

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
канд. физ.-мат. наук, доц. С. М. Полозов

Национальный Исследовательский Ядерный Университет
“МИФИ”
(НИЯУ МИФИ)

Москва, 2019

Актуальность

Зачем нужно искать ЭДМ?

- Вопрос: Барионная асимметрия вселенной

Актуальность

Зачем нужно искать ЭДМ?

- Вопрос: Барионная асимметрия вселенной
- Ответ: нарушение CP -симметрии, как одно из условий бариогенеза

Актуальность

Зачем нужно искать ЭДМ?

- Вопрос: Барионная асимметрия вселенной
- Ответ: нарушение CP -симметрии, как одно из условий бариогенеза
- Существование перманентного ЭДМ нарушает CP -симметрию

Актуальность

Зачем нужно искать ЭДМ?

- Вопрос: Барионная асимметрия вселенной
- Ответ: нарушение CP-симметрии, как одно из условий бариогенеза
- Существование перманентного ЭДМ нарушает CP-симметрию
- Стандартная Модель предсказывает ЭДМ $< 10^{-31} \text{ e} \cdot \text{cm}$

Актуальность

Зачем нужно искать ЭДМ?

- Вопрос: Барионная асимметрия вселенной
 - Ответ: нарушение CP-симметрии, как одно из условий бариогенеза
 - Существование перманентного ЭДМ нарушает CP-симметрию
 - Стандартная Модель предсказывает ЭДМ $< 10^{-31} \text{ e} \cdot \text{cm}$
- ⇒ Обнаружение большего ЭДМ — свидетельство физики за гранью СМ

Цель и задачи исследования

Цель: Оценка возможности детектирования ЭДМ на уровне 10^{-29} е·см частотным методом в накопительном кольце

Задачи:

- влияние бетатронных колебаний на валидность ЭДМ-статистики
- спин-декогеренция вблизи нулевого резонанса
- свойства МДМ-прецессии, связанной с неидеальностью машины (фэйк-сигнал)
- её калибровка и исключение из ЭДМ-статистики
- оценка статистической точности

Научная новизна

- 1 Исследования соискателя:
 - ▶ исследовано влияние бетатронных колебаний
 - ▶ промоделирована процедура калибровки МДМ-прецессии
- 2 Программы поиска ЭДМ на COSY:
 - ▶ научились удерживать поляризацию продольно-поляризованного пучка в течении 10^3 сек
 - ▶ научились измерять (относительную) частоту прецессии спина (спин-тюн) с точностью 10^{-10}
 - ▶ учимся юстировать квадруполь при помощи самого пучка (Beam Based Alignment)

Практическая значимость

По результатам исследования соискателя

- сформулированы аргументы в пользу частотного подхода к поиску ЭДМ в накопительном кольце
- исследованы систематические эффекты работы с поляризацией пучка в режиме нулевого спинового резонанса
- проведена оценка статистической точности (и оптимальных параметров) предполагаемого эксперимента

Апробация

- На COSY проводились исследования оптимизации времени когерентности спина при помощи секступольных полей
- Результаты исследования пошли в подготавливаемый коллаборацией JEDI 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 студенческих семинарах IKP-2 Forschungszentrum Jülich.

Структура диссертации

- 1 Введение понятия замороженного спина; классификация подходов к поиску ЭДМ; классификация проблем поиска ЭДМ в накопительном кольце; описание частотного метода поиска; описание возможных структур колец.
- 2 Детальное рассмотрение обозначенных в главе 1 проблем.
- 3 Введение в наиболее значимые для проекта технологии, разработанные на синхротроне COSY; результаты эксперимента по оптимизации времени когерентности спина.

А Статистическое моделирование эксперимента.

