

На правах рукописи



A handwritten signature in black ink, likely belonging to the author or supervisor, is placed here.

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

Москва — 2020

Работа выполнена в Национальном Исследовательском Ядерном Университете “МИФИ”.

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук, профессор  
**Сеничев Юрий Валерьевич**

Консультант: кандидат физ.-мат. наук, доцент  
**Полозов Сергей Маркович**

Официальные оппоненты: **Фамилия Имя Отчество,**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
Не очень длинное название для места работы,  
старший научный сотрудник  
**Филатов Юрий Николаевич,**  
кандидат физико-математических наук,  
Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет),  
старший научный сотрудник

Ведущая организация: НИЦ “Курчатовский институт” – ИТЭФ

Защита состоится **DD mmmmmmmm YYYY** г. в **XX** часов на заседании диссертационного совета **Д 201.004.01** при НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ по адресу: 142281, Московская область, г. Протвино, площадь науки, дом 1.

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

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: **142281, Московская область, г. Протвино, площадь науки, дом 1**, ученому секретарю диссертационного совета **Д 201.004.01**.

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

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
**Д 201.004.01**,  
канд. физ.-мат. наук

Рябов Юрий Григорьевич

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Данная работа посвящена исследованию особенностей измерения электрического дипольного момента (ЭДМ) элементарной частицы в накопительном синхротроне.

Одной из альтернатив Стандартной Модели (СМ) элементарных частиц являются теории суперсимметрии (так называемые SUSY-теории). Электрический дипольный момент (ЭДМ) элементарных частиц может служить отличным инструментом для подтверждения одной из этих моделей; к примеру: в случае нейтрона, электрический дипольный момент, совместный со стандартной моделью, находится в диапазоне от  $10^{-33}$  до  $10^{-30}$  е·см, [1] в то время как SUSY-теории предсказывают наличие ЭДМ гораздо большей величины – на уровне  $10^{-29} - 10^{-24}$  е·см.

Поиск ЭДМ частиц был начат более 50-ти лет назад. Первый эксперимент по измерению ЭДМ нейтрона был проведён д-р. 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. [2] 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. [3; 4]

Большинство экспериментов проводятся на зарядово-нейтральных частицах, таких как нейтрон или атомы. ЭДМ заряженных частиц, таких как протон или дейtron, можно измерить в накопительном кольце на основе прецессии поляризации пучка в электрическом поле в системе центра масс пучка. Преимущество использования накопительного кольца как инструмента измерения ЭДМ обусловлено такими свойствами ускорителя, как: (1) чистота среды; (2) высокая интенсивность и поляризованность, а также (3) длительность времени жизни циркулирующего пучка. [5, стр. 9]

В 2004 году коллаборацией srEDM (Storage Ring EDM Collaboration [6]) в Брукхейвенской Национальной Лаборатории (BNL, США) был предложен эксперимент 970 по детектированию ЭДМ дейтрана на уровне  $10^{-27}$  е·см в накопительном кольце. Тогда же была предложена идея “замороженного спина,” [7] 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, можно определить величину электрического дипольного момента. Реализация этой концепции потребует создание специального накопительного кольца 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 односторонности спина всех частиц в пучке, в течение достаточно длительного времени, порядка 1 000 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 по величине 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  $10^{-29}$  е·см, необходимо устанавливать оптические элементы ускорителя с точностью, значительно превышающей технологические возможности современных геодезических методов.

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:

- (1) Экспериментальное изучение декогеренции спина частиц в пучке в процессе циркуляции в кольце.
- (2) 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  $10^{-24}$  е·см.
- (3) 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. Автор настоящей работы был вовлечён в это направление исследований.

В 2011 году была сформирована коллаборация JEDI (Jülich Electric Dipole moment Investigations). [8] Целью коллаборации является не только разработка ключевых технологий для sFEDM, 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 [9; 10] с использованием специально разработанного для этой цели RF Wien filter [11; 12]. В кольце с незамороженным спином ЭДМ генерирует осцилляции вертикальной компоненты поляризации пучка с малой амплитудой; например, при импульсе дейтронов  $970 \text{ МэВ/с}$ , как на COSY, амплитуда колебаний ожидается на уровне  $3 \cdot 10^{-10}$  при величине ЭДМ  $d = 10^{-24} \text{ е}\cdot\text{см}$ . В связи с малостью амплитуды колебаний, установленный в данном эксперименте предел измерения ЭДМ оценивается на уровне  $d = 10^{-24} \text{ е}\cdot\text{см}$ .

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. Разработать метод измерения электрического дипольного момента дейтрона на основе измерения частоты прецессии спина.
2. Проанализировать требования к магнитооптической структуре кольца-накопителя, ориентированного на поиск электрического дипольного момента дейтрона.
3. Исследовать явление спин-декогеренции пучка дейтронов в окрестности состояния “замороженного” спина.
4. Разработать метод подавления декогеренции спина с помощью нелинейных магнитных элементов.
5. Исследовать влияние различного рода несовершенств элементов кольца на спин-орбитальную динамику.
6. Выполнить математическое моделирование процесса калибровки нормализованной частоты прецессии спина (спин-тюн) при смене полярности ведущего поля.
7. Проанализировать систематические ошибки в различных предложениях по проведению эксперимента по поиску электрического дипольного момента, и сравнить их с разработанным методом.
8. Изучить накопление 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 ограничением по точности, оцениваемым на уровне  $10^{-29} \text{ e}\cdot\text{см}$ .
2. Изучена спин-орбитальная динамика дейtronного пучка в окрестности состояния “замороженного спина” в накопительном кольце, предназначенному 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 частицы от её координат в фазовом 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,” подготовливаемый для CERN коллаборацией CPEDM (Charged Particle EDM Collaboration [13]), в которую входит коллаборация JEDI.

