

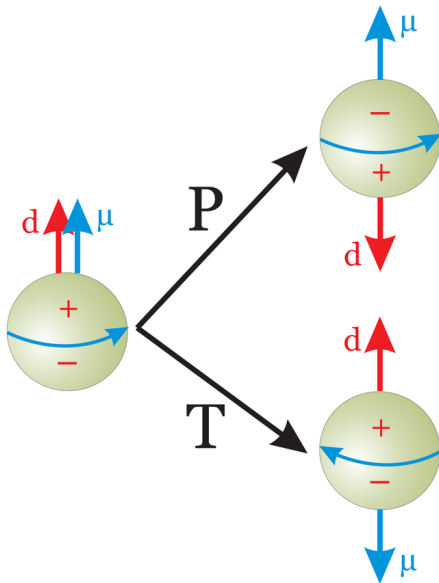
Метод замороженного спина для поиска электрического дипольного момента дейтрона в накопительном кольце

Соискатель: А. Е. Аксентьев
Руководитель: д-р. физ.-мат. наук, проф. Ю. В. Сеничев
Консультант: канд. физ.-мат. наук, доц. С. М. Полозов

Национальный Исследовательский Ядерный Университет
“МИФИ”
(НИЯУ МИФИ)

Москва, 2020

Актуальность



Цель исследования

Развитие метода поиска электрического дипольного момента дейтрона с использованием накопительного кольца на основе измерения частоты прецессии спина (frequency domain method) с экспериментально подтвержденной точностью

Задачи исследования

- Разработать метод измерения электрического дипольного момента дейтрона на основе измерения частоты прецессии спина.
- Проанализировать требования к магнитооптической структуре кольца-накопителя, ориентированного на поиск электрического дипольного момента дейтрона.
- Исследовать явление спин-декогеренции пучка дейтронов в окрестности состояния “замороженного” спина.

- Разработать метод подавления декогеренции спина с помощью нелинейных магнитных элементов.
- Исследовать влияние различного рода несовершенств элементов кольца на спин-орбитальную динамику.
- Выполнить математическое моделирование процесса калибровки нормализованной частоты прецессии спина (спин-тюн) при помеременной смене полярности ведущего поля.

- Проанализировать систематические ошибки в различных предложениях по проведению эксперимента по поиску электрического дипольного момента, и сравнить их с разработанным методом.
- Изучить накопление необходимой статистики измерения электрического дипольного момента.

Научная новизна

- 1 Предложен метод измерения электрического дипольного момента дейтрона, основанный исключительно на измерении частоты прецессии спина в накопительном кольце с ограничением по точности, оцениваемым на уровне 10^{-29} е·см.
- 2 Изучена спин-орбитальная динамика дейтронного пучка в окрестности состояния “замороженного спина” в накопительном кольце, предназначенном 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

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

Апробация

- Во время исследований по оптимизации времени когерентности спина при помощи секступольных полей на ускорительном комплексе COSY (Исследовательский центр “Юлих”).
- Результаты работы вошли в подготавливаемый коллаборацией CPEDM для CERN отчёта, под названием “Feasibility study for an EDM Storage Ring.”
- Основные результаты работы докладывались на международных конференциях IPAC’17, IPAC’19, LaPlas III–V, а также конференциях коллаборации JEDI, и семинарах IKP-2 Forschungszentrum Jülich.

Структура диссертации

Диссертация состоит из **четырёх** глав:

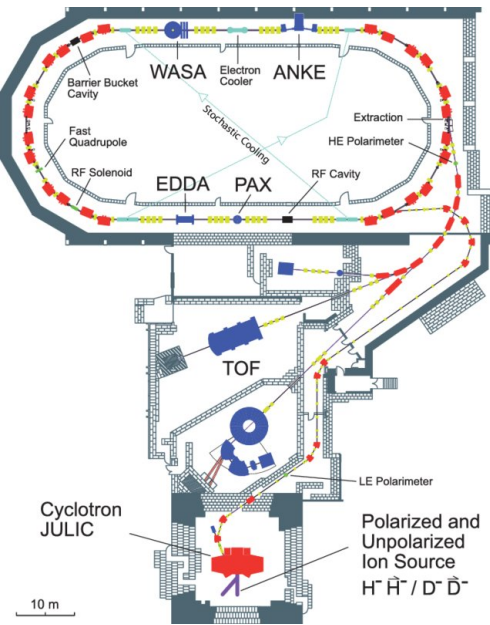
- ❶ посвящена анализу методологии измерения электрического дипольного момента (ЭДМ) элементарой частицы при помощи накопительного кольца, работающего в режиме “замороженного спина”:
 - ▶ вводится понятие “замороженного спина”;
 - ▶ анализируются основные предложения по методу измерения ЭДМ, систематизируются их проблемы, предлагается новый метод;
 - ▶ представлены три варианта магнитооптической структуры накопительного кольца для измерения дейтрона предложенным методом.