Кольцо с замороженным спином

Томас-Баргманн-Мишель-Телегди

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

Замороженный спин

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

Схема ускорителя

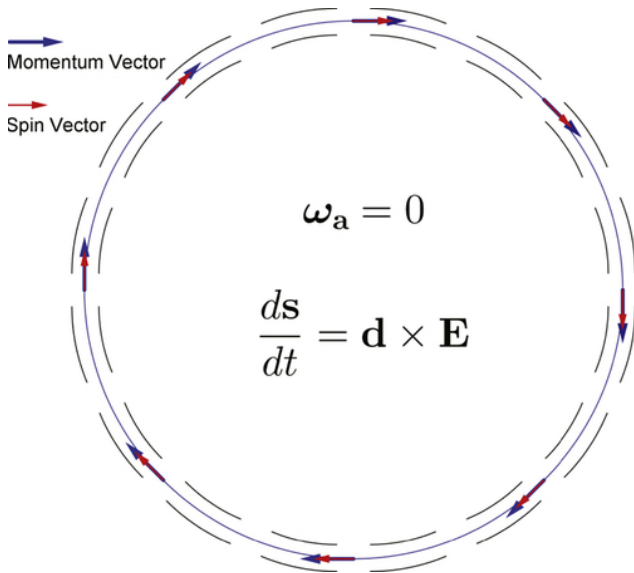
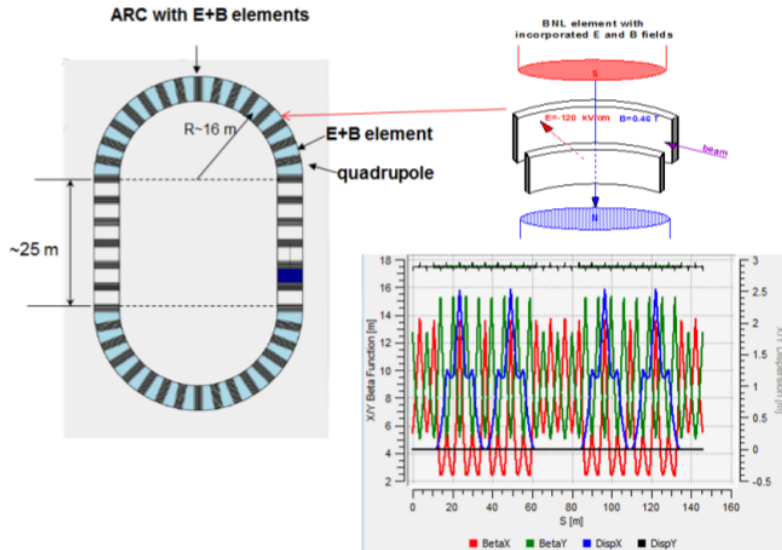
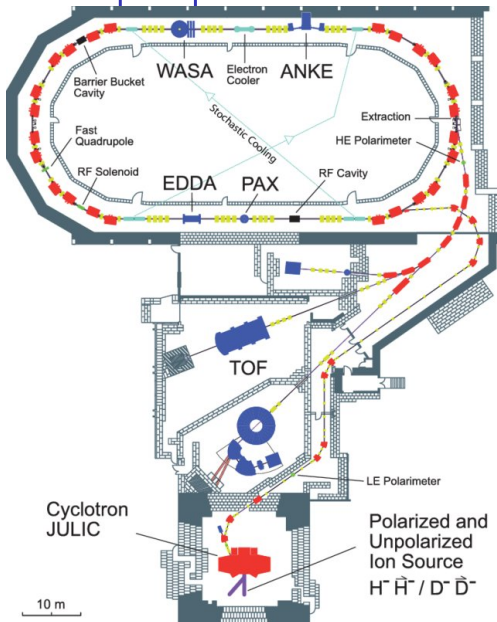


Схема ускорителя



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

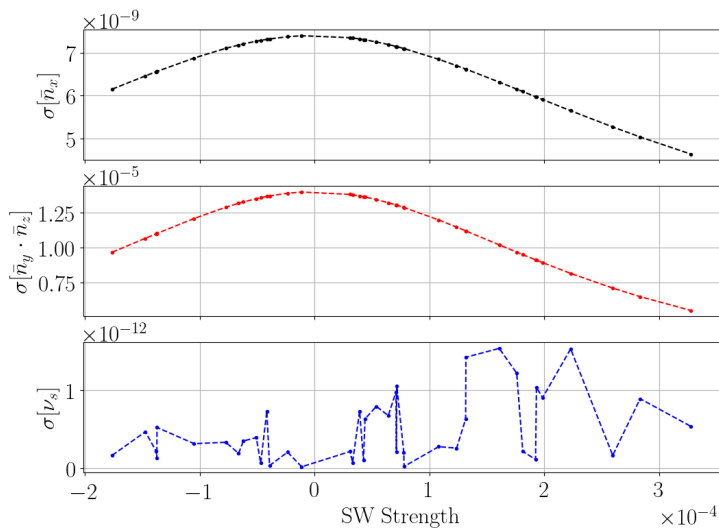
$$\hat{\omega}_{edm} = \frac{1}{2}(\hat{\omega}_x^+ + \hat{\omega}_x^-), \text{ где } \omega_x^\pm = \omega_{edm} \pm \omega_{mdm}$$