Целью экспериментов по поиску ЭДМ является проверка СР-инвариантности. При этом ЭДМ элементарных частиц нарушают одновременно и Р-, и Т-симметрию, а следовательно требуют дополнительных модельных предположений, для того, чтобы связать их существование с СР-нарушением. [14, стр. 1926]

Альтернативой является эксперимент TRIC (Time Reversal Invariance at Cosy [14]), в котором используется Т-нечётное, Р-чётное взаимодействие, а значит нарушается *только* Т-симметрия, в связи с чем никаких дополнительных предположений не требуется. TRIC входит в физическую программу PAX (Polarised Antiproton eXperiments [15]), для которой требуются высокointенсивные поляризованные пучки. Существует два подхода к получению поляризованных пучков: спин-флиппинг и спин-фильтринг. Спин-флиппинг позволяет получать более интенсивные пучки, однако на данный момент не существует стабильно-работающих методов спин-флиппинга.

Разработанный метод представляет интерес с точки зрения планирования экспериментов по поиску ЭДМ на различных ускорителях, в том числе на ускорительном комплексе NICA ОИЯИ (Дубна).

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

**Основные положения, выносимые на защиту:**

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

**Достоверность** полученных результатов подтверждается согласованием аналитических вычислений с результатами численных экспериментов. Результаты компьютерного моделирования находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами, и результатами, полученными в экспериментах на ускорителе COSY (Исследовательский центр “Юлих,” Германия).

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на:

- IX 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.
- семинарах Института Ядерных Исследований, Исследовательский Центр “Юлих,” Германия.

**Личный вклад.** Все результаты, 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 12 печатных работах: 5 изданы в журналах, индексируемых в международных базах цитирования Scopus и Web of Science, 7 – 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.

**Глава 1** посвящена анализу методологии измерения электрического дипольного момента (ЭДМ) элементарной частицы при помощи накопительного кольца, работающего в режиме “замороженного спина.”

Понятие “замороженный спин” определено как состояние, при котором направление спин-вектора частицы зафиксировано относительно её вектора импульса; отмечено преимущество работы в режиме “замороженного спина,” а также условия его реализации в накопительных кольцах различных типов (чисто электростатические, чисто магнитные, комбинированные).

Проводится анализ двух магистральных подходов к измерению ЭДМ частицы в накопительном кольце с замороженным спином (измерения, основанные на наблюдении набега фазы [5], или частоты [16] колебаний вектора поляризации пучка), с целью формулирования критериев успешности методики измерений.

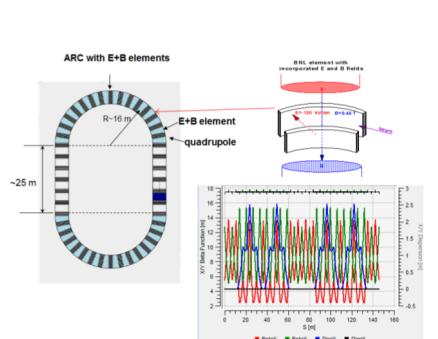
Систематизируются основные проблемы, возникающие при попытке измерить ЭДМ частицы в накопительном кольце при любом из существующих подходов: (1) возмущения спиновой динамики частиц; (2) спин-декогеренция; (3) неидеальности оптической структуры ускорителя (вызывает ложный сигнал ЭДМ).

Описывается метод (Frequency Domain Method), разработанный с целью решения всех поставленных выше проблем. Главными особенностями метода являются:

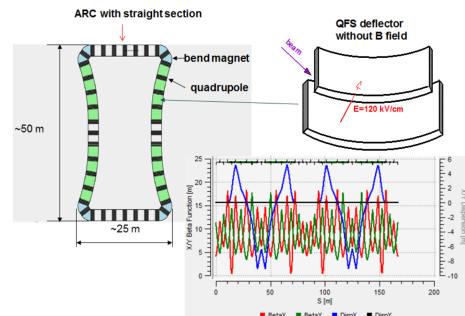
- (1) Величина ЭДМ вычисляется из измерений совокупной (МДМ+ЭДМ) частоты спин-прецессии.

- (2) Для стабилизации оси стабильного спина частицы используется собственная (связанная с неидеальностями оптической структуры) частота МДМ спин-прецессии ускорителя.
- (3) МДМ компонента частоты спин-прецессии устраниется в конечной статистике путём сравнения совокупных частот в циклах с противоположным направлением движения пучка.

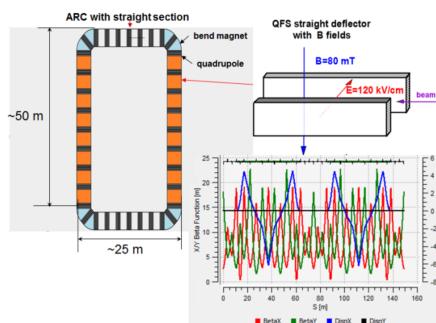
Представлены три варианта магнитооптической структуры накопительного кольца для измерения ЭДМ дейtronов предлагаемым методом: в структуре с “замороженным спином” (FS, Рис. 1а) горизонтальные проекции спин-вектора и вектора импульса частицы сонаправлены *в каждый момент времени*; в двух структурах, реализующих состояние “квази-замороженного спина” (QFS), условие “замороженности” выполняется *в среднем*.



a) FS-структура



б) QFS-структура с  
пространственно-разделёнными  
Е- и В- полями



в) QFS-структура с  
пространственно-совмешёнными  
Е- и В- полями

Рис. 1: Варианты магнитооптических структур для поиска ЭДМ в накопительном кольце

Преимущество кольца QFS-типа состоит в относительной простоте исполнения: в предложенных вариантах используются либо (i) цилиндрические электростатические дефлекторы и магнитные диполи раздельно (Рис. 16), либо (ii) прямые фильтры Вина (Рис. 1в). Простота исполнения, в свою очередь, позволяет использовать QFS структуру в неспециализированном под измерения ЭДМ накопительном кольце.

