

На правах рукописи

Мельников Алексей Александрович

**Исследование спин-орбитального движения
и управления поляризацией
в накопительном кольце для поиска
электрического дипольного момента лёгких ядер**

1.3.2— Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН).

Научный руководитель:

Сеничев Юрий Валерьевич, доктор физ.-мат. наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), отдел ускорительного комплекса, ведущий научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Теряев Олег Валерианович, доктор физ.-мат. наук, Международная межправительственная организация Объединённый институт ядерных исследований (ОИЯИ), лаборатория теоретической физики, заместитель директора.

Свирида Дмитрий Николаевич, кандидат физ.-мат. наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Курчатовский комплекс теоретической и экспериментальной физики, лаборатория поляризационных исследований, старший научный сотрудник.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Защита состоится _____ в _____ часов на заседании диссертационного совета 24.1.163.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН и на сайте по адресу: [http:// www.inr.ru](http://www.inr.ru).

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.163.01,
кандидат физ.-мат. наук

Демидов Сергей Владимирович

Общая характеристика работы

Электрический Дипольный Момент (ЭДМ) есть фундаментальная характеристика элементарных частиц наравне с электрическим зарядом и спином. Данная векторная физическая величина характеризует асимметрию распределения электрического заряда рассматриваемой частицы вдоль направления спина.

ЭДМ ни одной элементарной частицы ещё не был экспериментально обнаружен. Тем самым, найденные значения ЭДМ элементарных частиц установят существенные ограничения на параметры Стандартной Модели (СМ) физики элементарных частиц [13]. Данная область исследований, несомненно, является окном в Новую физику за пределами СМ. Наличие ненулевого ЭДМ у элементарных частиц сигнализирует о нарушении CP симметрии в СМ. Обнаружение ненулевого ЭДМ сигнала элементарных частиц также позволило бы объяснить величину и характер барионной асимметрии Вселенной.

Первый эксперимент по поиску ЭДМ частиц был проведён в 1949 г. на реакторе в г. Oak Ridge (Ramsey [14]). При этом исследовалось изменение поляризации пучка нейтронов при прохождении через систему электрических и магнитных полей. Следующим этапом стало проведение экспериментов по поиску ЭДМ ультрахолодных нейтронов (ILL [15], PNPI [16], PSI [17]). При этом анализировалось влияние ЭДМ на прецессию спина в статических электромагнитных полях. Текущее ограничение на величину ЭДМ нейтрона составляет $|dn| < (0.0 \pm 1.1) * 10^{-26}$ е·см [18].

Нейтроны стали первым и естественным выбором частиц для эксперимента по поиску ЭДМ, так как они не подвержены действию внешнего электрического и магнитного поля. ЭДМ исследования проводятся также и с нейтральными системами: атомами ртути ^{199}Hg и тяжёлыми поляризованными молекулами. Из экспериментальных данных для нейтральных систем можно также получить ограничения на величины ЭДМ других заряженных частиц, например $|dp| < 2 * 10^{-25}$ е·см [19] и $|de| < 1.1 * 10^{-29}$ е·см [20].

Эксперименты по поиску ЭДМ заряженных частиц целесообразно проводить на накопительных кольцах. При этом возможно накопление достаточного количества статистических данных благодаря существенному числу частиц в пучке $\sim 10^{10}$ и времени жизни пучка > 1000 с. Такие важные характеристики как поляризация, энергия, поперечный и продольный размер сгустка частиц можно контролировать и измерять в процессе ускорения и проведения

эксперимента. Контроль aberrаций орбитального и спинового движения, а также возможность эффективного управления поляризацией пучка, являются несомненными достоинствами метода измерения ЭДМ на ускорителях-накопителях. Главным достоинством поиска ЭДМ на ускорителе является высокая точность измерений [21]. Например, для ЭДМ протона может быть достигнуто ограничение $|dp| < 10^{-29}$ е·см [22], что примерно на 4 порядка выше текущего предела.

Первое прямое измерение ЭДМ на накопительном кольце было сделано для мюона в коллаборации $g - 2$ [23]. В данном эксперименте поляризованные мюоны инжектируются в накопительное кольцо с ведущим магнитным полем, и поляризация прецессирует под влиянием ЭДМ и МДМ. При этом измерялась как совокупная частота прецессии, так и угол наклона плоскости прецессии, вызванный ЭДМ. Итоговое ограничение на величину ЭДМ мюона составляет $|d\mu| < 10^{-21}$ е·см.

Следующим этапом в развитии методики измерения ЭДМ на накопителях было предложение концепции “замороженного спина” [24], в которой частота МДМ прецессии равна нулю, вектор спина сонаправлен с вектором импульса, и наблюдаемой величиной является аккумулируемая вертикальная поляризация, возникающая за счёт ЭДМ. Для реализации данной методики необходимо полностью электростатическое накопительное кольцо, работающее при “магической” энергии, реализующей условие “замороженного спина”.

Реализация эксперимента по поиску ЭДМ возможна и на ускорителе с ведущим магнитным полем, структура которого изначально не предназначена для таких исследований. При этом в накопителе необходимо установить элементы с комбинированным электрическим и магнитным полем — фильтры Вина (WF). В этом случае реализуется состояние “квази-замороженного спина” или “Quasi-Frozen Spin” (QFS), при котором вращение спин-вектора от магнитных диполей компенсируется противоположным вращением спина от фильтров Вина [25]. Усреднённая частота спин-прецессии равна нулю. Метод использования комбинированных полей является единственно возможным для частиц с отрицательной магнитной аномалией, например, дейтронов.

