

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: д-р. физ-мат. наук, доц.

С. М. Полозов

Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)

Москва, 2020

Актуальность

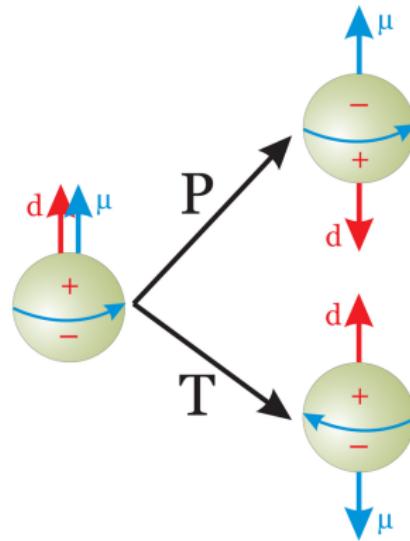
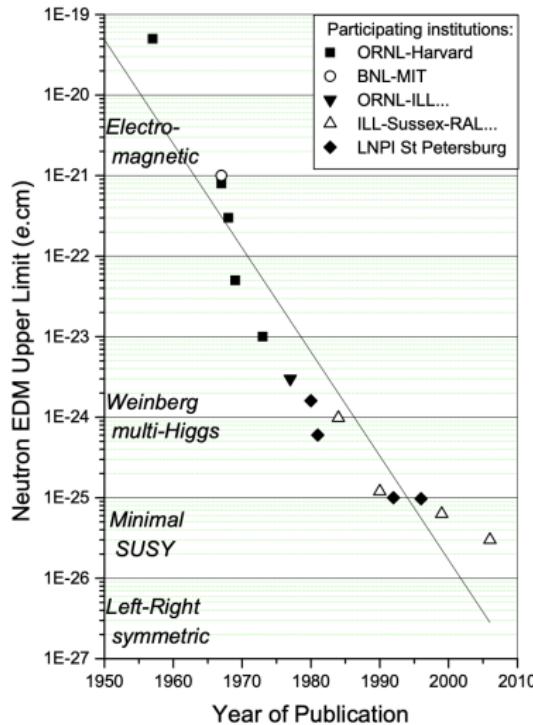


График взят из arXiv:0709.3100

Цель исследования

Разработка метода поиска электрического дипольного момента частицы в накопительном кольце, позволяющего достичь точность $10^{-29} e\cdot\text{см}$.

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 дейtronов 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

- ➊ Предложен метод измерения ЭДМ дейтрана, основанный исключительно на измерении частоты прецессии спина в накопительном кольце с ограничением по точности, оцениваемым на уровне 10^{-29} е·см.
- ➋ 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

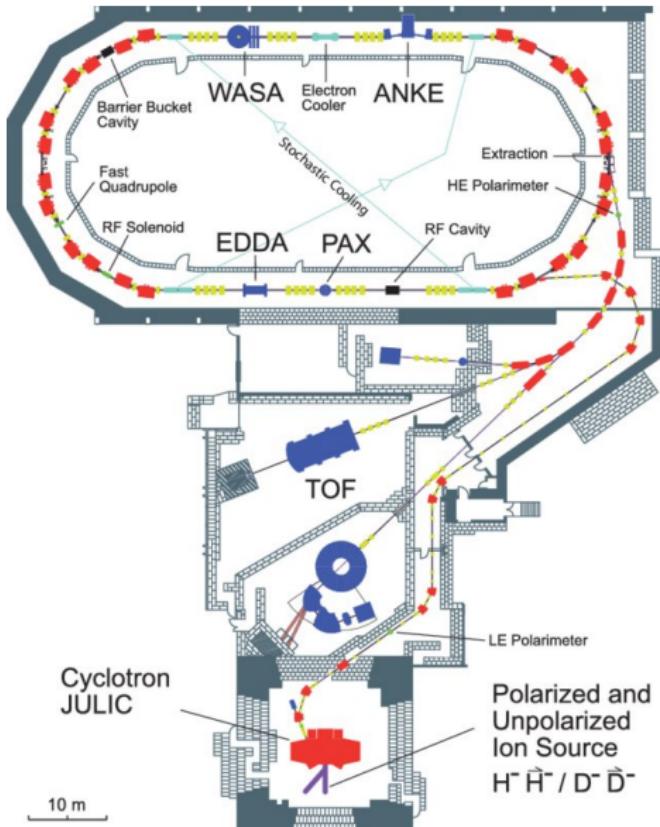
- Во время исследований по оптимизации времени когерентности спина при помощи сектупольных полей на ускорительном комплексе COSY (Исследовательский центр “Юлих”).
- Результаты работы вошли в подготавливаемый коллаборацией CPEDM для CERN отчёта, под названием “Feasibility study for an EDM Storage Ring.”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

Положения выносимые на защиту

- ➊ Метод измерения электрического дипольного момента дейтрона.
- ➋ Принцип построения магнитооптической структуры накопительного кольца.
- ➌ Результаты исследования спин-декогеренции пучка дейтронов в окрестности состояния “замороженного” спина.
- ➍ 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.

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

$$\begin{cases} z_n &= \mathcal{M}(z_{n-1}), \\ S_n &= \hat{A}(z_{n-1}) \cdot S_{n-1} \end{cases}$$

Принцип измерения ЭДМ методом “замороженного спина”

Уравнение Томаса-БМТ

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

Замороженный спин

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

Схема ускорителя

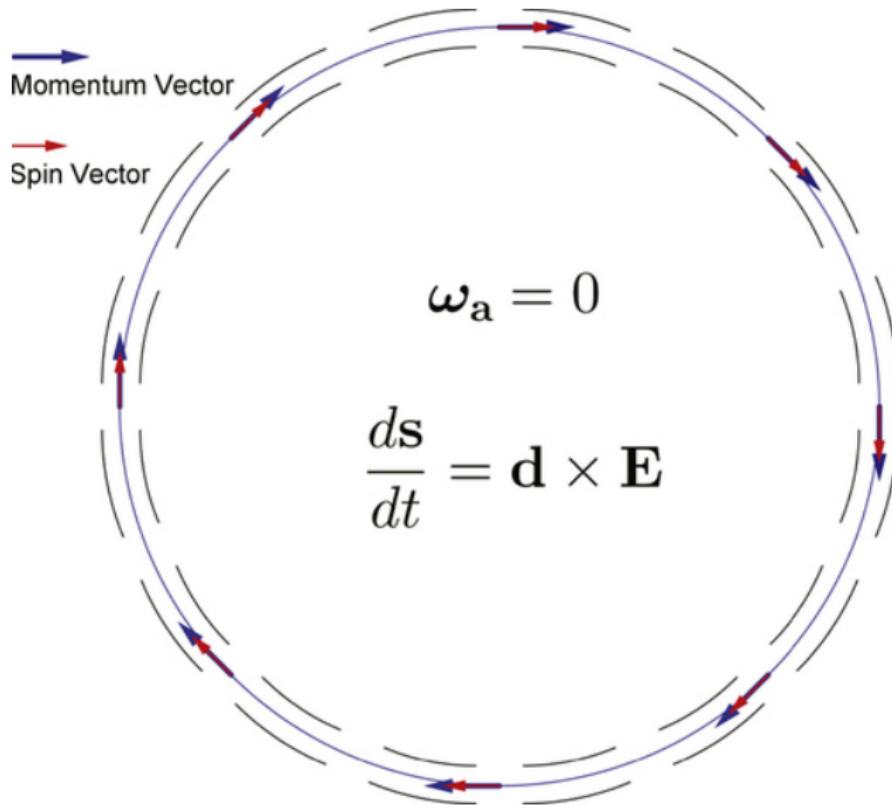
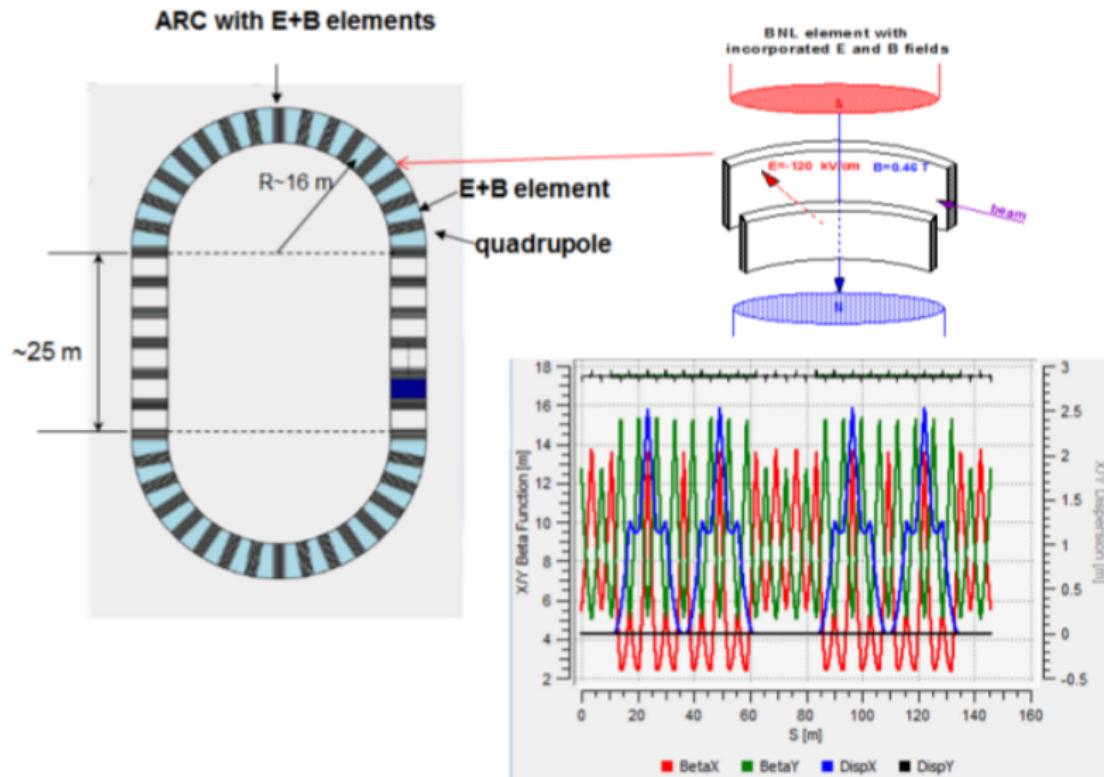