**Глава 2** посвящена анализу проблем измерения ЭДМ частицы в накопительном кольце с замороженным спином и поиску их решений.

Рассматриваются следующие проблемы:

**Возмущения спиновой динамики частицы**, вызванные её бетатронными колебаниями, и их влияние на ЭДМ-статистику частотного метода измерений. Суть проблемы состоит в возможном несоответствии между данными поляриметрии и фитируемой к модели, возникающем из-за вариации направления осей стабильного спина частиц пучка, вовлеченных в бетатронное движение.

Решение уравнения спин-динамики (уравнение Томаса-Баргманна-Мишеля-Телегди) для вертикальной компоненты спин-вектора:

$$\begin{aligned} s_y &= a \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi) \\ &= \sqrt{(\bar{n}_y \bar{n}_z)^2 + \bar{n}_x^2} \cdot \sin\left(2\pi \cdot \nu_s \cdot \frac{t}{T} + \phi\right), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\nu_s$  это спин-тюн частицы,  $T$  её период обращения в кольце, а  $\bar{n}$  – ось стабильного спина, *меняющая своё направление* во время бетатронного движения. [17, стр. 11] В связи с этим, фитирование данных гармонической моделью с постоянными параметрами составляет систематическую ошибку спецификации регрессионной модели.

На сколько вариация в амплитуды колебаний вертикальной компоненты поляризации влияет на систематическую ошибку оценки частоты колебаний – и был интересовавший нас вопрос.

Основные выводы, сделанные на основе анализа данных моделирования, таковы:

1. Осцилляции амплитуды сигнала очень малы. Они происходят на уровне не более  $10^{-4}$  (при распределении углов наклона элементов  $N(0, 3 \cdot 10^{-2})$  градусов), тогда как ожидаемая неточность измерений поляризации находится на уровне единиц процентов. Это значит, что суперпозиция систематической ошибки и случайной ошибки измерения не будет проявлять статистически-значимую систематичность.
2. Коэффициент корреляции между оценками амплитуды  $\hat{a}$  и частоты  $\hat{\omega}$  не значителен. Колебания амплитуды влияют на оценку  $\hat{a}$  в первую очередь; их влияние на оценку  $\hat{\omega}$  опосредовано, и описывается коэффициентом корреляции. Так как он меньше 10%, даже

если колебания окажутся достаточными, чтобы повлиять на оценку амплитуды, их влияние на оценку частоты будет уменьшен по крайней мере в 10 раз.

3. Этот систематический эффект контролируется, что является основным достоинством методологии частотной области. Вводя в систему внешнее магнитное поле колебания  $\tilde{n}$  могут быть непрерывно минимизированы до необходимого уровня без каких-либо модификаций паттерна эксперимента.

**Декогеренция спинов** частиц продольно-поляризованного пучка при работе в режиме замороженного спина.

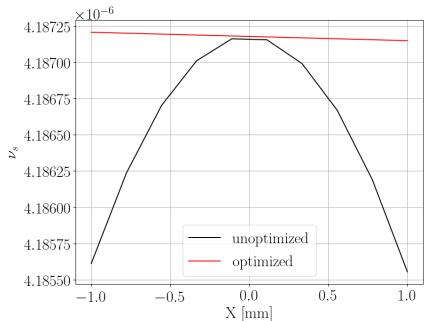
Проблема спин-декогеренции пучка вызвана различием частот прецессии спинов частиц пучка при движении в ускорителе, что в свою очередь связано с разницей равновесных уровней энергии частиц.

Для решения проблемы спин-декогеренции применяют [18; 19] нелинейные элементы (секступоли), влияющие одновременно на длины орбит бетатрон-осциллирующих частиц и на коэффициент сжатия орбиты  $\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 \delta$  (где  $\delta = \Delta p/p_0$ ).

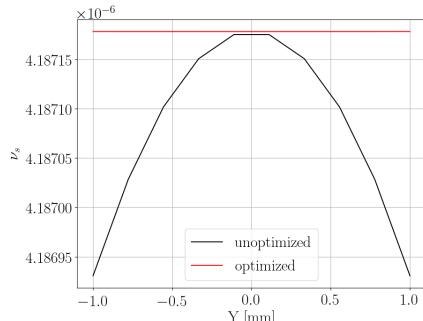
Была разработана численная модель секступольного метода подавления спин-декогеренции в идеально отьюстированном (т.е. отсутствует МДМ спин-прецессия вокруг радиальной оси) накопительном кольце FS-типа (Рис. 1a). В результате моделирования были получены данные, представленные на Рис. 2. Как следует из рисунка, при включении секступольных полей теряется зависимость нормированной частоты прецессии спина частицы (спин-тюна) от её координаты в поперечной к оптической оси плоскости ( $x-y$ ) и от её энергии  $\delta = \Delta K/K_0$  (где  $K$  – кинетическая энергия частицы, индекс 0 обозначает референсную частицу).

В подразделе 2.2.6 описаны результаты численного моделирования секступольного метода подавления спин-декогеренции в неидеальном ускорителе; на основе результатов моделирования был проанализирован эффект секступольных полей на спин-тюн частицы, а также и на направление оси стабильного спина этой частицы. По результатам анализа был сделан важный вывод: секступольные поля выравнивают не только спин-тюны частиц, но и направления их осей стабильного спина (см. Рис. 3).