Главным фактором, определяющим точность измерения ЭДМ частиц на накопителе, является учёт систематических ошибок. Можно показать, что в состоянии нулевого спинового резонанса движение

спина вдоль накопителя определяется локальными возмущениями поля, возникающими от неточностей выставки элементов. Из-за некоммутативности поворотов спина возникает так называемая ошибка геометрической фазы, не позволяющая измерить ЭДМ с достаточной точностью. Поэтому был предложен метод измерения ЭДМ в частотной области или “frequency domain method” [26]. При этом создаётся превалирующее контролируемое МДМ возмущение, и измеряется совокупная частота вращения спина как от МДМ, так и ЭДМ. Было показано, что именно в этом методе измерения ЭДМ можно учесть систематические ошибки для измерения ЭДМ с требуемой точностью 10^{-29} е-см.

Основным требованием в подобных экспериментах является высокая степень спиновой когерентности пучка частиц или равенство частот спин-прецессии для частиц с отклонениями в шестимерном фазовом пространстве. Соблюдение данного требования позволяет детектировать когерентный эффект изменения поляризации от ЭДМ. При этом время спиновой когерентности “Spin Coherence Time” (SCT) — время, за которое среднеквадратичный разброс направлений спинов в пучке достигает 1 рад. Известно, что высокой степени спиновой когерентности можно добиться с помощью использования резонатора с высокочастотным (ВЧ) полем и элементов с нелинейной зависимостью поля от расстояния от оси, например, секступолями [1].

Ключевым этапом в экспериментах по поиску ЭДМ является прецизионное управление поляризацией в области спиновых резонансов. Например, процедура изменения направления инвариантной оси с помощью контролируемого возмущения является основой метода измерений ЭДМ в частотной области [5]. Решение данной задачи в общем случае для управления поляризацией в области целочисленных спиновых резонансов позволит проводить высокоточные эксперименты с поляризованными пучками [2; 3]. Управление поляризацией в области ВЧ спиновых резонансов или “ВЧ спин-флиппинг” есть необходимый подготовительный этап для экспериментов по поиску ЭДМ. При этом поляризация переводится из вертикального направления при инжекции в плоскость накопительного кольца [9]. Во всех вышеописанных процедурах важно сохранить степень поляризации пучка.

Целью данной работы является развитие методов поиска ЭДМ заряженных частиц на накопительном кольце. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Исследовать спин-орбитальное движение пучка частиц в магнитном накопителе.
2. Провести численное моделирование подавления эффектов спиновой декогеренции с помощью элементов с нелинейным магнитным полем.
3. Экспериментально исследовать эффекты спиновой декогеренции протонов, получить данные о достижимом времени когерентности.
4. Исследовать особенности накопителей с совмещёнными $E + B$ полями для целей измерения ЭДМ.
5. Разработать и реализовать в эксперименте метод управления поляризацией в области целочисленных спиновых резонансов.
6. Исследовать особенности управления поляризацией с помощью ВЧ спин-ротатора.
7. Исследовать свойства и различия структур типа “замороженного” и “квази-замороженного” спина с точки зрения измерения ЭДМ частотным методом.

Научная новизна:

1. Впервые было верифицировано в численном эксперименте выражение для эффективного Лоренц-фактора, что позволило развить методику подавления эффектов спиновой декогеренции частиц.
2. Впервые было исследовано влияние спиновых резонансов на время когерентности спинов протонов и предложены оптимальные условия для проведения эксперимента по поиску ЭДМ на ускорителе COSY (COoler SYnchrotron).
3. На ускорителе COSY в составе коллаборации JEDI автором впервые были получены экспериментальные результаты по достижимому времени спиновой когерентности протонов.
4. Была разработана специализированная структура накопителя для измерения ЭДМ с совмещённым электрическим и магнитным полем, в которой можно достичь времени когерентности спинов ~ 1000 с.
5. Была разработана первая в своём роде экспериментальная реализация методики управления поляризацией в области целочисленного резонанса. Для ускорителя COSY были проработаны этапы эксперимента, проведены оценки параметров необходимого оборудования.

6. Были проведены основополагающие исследования спин-декогеренции в области ВЧ спинового резонанса. На их базе разработаны методы увеличения эффективности управления поляризацией с помощью ВЧ спин-ротатора.
7. Впервые были рассмотрены свойства и различия структур типа “замороженного” и “квази-замороженного” спина с радиальными МДМ возмущениями для измерения ЭДМ методом частотной области.

Практическая значимость:

Исследования эффектов спиновой декогеренции протонов имеют определяющее значение как для экспериментальной программы на ускорителях COSY и Nuclotron based Ion Collider Facility (NICA), так и для создания специализированного накопителя для поиска ЭДМ.

Высокую важность представляют эксперименты по поиску ЭДМ протонов, так как они одновременно могут циркулировать в противоположных направлениях в накопителе с электрическим полем при условии замороженного спина. При этом два пучка испытывают одинаковое воздействие полей от МДМ возмущений, возникающих от неточностей юстировки элементов. Данный факт крайне важен для учёта систематических ошибок при измерении ЭДМ в концепции замороженного спина.

Опыт работы с дейтронами на ускорителе COSY показывает, что для этих частиц возможно достичь времени спиновой когерентности (SCT) порядка 1000 с [27], что является необходимым требованием для проведения эксперимента по поиску ЭДМ. Достижение большого времени когерентности для протонов является более сложной задачей, чем для дейтронов. Это объясняется тем, что отношение магнитных аномалий, определяющих разброс частот спин-прецессии в пучке, составляет $|G_p/G_d| \sim 13$. Большее значение магнитной аномалии также ведёт к тому, что в рабочем энергетическом диапазоне ускорителя спиновые резонансы будут встречаться гораздо чаще и вызывать дополнительные эффекты деполаризации и декогеренции.