Схема ускорителя



Замороженный спин: 3D vs 2D

3D (BNL): $\Omega^{mdm} \rightarrow 0$

2D (FDM): $\Omega_{(y)}^{mdm} \rightarrow 0$

- ➊ **дестабилизация** оси поляризации
- ➋ **нужна большая точность** установки оптических элементов
- ➌ **трудная** поляриметрия

- ➊ **выделенная** ось поляризации
- ➋ **неидеальности** машины **задают** ось
- ➌ **нет** проблем с поляриметрией

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-компоненты 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

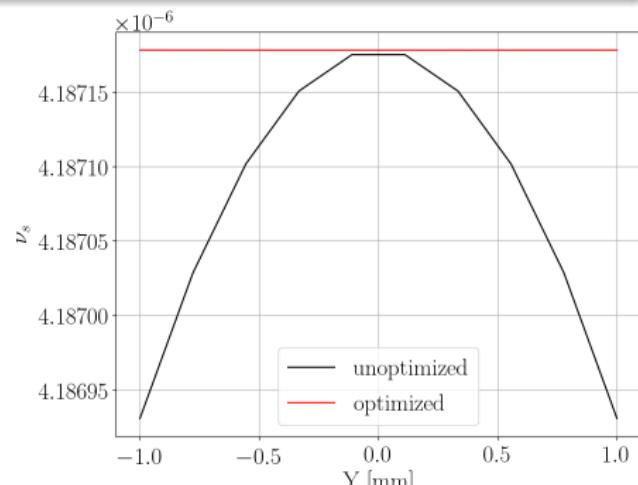
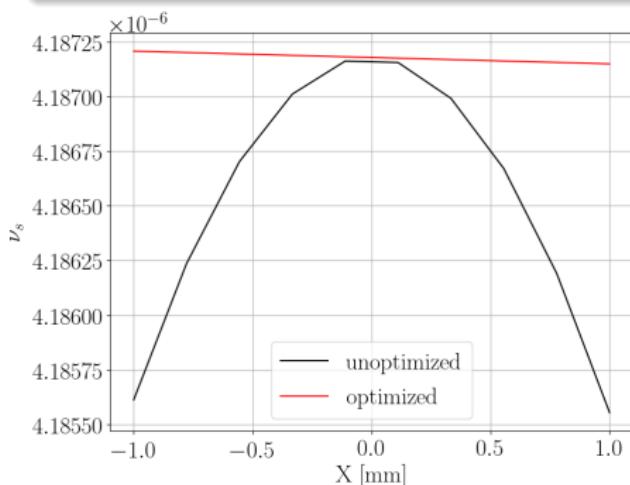
Возмущения амплитуды сигнала

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

Спин-декогеренция

Проблема

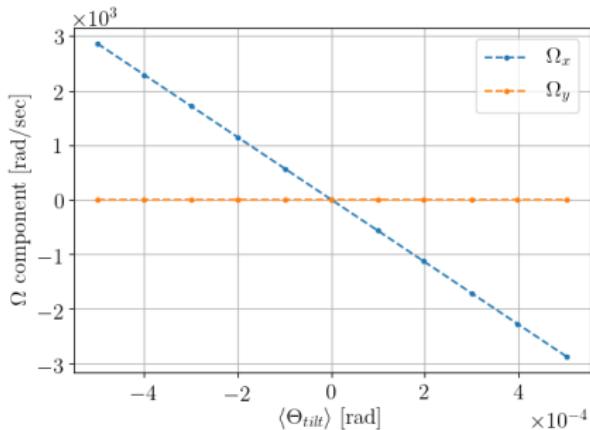
Ограничение на длительность измерительного цикла



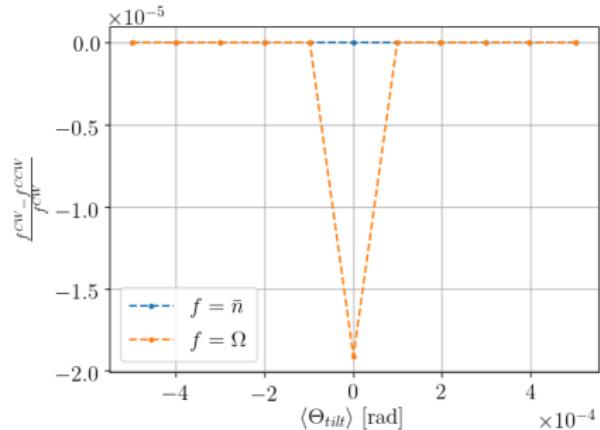
МДМ-компоненты спин-прецессии

Проблема

Основная систематическая ошибка Ω^{mdm}



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

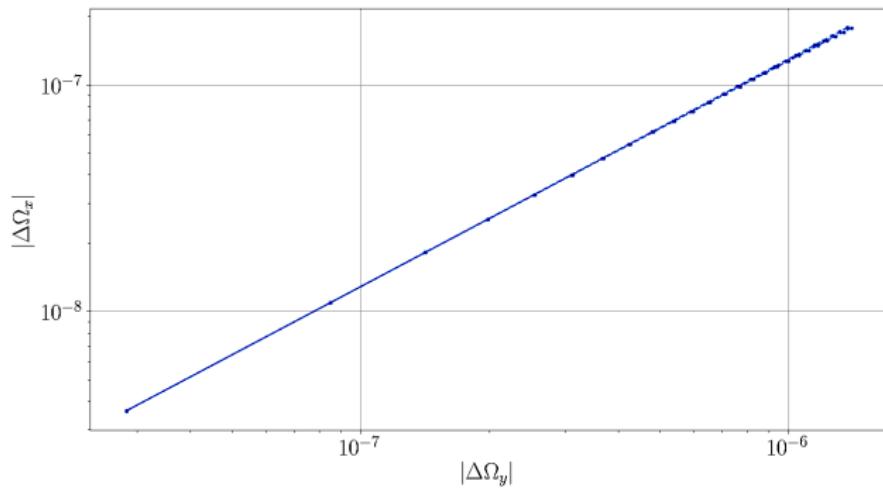


$$\Omega_{CW}^{mdm} \approx \Omega_{CCW}^{mdm}$$

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 _{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

