты прецессии спина.
2. Принцип построения магнитооптической структуры кольца-накопителя, ориентированного на поиск электрического дипольного момента дейтрона.
3. Результаты исследования декогеренции спина пучка дейтронов в окрестности состояния “замороженного” спина, и метод подавления декогеренции спина с помощью нелинейных элементов.
4. Исследование влияния различного рода несовершенств элементов накопительного кольца на спин-орбитальную динамику пучка.
5. Метод калибровки нормализованной частоты прецессии спина (спин-тьюн) при попеременной смене полярности ведущего поля и его численное моделирование.
6. Результаты исследования систематических ошибок в различных предложениях по проведению эксперимента по поиску электрического дипольного момента, и их сравнение с методом Frequency Domain.
7. Оценка статистических свойств Frequency Domain метода измерения электрического дипольного момента в накопительном кольце.

Достоверность полученных результатов обеспечивается согласованием аналитических вычислений с результатами численных экспериментов. Результаты компьютерных симуляций находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

- ПХ международной конференции по ускорителям заряженных частиц IPAC'17, Копенгаген, Дания.

- X международной конференции по ускорителям заряженных частиц IPAC'19, Мельбурн, Австралия.
- конференциях коллаборации JEDI, Юлих, Германия, 2017–2019.
- III международной конференции “Лазерные, плазменные исследования и технологии,” (LaPlas) Москва, Россия.
- IV международной конференции LaPlas, Москва, Россия.
- V международной конференции LaPlas, Москва, Россия.
- студенческих семинарах Института Ядерных Исследований, Исследовательский Центр “Юлих,” Германия.

Личный вклад. Все положения, выносимые на защиту, получены автором лично. Результаты аналитического и численного исследования спин-орбитальной динамики пучка для моделирования метода измерения электрического дипольного момента дейтрона с помощью измерения прецессии спина в накопительном кольце получены автором лично либо при участии научного руководителя. Вклад соавторов в результаты, полученные совместно, оговаривается в тексте диссертации для каждого случая.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 0 печатных изданиях: 0 изданы в журналах, индексируемых в международных базах цитирования Scopus и Web of Science, а 0 — в трудах докладов на международных конференциях. Из последних, 4 работы входят в базу Scopus, 3 в РИНЦ.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы. Содержание следующих глав такого:

Первая глава

1. Вводит понятие замороженного спина.
2. Проводит классификацию методов поиска ЭДМ в накопительном кольце с замороженным спином.
3. Проводит классификацию проблем, общих для всех методов поиска ЭДМ в накопительном кольце.
4. Описывает метод измерения ЭДМ в накопительном кольце с замороженным спином, разрешающий описанные проблемы.
5. Описывает магнитооптические структуры накопительных колец, которые можно использовать для детектирования ЭДМ предлагаемым методом.

Во **второй главе** содержится подробное рассмотрение проблем, обозначенных в первой главе, и методов их решения; описаны результаты моделирования.

Рассматриваемые проблемы:

1. возмущения спиновой динамики частицы, вызванные её бетатронными колебаниями, и их эффект на ЭДМ-статистику частотного метода измерения;
2. декогеренция спинов частиц продольно-поляризованного пучка при работе в режиме нулевого спинового резонанса;
3. величина и свойства систематической ошибки эксперимента, связанной с МДМ-прецессией спинов частиц пучка, и вызванной неидеальностями оптической структуры ускорителя;
4. процедура смены полярности ведущего поля накопительного кольца, необходимая для исключения обозначенной выше ошибки из ЭДМ-статистики.

Отдельно рассматривается вопрос интерпретации введённого в первой главе понятия *эффективного Лоренц-фактора* (γ_{eff}).

Большая часть методологии, исследованию которой посвящена настоящая работа, основана на этом понятии. Его можно определять таким образом: если две частицы имеют одно и то же значение γ_{eff} , то они эквивалентны с точки зрения спиновой динамики (а именно, направления и величины вектора угловой скорости спин-прецессии), независимо от частоты их орбитального движения.

Именно фиксация значения γ_{eff} позволяет нам исключить МДМ-прецессию, связанную с неидеальностями машины, из конечной ЭДМ-статистики частотного метода.

В третьей главе приведены наиболее значимые (для данной работы) технологии, разработанные в рамках исследований, проводимых на синхротроне COSY,¹ описаны результаты процедуры оптимизации времени когерентности спина (SCT) при помощи семейств секступолей, установленных на COSY.

Отдельно стоит отметить наблюдение явления изменения SCT при длительном измерении поляризации деструктивными методами, связанного с переходом от внешней (оболочки) к внутренней (ядру) частям пучка. Наблюдение этого явления косвенно подтверждает теорию спин-декогеренции, изложенную в данной работе.

В заключении приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Разработан метод измерения электрического дипольного момента дейтрона, основанный исключительно на измерении частоты прецессии спина.
2. Предложен принцип построения магнитооптической структуры кольца-накопителя, ориентированного на поиск электрического дипольного момента дейтрона.

¹Принадлежащем институту ядерных исследований Исследовательского центра “Юлих”, Германия

3. Получены результаты исследования спин-декогеренции пучка дейтронов в окрестности состояния “замороженного спина”, а также метод подавления спин-декогеренции, основанный на использовании нелинейных элементов.
4. Исследованы эффекты различного рода несовершенств элементов накопительного кольца на спин-орбитальную динамику пучка.
5. Проведено численное моделирование метода калибровки нормализованной частоты прецессии спина при попеременной смене полярности ведущего поля накопительного кольца.
6. Исследованы систематические ошибки в различных предложениях по проведению эксперимента по поиску электрического дипольного момента; проведён сравнительный анализ этих предложений с методом Frequency Domain.
7. Проведена оценка статистических свойств Frequency Domain метода измерения электрического дипольного момента в накопительном кольце.

В основное тело работы не вошло статистическое моделирование эксперимента; для него отведено **приложение А**. Два момента, заслуживающие упоминания: исследование возможности оптимизации точности оценки частоты прецессии поляризации путём применения неоднородной схемы выборки; определение максимальной продуктивной длительности измерительного цикла.

По результатам исследований, мы пришли к выводу, что неоднородная схема выборки не имеет практического применения, в связи с особенностями измерений поляризации. Касательно максимальной длительности измерительного цикла — она не может превосходить трёх постоянных времени жизни поляризации.

Аксентьев Александр Евгеньевич

Метод замороженного спина для поиска электрического дипольного момента
дейтрона в накопительном кольце

Автореф. дис. на соискание ученой степени **канд. физ.-мат. наук**

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____