Подготовительным этапом для проектирования специализированного кольца для измерения ЭДМ протона является экспериментальная проверка возможности достижения $SCT \sim 1000$ с. Первый эксперимент подобного рода проводился в феврале-марте 2022 г. на ускорителе COSY. Для проведения дальнейших исследований возникла необходимость решения двух задач:

- 1) разработать схему перевода поляризации протонов в плоскость кольца с помощью ВЧ спин-ротатора без потери поляризации;

2) исследовать особенности спин-декогеренции протонов в магнитном накопителе при учёте спиновых резонансов.

Детальный анализ эффектов спиновой декогеренции в накопителях с совмещённым $E + B$ полем показал, что предполагаемая структура накопителя для поиска ЭДМ ProtoType EDM Ring (PTR) не удовлетворяет основному требованию достижения SCT ~ 1000 с. В связи с этим была разработана и обоснована новый тип структур для поиска ЭДМ с более сильной фокусировкой, который может стать итоговым вариантом проектируемого накопителя для поиска ЭДМ.

Развитие методики управления поляризацией — ключевой шаг в проведении прецизионных экспериментов на накопителях. Первый в своём роде эксперимент по управлению спином в целочисленном резонансе планируется на ускорителях COSY и в комплексе NICA. Успешная реализация данной концепции позволит вывести эксперименты с поляризованными пучками на новый уровень точности, что является ключевым фактором для таких экспериментов, как поиск ЭДМ частиц.

Развитие методики управления поляризацией в области нулевого спинового резонанса является ключевым этапом для проведения экспериментов по поиску ЭДМ на NICA. Это также позволит убедиться в целесообразности использования метода измерения ЭДМ в частотной области как более перспективного с точки зрения учёта систематических ошибок. Данный факт несомненно позволит увеличить научный потенциал комплекса NICA и других проектируемых накопителей для поиска ЭДМ.

Методология и методы исследования. Основным методом исследования является численное моделирование в программных средах COSY Infinity, MAD-X, OPTIM.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработан метод увеличения времени спиновой когерентности на основе изменения равновесного уровня энергии частиц.
2. Предложен метод увеличения времени спиновой когерентности протонов при учёте влияния спиновых резонансов.
3. Представлены результаты вычисления мощностей внутренних и целых спиновых резонансов для ускорителя COSY.
4. Представлена концепция спин-прозрачного режима управления поляризацией, включающая в себя аналитические оценки, проработку этапов эксперимента, определение параметров оборудования, необходимого для установки на накопителе.

5. Предложена методика управления поляризацией протонов с помощью ВЧ спин-ротатора без потери поляризации.
6. Разработан и верифицирован в численном эксперименте матричный метод анализа структур накопительных колец типа “замороженного” и “квази-замороженного” спина с целью проведения эксперимента по поиску ЭДМ в частотной области.

Достоверность полученных результатов обеспечивается соответствием аналитических выражений результатам численного моделирования. Результаты аналитических и численных расчётов находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами, и результатами, полученными в ходе экспериментов на ускорителе COSY.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

- XIII и XIV международной конференции по ускорителям заряженных частиц IPAC-2022, 2023. Бангкок, Тайланд; Венеция, Италия.
- XXVII и XXVIII Всероссийской конференции по ускорителям заряженных частиц RuPAC-2021, 2023. Алушта; Новосибирск, Россия.
- VII, VIII и IX Международной конференции Лазерные и Плазменные технологии ЛаПлаз-2021, 2022, 2023. Москва, Россия.
- XIX Международной конференции по спиновой физике высоких энергий DSPIN-2023. Дубна, Россия.
- 64-й Всероссийской научной конференции МФТИ в 2021 г. Долгопрудный, Россия.
- Семинарах Института Ядерной Физики (IKP FZJ) в г. Юлих, Германия.

Личный вклад. Все результаты, выносимые на защиту, получены автором лично либо при его непосредственном участии. Результаты по подготовке и проведению экспериментов на ускорителе COSY получены в соавторстве с коллаборацией JEDI (Juelich Electric Dipole Moment Investigations) и сотрудниками ИЯИ, МФТИ, ИТФ. Автор лично принимал участие в получении всех упомянутых экспериментальных результатов.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 12 печатных изданиях: 10 печатных работ изданы в журналах, рекомендованных ВАК [1–10], 2 статьи — в журналах, индексируемых международными базами цитирования Scopus и Web of Science [11; 12].

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.

В первой главе представлены основополагающие принципы описания спин-орбитальной динамики в ускорителях-накопителях: на основе дифференциального уравнения Томаса-Баргманна-Мишеля-Телегди (Т-БМТ) и на основе спиновой матричной техники. В данной главе получены основные соотношения для описания спиновых интегральных характеристик накопительных колец: направления инвариантной оси \vec{n} и приведённой частоты спин-прецессии ν_s в системе, связанной с импульсом. Представлены спиновые матрицы основных элементов накопительных колец и результаты применения соотношений для \vec{n} и ν_s к основным типам структур ускорителей-накопителей, рассматриваемым в диссертационной работе.

В данной главе также представлены общие принципы описания спиновой динамики в области спиновых резонансов: появление отстройки по частоте спин-прецессии и изменение направления инвариантной оси; изменение поляризации пучка при пересечении спиновых резонансов и основные соотношения для реализации условия высокочастотного спинового резонанса.