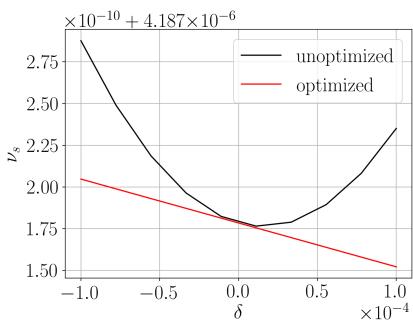
Как было отмечено ранее, секступольное поле влияет на декогеренцию двумя путями: модифицируя (1) коэффициент сжатия орбиты и (2) длину орбиты частицы. В подразделе 2.2.7 анализируется, каким образом каждый из обозначенных механизмов подавления спин-декогеренции отражается на зависимости спин-тюна частицы от её равновесного уровня энергии.



а) В горизонтальном направлении



б) В вертикальном направлении



в) По энергии

Рис. 2: Зависимость спин-тюна частицы от её смещения от референсной частицы. Цветом выделены зависимости при нулевом (чёрный) и оптимизированном (красный) значениях градиента секступоля

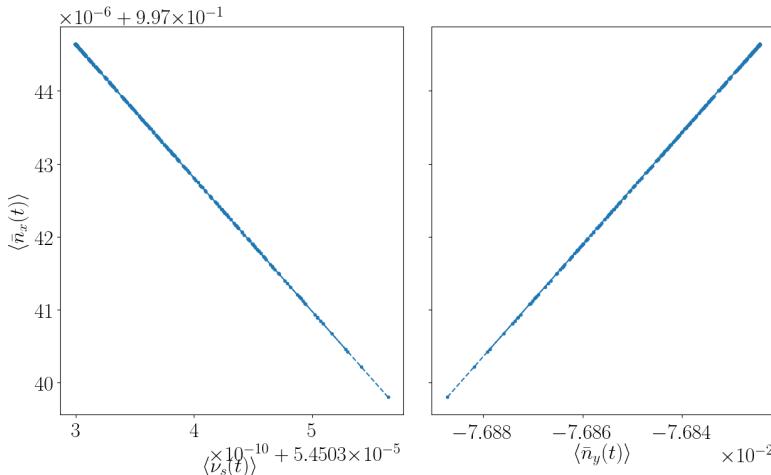


Рис. 3: Средние уровни поперечных компонент осей стабильного спина частиц, в зависимости от уровня их спин-тюна

**Свойства МДМ компоненты частоты спин-прецессии вокруг радиальной оси**  $\Omega_x^{MDM}$ , вызванной неидеальностями оптической структуры ускорителя, и составляющей основную систематическую ошибку измерений ЭДМ в накопительном кольце (любым из методов), анализируются в разделе 2.3.

В подразделе 2.3.1 подтверждаются следующие свойства  $\Omega_x^{MDM}$  (см. Рис. 4): (1) зависимость  $\Omega_x^{MDM}$  только от среднего угла наклона спин-ротаторов  $\langle\Theta_{tilt}\rangle$ , но не от конкретной последовательности наклонов элементов  $\{\Theta_{tilt}^{(i)}\}_{i \in J}$ ; (2) зависимость  $\Omega_x^{MDM}(\langle\Theta_{tilt}\rangle) = L(\langle\Theta_{tilt}\rangle)$  носит линейный характер.

В подразделе 2.3.2 величина  $\Omega_x^{MDM}$  сравнивается для двух противоположных направлений движения пучка: по (CW) и против (CCW) часовой стрелки. Результаты моделирования представлены на Рис. 4.

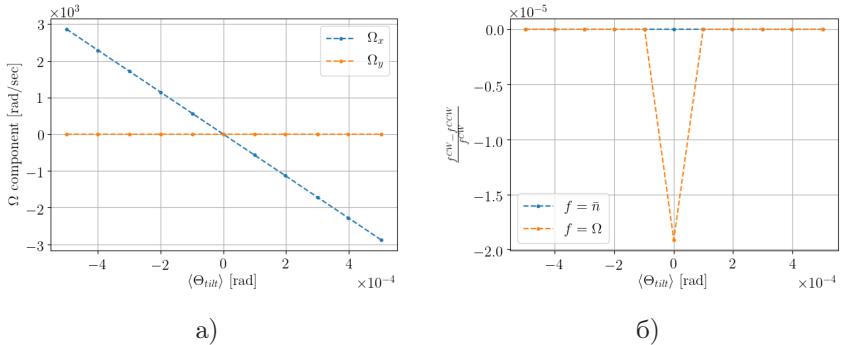


Рис. 4: Результаты исследования свойств частоты МДМ спин-прецессии в неидеальном ускорителе: (а) зависимость компонент частоты МДМ спин-прецессии  $\Omega^{MDM}$  референсной частицы в неидеальной FS-структуре 1а со случайно-распределёнными ошибками установки спин-ротаторов от их среднего угла наклона  $\langle\Theta_{tilt}\rangle$ ; (б) относительная разница между радиальными компонентами оси стабильного спина и угловой скоростью поворота спина, посчитанная относительно значения для CW-циркулирующего пучка

По результатам моделирования сделан вывод о том, что при движении пучка в любом из направлений ось стабильного спина  $\bar{n}$  наклонена одинаково; при этом существует *различие* между спин-тюнами CW и CCW пучков, но на уровне не более десятых долей процента, которое тем сильнее, чем меньше модуль  $\Omega_x^{MDM}$ . Эта *разница* свидетельствует об асимметричности ускорительной структуры относительно обращения направления движения, с точки зрения спиновой динамики, и может объясняться различием референсных орбит CW и CCW пучков.