- 2 посвящена анализу проблем измерения ЭДМ частицы в накопительном кольце с замороженным спином и поиску их решений:
- ▶ возмущения спиновой динамики частицы;
 - ▶ спин-декогеренция частиц пучка в окрестности состояния “замороженного спина”;
 - ▶ свойства МДМ компоненты частоты спин-прецессии – основной систематической ошибкой измерений;
 - ▶ смена полярности ведущего поля ускорителя.
- 3 посвящена статистическому моделированию эксперимента и оценке его возможной статистической точности:
- ▶ исследуется возможность повышения эффективности поляриметрии путём использования частотно-модулированной схемы выборки;
 - ▶ процедура обработки данных поляриметрии протестирована на модельных данных.

4

описаны наиболее значимые (для данной работы) технологии, разработанные в рамках исследований, проведённых на синхротроне COSY:

- ▶ высокоточное измерение частоты прецессии спина;
- ▶ юстировка квадруполей при помощи пучка;
- ▶ оптимизация времени когерентности спина.



Кольцо с замороженным спином

Уравнение Томаса-БМТ

$$\frac{d\mathbf{s}}{dt} = \mathbf{s} \times \left(\underbrace{a_0 \cdot \mathbf{B} + a_1 \cdot \mathbf{E} \times \boldsymbol{\beta}}_{\Omega^{mdm}} + \underbrace{b_0 \cdot \mathbf{E} + b_1 \cdot \boldsymbol{\beta} \times \mathbf{B}}_{\Omega^{edm}} \right)$$

Замороженный спин

$$\Omega_{(y)}^{mdm} = 0$$

Схема ускорителя

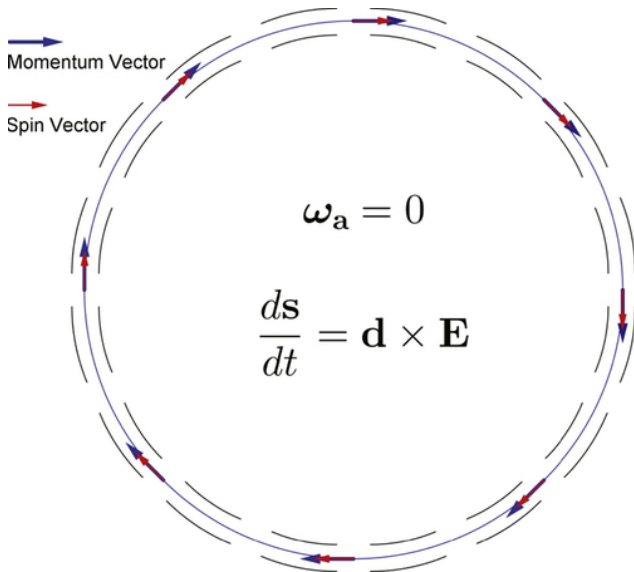
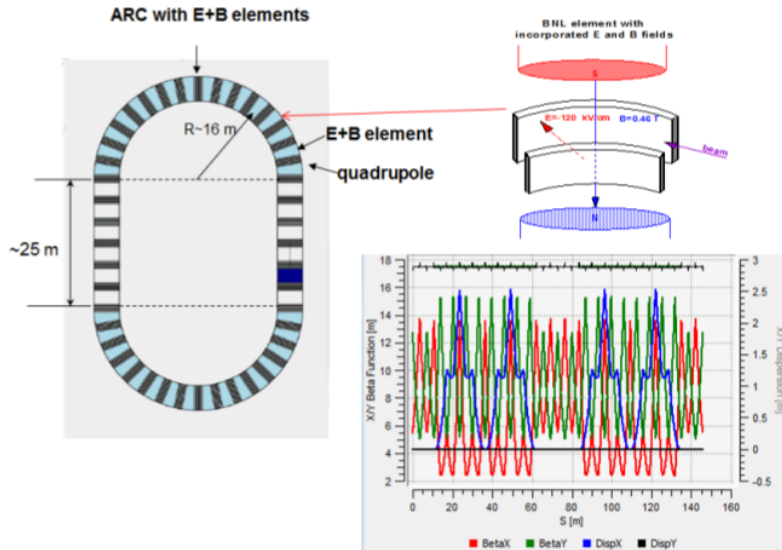
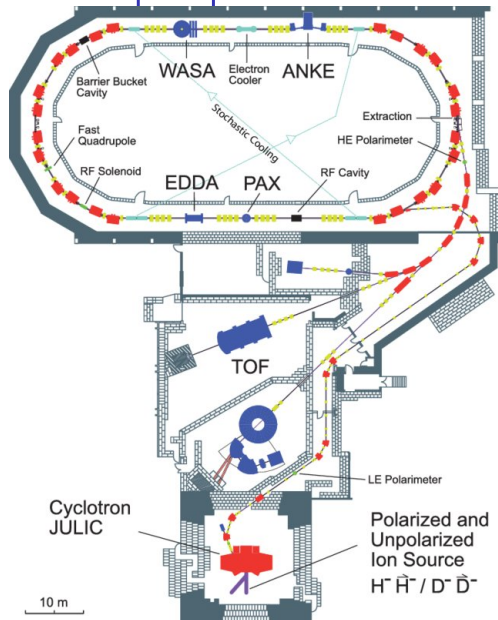