Приведён обзор основных методов поиска ЭДМ в ускорителях-накопителях. При учёте ЭДМ-компоненты спин-прецессии в уравнении Т-БМТ были рассмотрен метод “замороженного спина”, представлены основные особенности методов измерения ЭДМ в пространственной и частотной области. Для ускорителей-накопителей широкого класса был рассмотрен метод “квази-замороженного спина” для поиска ЭДМ.

Вторая глава посвящена исследованию эффектов спиновой декогеренции в накопителях с электрическими и магнитными полями. Из решения системы нелинейных дифференциальных уравнений для основного “принципа синхронного ускорения” Векслера–Макмиллана следует, что равновесный уровень продольной фазовой траектории смещается на величину $\Delta\delta_{eq}$ (рис. 1).

$$\Delta\delta_{eq} = \frac{\gamma_s^2}{\gamma_s^2\alpha_0 - 1} \left[\frac{\delta_m^2}{2} \left(\alpha_1 + \frac{3\beta_s^2}{2\gamma_s^2} - \frac{\alpha_0}{\gamma_s^2} + \frac{1}{\gamma_s^4} \right) + \left(\frac{\Delta L}{L} \right)_\beta \right].$$

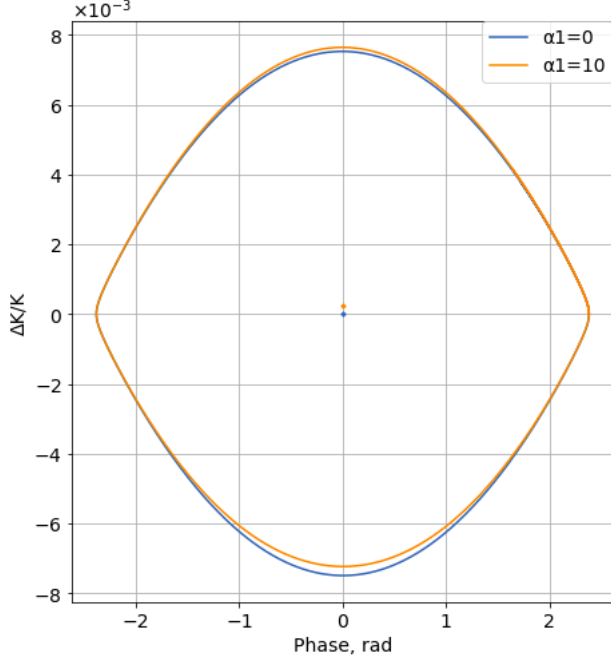


Рис. 1: Продольные фазовые траектории для различных значений α_1 ; $\xi_{x,y} = 0$. $\Delta K/K$ — относительное изменение кинетической энергии.

В силу того, что $\delta = d\gamma / (\beta_s^2 \gamma_s)$, можно переписать соотношение для $\Delta\delta_{eq}$ в терминах *эффективного* Лоренц-фактора [1; 26]:

$$\gamma_{eff} = \gamma_s + \beta_s^2 \gamma_s \cdot \Delta\delta_{eq}. \quad (1)$$

Причём γ_{eff} является универсальным скалярным параметром, отождествляющим частицы с различными отклонениями в шестимерном фазовом пространстве с точки зрения спиновой динамики. Данное утверждение верно в силу того, что бетатронное удлинение орбит зависит от положения частицы в “поперечном” (x, a) , (y, b) фазовом пространстве [6; 28]:

$$\left(\frac{\Delta L}{L}\right)_\beta = -\frac{\pi}{L_s} [\epsilon_x \xi_x + \epsilon_y \xi_y]. \quad (2)$$

В диссертационной работе была произведена верификация соотношения для $\Delta\delta_{eq}$ в численном эксперименте с точки зрения

орбитальной и спиновой динамики частиц. Причём спиновая динамика в вертикальной плоскости характеризуется действием целых $\gamma G = K$ и внутренних $\gamma G = KP \pm Q_y$ спиновых резонансов. Изменение частоты спин-прецессии под действием спиновых резонансов было определено двумя способами: усреднением набега фазы спинового движения в плоскости накопителя и вычислением мощностей резонансов для определения их совокупного влияния. Результаты для спиновой динамики протонов в вертикальной плоскости отражают существенное влияние спиновых резонансов на время когерентности спинов (рис. 2) [1; 4].

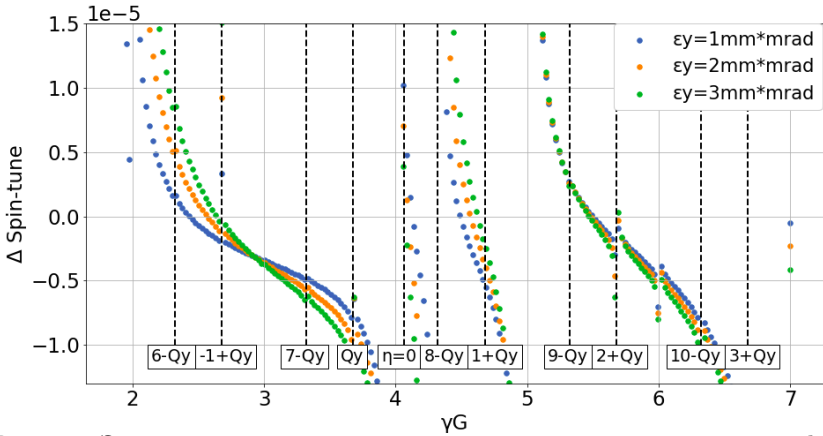


Рис. 2: Зависимость отклонения частот спин-прецессии от референсной величины для различных значений энергии референсной частицы, соответствующей спин-тьюну γG . Частицы имеют различные вертикальные бетатронные амплитуды, соответствующие ϵ_y , при инжекции.