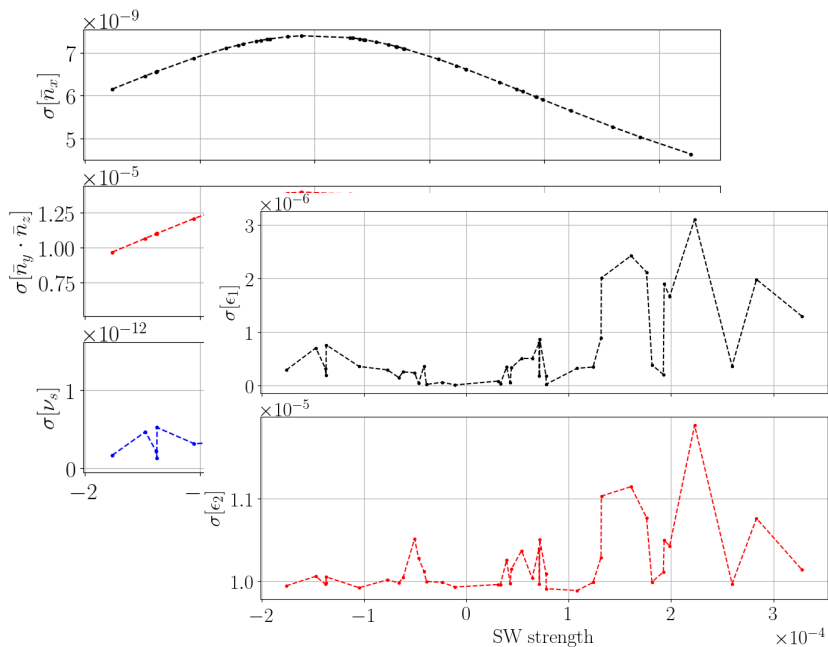
Частота оценивается путём фитирования

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

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

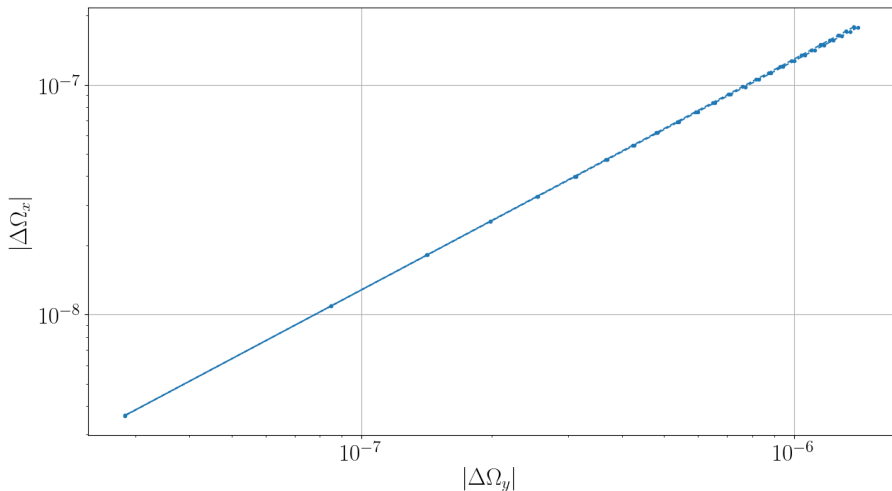
$$\begin{aligned}\hat{\omega}_{edm} &= \frac{1}{2}(\hat{\omega}_x^+ + \hat{\omega}_x^-) \\ &= \omega_{edm} + \underbrace{\frac{1}{\sqrt{2}}\sigma_{\hat{\omega}}}_{stat} + \underbrace{(\omega_{mdm}^+ - \omega_{mdm}^-)}_{syst}\end{aligned}$$