Проблема смены полярности ведущего поля ускорителя рассмотрена в разделе 2.4. Эта процедура необходима для смены направления движения дейtronного пучка в ускорителе, т.е. для сокращения в конечном выражении оценки ЭДМ МДМ компоненты совокупной частоты прецессии, измеряемой в методах частотной области:

$$\hat{\Omega}_{EDM} = \frac{1}{2} \left[ \hat{\Omega}_{net}^+ + \hat{\Omega}_{net}^- \right],$$

$$\Omega_{net}^\pm = \Omega_{EDM} \pm \Omega_{MDM}.$$

Необходимо отметить, что целью смены полярности ведущего поля является точное воспроизведение радиальной компоненты частоты МДМ прецессии  $\Omega_x^{MDM}$ , индуцированной полями неидеальности оптической структуры ускорителя. Этот момент часто упускается из виду: простого воспроизведения величины *магнитного поля* не достаточно, поскольку точка инжекции центра масс пучка, а значит его длина орбиты — и, соответственно, спин-тюн — подвержена вариации. (Не говоря о возможной асимметричности оптической структуры кольца относительно обращения направления движения пучка, с точки зрения спиновой динамики.) Таким образом, необходимо восстанавливать не величину поля, а эффективный Лоренц-фактор центра масс пучка.

Для калибровки эффективного Лоренц-фактора в *FD*-методе изменяется вертикальная компонента ЭДМ+МДМ частоты спин-прецессии  $\Omega_y$ ; пучок при этом выводится из состояния “замороженного спина.”

В результате моделирования, были получены результаты, представленные на Рис. 5. Можно видеть, что при уменьшении разницы  $\Delta\Omega_y^{MDM} < 10^{-7}$  рад/сек (точность определения частоты, достигаемая при фильтровании данных одного цикла), разница  $\Delta\Omega_x^{MDM} < 10^{-8}$  рад/сек (т.е. на порядок меньше статистической погрешности). Это говорит о принципиальной возможности использования частоты прецессии спина в горизонтальной плоскости для калибровки частоты прецессии в вертикальной плоскости.

Отдельно в разделе 2.5 рассматривается вопрос интерпретации введенного в подразделе 1.2.6 понятия **эффективного Лоренц-фактора** ( $\gamma_{eff}$ ). Большая часть методологии, исследованию которой посвящена настоящая работа, основана на утверждении, что частицы с одинаковым значением эффективного Лоренц-фактора имеют одинаковый спин-тюн, то есть эквивалентны с точки зрения спиновой динамики.

В подразделе 2.5.1 эффективный Лоренц фактор интерпретируется как математическое ожидание кинетической энергии частицы. Такая интерпретация предполагалась при введении этого понятия, однако она не подтвердилась. В подразделе 2.5.2 был принят более абстрактный подход: был поставлен вопрос о возможности сведения функции многих переменных  $\nu_s(x,a,y,b,\ell,\delta)$  к функции одной переменной  $\nu_s(\gamma_{eff})$ . Возможность

подтверждена, эффективный Лоренц-фактор интерпретируется как мера продольного эмиттанса пучка.

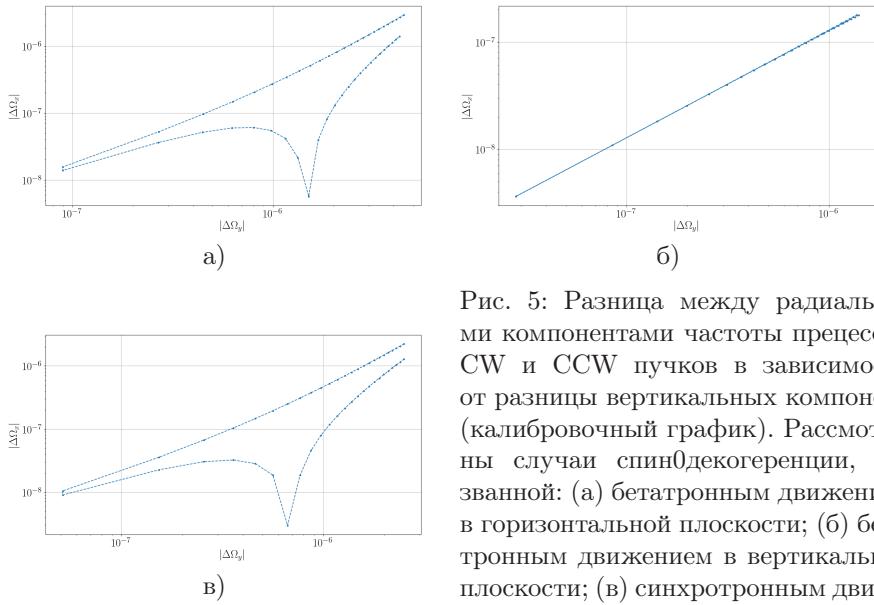


Рис. 5: Разница между радиальными компонентами частоты прецессии CW и CCW пучков в зависимости от разницы вертикальных компонент (калибровочный график). Рассмотрены случаи спинодекогеренции, вызванной: (а) бетатронным движением в горизонтальной плоскости; (б) бетатронным движением в вертикальной плоскости; (в) синхротронным движением.

**Глава 3** посвящена статистическому моделированию эксперимента и оценке его возможной статистической точности. Исследуется возможность повышения эффективности поляриметрии путём использования частотно-модулированной схемы выборки. Модулированная схема состоит в том, чтобы измерять поляризацию пучка в момент максимальной скорости её изменения (см. Рис. 6).

