

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

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

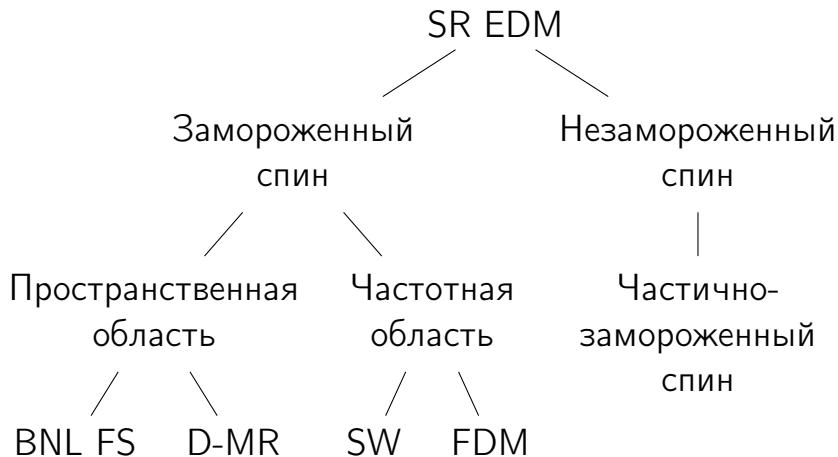
Национальный Исследовательский Ядерный Университет
“МИФИ”
(НИЯУ МИФИ)

Москва, 2019

Цели и задачи

- **Предмет исследования:** методология частотной области для детектирования ЭДМ дейтрона в накопительном кольце с замороженным спином
- **Исследуемые характеристики:**
 - ▶ устойчивость к систематическим ошибкам
 - ▶ статистическая точность
- **Цель исследования:** оценка возможности детектирования ЭДМ дейтрона с точностью 10^{-29} е·см предложенным методом
- **Актуальность:** исследование велось в рамках проекта, посвящённого поиску ЭДМ элементарных частиц

Классификация методологий



Проблемы

- Возмущения спиновой динамики
- Декогеренция спинов частиц пучка
- Поля неидеальности машины
- Смена полярности ведущего поля ускорителя

Общие проблемы измерения ЭДМ методом накопительного кольца

И их канонические решения

Спин-Колесо

- Возмущения полей
- Бетатронное движение
- * Обе вызывают возмущение направления \vec{n}

Частное решение

- Спиновая декогеренция
- Р: Секступольные поля
- Неидеальности машины
- Р: CW/CCW-инжекция

План работ

1 Возмущения спиновой динамики

- ▶ Постановка проблемы
- ▶ Результаты симуляции

2 Декогеренция спинов

- ▶ Симуляция подавления декогеренции в идеальном ускорителе
- ▶ Симуляция подавления декогеренции в неидеальном ускорителе
- ▶ Анализ механизма подавления декогеренции

- 3 **Поля неидеальности ускорителя**
 - ▶ Исследование зависимости от распределения неидеальностей вдоль кольца
 - ▶ Сравнение систематической ошибки при движении пучка в прямом и обратном направлениях в кольце
- 4 **Смена полярности ведущего поля**
 - ▶ Калибровка эффективного Лоренц-фактора
 - ▶ Результаты симуляции

- 5 Спин-тюн эквивалентность частиц с одинаковыми эффективными Лоренц-факторами
 - ▶ Формулировка А
 - ▶ Формулировка В
- 6 Структуры колец для поиска ЭДМ методом замороженного спина
 - ▶ BNL FS
 - ▶ QFS 6.3
 - ▶ QFS E+B

