

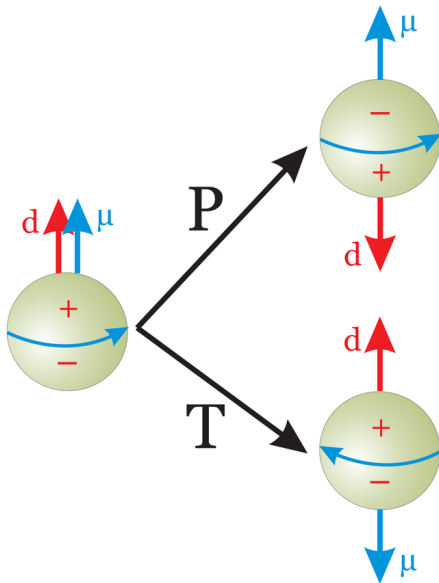
Метод замороженного спина для поиска электрического дипольного момента дейтрона в накопительном кольце

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

Национальный Исследовательский Ядерный Университет
“МИФИ”
(НИЯУ МИФИ)

Москва, 2020

Актуальность



Цель исследования

Разработка метода поиска электрического дипольного момента частицы в накопительном кольце, позволяющего достичь точность 10^{-29} е·см.

Задачи исследования

- Разработать метод измерения ЭДМ дейтрона на основе измерений частоты прецессии спина в накопительном кольце.
- Проанализировать требования к магнитооптической структуре кольца-накопителя для поиска ЭДМ.
- Исследовать спин-декогеренцию пучка дейтронов в окрестности состояния “замороженного спина.”

- Исследовать влияние несовершенств оптической структуры кольца на спин-орбитальную динамику.
- Промоделировать процедуру калибровки нормализованной частоты прецессии спина (спин-тюна) при смене полярности ведущего поля.
- Изучить статистические свойства метода измерения электрического дипольного момента.

Научная новизна

- 1 Предложен метод измерения ЭДМ 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.”

- 3 Предложен метод калибровки среднего по пучку спин-тюна, позволяющий уменьшить вклад систематических ошибок.
- 4 Введено определение эффективного значения фактора Лоренца, необходимое для определения зависимости спин-тюна частицы от её координат в фазовом пространстве.
- 5 Сделаны статистические оценки предельной чувствительности измерения ЭДМ предложенным методом.

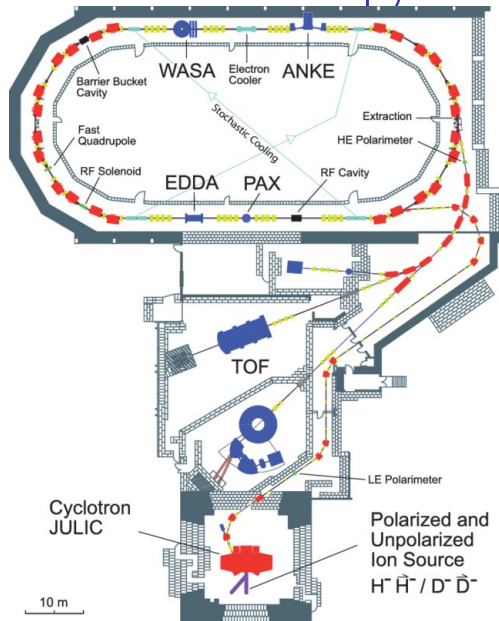
Практическая значимость

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.

COSY как инструмент для поиска ЭДМ



- 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.
- Трекинговый код, учитывающий спиновую динамику.

Спин-трекинг в COSY Infinity

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

Принцип измерения ЭДМ методом “замороженного спина”

