

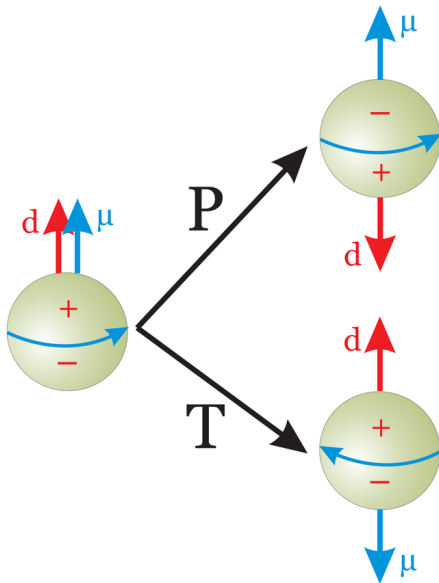
Метод замороженного спина для поиска электрического дипольного момента дейтрона в накопительном кольце

<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 электрического дипольного момента дейтрона на основе измерений частоты прецессии спина в накопительном кольце.
- Проанализировать требования к магнитооптической структуре кольца-накопителя, ориентированного на поиск электрического дипольного момента дейтрона.
- Исследовать спин-декогеренцию пучка дейтронов в окрестности состояния “замороженного” спина и разработать метод её подавления.

- Исследовать влияние различного рода несовершенств элементов кольца на спин-орбитальную динамику.
- Выполнить математическое моделирование процесса калибровки нормализованной частоты прецессии спина (спин-тюн) при смене полярности ведущего поля.
- Изучить статистические свойства метода 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.

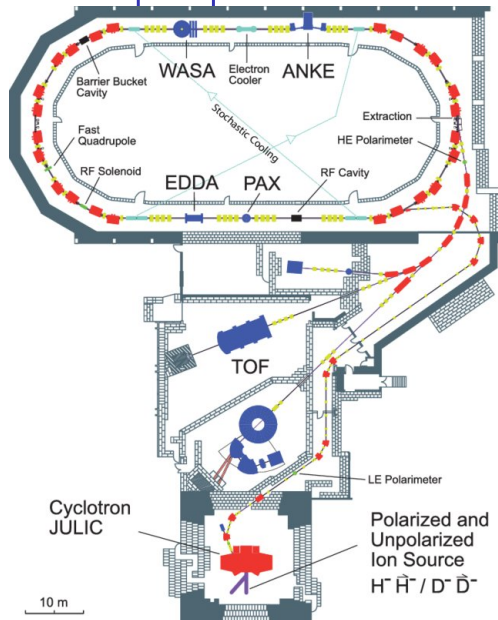
Практическая значимость

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.

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.
- 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

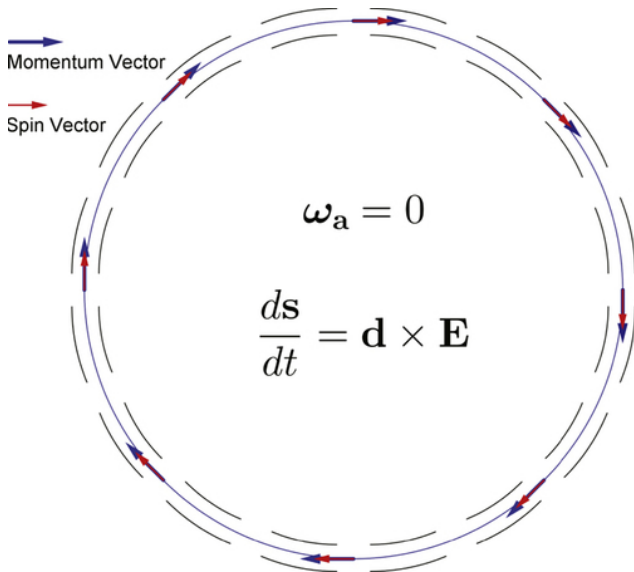
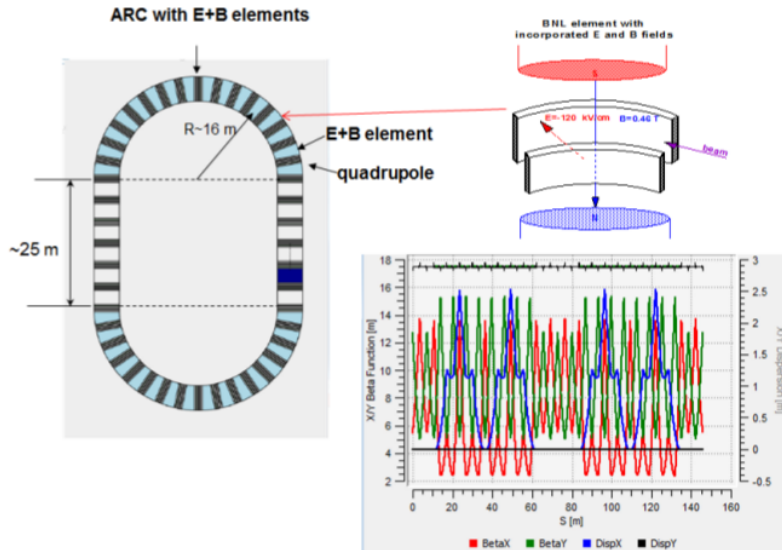