Возмущения спиновой динамики

Постановка проблемы

- Решение Т-БМТ уравнения для вертикальной компоненты спина

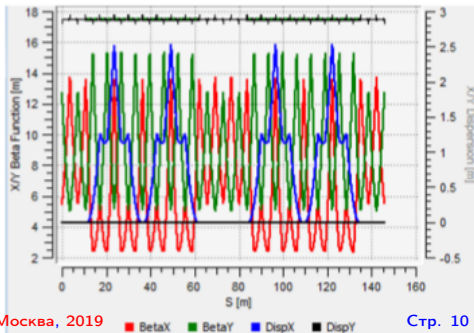
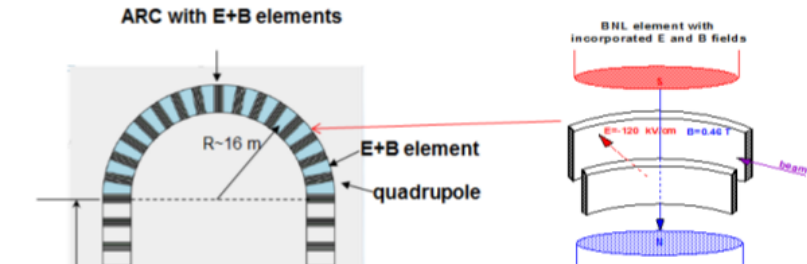
$$s_y(n_{turn}) = \sqrt{(\bar{n}_y \bar{n}_z)^2 + \bar{n}_x^2} \cdot \sin(2\pi\nu_s \cdot n_{turn} + \delta).$$

- Данные фитируются функцией

$$f(n_{turn}) = a \cdot \sin(b \cdot n_{turn} + c), \quad (a, b, c) = \text{const}$$

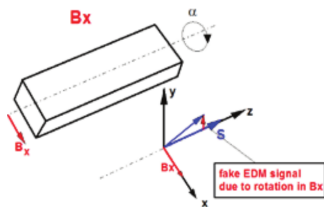
- При значительной вариации ν_s , \bar{n} — ошибка спецификации уравнения регрессии

Симуляція



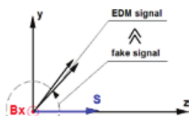
Симуляция

Неидеальности машины



- $\alpha \sim N(\mu_i, 3 \cdot 10^{-4})^\circ$
- μ_i симулирует Спин-Колесо

Частицы



- бетатронные колебания в вертикальной плоскости
 - $E_{FS} \neq E_{kin} \rightarrow E_{FS}$
- $\Rightarrow \bar{n}_x \ll 1 \Rightarrow$
- повышенная чувствительность к возмущениям

Анализ

Данные

TRK данные трекера TR
COSY Infinity

GEN вычислены по
формуле, \bar{n} , ν_s
вычислены на данном
обороте

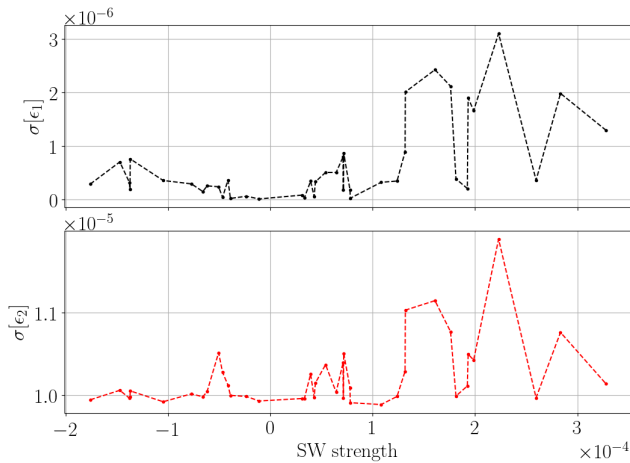
IDL как в GEN, но $\bar{n} = \langle \bar{n} \rangle$,
 $\nu_s = \langle \nu_s \rangle$