Схема ускорителя



Синхротрон COSY



- Чисто магнитное кольцо
- + Источник поляризованных H^-/D^-
- + Циклотрон JULIC
- + Кольцо COSY 184 м
- + Внутренняя/внешняя мишени
- + Два вида охлаждения

Код COSY Infinity

- Разработка М. Берца и К. Макино (Michigan State University)
- Основан на дифференциальной алгебре; позволяет вычислять трансфер-матрицы элементов до (потенциально) любого порядка разложения ряда Тэйлора
- Трэкинг-код, учитывающий спиновую динамику

Спин-трэкинг в COSY Infinity

$$\begin{cases} \mathbf{z}_n &= \mathcal{M}(\mathbf{z}_{n-1}), \\ \mathbf{S}_n &= \hat{A}(\mathbf{z}_{n-1}) \cdot \mathbf{S}_{n-1} \end{cases}$$

Эффект бетатронных колебаний

Почему это важно?

ЭДМ-статистика

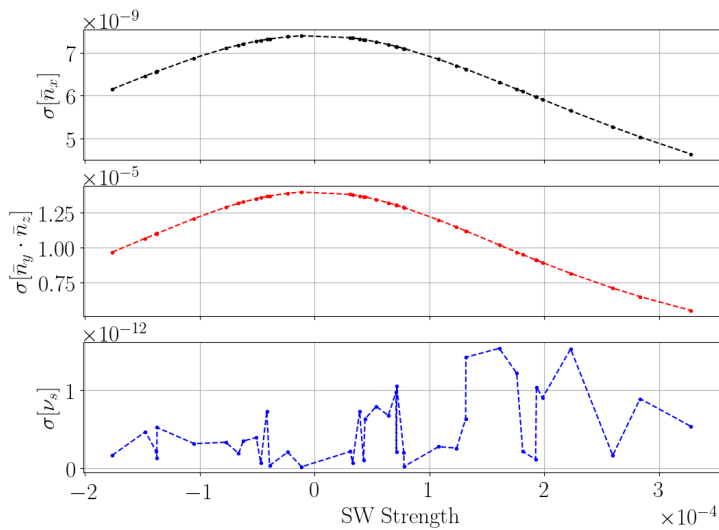
$$\hat{\omega}_{edm} = \frac{1}{2}(\hat{\omega}_x^+ + \hat{\omega}_x^-), \text{ где } \omega_x^\pm = \omega_{edm} \pm \omega_{mdm}$$