Для получения высоких значений SCT необходимо изучить общую картину спиновых резонансов. Из предсказанных результатов для COSY (рис. 2) следует, что точка, в которой частицы с разными бетатронными амплитудами имеют одинаковый спин-тьюн, является наиболее подходящей для эксперимента по поиску ЭДМ. Местоположение этой “точки пересечения” зависит от энергии пучка и значения вертикальной хроматичности, что для COSY соответствует $\gamma G \sim 3$.

Первый эксперимент по изучению эффектов спиновой декогеренции протонов был проведён на ускорителе COSY. Предварительные результаты эксперимента при энергии пучка, соответствующей

$\gamma G \sim 2.06$, сигнализируют о достижимом времени когерентности $\tau \sim 0.2$ с при указанных параметрах. Данная величина согласуется как с численными (рис. 2), так и с аналитическими оценками, представленными в диссертационной работе.

Из соотношения для $\Delta\delta_{eq}$ следует, что для минимизации эффектов спиновой декогеренции необходимо иметь три семейства секступолей, расположенных в точках с ненулевой дисперсией $\eta_x \neq 0$ и различным отношением оптических функций β_x, β_y, η_x . Данный факт был использован при проектировании специализированного накопительного кольца для поиска ЭДМ протона (рис. 3). Было показано, что в упомянутой структуре возможно достижение времени спиновой когеренции SCT ~ 1000 с, что на порядок выше, чем в изначальной структуре, предлагаемой коллаборацией SrEDM [22; 29].

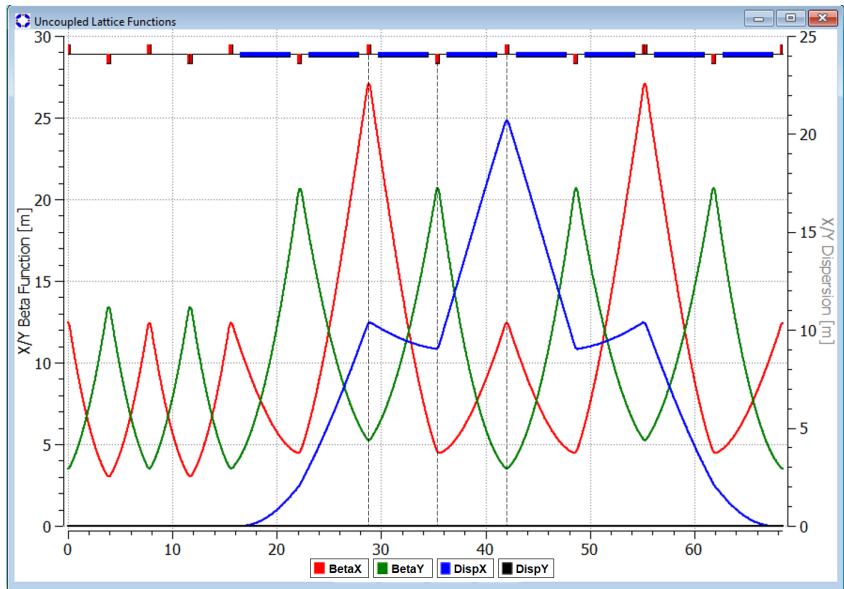


Рис. 3: Структура суперпериода накопителя для поиска ЭДМ протона с периодичностью $P = 2$ и оптическими функциями. Штриховые линии указывают на положения трёх семейств секступолей.

Третья глава посвящена исследованию управления поляризацией для поиска ЭДМ. В частности, была разработана схема

управления поляризацией в режиме спиновой прозрачности при энергии, соответствующей целочисленному спиновому резонансу $\gamma G = K$ [2; 3]. Для управления поляризацией протонов на ускорителе COSY предполагается использование устройств со слабыми магнитными полями, соленоидов-навигаторов (SN) на основе двух соленоидов с продольным полем. Один соленоид должен располагаться на прямом участке, а другой — в поворотной арке (рис. 4). В данной концепции SN позволяет получить любое направление поляризации \vec{n} в детекторе и индуцированную навигатором спиновую частоту $\nu_N \ll 1$.

Наведённая навигатором спиновая частота $\nu_N \ll 1$, линейная по углам, представляется в виде:

$$\nu = \gamma G + \nu_N, \quad \nu_N = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\psi_1^2 + \psi_2^2 + 2\psi_1\psi_2 \cos \phi_y}.$$

Также получены выражения для компонент \vec{n} в линейном приближении:

$$\begin{aligned} n_x &= \frac{\psi_2 \sin \phi_y}{2\pi\nu_N} = \frac{\psi_2 \sin \phi_y}{\sqrt{\psi_1^2 + \psi_2^2 + 2\psi_1\psi_2 \cos \phi_y}}, \\ n_z &= \frac{\psi_1 + \psi_2 \cos \phi_y}{2\pi\nu_N} = \frac{\psi_1 + \psi_2 \cos \phi_y}{\sqrt{\psi_1^2 + \psi_2^2 + 2\psi_1\psi_2 \cos \phi_y}}, \\ n_y &= -\frac{\psi_1\psi_2 \sin \phi_y}{4\pi\nu_N} = \frac{o(\psi)}{\nu_N}. \end{aligned}$$

Из уравнений следует, что можно получить любое направление \vec{n} в плоскости накопителя путём вариации полей в соленоидах-навигаторах.

В диссертационной работе приведены аналитические оценки необходимых параметров накопителя при проведении эксперимента, исследованы основные этапы проведения эксперимента, представлены необходимые характеристики оборудования, необходимого для установки на накопителе.