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

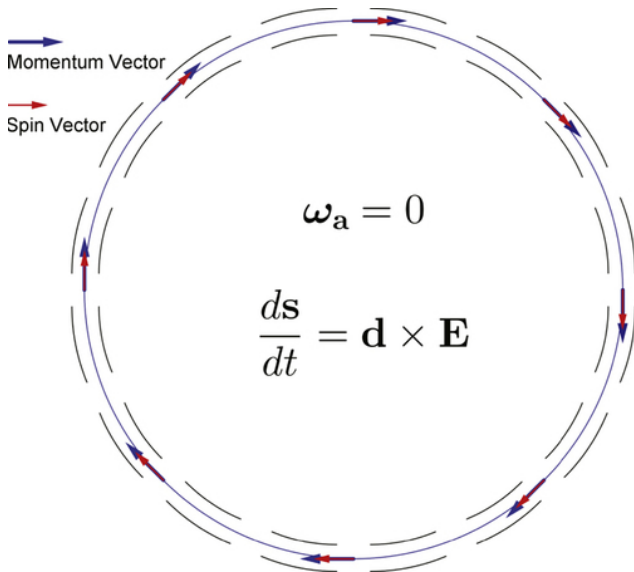
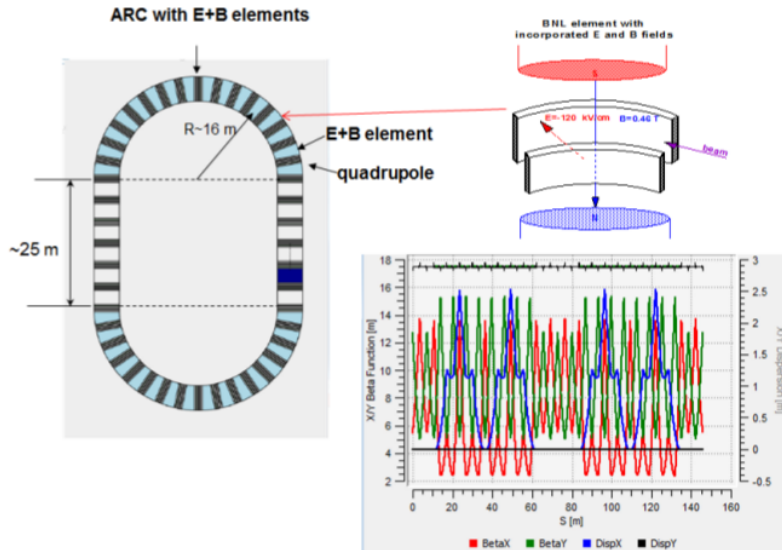


Схема ускорителя



Общие проблемы поиска ЭДМ в накопительном кольце

- 1 Возмущения спиновой динамики, связанные с бетатронными колебаниями частиц.
- 2 Спин-декогеренция частиц пучка в окрестности состояния “замороженного спина.”
- 3 МДМ-компонента спин-прецессии, связанная с неидеальностями оптической структуры ускорителя.
- 4 Смена полярности ведущего поля, требуемая для сокращения МДМ-компоненты частоты спин-прецессии в конечном выражении оценки ЭДМ.

Возмущения спин-динамики

Проблема

Вариация амплитуды фитируемого сигнала

Выводы

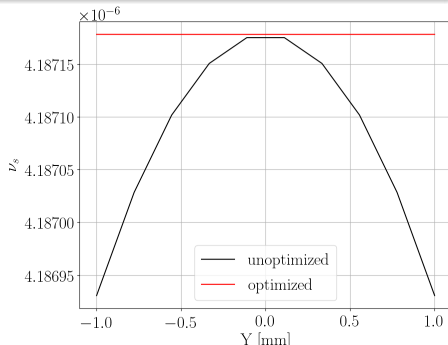
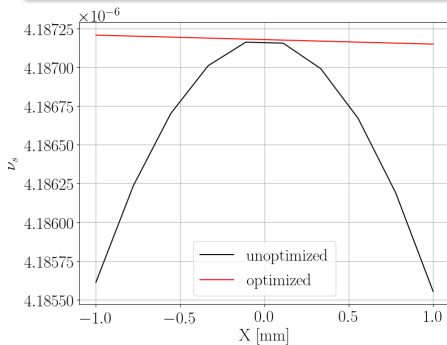
Возмущения амплитуды сигнала

- на два порядка меньше случайной ошибки поляриметрии;
- влияют на оценку частоты с коэффициентом аттенюации 10;
- поддаются контролю при использовании частотного подхода к измерениям.