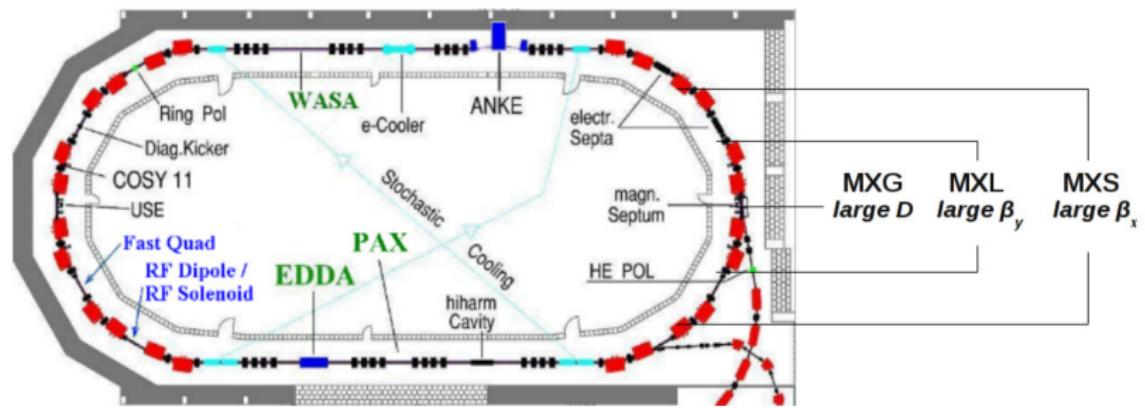
- 1 Полезная длительность измерительного цикла не превосходит $3 \cdot \tau_d$.
- 2 За один измерительный цикл в 1 000 сек можно достичь $\sigma_{\hat{\omega}} \approx 10^{-7}$ рад/сек, что за год измерений позволяет оценить ЭДМ с точностью $10^{-29} \text{ е}\cdot\text{см}$.

Результаты на COSY

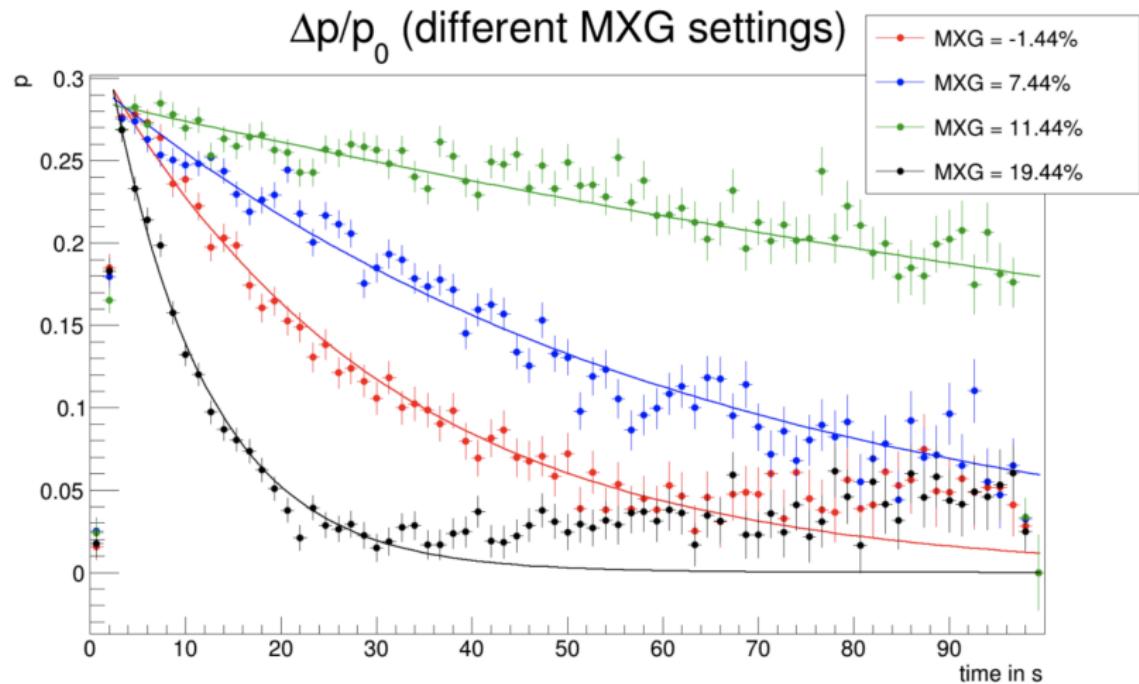
Успехи

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

Оптимизация времени когерентности спина на COSY



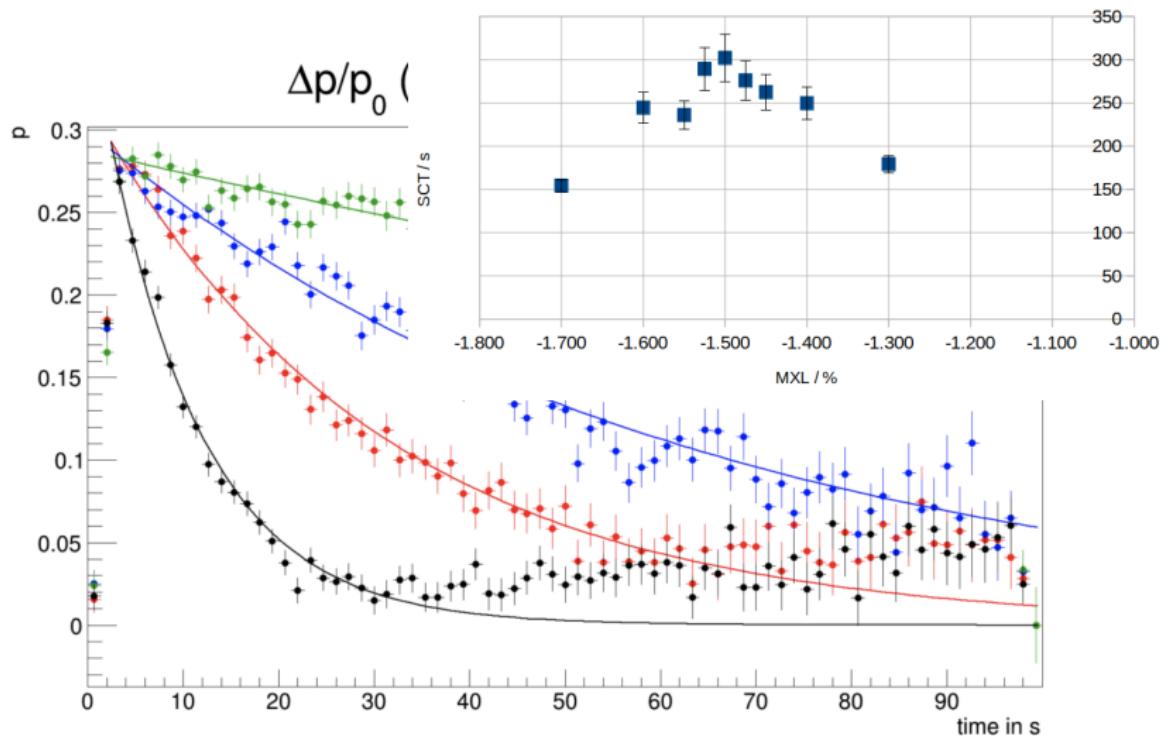
Оптимизация времени когерентности спина на COSY