Схема ускорителя



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 в конечном выражении оценки ЭДМ МДМ-компоненты частоты спин-прецессии.

Возмущения спин-динамики

Проблема

Вызывают осцилляции амплитуды фитируемого сигнала.

Выводы

Осцилляции амплитуды сигнала

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

Спин-декогеренция

Проблема

Ограничение на длительность измерительного цикла.

Выводы

- 1 В частотных методах измерения ЭДМ спин-декогеренция переходит из плоскости замкнутой орбиты, в плоскость измерения поляризации.
- 2 Секступольные элементы одновременно выравнивают как **частоты**, так и **направления** осей прецессии спинов частиц.

МДМ-компонента спин-прецессии

Проблема

Основная систематическая ошибка Ω^{mdm} .

Выводы

- 1 Зависит только от **среднего** угла наклона $\langle \theta_{tilt} \rangle$, но не от конкретной последовательности наклонов оптических элементов ускорителя.
- 2 Зависимость носит линейный характер:
$$\Omega^{mdm} = L(\langle \theta_{tilt} \rangle).$$
- 3 Устраняется в статистике путём измерений частоты прецессии спина в противоположно движущемся пучке.

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.

Выводы

- 1 Воспроизведение величины магнитного поля не достаточно; необходимо восстанавливать эффективный Лоренц-фактор центра масс пучка.
- 2 Если $|\Delta\Omega_y^{mdm}| < 10^{-7}$ рад/сек, то $|\Delta\Omega_x^{mdm}| < 10^{-7}$ рад/сек.

Статистическое моделирование

Выводы

- 1 Ω_{spin} оценивается фитированием данных поляриметрии функцией $f(t) = a \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi)$.
- 2 Ошибка поляриметрии растёт к концу измерительного цикла \Rightarrow гетероскедастичные регрессионные модели.
- 3 Полезная длительность измерительного цикла не превосходит $3 \cdot \tau_d$.
- 4 За один измерительный цикл в 1000 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 квадруполов при помощи пучка: точность определения положения квадруполов до 0.2 мм.
3. Оптимизация времени когерентности спина: время жизни поляризации свыше 1 000 сек.

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 смене полярности ведущего поля накопительного кольца.
- 6 Проведена оценка статистических свойств предложенного метода измерения ЭДМ в накопительном кольце.

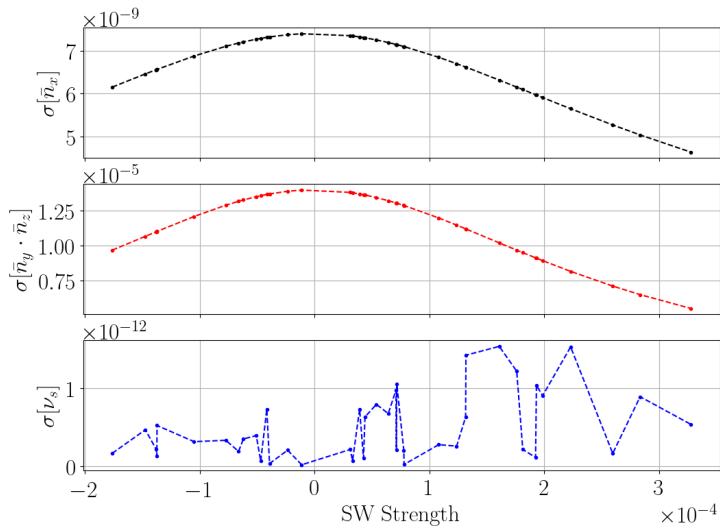
Положения выносимые на защиту

- 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.