Спин-декогеренция

Проблема

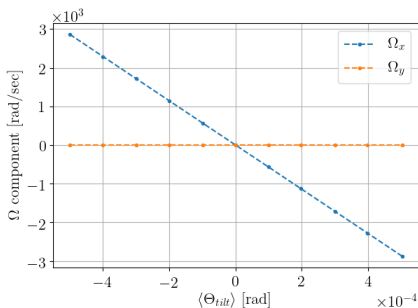
Ограничение на длительность измерительного цикла



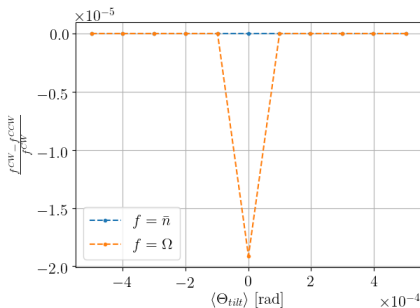
МДМ-компонента спин-прецессии

Проблема

Основная систематическая ошибка Ω^{mdm}



$$\Omega^{mdm} = L(\langle \theta_{tilt} \rangle)$$

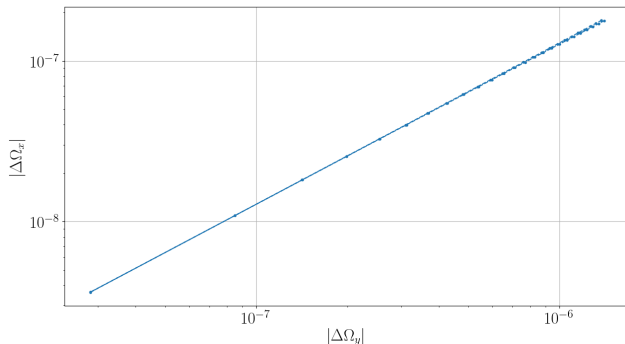


$$\Omega_{CW}^{mdm} \approx \Omega_{CCW}^{mdm}$$

Смена полярности ведущего поля

Проблема

Сменить полярность поля таким образом, чтобы воспроизвести величину Ω_x^{mdm} во всех измерительных циклах с точностью не хуже 10^{-7} рад/сек



Статистическое моделирование

Выводы

Инфо. ($\%FI_{\text{tot}}$)	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

- 1 Полезная длительность измерительного цикла не превосходит $3 \cdot \tau_d$.
- 2 За один измерительный цикл в 1 000 сек можно достичь $\sigma_{\hat{\omega}} \approx 10^{-7}$ рад/сек, что за год измерений позволяет оценить ЭДМ с точностью 10^{-29} е·см.

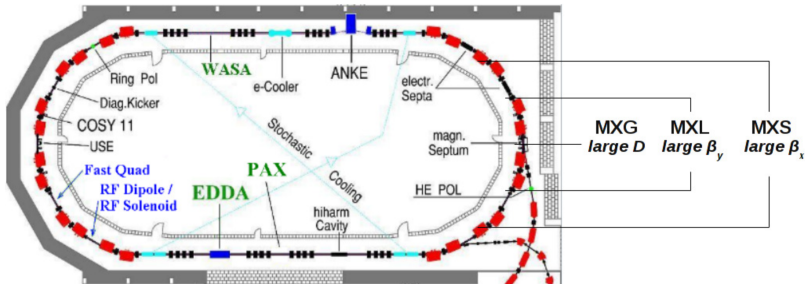
Результаты на COSY

Успехи

1. Высокоточное измерение нормализованной частоты прецессии спина: $\sigma_{\nu_s} \approx 10^{-10}$,
 $\sigma_{edm} \approx 10^{-24} \text{ е} \cdot \text{см}$.
2. Юстировка квадруполей с помощью пучка: точность определения положения квадруполей до 0.2 мм.
3. Оптимизация времени когерентности спина: время жизни поляризации **свыше 1 000 сек.**