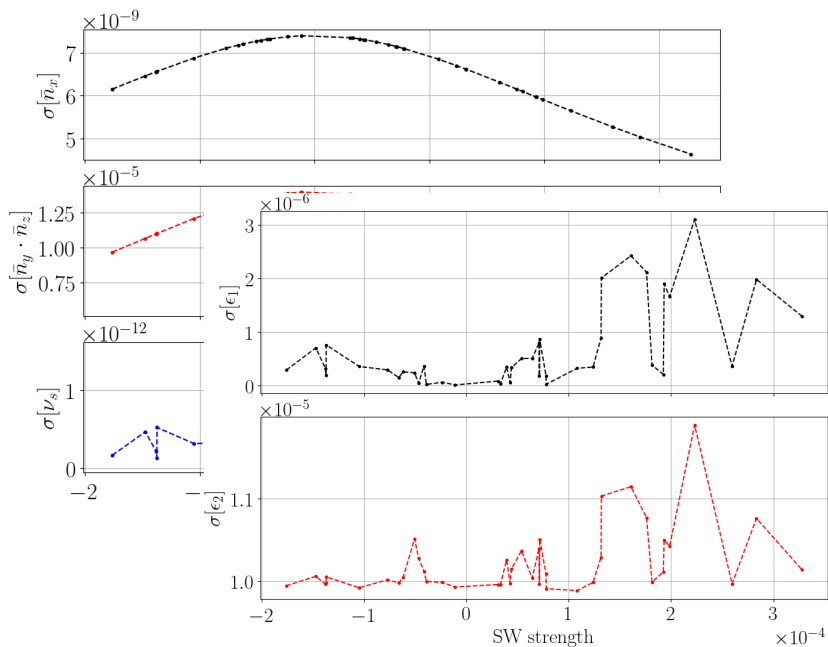
Частота оценивается путём фитирования

$$f(t) = a \cdot \sin(\omega_x \cdot t + \delta) \mapsto \hat{\omega}_x, \text{ где } (a, \omega, \delta) = \text{const}$$

Решение Т-БМТ уравнения даёт

$$a = \sqrt{\bar{n}_x^2 + (\bar{n}_y \cdot \bar{n}_z)^2}, \text{ где } \bar{n} = g(\mathbf{E}, \mathbf{B})$$





Выводы

- 1 Осцилляции амплитуды сигнала пренебрежимо малы
- 2 Коэффициент корреляции $\sigma[\hat{a}, \hat{\omega}] < 10\%$
- 3 Эффект поддаётся контролю (при использовании частотного метода)

Калибровка МДМ-сигнала

Почему это важно?

ЭДМ-статистика

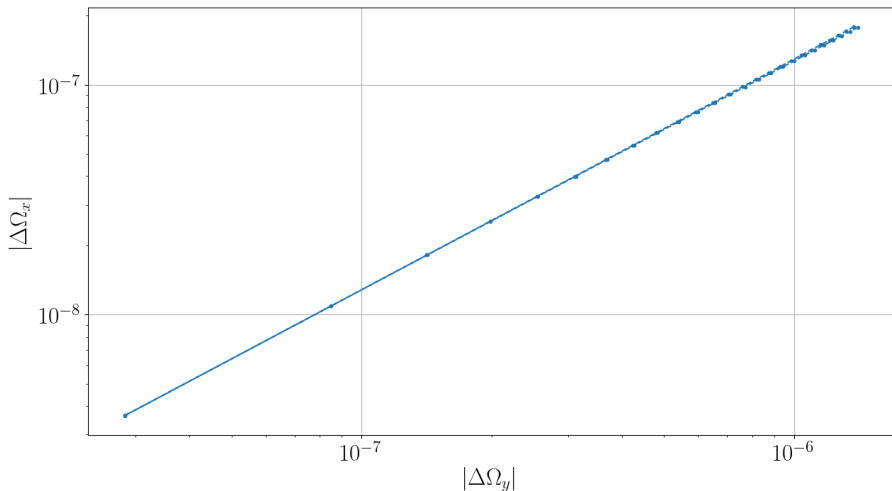
$$\begin{aligned}\hat{\omega}_{edm} &= \frac{1}{2}(\hat{\omega}_x^+ + \hat{\omega}_x^-) \\ &= \omega_{edm} + \underbrace{\frac{1}{\sqrt{2}}\sigma_{\hat{\omega}}}_{stat} + \underbrace{(\omega_{mdm}^+ - \omega_{mdm}^-)}_{syst}\end{aligned}$$

Утверждение

$$[\omega_y^{mdm+} - \omega_y^{mdm-} \rightarrow 0] \Rightarrow [\omega_x^{mdm+} - \omega_x^{mdm-} \rightarrow 0]$$