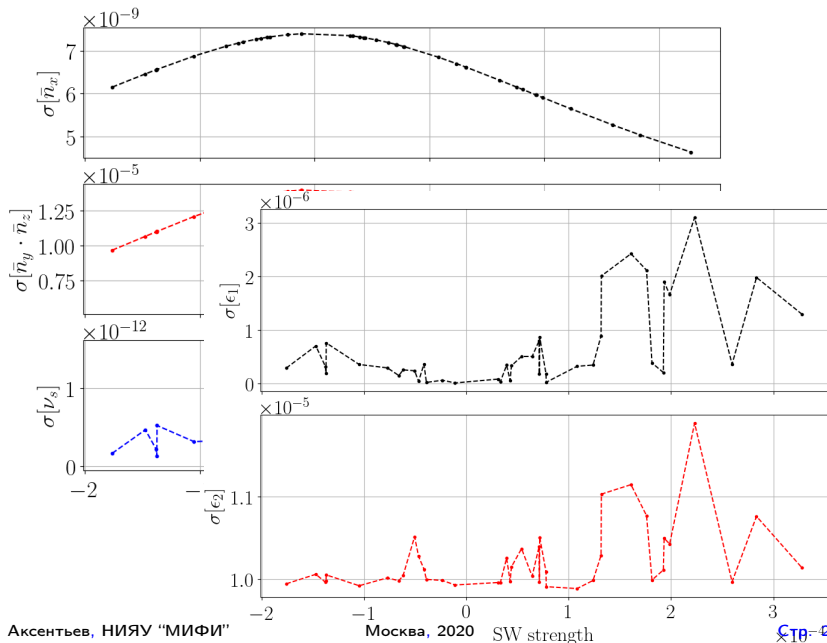
- 1 Результаты исследования влияния различного рода несовершенств элементов накопительного кольца на спин-орбитальную динамику пучка.
- 2 Метод калибровки нормализованной частоты прецессии спина при попеременной смене полярности ведущего поля и его численная модель.
- 3 Результаты исследования систематических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

Спасибо за внимание!