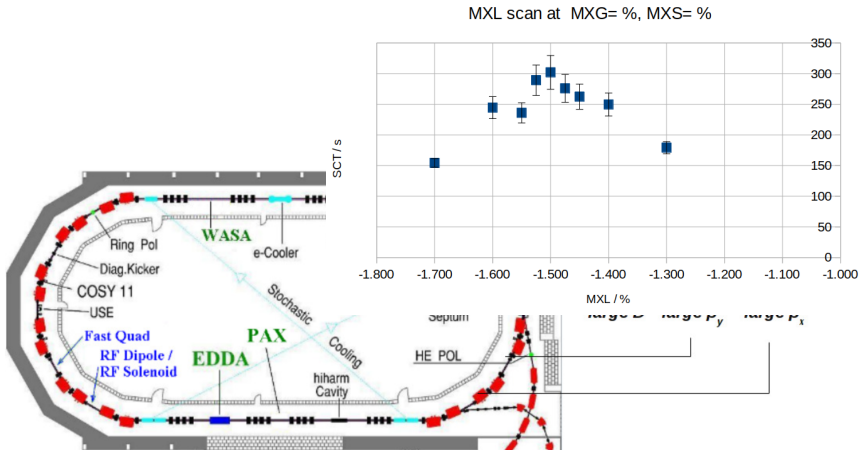
Результаты на COSY

Спин-декогеренция



Результаты на COSY

Спин-декогеренция



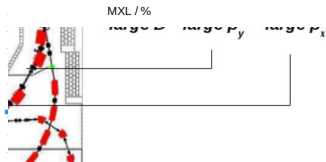
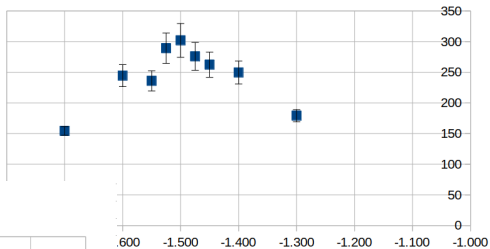
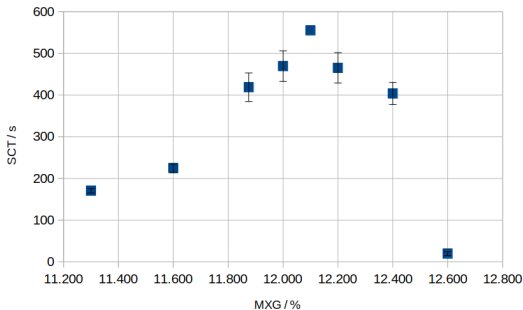
Результаты на COSY

Спин-декогеренция

MXL scan at MXG= %, MXS= %



first diag. scan, MXL -1.575 %



Результаты работы

- 1 Разработан метод измерения ЭДМ дейтрона, основанный исключительно на измерении частоты прецессии спина частицы при движении в накопительном кольце.
- 2 Предложен принцип построения магнитооптической структуры кольца-накопителя для поиска ЭДМ дейтрона.
- 3 Получены результаты исследования спин-декогеренции пучка дейтронов в окрестности состояния “замороженного спина.”

- 4 Исследовано влияние различного рода несовершенств элементов накопительного кольца на спин-орбитальную динамику пучка.
- 5 Проведено численное моделирование процедуры калибровки нормализованной частоты прецессии спина.
- 6 Проведена оценка статистических свойств разработанного метода измерения ЭДМ.

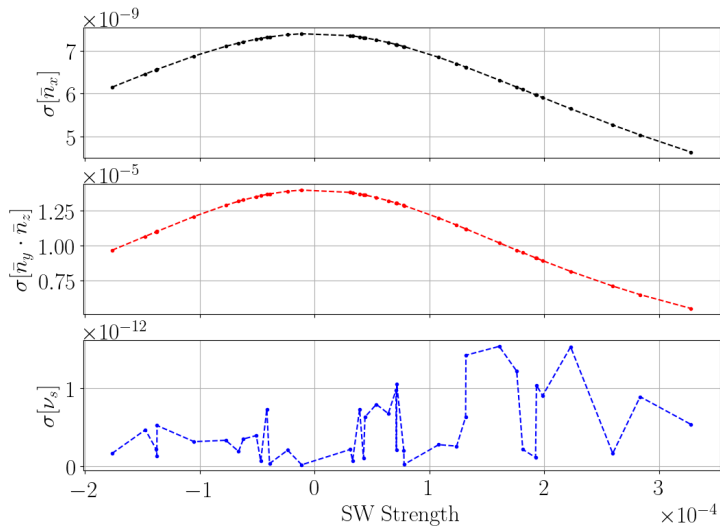
Положения выносимые на защиту

- 1 Метод измерения электрического дипольного момента дейтрона.
- 2 Принцип построения магнитооптической структуры накопительного кольца.
- 3 Результаты исследования спин-декогеренции пучка дейтронов в окрестности состояния “замороженного” спина.
- 4 Результаты исследования влияния различного рода несовершенств элементов накопительного кольца на спин-орбитальную динамику пучка.