Был сделан вывод о нецелесообразности использования модулированной схемы выборки. Она даёт только малый выигрыш (40%) по сравнению с немодулированной схемой, даже если не учитывать вариацию анализирующей способности детектора. Учитывая, что максимальная скорость изменения соответствует окрестности продольной ориентации вектора поляризации пучка, в которой анализирующая способность детектора минимальна, эффективность использования модулированной схемы ещё меньше.

Также важно отметить отсутствие прямой зависимости между частотой  $\omega$  измеряемого сигнала, и стандартным отклонением оценки частоты  $\sigma_\omega$ . То есть, нет принципиальной разницы измеряется ли частота в 1 или 100 рад/сек. Это обстоятельство важно для методов детектирования ЭДМ, основанных на измерении частоты прецессии спина: благодаря ему, строго

говоря, отсутствует необходимость подавлять МДМ-прецессию, связанную с неидеальностями оптической структуры ускорителя.

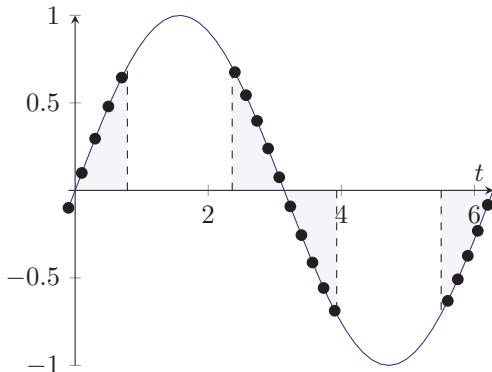


Рис. 6: Частотно-модулированная выборка: измерения делаются только в максимально информативных точках, находящихся в окрестностях узлов сигнала

Также была оценена эффективная длительность измерительного цикла, исходя из времени жизни поляризации пучка  $\tau_d$  (опеределяемого как период времени, за который поляризация пучка уменьшается в  $e$  раз). Очевидно, что когда пучок полностью деполяризуется, невозможно получать информацию о скорости вращения его поляризации; т.е. существует принципиальное ограничение на полное количество информации (обозначим её  $FI_{tot}$ ) о частоте прецессии спина, которое можно получить за один цикл измерений. В таблице 1 отражено количество выбранной (относительно  $FI_{tot}$ ) информации о частоте прецессии спина как функция длительности цикла, а также соответствующее ему отношение сигнал/шум. Исходя из данных таблицы, полезная длительность измерительного цикла ограничена тремя постоянными временем деполяризации.

Результаты численного моделирования [20] показывают возможность достичь точности оценки частоты прецессии спина на уровне  $8 \cdot 10^{-7}$  рад/сек за один измерительный цикл при постоянной времени деполяризации 1 000 сек, частоте измерения поляризации 375 Гц, и начальной ошибке измерения поляризации 3%. При 70% годовой временной загрузке ускорителя это позволяет выйти на уровень  $5 \cdot 10^{-9}$  рад/сек стандартного отклонения среднего значения оценки частоты. Такая точность достаточна для получения оценки ЭДМ на уровне  $10^{-29}$  е·см.

В Главе 4 описаны наиболее значимые (для данной работы) технологии, разработанные в рамках исследований, проведённых на синхротроне COSY (Рис. 7), а также описаны результаты процедуры оптимизации времени когерентности спина (spin coherence time, SCT) при помощи семейств секступолей, установленных на COSY (параметры COSY представлены в Таблице 2).

Таблица 1: Количество выбранной информации (в долях от потенциального максимума), в зависимости от длительности измерительного цикла, и соответствующее ему отношение сигнал/шум.

Инфо. (%FI <sub>tot</sub> )	Длительность ( $\times \tau_d$ )	Сигнал/шум
95	3.0	0.4
90	2.3	1.1
70	1.2	5.5
50	0.7	11.7

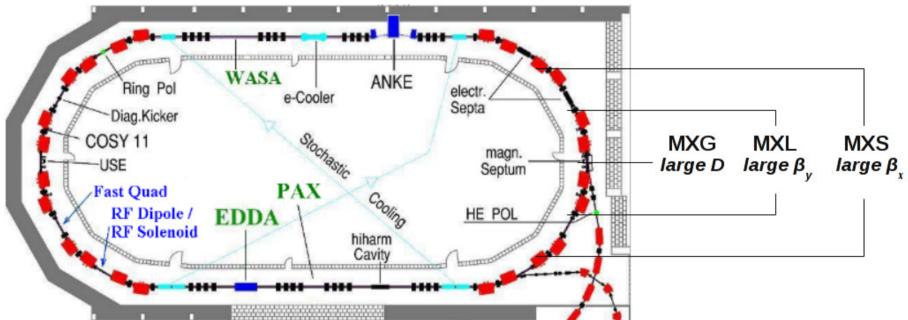


Рис. 7: Кольцо COSY с отмеченными положениями секступолей для контроля времени когерентности спина [21]

Таблица 2: Рабочие параметры COSY, использованные в проводимых исследованиях

Параметр	Величина	Размерность
Длина окружности COSY	183	м
Импульс дейtron'a	970	МэВ/с
$\beta / \gamma$	0.459 / 1.126	
Аномальный магнитный момент G	-0.143	
Частота оборота пучка $f_{rev}$	752543	Гц
Длительность измерительного цикла	100–1500	сек
Число частиц в пучке	$\approx 10^9$	

Рассмотренные технологии:

- (1) высокоточное измерение спин-тиона (с точностью до  $10^{-10}$  в измерительном цикле 100 секунд);
- (2) юстировка квадрупольей при помощи пучка (Beam Based Alignment [22]);

(3) оптимизация времени когерентности спина [18; 21].