Возмущения спин-динамики

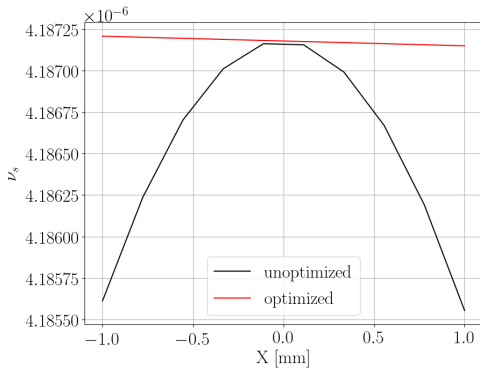


Возмущения спин-динамики



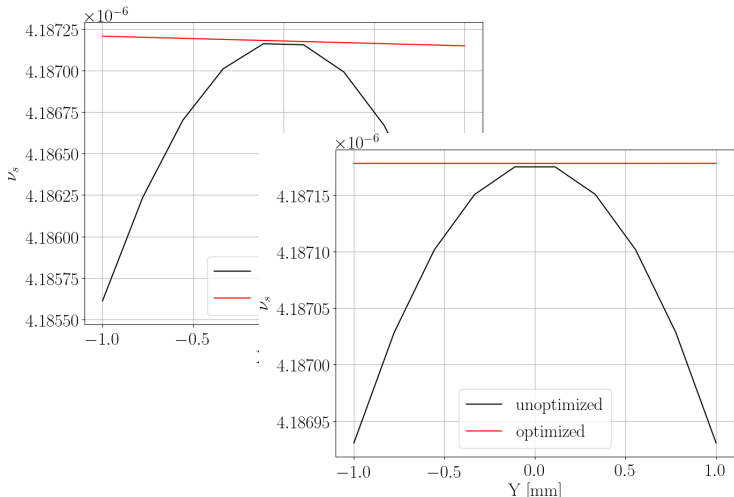
Спин-декогеренция

Идеальная структура



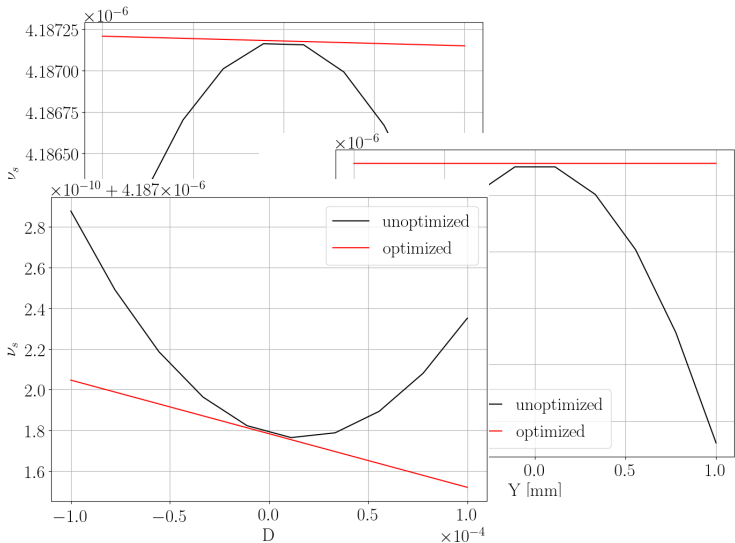
Спин-декогеренция

Идеальная структура



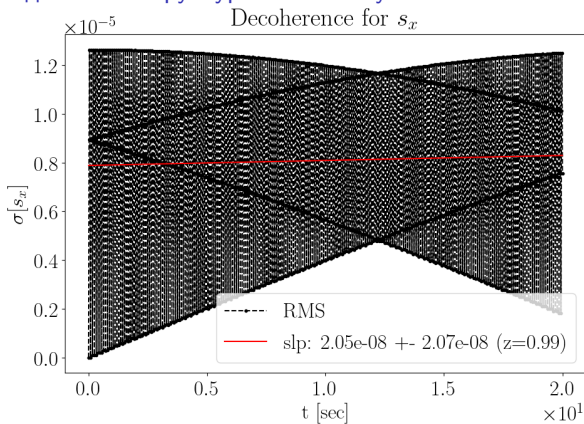
Спин-декогеренция

Идеальная структура



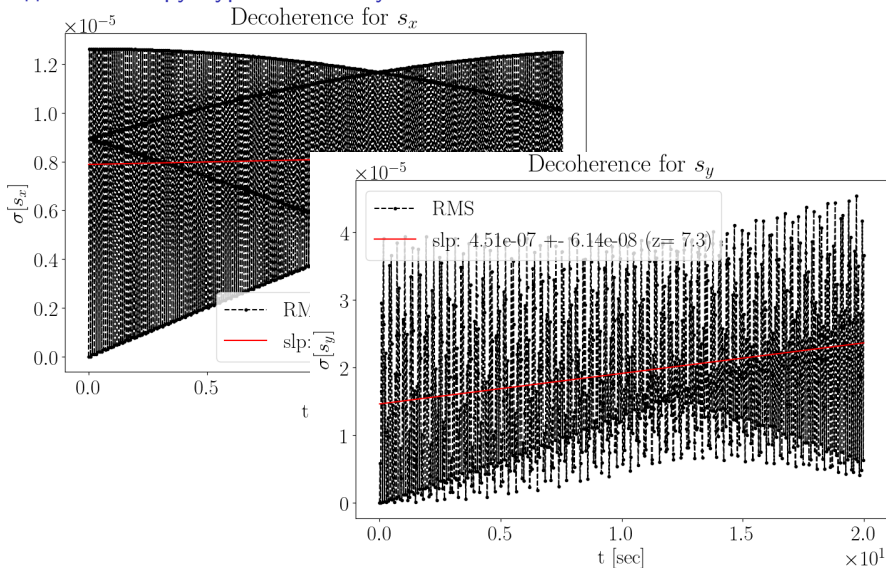
Спин-декогеренция

Неидеальная структура: без секступолей