Сравнительные статистики

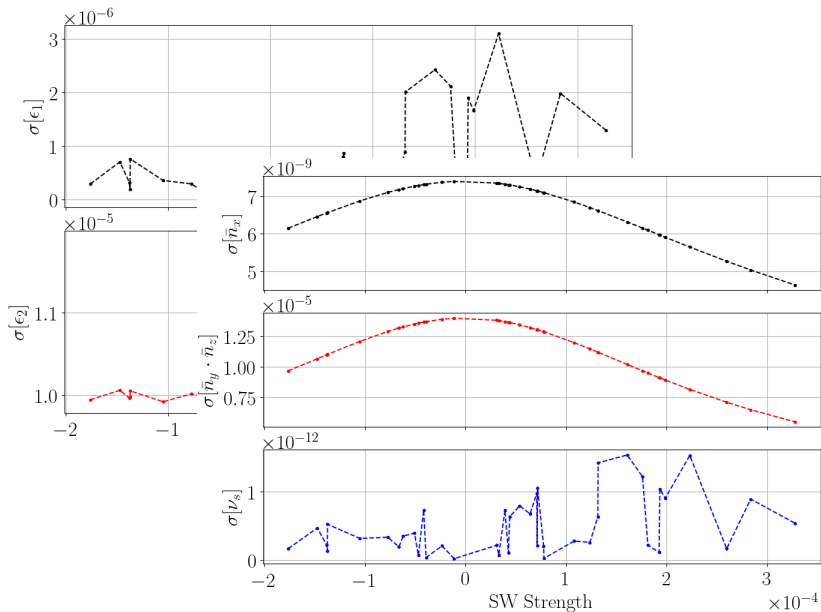
$$\epsilon_1(t) = s_y^{gen}(t) - s_y^{idl}(t)$$

$$\epsilon_2(t) = s_y^{trk}(t) - s_y^{idl}(t)$$

Результаты



Результаты



Выводы

- 1 Влияние вариации \bar{n} на дисперсию невязки между идеальными данными, и трекерными, незначительно, по сравнению с вариацией ν_s
- 2 $\sigma[\epsilon_2] \ll \sigma[P_y]$, значит суперпозиция систематической ошибки со случайной ошибкой измерений поляризации не будет обладать статистически значимой систематичностью

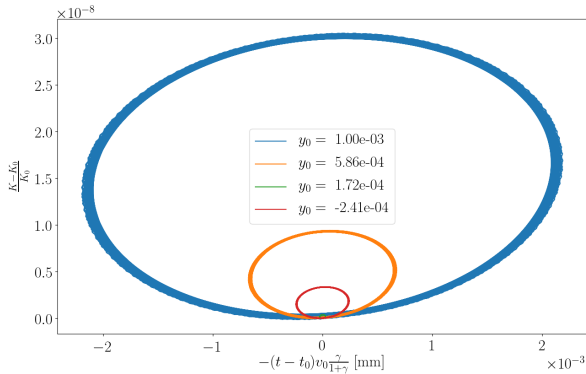
Выводы

- 3 $\sigma[\hat{a}, \hat{b}] < 10\%$, значит даже если вариация \bar{n} будет достаточной, чтобы повлиять на \hat{a} , её эффект на \hat{b} будет уменьшен как минимум в 10 раз
- 4 Этот систематический эффект контролируем. Увеличивая скорость вращения Спин-Колеса, мы непрерывно уменьшали амплитуду колебаний \bar{n}

Декогеренция спинов

Декогеренция спинов

Причины



- $\nu_s = \gamma G$
- из-за разницы длин орбит, у частиц в пучке разная γ_{eq}

Декогеренция спинов

Подавление секступольными полями

Сдвиг равновесного уровня импульса

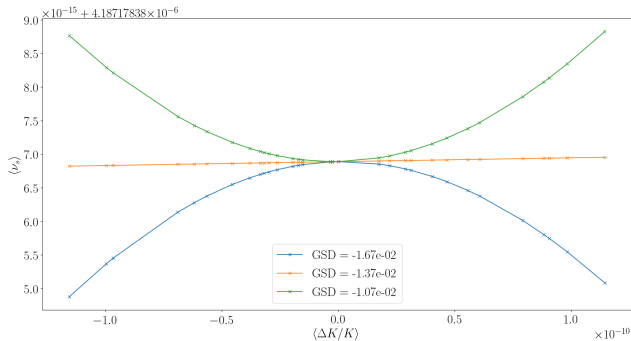
$$\Delta\delta_{eq} = \frac{\gamma_0^2}{\gamma_0^2\alpha_0-1} \left[\frac{\delta_m^2}{2} (\alpha_1 - \alpha_0\gamma^{-2} + \gamma_0^{-4}) + \left(\frac{\Delta L}{L}\right)_\beta \right]$$