Отдельно стоит отметить наблюдение явления изменения SCT (см. Рис. 8) при длительном измерении поляризации разрушающими методами, связанного с переходом от внешней (ореол) к внутренней (ядру) частям пучка. Наблюдение этого явления косвенно подтверждает теорию спин-декогеренции, изложенную в данной работе.

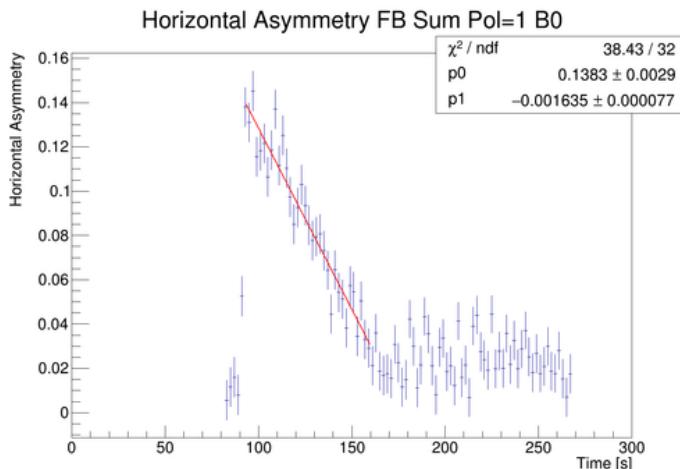


Рис. 8: Результаты измерения горизонтальной поляризации во время оптимизации времени когерентности спина при подготовке к эксперименту по поиску аксионов в апреле 2019 года

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

1. Разработан метод измерения электрического дипольного момента дейtronона, основанный исключительно на измерении частоты прецессии частицы при движении в накопительном кольце.
2. Предложен принцип построения магнитооптической структуры кольца-накопителя, ориентированного на поиск электрического дипольного момента дейtronона.
3. Получены результаты исследования спин-декогеренции пучка дейtronов в окрестности состояния “замороженного спина,” а также метод подавления спин-декогеренции, основанный на использовании нелинейных элементов оптической структуры накопителя.
4. Исследовано влияние 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.

## Публикации автора по теме диссертации

1. The Test of Time Reversal Invariance at COSY (TRIC) / A. Aksentyev [и др.] // Acta Physica Polonica B. — 2017. — Окт. — Т. 48. — С. 1925—1934. — URL: <http://www.actaphys.uj.edu.pl/fulltext?series=Reg&vol=48&page=1925>.
2. The physics program of PAX at COSY / Y. Valdau [и др.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2016. — Т. 678. — URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/678/1/012027/meta>.
3. Aksentev, A. E. Statistical precision in charged particle EDM search in storage rings / A. E. Aksentev, Y. V. Senichev // Journal of Physics: Conference Series. — 2017. — Дек. — Т. 941. — URL: <http://stacks.iop.org/1742-6596/941/i=1/a=012083>.
4. Aksentev, A. Modeling of spin-orbital dynamics in a storage ring / A. Aksentev // Journal of Physics: Conference Series. — 2019. — Июнь. — Т. 1238. — С. 012079. — URL: <https://doi.org/10.1088%2F1742-6596%2F1238%2F1%2F012079>.
5. Aksentyev, A. Frequency domain method of the search for the electric dipole moment in a storage ring / A. Aksentyev, Y. Senichev // Journal of Physics: Conference Series. — 2020. — Янв. — Т. 1435. — С. 012026.
6. Aksentyev, A. Model of Statistical Errors in the Search for the Deuteron EDM in the Storage Ring / A. Aksentyev, Y. Senichev // Hadron Accelerators (8th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'17), 14—19 мая 2017). — Copenhagen, Denmark : JACOW, Geneva, Switzerland. — С. 2258—2260. — URL: <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ipac2017/doi/JACoW-IPAC2017-TUPVA079.html>.
7. Аксентьев, А. Статистическая точность при поиске ЭДМ заряженных частиц в накопительных кольцах / А. Аксентьев, Ю. Сеничев // Ускорители заряженных частиц (III Международная конференция “Лазерные, плазменные исследования и технологии”, 24—27 янв. 2017). — Москва, Россия.

8. Аксентьев, А. Моделирование спин-орбитальной динамики пучка в накопительном кольце / А. Аксентьев // Ускорители заряженных частиц (IV Международная конференция “Лазерные, плазменные исследования и технологии”, 30 янв.–1 февр. 2018). — Москва, Россия.
9. Аксентьев, А. Декогеренция спина в структуре с замороженным спином, её подавление и эффект на ЭДМ статистику в методе Frequency Domain / А. Аксентьев, Ю. Сеничев // Ускорители заряженных частиц (V Международная конференция “Лазерные, плазменные исследования и технологии”, 12–15 февр. 2019). — Москва, Россия.
10. Aksentyev, A. Simulation of the Guide Field Flipping Procedure for the Frequency Domain Method / A. Aksentyev, Y. Senichev // Hardon Accelerators (10th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'19), 19–24 мая 2019). — Melbourne, Australia.
11. Aksentyev, A. Spin Motion Perturbation Effect on the EDM Statistic in the Frequency Domain Method / A. Aksentyev, Y. Senichev // Hadron Accelerators (10th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'19), 19–24 мая 2019). — Melbourne, Australia.
12. Aksentyev, A. Spin decoherence in the Frequency Domain Method for the search of a particle EDM / A. Aksentyev, Y. Senichev // Hadron Accelerators (10th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'19), 19–24 мая 2019). — Melbourne, Australia.