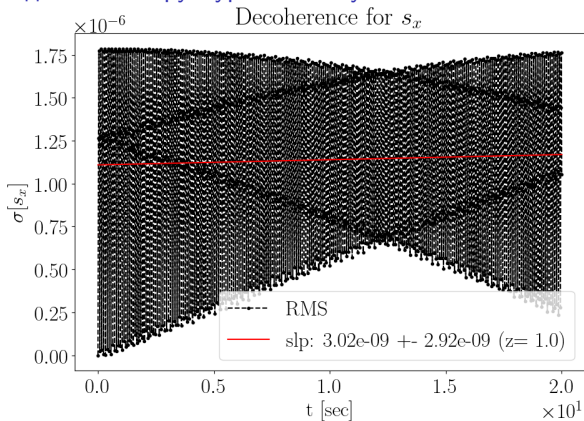
Спин-декогеренция

Неидеальная структура: без секступолей



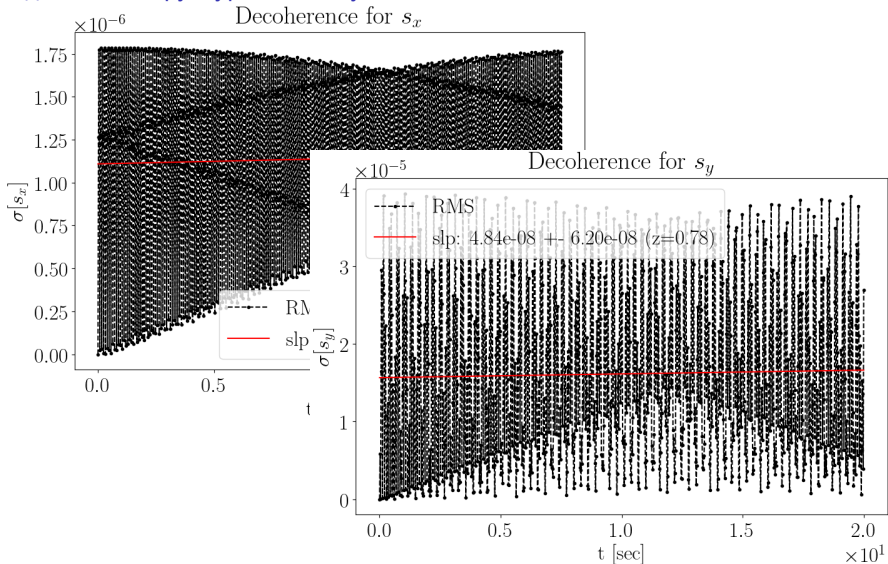
Спин-декогеренция

Неидеальная структура: с секступолями



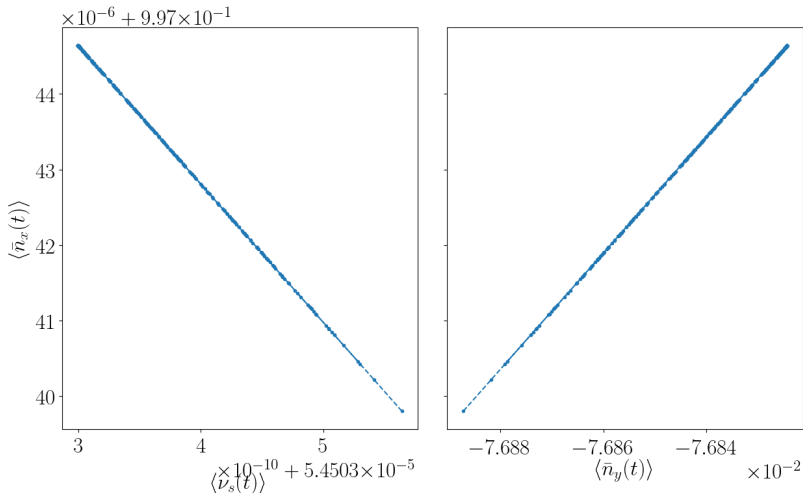
Спин-декогеренция

Неидеальная структура: с секступолями

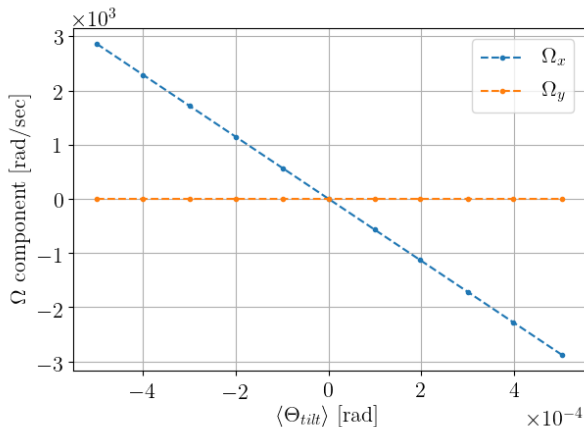


Спин-декогеренция

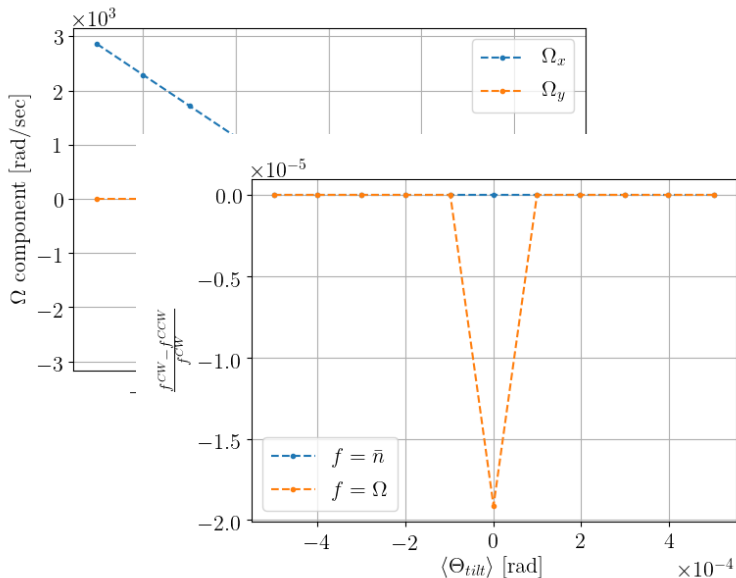