Результаты на COSY

Спин-декогеренция

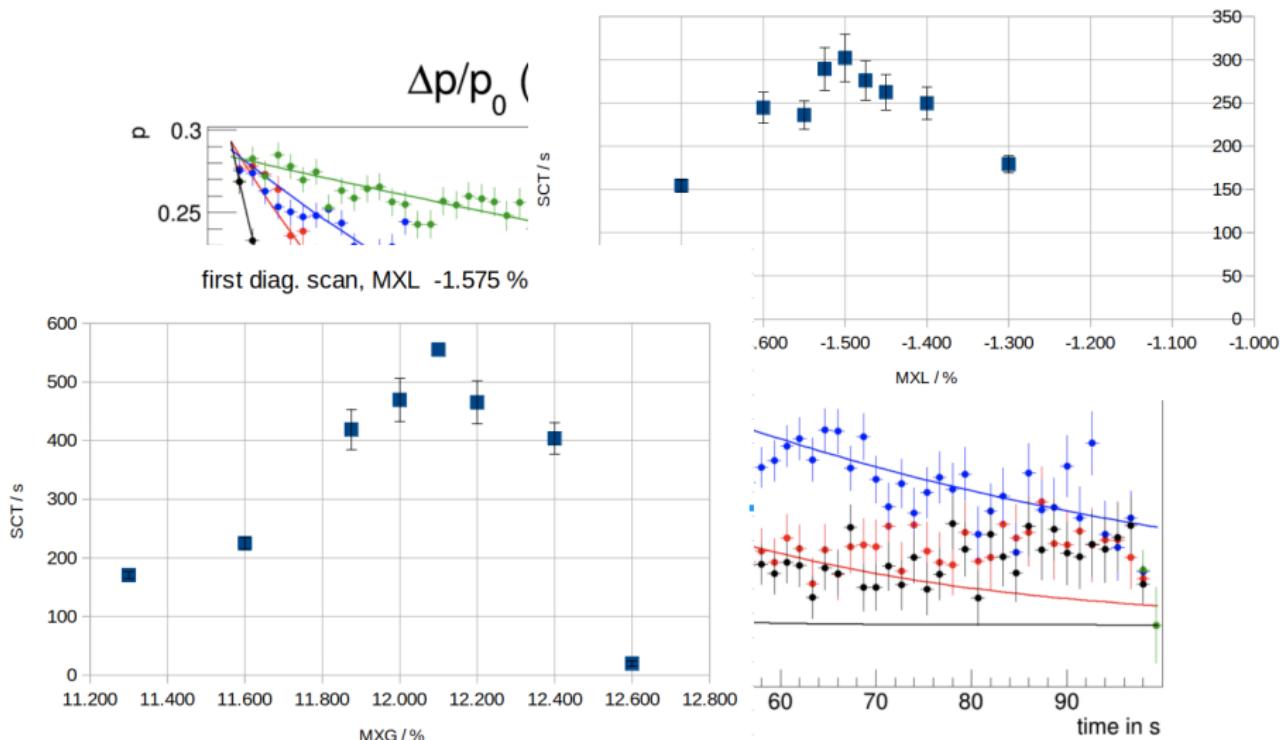
MXL scan at MXG= %, MXS= %



Результаты на COSY

Спин-декогеренция

MXL scan at MXG= %, MXS= %



Результаты работы

- ➊ Разработан метод измерения ЭДМ дейтрана, основанный исключительно на измерении частоты прецессии спина частицы при движении в накопительном кольце.
- ➋ Предложен принцип построения магнитооптической структуры кольца-накопителя для поиска ЭДМ дейтрана.
- ➌ 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.

Спасибо за внимание!

Уравнение Томаса-БМТ

$$\frac{ds}{dt} = s \times (\Omega^{mdm} + \Omega^{edm})$$

$$\Omega^{mdm} = \frac{e}{m} \left(GB + \left[\frac{1}{\gamma^2 - 1} - G \right] \frac{\beta \times E}{c} \right)$$

$$\Omega^{edm} = \frac{e \eta}{m^2} \left[\frac{E}{c} + \beta \times B \right]$$

Параметры

$$G = (g - 2)/2 \quad (\text{аномальный магнитный момент})$$

$$d = \eta e h / (4 m c), \text{ где } \eta \approx 2 \cdot 10^{-15} \quad (\text{ЭДМ})$$

Поляриметрия с EDDA

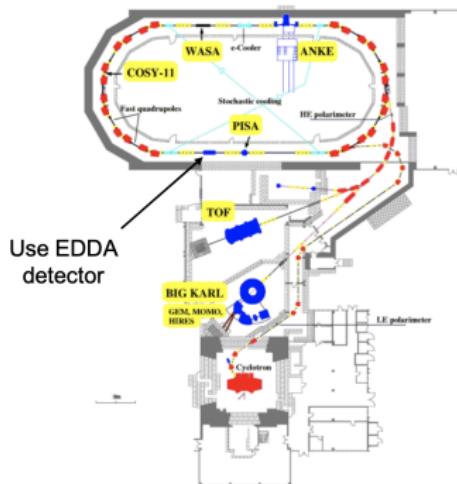
Storage Ring EDM

Technical Review – 12/7/2009

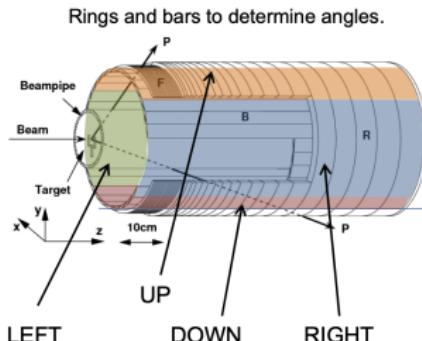
Polarimeter Development

COSY tests

COSY ring:



EDDA detector:



Azimuthal angles yield two asymmetries:

$$\varepsilon_{EDM} = \frac{L - R}{L + R} \quad \varepsilon_{g-2} = \frac{D - U}{D + U}$$

W.Morse - BNL

42

Взято из презентации **EDM of the muon, deuteron, and proton in storage rings** [докладчик W. Morse (BNL)]

А. Е. Аксентьев, НИЯУ "МИФИ"

Москва, 2020

Стр. 31 из 44

BNL-метод

Идея: измерение набега фазы

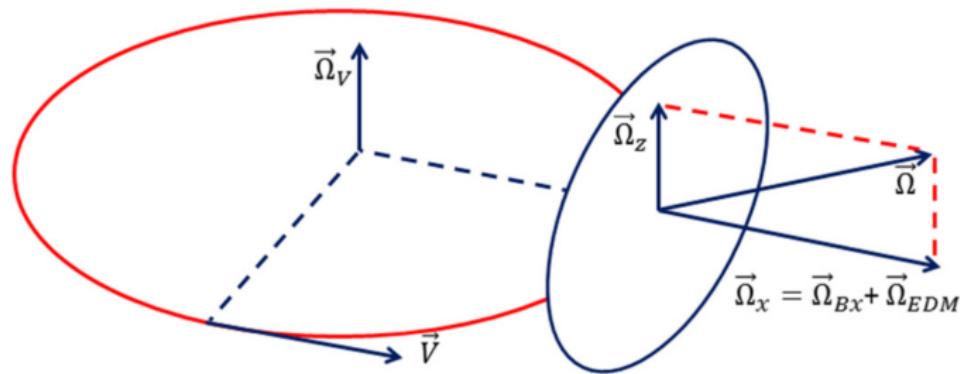
$$\Omega_{MDM} \rightarrow 0$$

$$\Delta P_V = P \frac{\Omega_{edm}}{\Omega} \sin(\Omega t + \Theta_0)$$

Проблемы

- ➊ $\Omega_{MDM} \rightarrow 0 \Rightarrow$ дестабилизация оси поляризации
- ➋ чтобы $\Omega_{MDM} \rightarrow 0 \Rightarrow$ нужна большая точность установки оптических элементов кольца
- ➌ если $\Omega_{MDM} \approx 0$, то $\Delta P_V(\Delta t_{cyc}) \ll 1 \Rightarrow$ проблема для поляриметрии

Spin Wheel метод



- ➊ Два пучка (поляризованный и неполяризованный)
- ➋ **Диполь B_x** для вращения P с частотой 1 Гц
- ➌ Измерить Ω_x и Δ замкнутых орбит пучков
- ➍ $\hat{\Omega}_{EDM} = \frac{1}{2} [\hat{\Omega}_x(+\Delta) + \hat{\Omega}_x(-\Delta)]$

Spin Wheel метод

Достоинства

Не нужно подавлять МДМ спин-прецессию, а значит нет проблемы нестабильности оси поляризации

Проблемы

- ➊ Ограничения на **сечение взаимодействия** потому что используется пучок-магнетометр
- ➋ Нужна возможность определения вертикального разделения орбит пучков на уровне $\Delta \sim 10^{-12}$ м

Frequency Domain метод

Идея

Вместо **диполя** – неидеальности машины

Основные моменты

- попаременная CW/CCW инжекция
- калибровка величины ведущего поля требует только измерения Ω
- $\hat{\Omega}_{EDM} = \frac{1}{2} [\hat{\Omega}_x^{CW} + \hat{\Omega}_x^{CCW}]$

Калибровка МДМ-сигнала

Почему это важно?