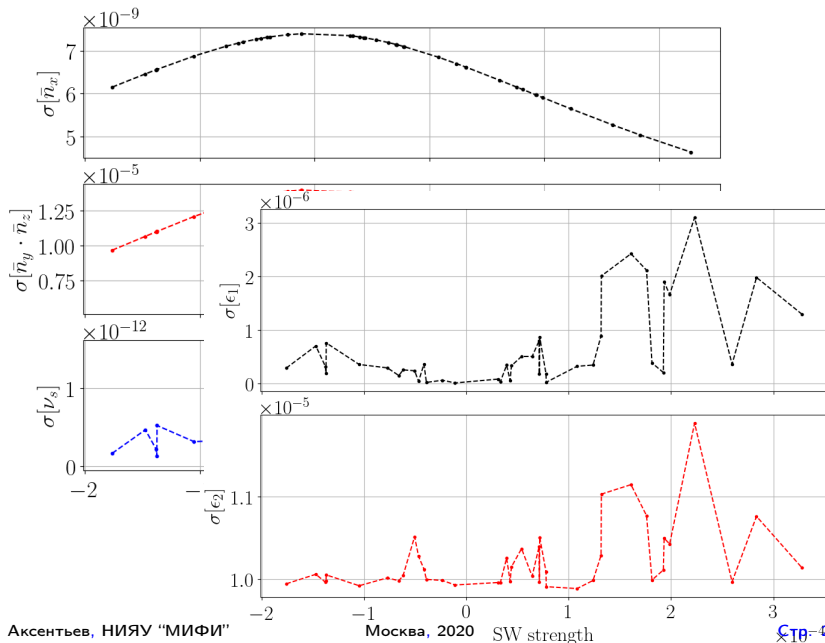
- ④ Метод калибровки нормализованной частоты прецессии спина.
- ⑤ Результаты исследования систематических ошибок в различных методах поиска ЭДМ.
- ⑥ Результаты исследования статистических свойств разработанного метода.

Спасибо за внимание!