Также в данной главе рассматривается вопрос управления поляризацией в области высокочастотного спинового резонанса. Было продемонстрировано, что спин-декогеренция при перевороте спин-векторов ансамбля частиц характеризуется следующим фактором [9]:

$$C_{SD} = 1 - \frac{\eta}{\beta^2} \left(1 + \frac{K}{G\gamma} \right).$$

Причём сигнал поляризации в плоскости максимален, когда $C_{SD} \rightarrow 0$. В этом случае компенсируются эффекты отклонения по фазе при

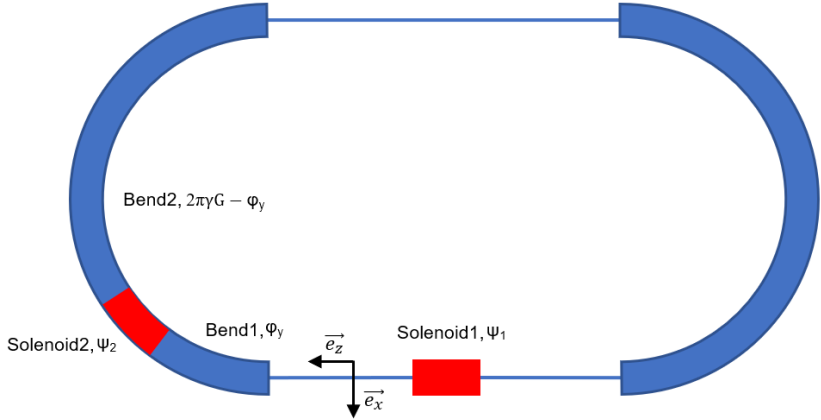


Рис. 4: Принципиальная схема реализации спин-прозрачного режима управления поляризациями в магнитном накопителе с двумя соленоидами. ψ и ϕ — углы поворота \vec{S} вокруг продольной и вертикальной оси соответственно.

спин-прецессии в плоскости накопителя и при движении в ВЧ поле соленоида. Следовательно, уменьшается влияние декогеренции на деполаризацию во время переворота спин-векторов ансамбля частиц.

Четвертая глава посвящена исследованию свойств структур типа “замороженного” и “квази-замороженного” спина с точки зрения измерения ЭДМ частотным методом [10]. Величину ЭДМ частицы в накопительном кольце с радиальными возмущениями поля можно получить, наблюдая полную частоту прецессии спина в точке поляриметра [26]. В концепции линейного вклада локальных частот в измеряемую величину частоты можно вычесть систематические эффекты магнитного дипольного момента, инжектируя пучок в противоположном направлении. Таким образом, для обоих типов структур необходимо получить точную форму связи общей частоты с локальными поворотами спина, что послужит для оценки измеряемой величины ЭДМ.

Было показано, что для структуры типа “замороженного спина” с N радиальными возмущениями, вращающими спин-векторы частиц на углы ψ_i , измеряемая частота спин-прецессии есть среднее

значение от локальных частот, а направление инвариантной оси радиальное:

$$\nu_s = \frac{\sum_{i=1}^N \psi_i}{2\pi},$$

$$\vec{n} = \vec{n}_r, \text{ за исключением } \sum_{i=1}^N \psi_i = 0.$$

Для структуры типа “квази-замороженного спина” с N радиальными возмущениями накопитель можно разбить на N секторов с последовательными поворотами на углы ϕ_i и ψ_i вокруг вертикального и радиального направлений (рис. 5). С помощью матричного анализа для случая $\sum_{i=1}^N \phi_i = 0$ получим [10]:

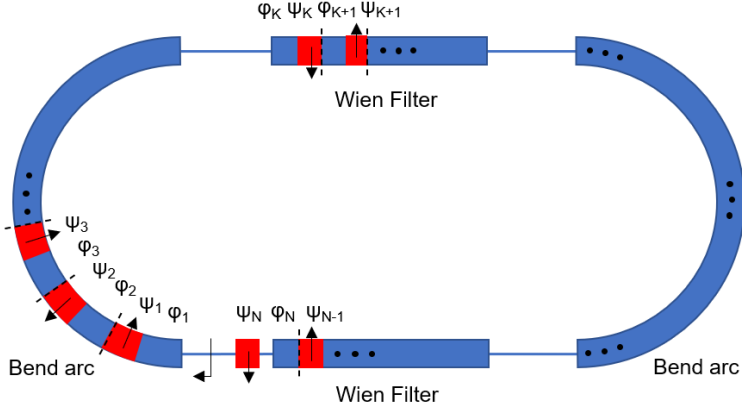


Рис. 5: Структура типа “квази-замороженного спина” с N радиальными возмущениями.

$$\nu_s - \frac{\sum_{i=1}^N \psi_i}{2\pi} \sim \phi_i \psi_j \phi_k \psi_l + o(\phi, \psi)^4,$$

$$\vec{n} = \left[1 + o(\phi, \psi), -\frac{s_{ij} \phi_i \psi_j}{4 \sum_{i=1}^N \psi_i} + o(\phi, \psi), o(\phi, \psi) \right], \text{ где } s_{ij} = \begin{cases} 1, & i \leq j \\ -1, & i > j \end{cases}.$$

Вектор инвариантной оси \vec{n} лежит в плоскости накопителя, и его направление не является строго радиальным; также существуют нелинейные добавки к измеряемой частоте. Было показано, что последние

совпадают для случая прямой и обратной инжекции, что позволяет учесть систематический вклад от МДМ в измеряемую частоту прецессии спина, вызванную наличием как МДМ, так и ЭДМ сигнала. Также представлены данные численного моделирования, описывающие поведение \bar{n} и ν_s в области $\sum_{i=1}^N \phi_i = 0$ для структуры данного типа.