## Список литературы

1. Harris, P. G. The Neutron EDM Experiment / P. G. Harris // arXiv:0709.3100 [hep-ex]. — 2007. — 19 сент. — arXiv: [0709 . 3100](https://arxiv.org/abs/0709.3100). — URL: <http://arxiv.org/abs/0709.3100> (дата обр. 16.04.2019).
2. Smith, J. H. Experimental Limit to the Electric Dipole Moment of the Neutron / J. H. Smith, E. M. Purcell, N. F. Ramsey // Phys. Rev. — 1957. — Окт. — Т. 108, вып. 1. — С. 120–122. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.108.120>.
3. Improved Experimental Limit on the Electric Dipole Moment of the Neutron / C. A. Baker [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2006. — Сент. — Т. 97, вып. 13. — С. 131801. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.97.131801>.
4. Baker et al. Reply: / C. A. Baker [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2007. — Апр. — Т. 98, вып. 14. — С. 149102. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.98.149102>.

5. AGS Proposal: Search for a permanent electric dipole moment of the deuteron nucleus at the  $10^{-29}$  e· cm level. Tex. отч. / D. Anastassopoulos, V. Anastassopoulos, D. Babusci [и др.] ; BNL. — 2008. — URL: [https://www.bnl.gov/edm/files/pdf/deuteron\\_proposal\\_080423\\_final.pdf](https://www.bnl.gov/edm/files/pdf/deuteron_proposal_080423_final.pdf) (дата обр. 25.11.2016).
6. srEDM Collaboration. — URL: <https://www.bnl.gov/edm/>.
7. New Method of Measuring Electric Dipole Moments in Storage Rings / F. J. M. Farley, K. Jungmann, J. P. Miller [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2004. — Июль. — Т. 93, вып. 5. — С. 052001. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.93.052001>.
8. JEDI Collaboration. — URL: <http://collaborations.fz-juelich.de/ikp/jedi/about/introduction.shtml>.
9. Morse, W. M. rf Wien filter in an electric dipole moment storage ring: The “partially frozen spin” effect / W. M. Morse, Y. F. Orlov, Y. K. Semertzidis // Phys. Rev. ST Accel. Beams. — 2013. — Нояб. — Т. 16, вып. 11. — С. 114001. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevSTAB.16.114001>.
10. Spin tune mapping as a novel tool to probe the spin dynamics in storage rings / A. Saleev, N. N. Nikolaev, F. Rathmann [и др.] // Phys. Rev. Accel. Beams. — 2017. — Июль. — Т. 20, вып. 7. — С. 072801. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevAccelBeams.20.072801>.
11. Electromagnetic Simulation and Design of a 11el Waveguide RF Wien Filter for Electric Dipole Moment Measurements of Protons and Deuterons / J. Slim [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2016. — 21 авг. — Т. 828. — С. 116–124. — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900216303710> (дата обр. 18.04.2019).
12. Slim, J. First commissioning results of the waveguide RF Wien filter / J. Slim, for the JEDI Collaboration // Hyperfine Interactions. — 2019. — Янв. — Т. 240, № 1. — С. 7. — URL: <https://doi.org/10.1007/s10751-018-1547-6>.
13. CPEDM Collaboration. — URL: <http://pbc.web.cern.ch/edm/edm-default.htm>.
14. The Test of Time Reversal Invariance at COSY (TRIC) / A. Aksentyev [и др.] // Acta Physica Polonica B. — 2017. — Окт. — Т. 48. — С. 1925–1934. — URL: <http://www.actaphys.uj.edu.pl/fulltext?series=Reg&vol=48&page=1925>.

15. The physics program of PAX at COSY / Y. Valdau [и др.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2016. — Т. 678. — URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/678/1/012027/meta>.
16. Koop, I. A. Colliding or co-rotating ion beams in storage rings for EDM search / I. A. Koop // Phys. Scr. — 2015. — С. 014034.
17. Шатунов, Ю. М. Пучки поляризованных частиц в ускорителях и накопителях / Ю. М. Шатунов. — Новосибирск : Издательство СО РАН, 2015. — 205 с.
18. Greta Guidoboni. Overview of Spin Coherence Time study results at COSY / Greta Guidoboni. — Richmond, VA, USA, 03.05.2015. — URL: [http://collaborations.fz-juelich.de/ikp/jedi/public\\_files/workshop/G.Guidoboni\\_IPAC15.pdf](http://collaborations.fz-juelich.de/ikp/jedi/public_files/workshop/G.Guidoboni_IPAC15.pdf) ; Topical meeting of Spin Tracking for Precision Measurements (IPAC15).
19. How to Reach a Thousand-Second in-Plane Polarization Lifetime with 0.97-GeV/c Deuterons in a Storage Ring / G. Guidoboni, E. Stephenson, S. Andria11 [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2016. — Июль. — Т. 117, вып. 5. — С. 054801. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.117.054801>.
20. Aksentev, A. E. Statistical precision in charged particle EDM search in storage rings / A. E. Aksentev, Y. V. Senichev // Journal of Physics: Conference Series. — 2017. — Дек. — Т. 941. — URL: <http://stacks.iop.org/1742-6596/941/i=1/a=012083>.
21. Guidoboni, G. Spin coherence time studies of a horizontally polarized deuteron beam at COSY / G. Guidoboni, on behalf of JEDI Collaboration // Physica Scripta. — 2015. — Нояб. — Т. T166. — С. 014036.
22. Wagner, T. Beam-based alignment tests at the Cooler Synchrotron (COSY) / T. Wagner, on behalf of JEDI Collaboration // Hyperfine Interact. — 2018. — Nov. 28. — Vol. 239, no. 1. — P. 61. — URL: <https://doi.org/10.1007/s10751-018-1539-6> (visited on 04/16/2019).

*Аксентьев Александр Евгеньевич*

Метод замороженного спина для поиска электрического дипольного момента  
дейtronа 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 \_\_\_\_\_