Возмущения спин-динамики

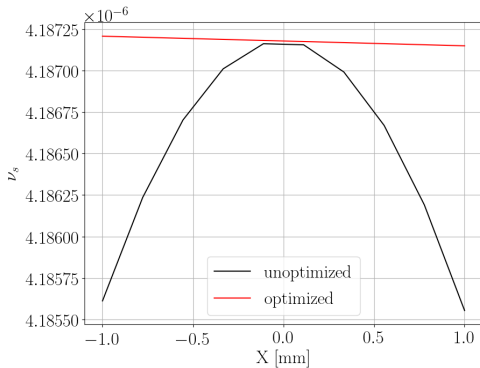


Возмущения спин-динамики



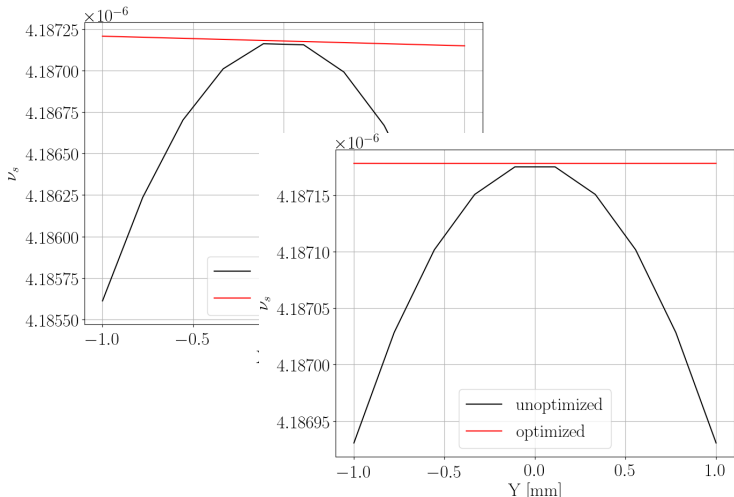
Спин-декогеренция

Идеальная структура



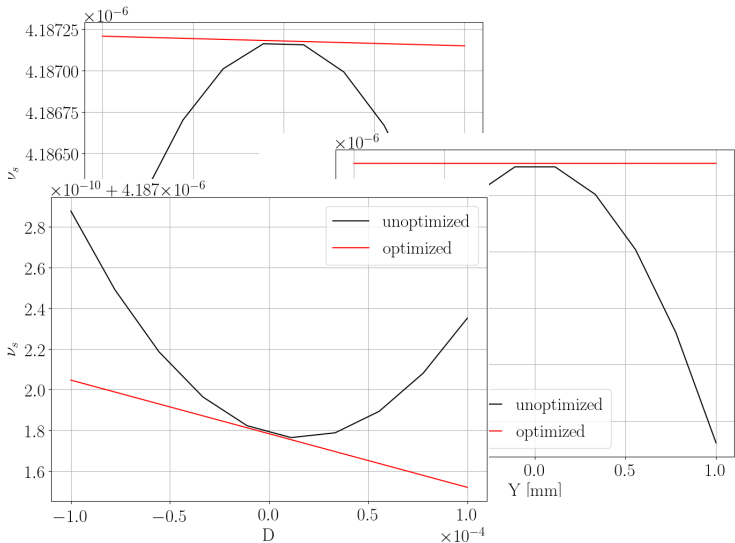
Спин-декогеренция

Идеальная структура



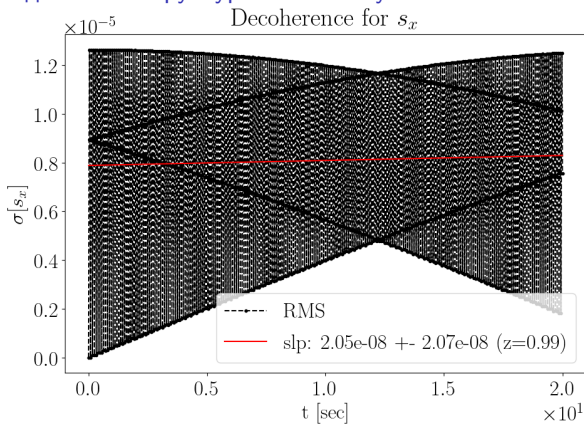
Спин-декогеренция

Идеальная структура



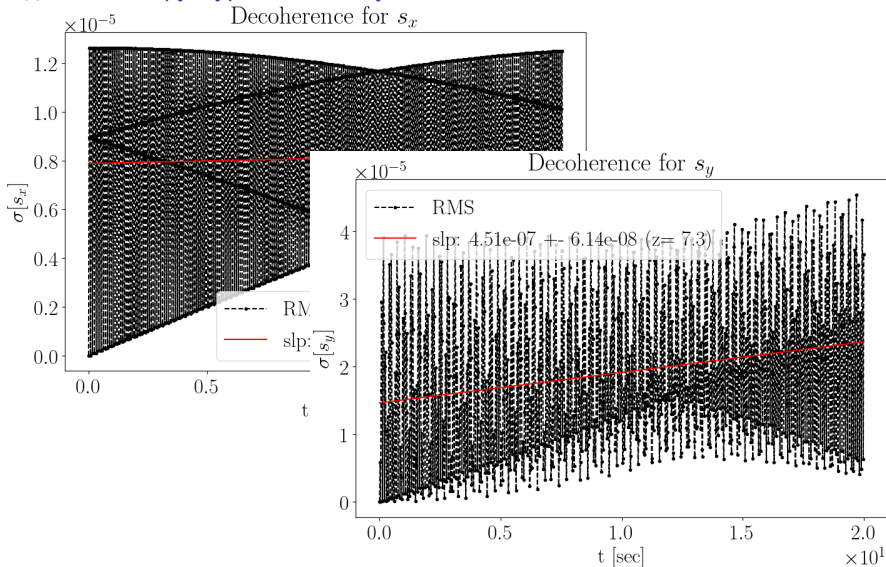
Спин-декогеренция

Неидеальная структура: без секступолей



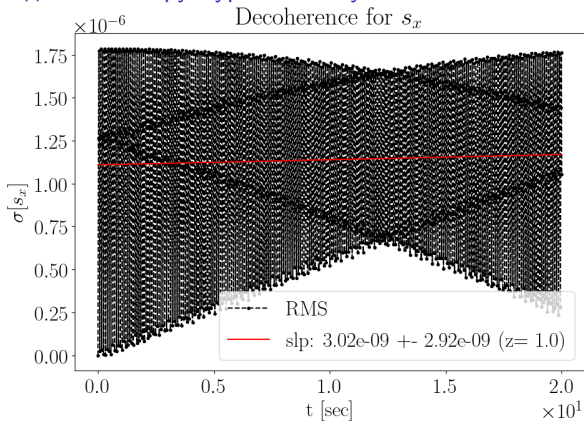