Эффекты секступольных полей

$$S_{sext} = \frac{1}{B\rho} \frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2} \begin{cases} \rightarrow \Delta\alpha_{1,sext} = -\frac{S_{sext}D_0^3}{L} \\ \rightarrow \left(\frac{\Delta L}{L}\right)_{sext} = \mp \frac{S_{sext}D_0\beta_{x,y}\varepsilon_{x,y}}{L} \end{cases}$$

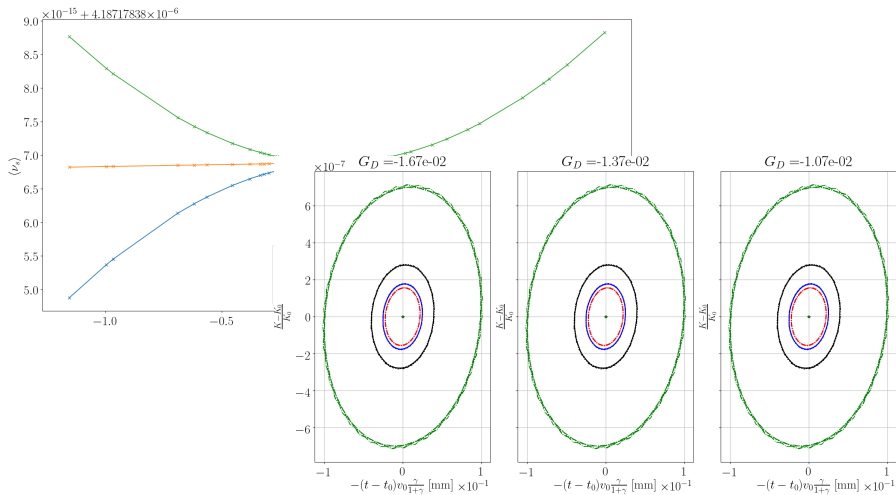
Эффект секступольных полей

Коэффициент сжатия орбиты



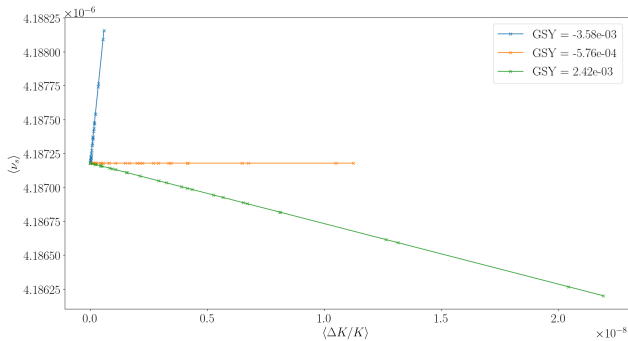
Эффект секступольных полей

Коэффициент сжатия орбиты



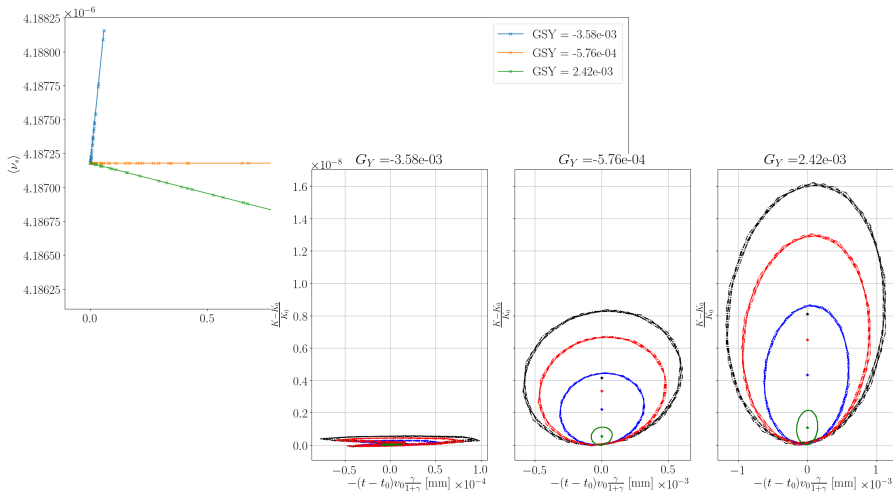