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

1. Произведена систематизация и численная проверка моделей спин-декогеренции в накопительных кольцах. Исследовано влияние спиновых резонансов на декогеренцию. На основании данных результатов предложены методы настройки параметров накопительного кольца для проведения экспериментов по поиску ЭДМ заряженных частиц. В частности, для магнитного накопителя необходимо использовать 3 семейства секступолей с разделёнными функциями: для контроля горизонтальной и вертикальной хроматичности $\xi_{x,y}$, а также фактора нелинейного сжатия орбит κ . Для частиц с относительно небольшим значением магнитной аномалии G , например, дейтронов, для достижения большого SCT достаточно настроить секступоли для достижения $\xi_{x,y}$, $\kappa = 0$. Для протонов с относительно большим значением магнитной аномалии по сравнению с дейтронами $G_p/G_d \sim 13$ было показано, что важную роль с точки зрения спин-декогеренции в вертикальной плоскости играют спиновые резонансы. Для достижения большого времени спиновой когерентности необходимо учесть совокупное влияние как целых, так и внутренних спиновых резонансов во всём энергетическом диапазоне накопителя. Оптимальная рабочая точка (энергия) для проведения эксперимента выбирается из анализа резонансной диаграммы и соответствует минимальному разбросу частот спин-прецессии частиц.
2. Получены результаты в первом в своём роде эксперименте по исследованию времени когерентности спинов протонов. Предварительные данные, полученные на ускорителе COSY, указывают на величину SCT ~ 0.2 с. Представлено объяснение полученных результатов на основе вышеописанных аналитических и численных моделей, развитых автором.
3. На основании развитой методики подавления спин-декогеренции частиц была модернизирована структура проектируемого

накопительного кольца PTR для поиска ЭДМ. В предложенном автором варианте структуры накопителя возможно достижение SCT ~ 1000 секунд, что на порядок больше максимальных достижимых значений в изначальной структуре. Модернизированная версия накопительного кольца также является более предпочтительной с точки зрения динамики и времени жизни пучка.

4. Разработана методика управления спином в области целочисленного спинового резонанса на ускорителе COSY на базе двух навигаторных соленоидов. Произведены оценки параметров проведения эксперимента и необходимого оборудования. Результаты работы по указанной теме легли в основу реализации данной методики в ускорительном комплексе NICA.
5. Исследован механизм спин-декогеренции в области ВЧ спинового резонанса. С помощью математического моделирования и аналитических оценок были продемонстрированы методы уменьшения деполяризации пучка в процессе переворота вектора поляризации ансамбля частиц.
6. Исследовано различие структур типа “замороженного” и “квази-замороженного” спина с точки зрения измерения ЭДМ методом частотной области. В результате аналитического исследования было продемонстрировано, что в возмущённой структуре типа “квази-замороженного спина” присутствует дополнительное МДМ вращение по сравнению со структурой типа “замороженного спина”. Данный факт необходимо учитывать при построении модели оценки сигнала ЭДМ на основании измерения общей МДМ+ЭДМ частоты спин-прецессии.

Публикации автора по теме диссертации

1. Природа спиновой декогеренции поляризованного пучка легких ядер в накопительном кольце для поиска ЭДМ / А. Мельников, Ю. Сеничев, А. Аксентьев, С. Колокольчиков // Письма в ЖЭТФ. — 2023. — Т. 118, вып. 10. — С. 713–720.
2. Спиновый навигатор на базе корректирующих диполей Нукло-трона/ОИЯИ / Ю. Филатов, А. Кондратенко, М. Кондратенко,

- Е. Цыплаков, А. Бутенко, С. Костромин, В. Ладыгин, Е. Сыресин, И. Гурылева, А. Мельников, А. Аксентьев // Письма в ЖЭТФ. — 2022. — Т. 116, вып. 7. — С. 411–418.
3. Система спин-флипа протонов на базе корректирующих диполей Нуклотрона/ОИЯИ на спиновом резонансе $\gamma^*G=7$ / Ю. Филатов, А. Кондратенко, Н. Николаев, Ю. Сеничев, М. Кондратенко, С. Виноградов, Е. Цыплаков, А. Бутенко, С. Костромин, В. Ладыгин, Е. Сыресин, И. Гурылева, А. Мельников, А. Аксентьев // Письма в ЖЭТФ. — 2023. — Т. 118, вып. 6. — С. 389–396.
 4. *Melnikov, A.* Investigation of Proton Spin Decoherence Mechanisms at COSY / A. Melnikov, A. Aksentev, Y. Senichev // Physics of Atomic Nuclei. — 2022. — Март. — Т. 85, № 11. — С. 1881–1885.
 5. *Aksentev, A.* Investigation of Spin Decoherence of a Beam with a Nonadiabatic Change in the Orientation of the Stable Axis of the Spin / A. Aksentev, A. Melnikov, Y. Senichev // Physics of Atomic Nuclei. — 2022. — Март. — Т. 85, № 10. — С. 1675–1678.
 6. *Senichev, Y.* Spin Chromaticity of Beam: Orbit Lengthening and Betatron Chromaticity / Y. Senichev, A. Aksentyev, A. Melnikov // Physics of Atomic Nuclei. — 2022. — Февр. — Т. 84, № 12. — С. 2014–2017.
 7. *Melnikov, A.* Robustness of the Spin-Navigator Based Method for the Manipulation of the Beam Polarization Axis in a Spin-Transparent Storage Ring / A. Melnikov, A. Aksentyev, Y. Senichev // Physics of Atomic Nuclei. — 2022. — Февр. — Т. 84, № 11. — С. 1871–1873.
 8. *Aksentev, A.* Manipulation of Beam Polarization Orientation in a Spin-Transparent Storage Ring / A. Aksentev, A. Melnikov, Y. Senichev // Physics of Atomic Nuclei. — 2022. — Февр. — Т. 84, № 10. — С. 1752–1756.
 9. Investigation of Methods to Decrease Proton Beam Depolarization while using an RF Spin-rotator/ A. Melnikov, N. Nikolaev, A. Aksentyev, Y. Senichev, S. Kolokolchikov // Physics of Atomic Nuclei. — 2024. — Март. — Т. 86, № 11. — С. 2429–2433.
 10. Quasi-frozen Spin Concept at NICA for EDM Search and its Matrix Analysis / A. Melnikov, A. Aksentyev, Y. Senichev, S. Kolokolchikov // Physics of Atomic Nuclei. — 2024. — Т. 87, № 4.
 11. Studies of the spin coherence time of protons at COSY / A. Melnikov, A. Aksentyev, Y. Senichev, S. Kolokolchikov // Journal of Physics: Conference Series. — 2024. — Т. 2687, № 5. — 052025.