Выравнивание осей стабильного спина частиц



МДМ-компонента спин-прецессии



МДМ-компонента спин-прецессии



Калибровка МДМ-сигнала

Почему это важно?

ЭДМ-статистика

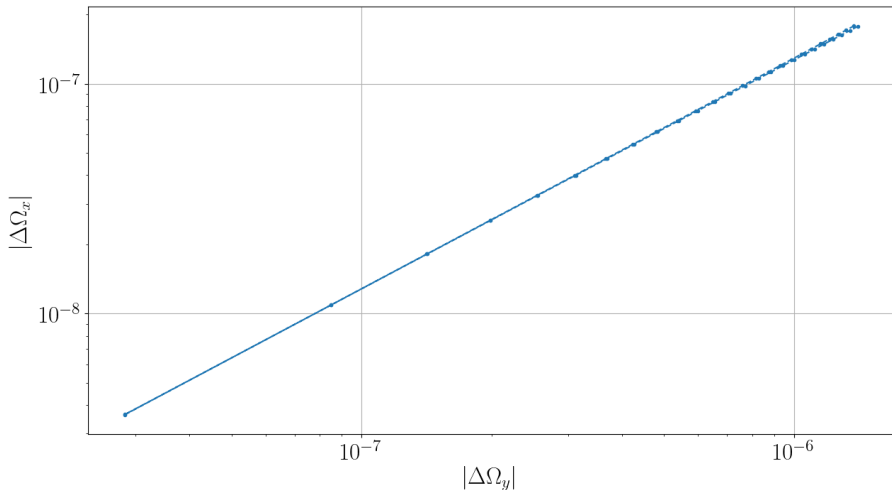
$$\begin{aligned}\hat{\omega}_{edm} &= \frac{1}{2}(\hat{\omega}_x^+ + \hat{\omega}_x^-) \\ &= \omega_{edm} + \underbrace{\frac{1}{\sqrt{2}}\sigma_{\hat{\omega}}}_{stat} + \underbrace{(\omega_{mdm}^+ - \omega_{mdm}^-)}_{syst}\end{aligned}$$