Эффект секstupольных полей

Длина орбиты



Эффект секступольных полей

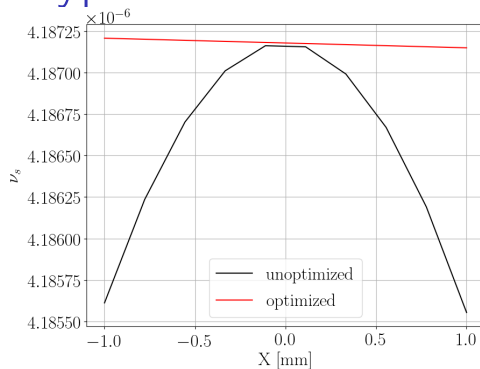
Длина орбиты



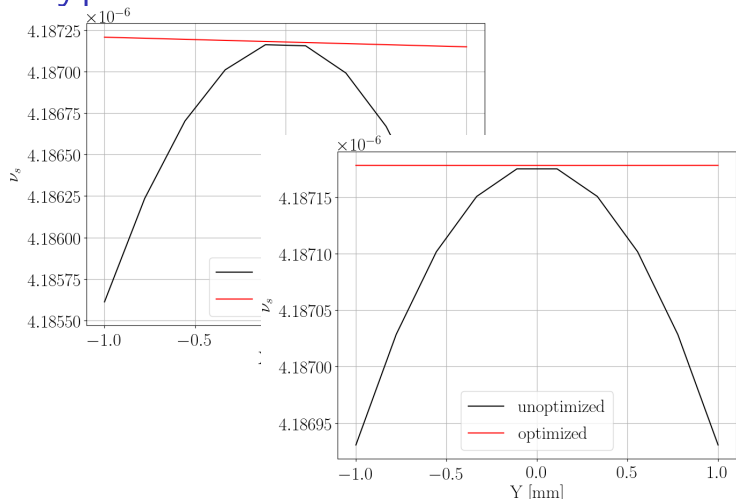
Выводы

- 1 Сигнатура эффекта секступольных полей на коэффициент сжатия орбиты — изменение функциональной зависимости $\langle \nu_s \rangle (\langle \Delta K / K \rangle)$
- 2 ... на длины орбит частиц банча — уменьшение дисперсии $\langle \Delta K / K \rangle$

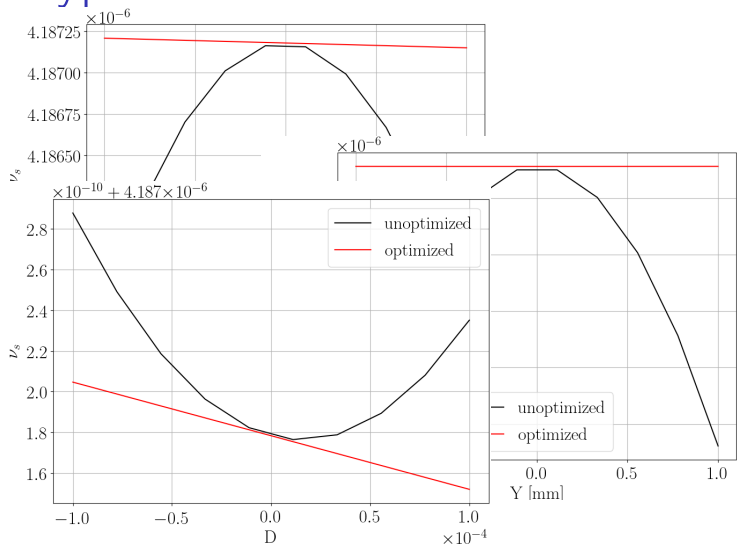
Подавление декогеренции в идеальной структуре