ЭДМ-статистика

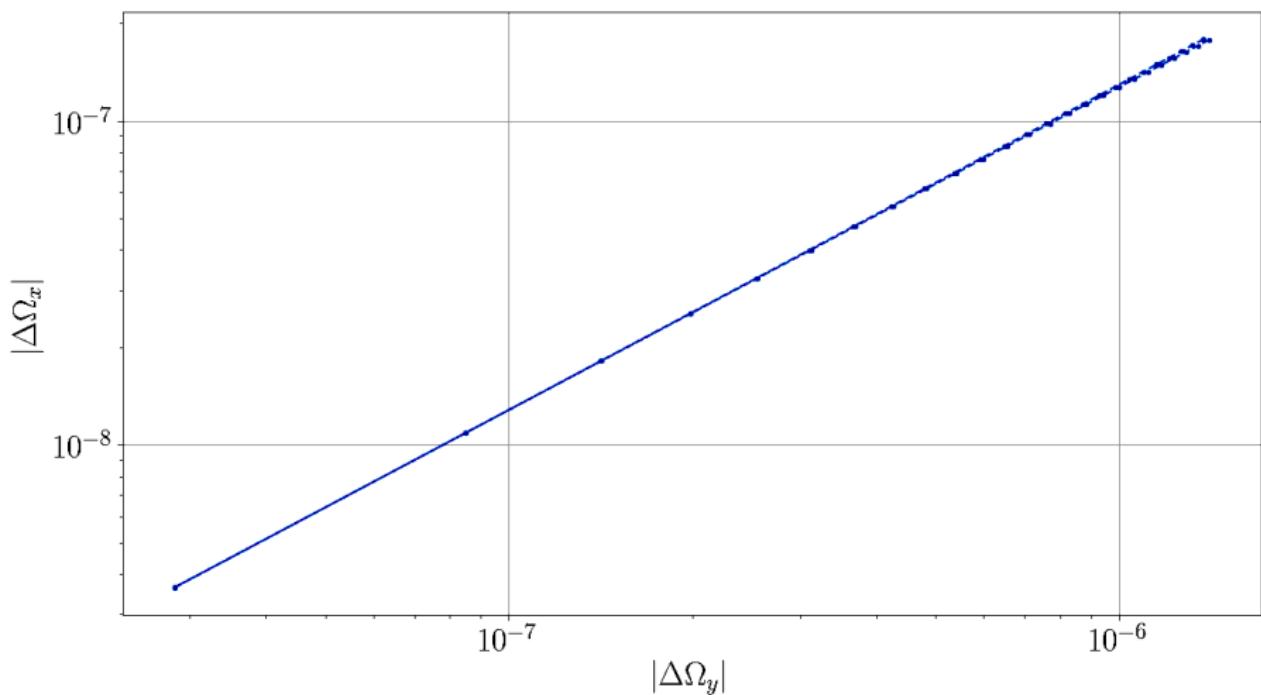
$$\begin{aligned}\hat{\omega}_{edm} &= \frac{1}{2}(\hat{\omega}_x^+ + \hat{\omega}_x^-) \\ &= \omega_{edm} + \underbrace{\frac{1}{\sqrt{2}}\sigma_{\hat{\omega}}}_{stat} + \underbrace{(\omega_{mdm}^+ - \omega_{mdm}^-)}_{syst}\end{aligned}$$

Утверждение

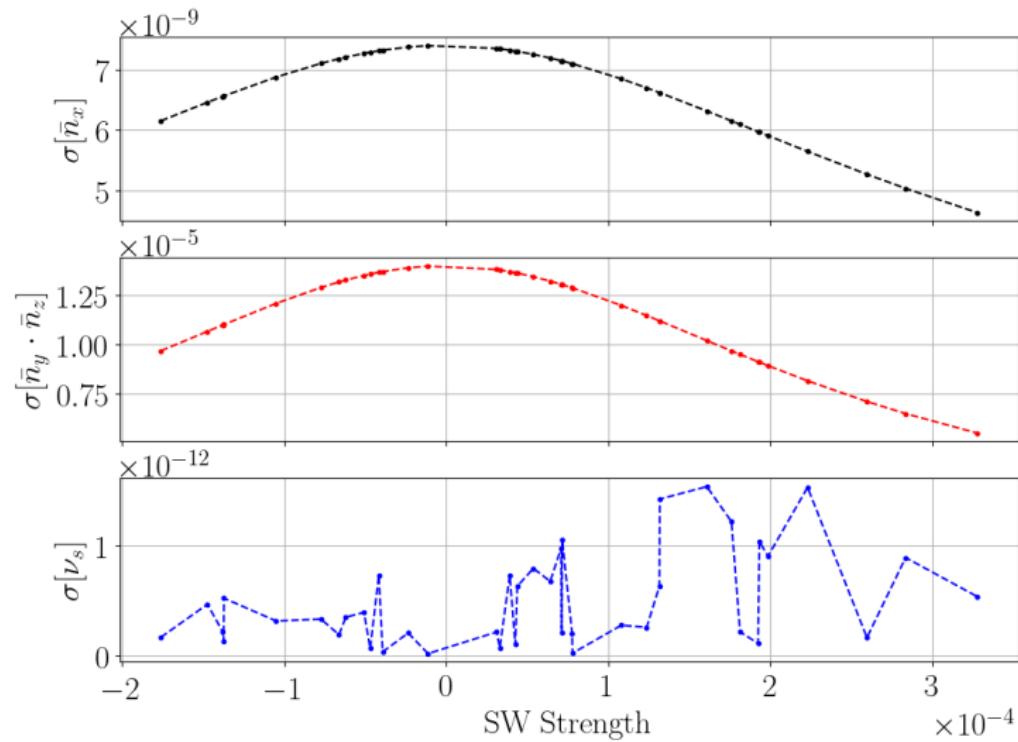
$$[\omega_y^{mdm+} - \omega_y^{mdm-} \rightarrow 0] \Rightarrow [\omega_x^{mdm+} - \omega_x^{mdm-} \rightarrow 0]$$