Спин-декогеренция

Неидеальная структура: без секступолей



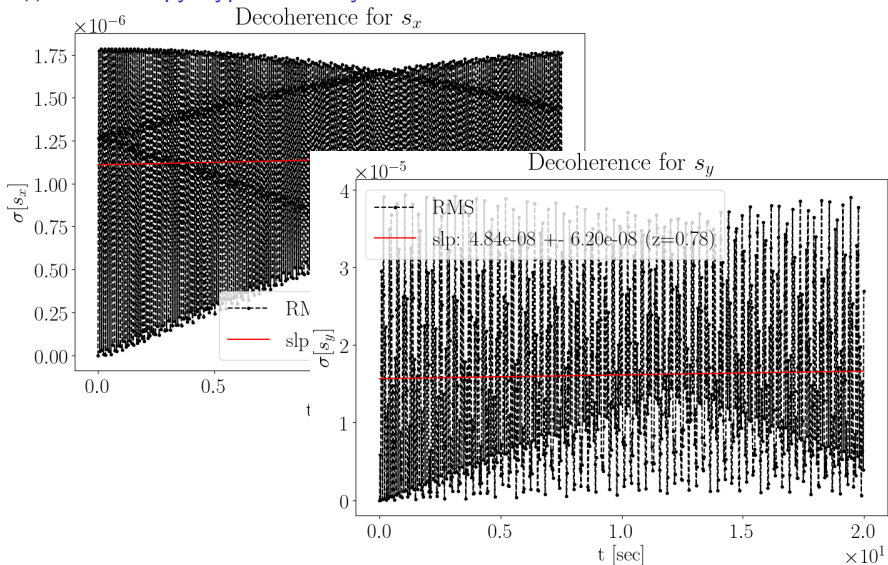
Спин-декогеренция

Неидеальная структура: с секступолями



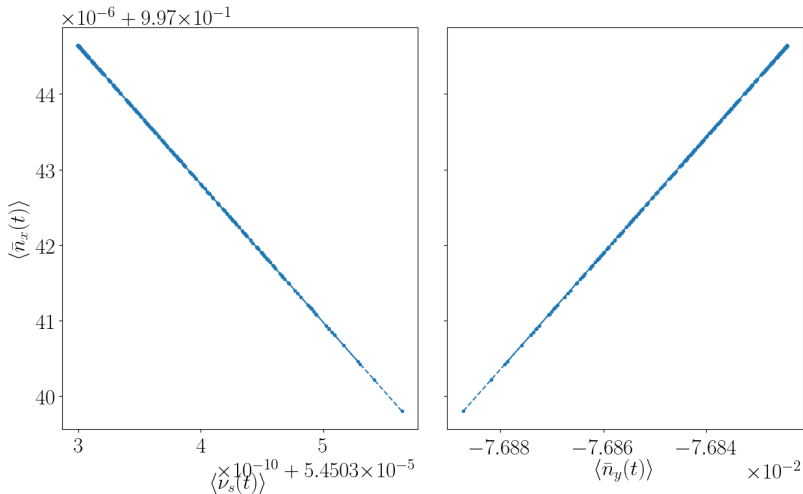
Спин-декогеренция

Неидеальная структура: с секступолями

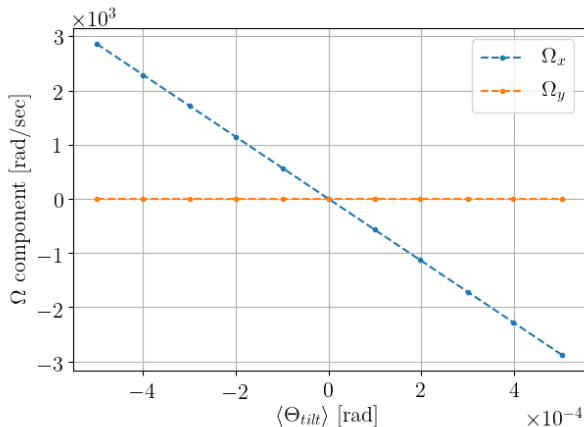


Спин-декогеренция

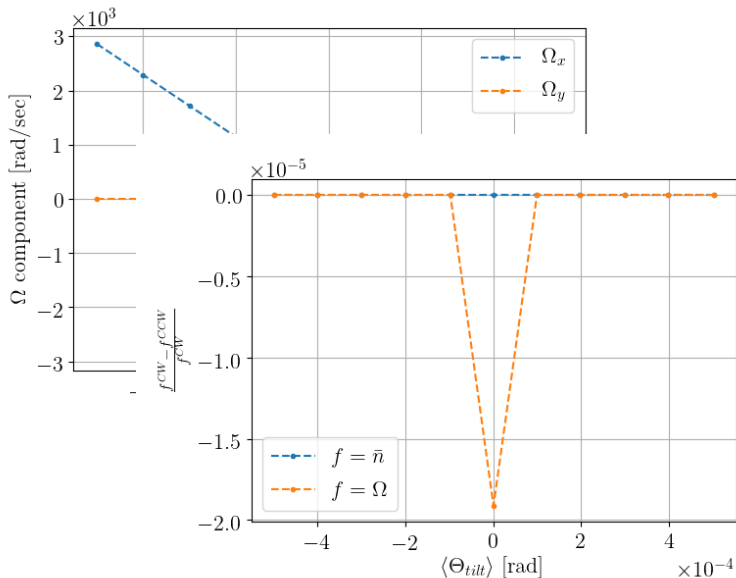
Выравнивание осей стабильного спина частиц



МДМ-компонента спин-прецессии



МДМ-компонента спин-прецессии



Калибровка МДМ-сигнала