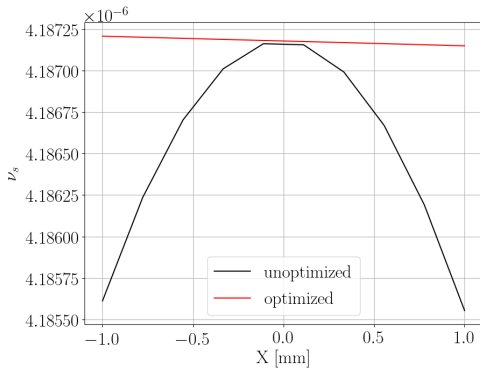
Калибровка МДМ-сигнала

Результаты симуляции



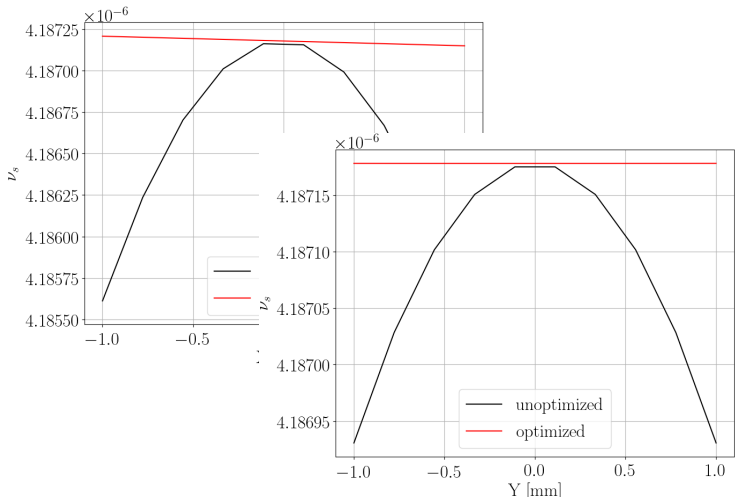
Подавление спин-декогеренции

Идеальная структура



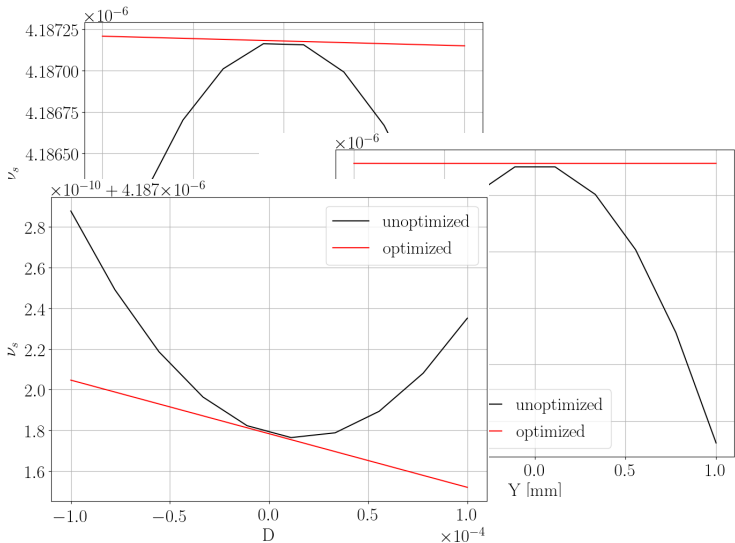
Подавление спин-декогеренции

Идеальная структура



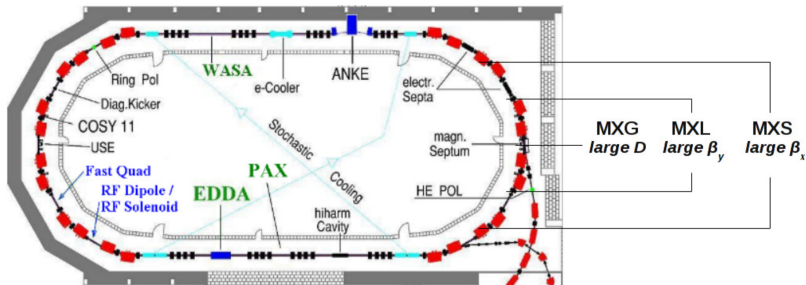
Подавление спин-декогеренции

Идеальная структура



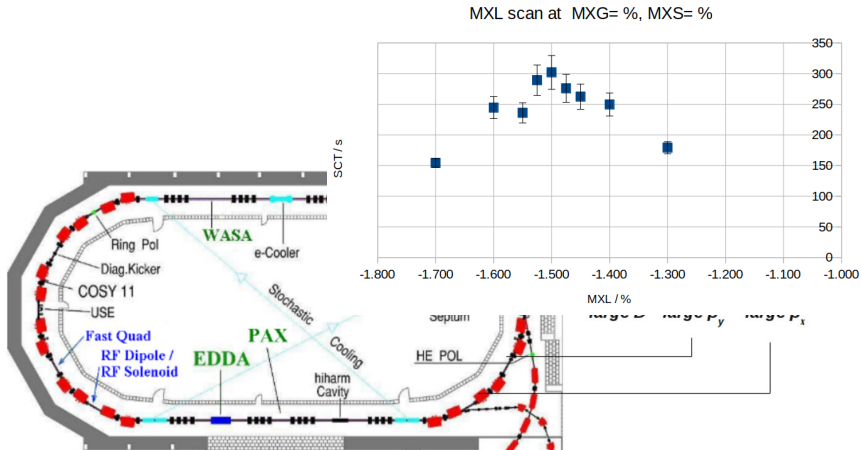
Исследования на COSY

Спин-декогеренция



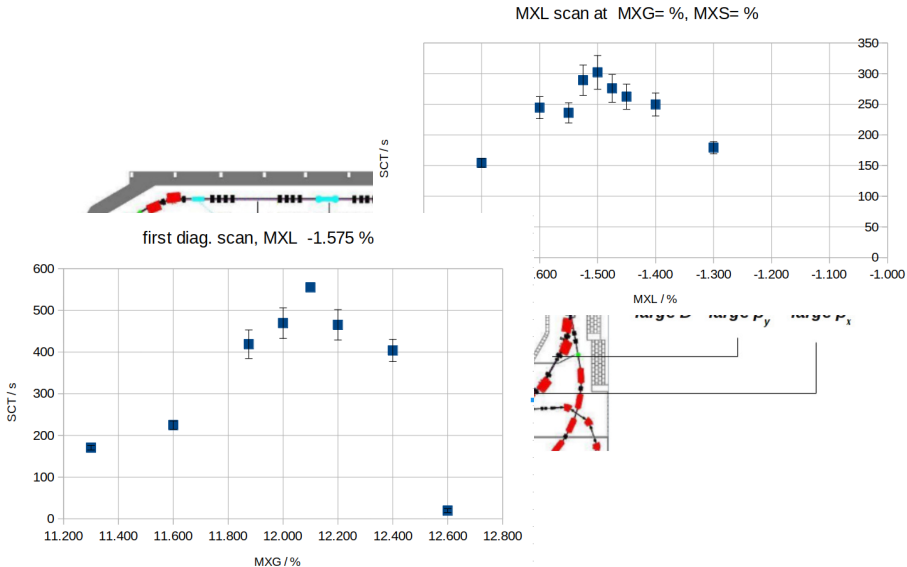
Исследования на COSY

Спин-декогеренция



Исследования на COSY

Спин-декогеренция



Результаты работы

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

- 3 Получены результаты исследования спин-декогеренции пучка дейтронов 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.
- 7 Проведена оценка статистических свойств предложенного метода измерения ЭДМ в накопительном кольце.

Положения выносимые на защиту

- Метод измерения электрического дипольного момента дейтрона, основанный исключительно на измерении частоты прецессии спина при движении пучка в накопительном синхротроне.
- Принцип построения магнитооптической структуры накопительного кольца, ориентированного на поиск электрического дипольного момента дейтрона.
- Результаты исследования спин-декогеренции пучка дейтронов в окрестности состояния “замороженного” спина и метод её подавления с помощью нелинейных магнитных элементов.

- Результаты исследования влияния различного рода несовершенств элементов накопительного кольца на спин-орбитальную динамику пучка.
- Метод калибровки нормализованной частоты прецессии спина при попеременной смене полярности ведущего поля и его численная модель.
- Результаты исследования систематических ошибок в различных предложениях по проведению эксперимента по поиску электрического дипольного момента и их сравнения с разработанным методом.
- Результаты исследования статистических свойств разработанного метода измерения ЭДМ в накопительном кольце.