Калибровка МДМ-сигнала

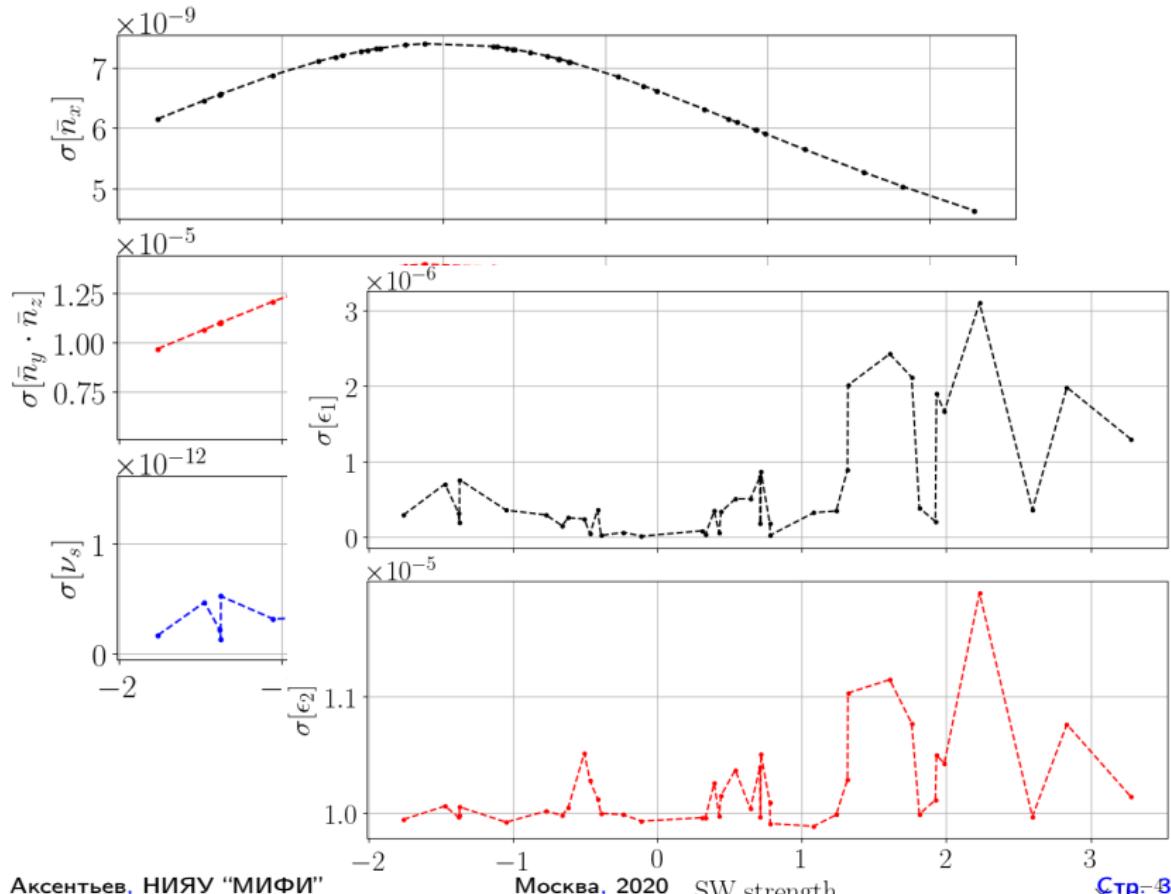
Калибровочный график



Возмущения спин-динамики

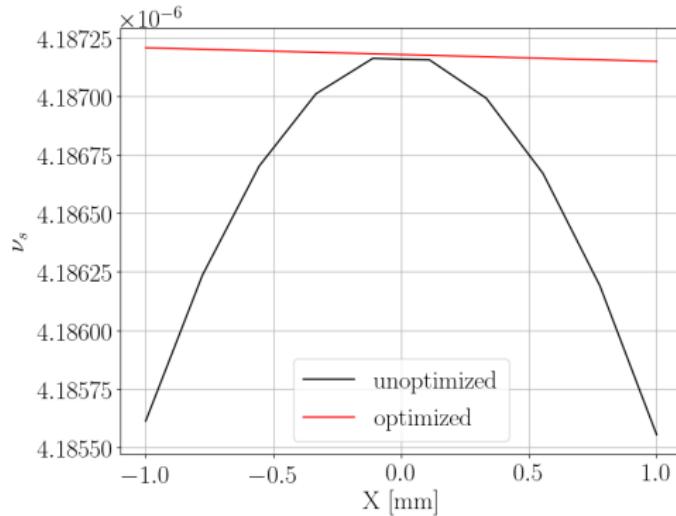


Возмущения спин-динамики



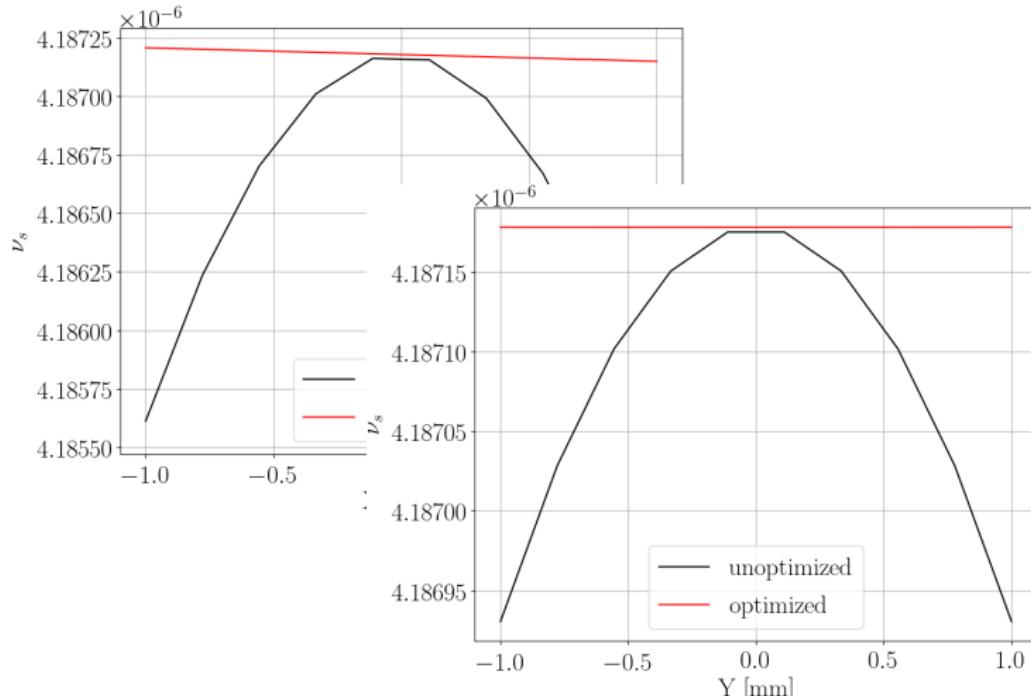
Спин-декогеренция

Идеальная структура



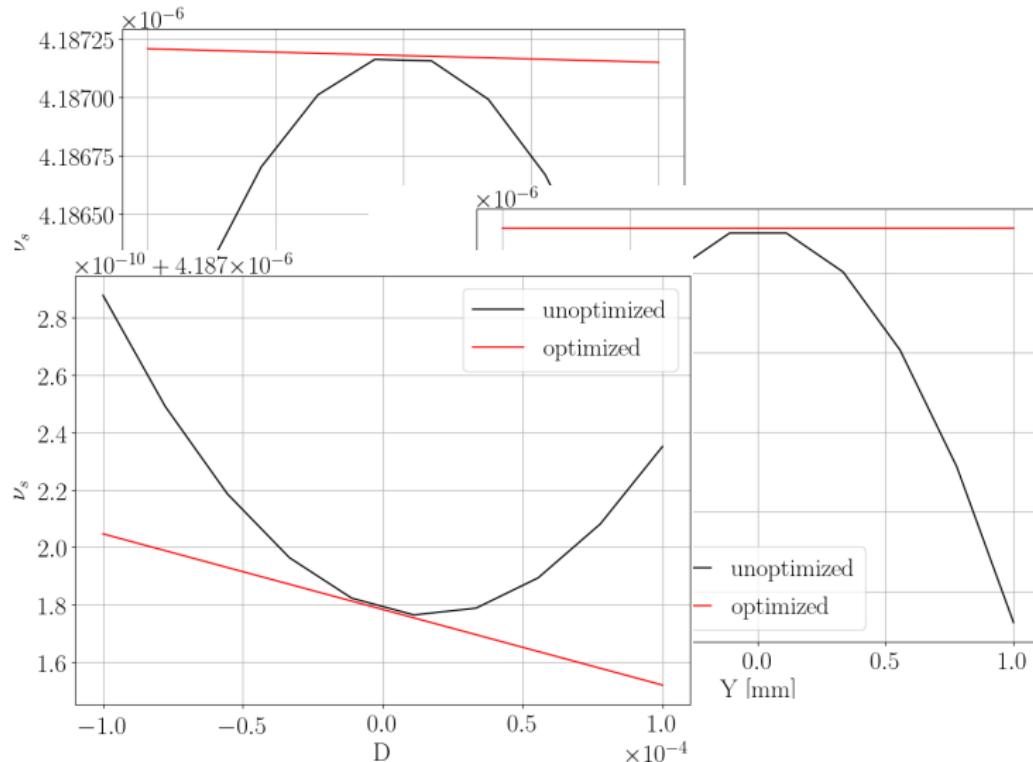
Спин-декогеренция

Идеальная структура