Утверждение

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

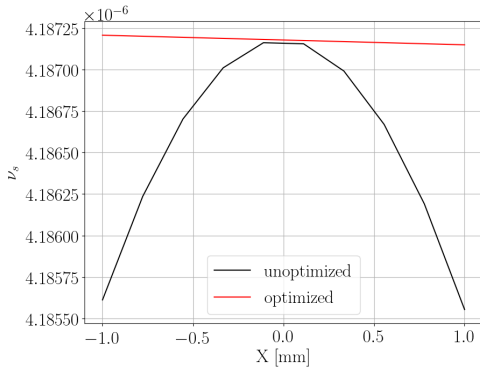
Калибровка МДМ-сигнала

Результаты симуляции



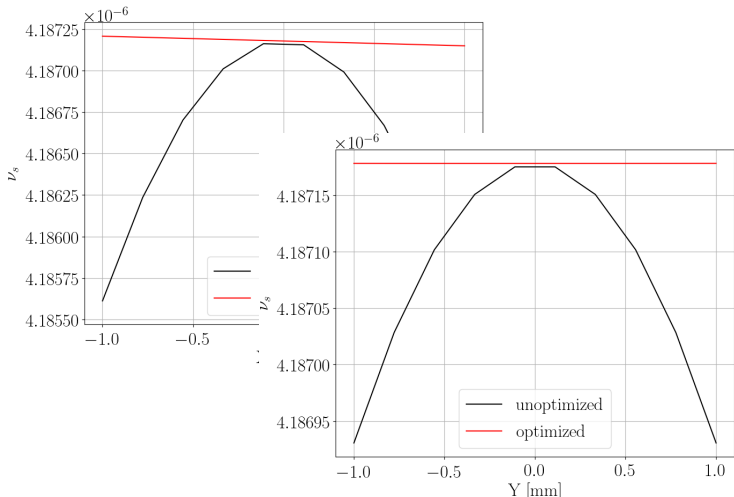
Подавление спин-декогеренции

Идеальная структура



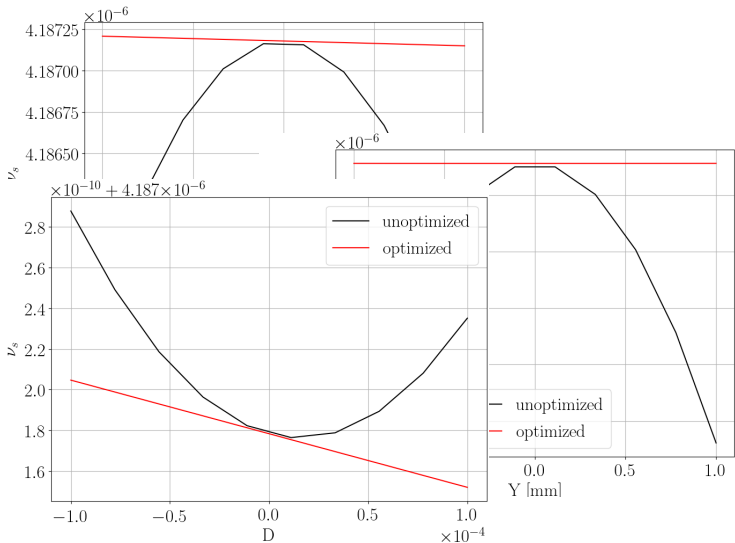
Подавление спин-декогеренции

Идеальная структура



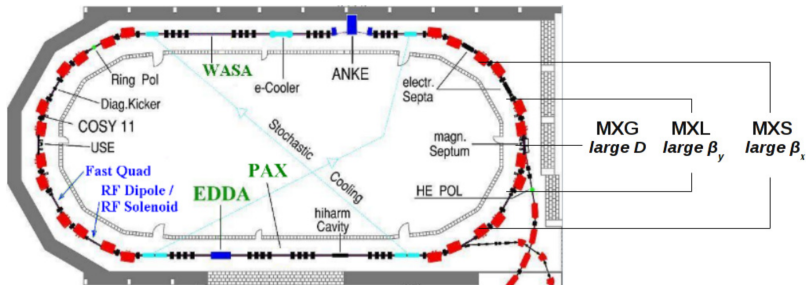
Подавление спин-декогеренции

Идеальная структура



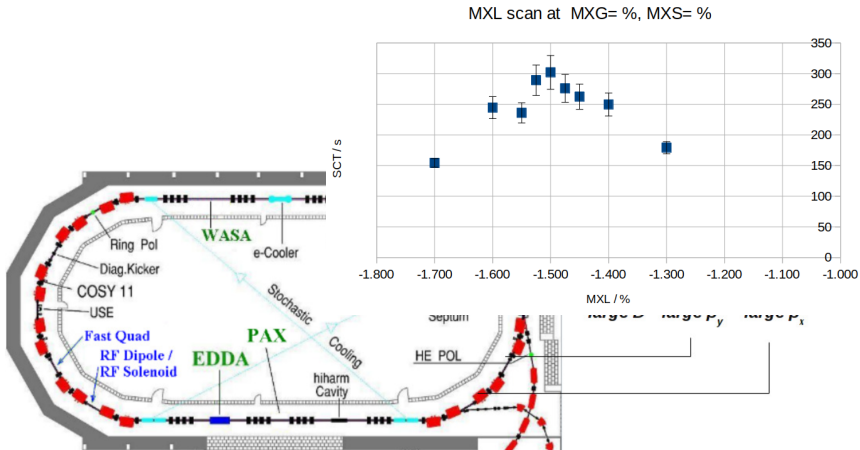
Исследования на COSY

Спин-декогеренция



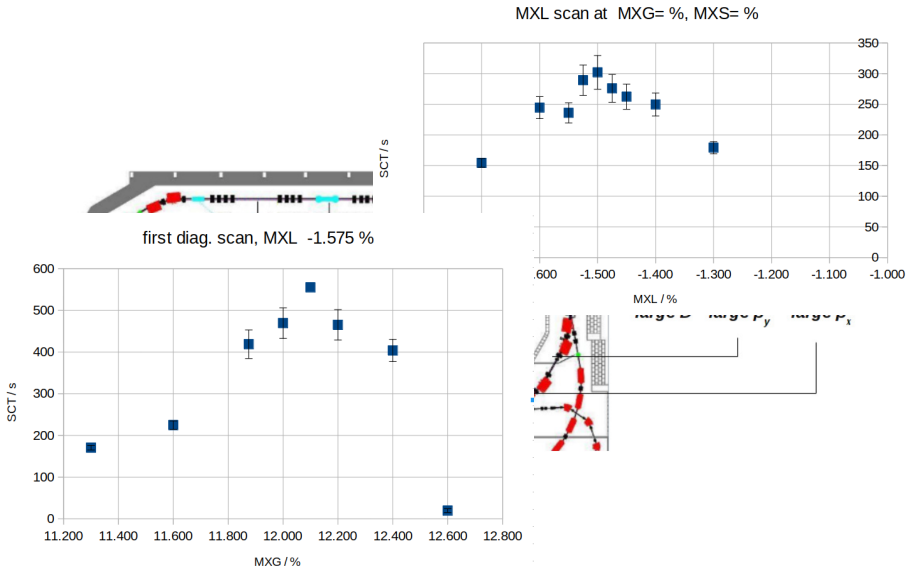
Исследования на COSY

Спин-декогеренция



Исследования на COSY

Спин-декогеренция



Результаты работы

- 1 Изучены эффекты спиновой динамики вблизи нулевого спинового резонанса
- 2 Описаны и численно промоделированы средства борьбы с этими эффектами
- 3 Сформулирован аргумент в пользу частотного метода измерений ЭДМ в накопительном кольце с замороженным спином

Положения выносимые на защиту

- ЭДМ-статистика частотного метода измерения не чувствительна к возмущениям со стороны бетатронного движения частиц
- Возможно достичь времени жизни поляризации пучка на уровне 1000 секунд
- Свойства угловой скорости МДМ-прецессии
 - ▶ вынуждают использование частотных методов измерения ЭДМ
 - ▶ оставляют возможность исключения этой систематической ошибки из конечной статистики

- Частота прецессии спина частицы может быть выражена как функция одной переменной, называемой эффективным Лоренц-фактором, и отражающей величину продольного эмиттанса частицы
- Эффективный Лоренц-фактор поддаётся калибровке
- Возможно достичь величины стандартной ошибки среднего значения ЭДМ-статистики на уровне 10^{-29} е·см за год измерений