Почему это важно?

ЭДМ-статистика

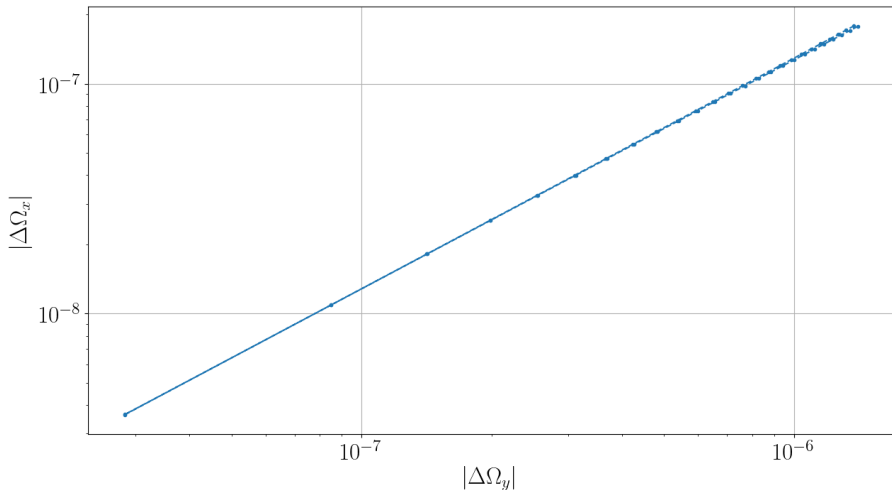
$$\begin{aligned}\hat{\omega}_{edm} &= \frac{1}{2}(\hat{\omega}_x^+ + \hat{\omega}_x^-) \\ &= \omega_{edm} + \underbrace{\frac{1}{\sqrt{2}}\sigma_{\hat{\omega}}}_{stat} + \underbrace{(\omega_{mdm}^+ - \omega_{mdm}^-)}_{syst}\end{aligned}$$

Утверждение

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

Калибровка МДМ-сигнала

Калибровочный график



Статистическое моделирование

Модулированная схема выборки