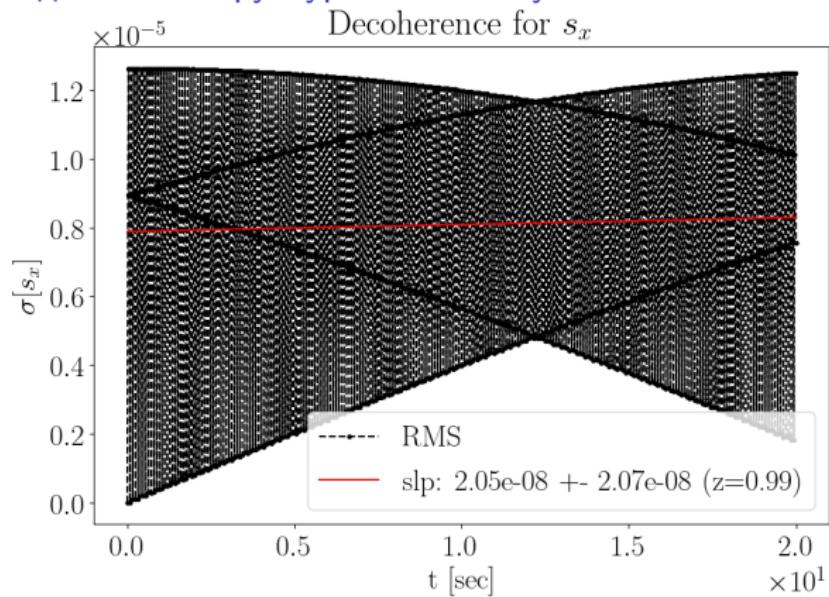
Спин-декогеренция

Идеальная структура



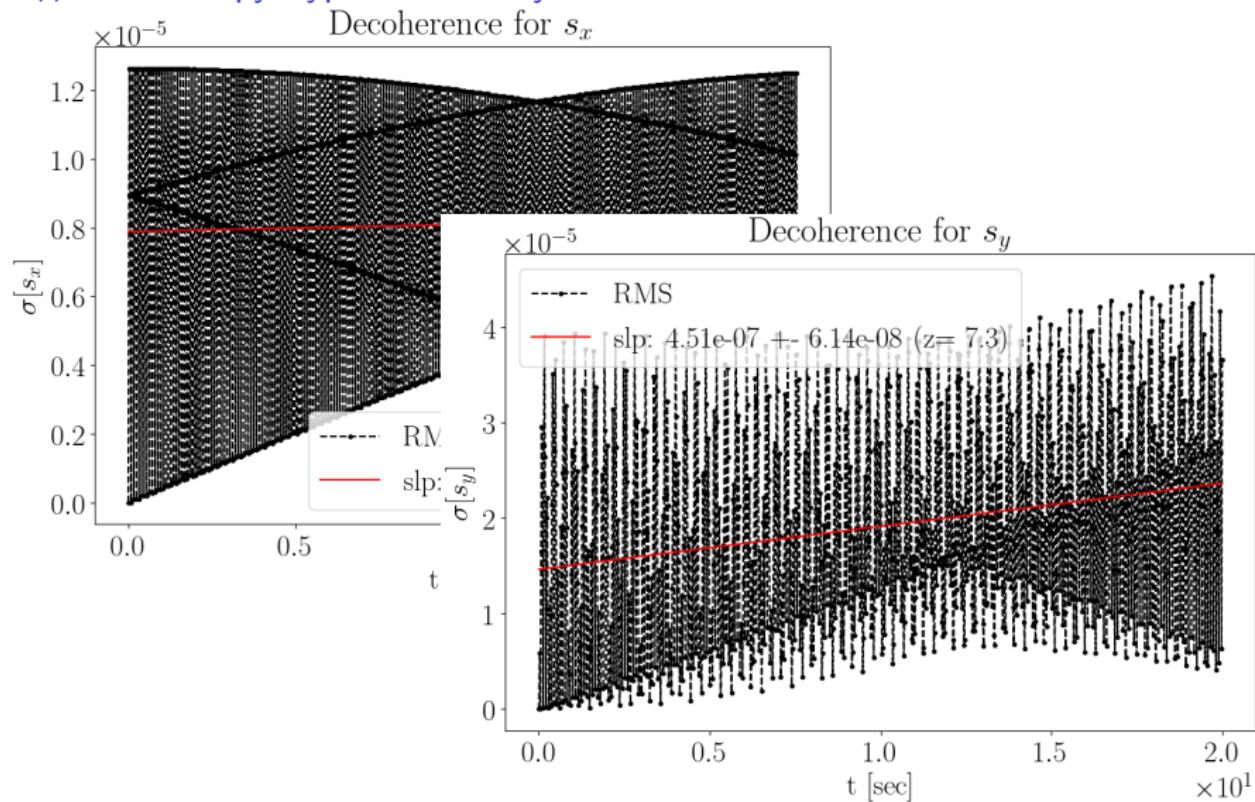
Спин-декогеренция

Неидеальная структура: без сектуполей



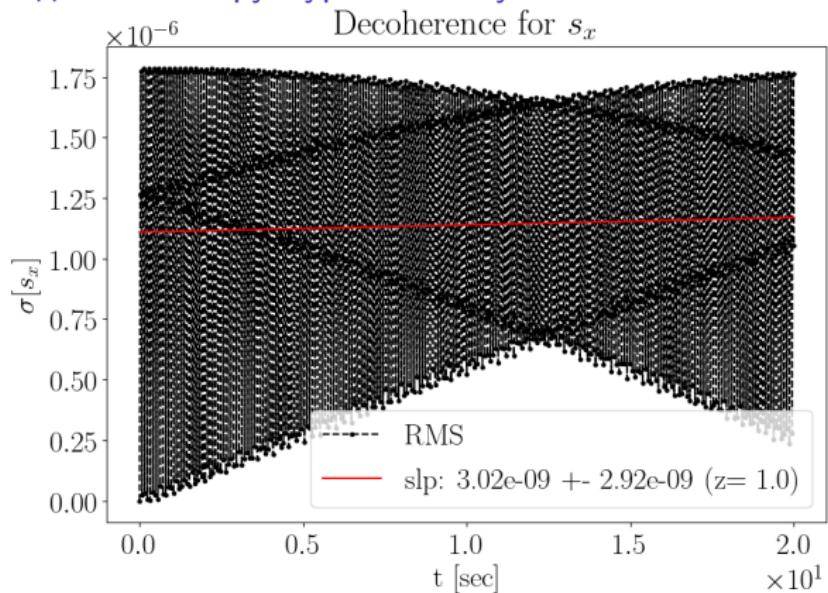
Спин-декогеренция

Неидеальная структура: без сектуполей



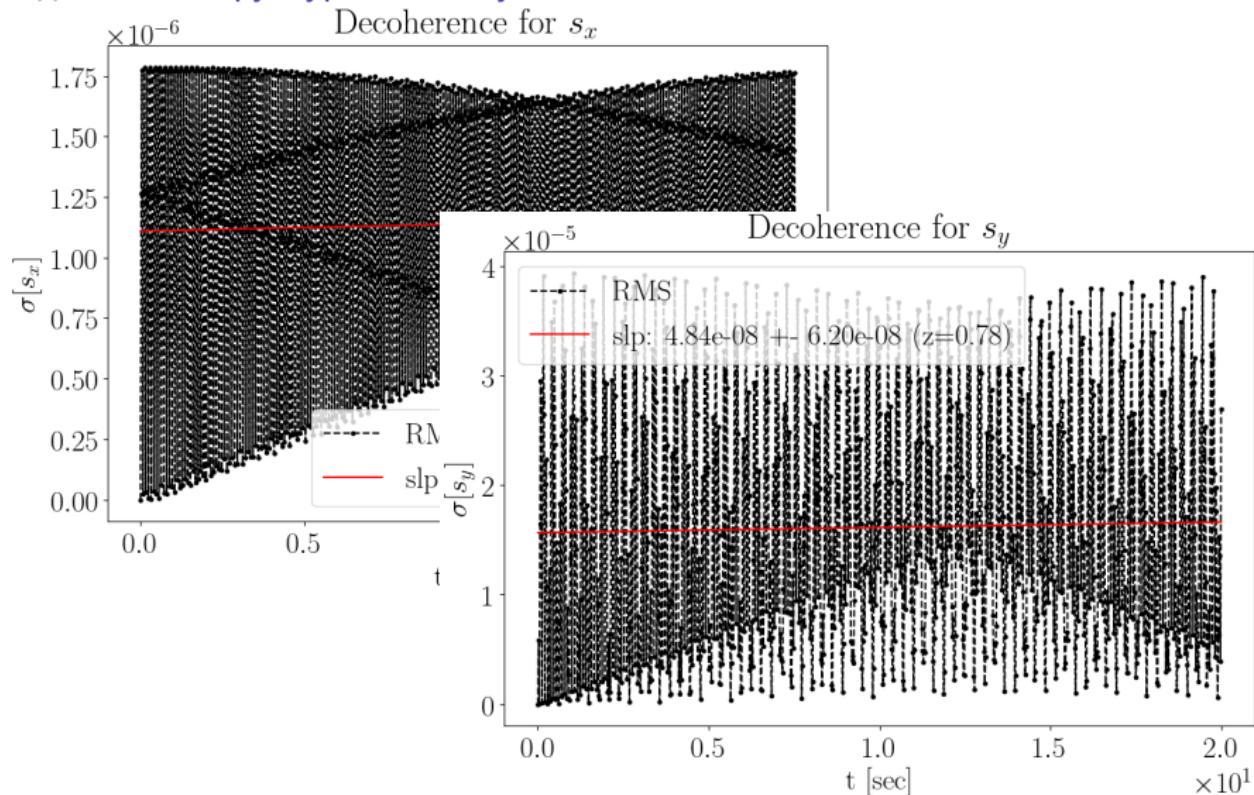
Спин-декогеренция

Неидеальная структура: с секступолями