12. A feasibility study into the quasi-frozen spin regime of operation of the NICA storage ring / A. Aksentyev, A. Melnikov, Y. Senichev, S. Kolokolchikov, V. Ladygin, E. Syresin, A. Butenko // Journal of Physics: Conference Series. — 2024. — Т. 2687, № 2. — 022028.

Список литературы

13. *Емельянов, В. М.* Стандартная модель и её расширения / В. М. Емельянов. — М. : Физматлит, 2007. — 584 с.
14. *Smith, J.* Experimental Limit to the Electric Dipole Moment of the Neutron / J. Smith, E. Purcell, N. Ramsey // Phys. Rev. — 1957. — Т. 108. — С. 120–122. — URL: <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.108.120>.
15. An Improved Experimental Limit on the Electric Dipole Moment of the Neutron / С. Baker [и др.] // Phys.Rev.Lett. — 2006. — Т. 97, вып. 7. — URL: <https://arxiv.org/abs/hep-ex/0602020>.
16. PNPI differential EDM spectrometer and latest results of measurements of the neutron electric dipole moment / A. Serebrov [и др.] // Physics of Atomic Nuclei. — 2015. — Т. 78. — С. 1601–1605. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1063778815130293>.
17. *Ayres, N.* The design of the n2EDM experiment / N. Ayres, et al., the nEDM collaboration // The European Physical Journal C. — 2021. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1140/epjc/s10052-021-09298-z>.
18. Measurement of the permanent electric dipole moment of the neutron / С. Abel [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2020. — Т. 124. — URL: <https://arxiv.org/pdf/2001.11966.pdf>.
19. Reduced Limit on the Permanent Electric Dipole Moment of Hg / В. Graner [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2016. — Т. 116. — URL: <https://arxiv.org/abs/1601.04339>.
20. *Andreev, V.* Improved limit on the electric dipole moment of the electron / V. Andreev, et al., ACME collaboration // Nature. — 2018. — Т. 562. — С. 355–360. — URL: <https://www.nature.com/articles/s41586-018-0599-8>.

21. New Method for a Continuous Determination of the Spin Tune in Storage Rings and Implications for Precision Experiments / D. Eversmann [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2015. — Абр. — Т. 115, вып. 9. — С. 094801. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.115.094801>.
22. *Abusaif, F.* Storage Ring to Search for Electric Dipole Moments of Charged Particles: Feasibility Study : tech. rep. / F. Abusaif, et al., CpEDM collaboration. — Vol. 3 (2021) CERN Monograph.
23. *Chislett, R.* The muon EDM in the g-2 experiment at Fermilab / R. Chislett, et al., Muon g-2 Collaboration // EPJ Web of Conferences. Vol. 118. — 2016.
24. A storage ring experiment to detect a proton electric dipole moment / V. Anastassopoulos [и др.] // Review of Scientific Instruments. — 2016. — Т. 87, № 11. — С. 115116. — URL: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4967465>.
25. Quasi-frozen Spin Method for EDM Deuteron Search / Y. Senichev [и др.] // in proc. of 6th International Particle Accelerator Conference IPAC2015, Richmond, VA, USA.
26. Frequency domain method of the search for the deuteron electric dipole moment in a storage ring with imperfections / Y. Senichev [и др.] // Submitted to Phys. Rev. Lett. — 2017. — URL: <https://arxiv.org/abs/1711.06512>.
27. *Guidoboni, G.* How to Reach a Thousand-Second in-Plane Polarization Lifetime with 0.97-GeV/c Deuterons in a Storage Ring / G. Guidoboni, et al., JEDI Collaboration // Phys. Rev. Lett. — 2016. — Т. 117. — URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27517774/>.
28. *Shoji, Y.* Dependence of average path length betatron motion in a storage ring / Y. Shoji // Phys. Rev. Accel. Beams. — 2005. — Сент. — Т. 8, вып. 9. — С. 094001. — URL: <https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevSTAB.8.094001>.
29. Investigation of polarized proton spin coherence time at storage rings / A. Melnikov, A. Aksentyev, Y. Senichev [и др.] // in proc. of 13th International Particle Accelerator Conference IPAC2022, Bangkok, Thailand.

Научное издание
Мельников Алексей Александрович
Исследование спин-орбитального движения
и управления поляризацией в накопительном кольце
для поиска электрического дипольного момента
лёгких ядер

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Принято в печать 20.06.2024
Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,0 Зак. № 22547 Тираж 80 экз. Бесплатно
Печать цифровая
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук
Издательский отдел
117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а