Утверждение

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

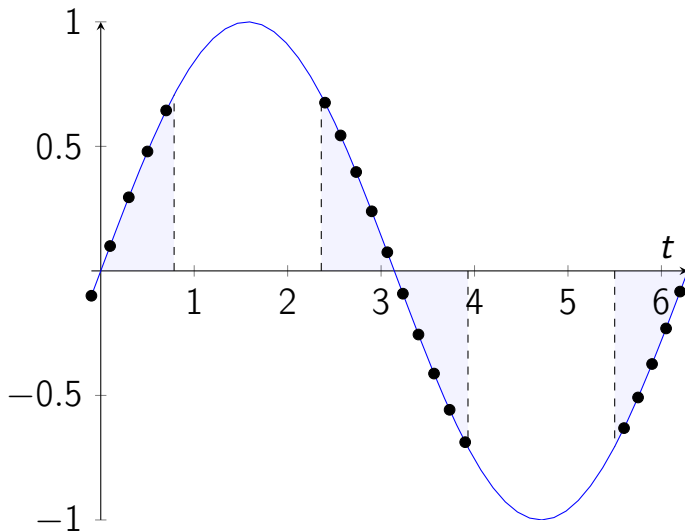
Калибровка МДМ-сигнала

Калибровочный график



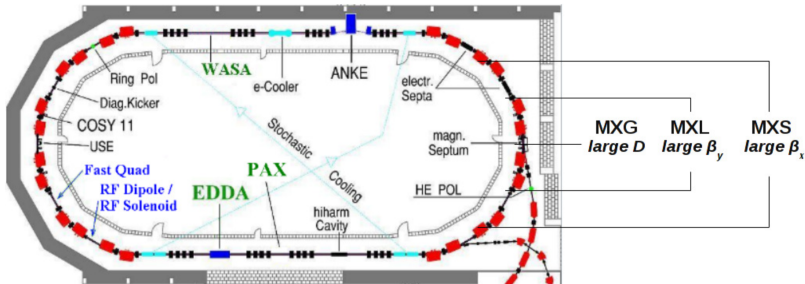
Статистическое моделирование

Модулированная схема выборки



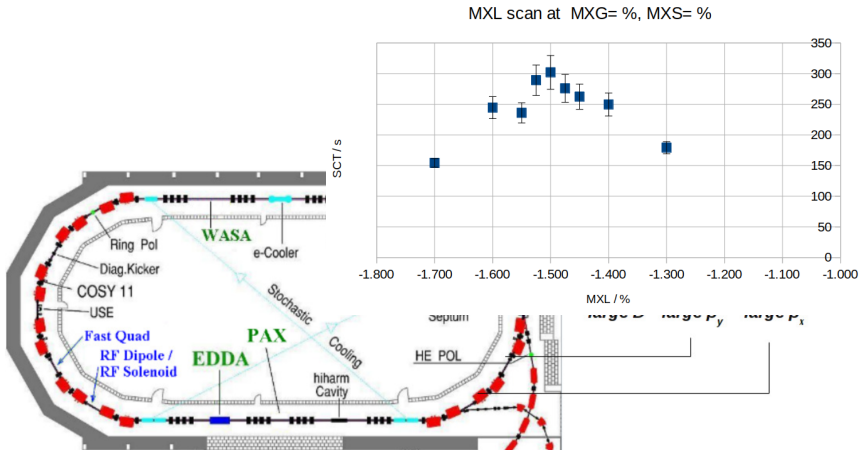
Результаты на COSY

Спин-декогеренция



Результаты на COSY

Спин-декогеренция



Результаты на COSY

Спин-декогеренция