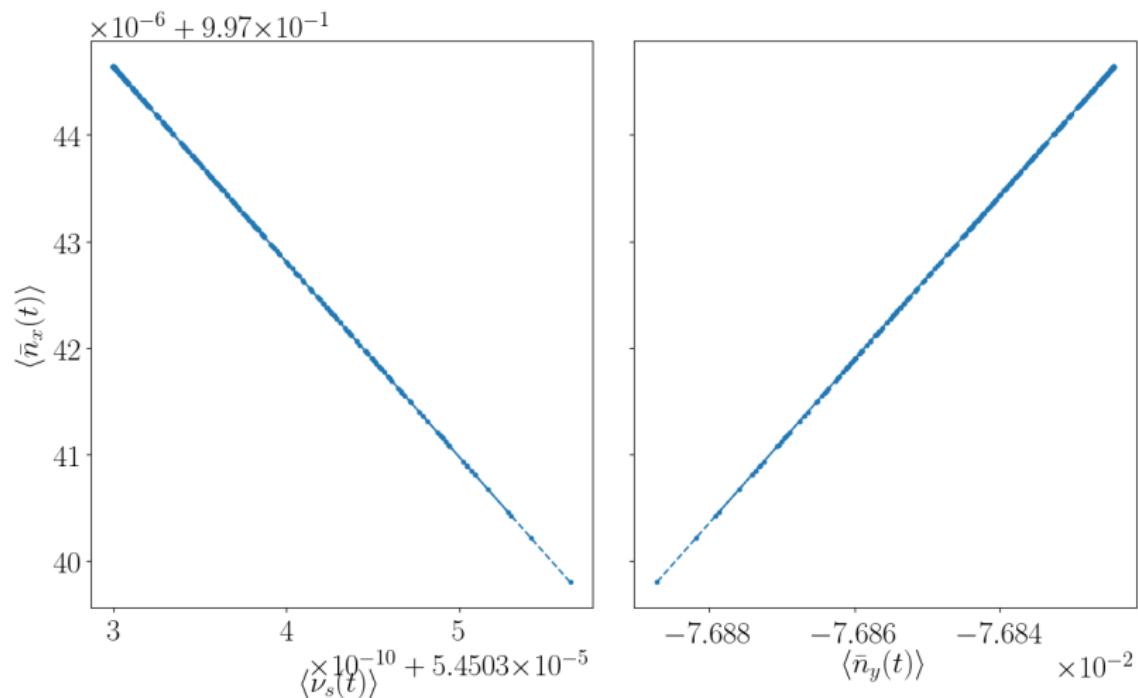
Спин-декогеренция

Неидеальная структура: с секступолями

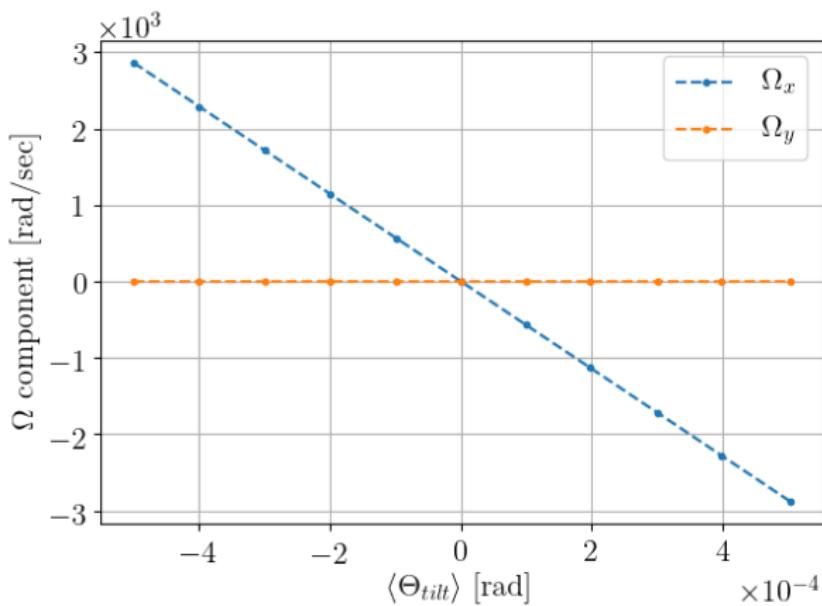


Спин-декогеренция

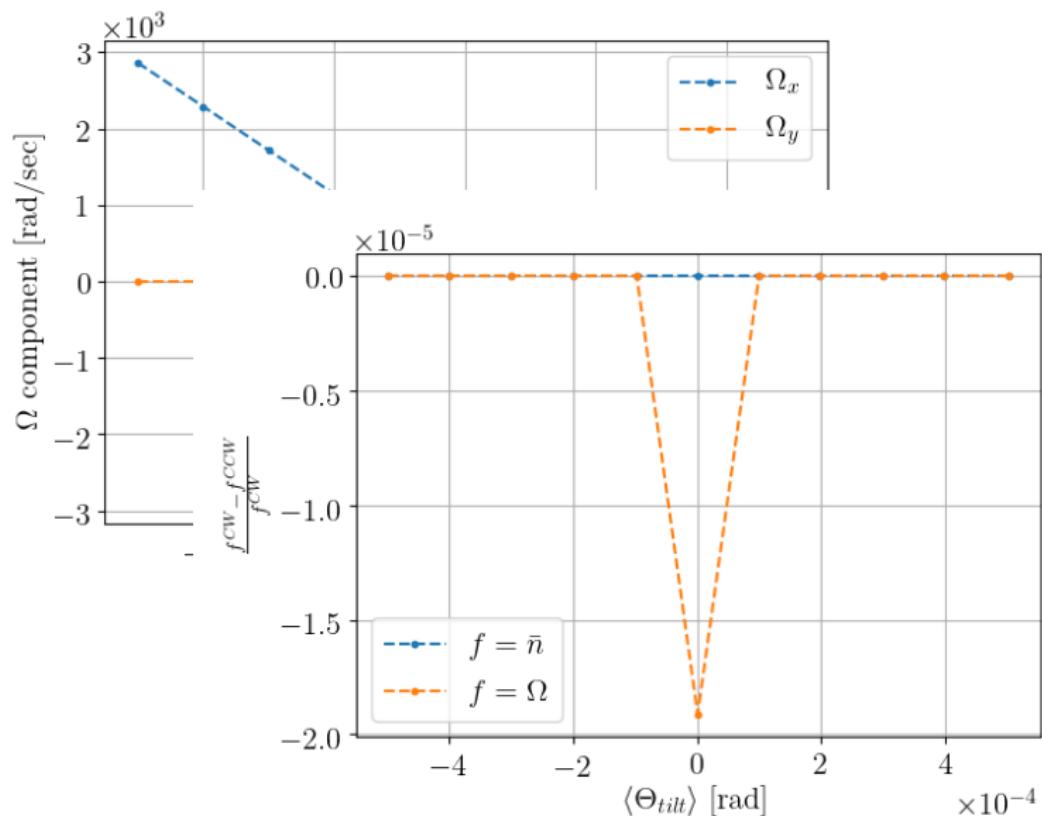
Выравнивание осей стабильного спина частиц



МДМ-компоненты спин-прецессии



МДМ-компоненты спин-прецессии



Статистическое моделирование

Модулированная схема выборки