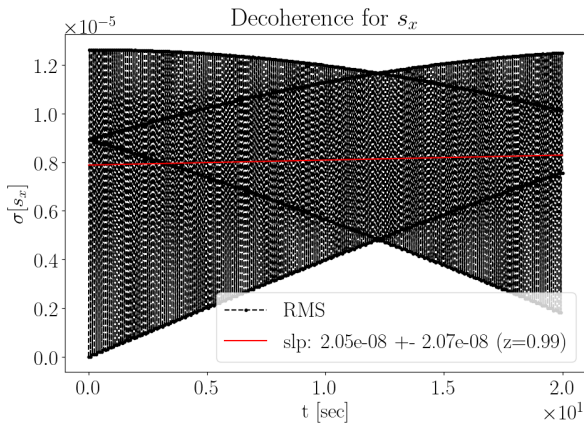
Подавление декогеренции в идеальной структуре



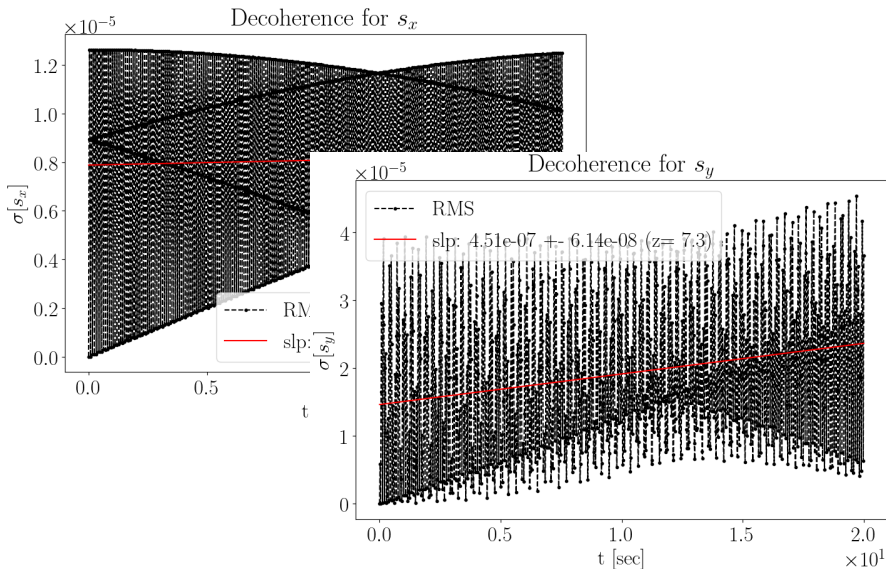
Подавление декогеренции в идеальной структуре



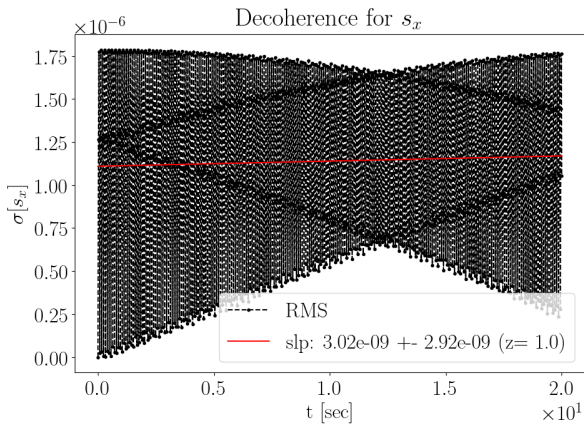
Декогеренция в неидеальной структуре



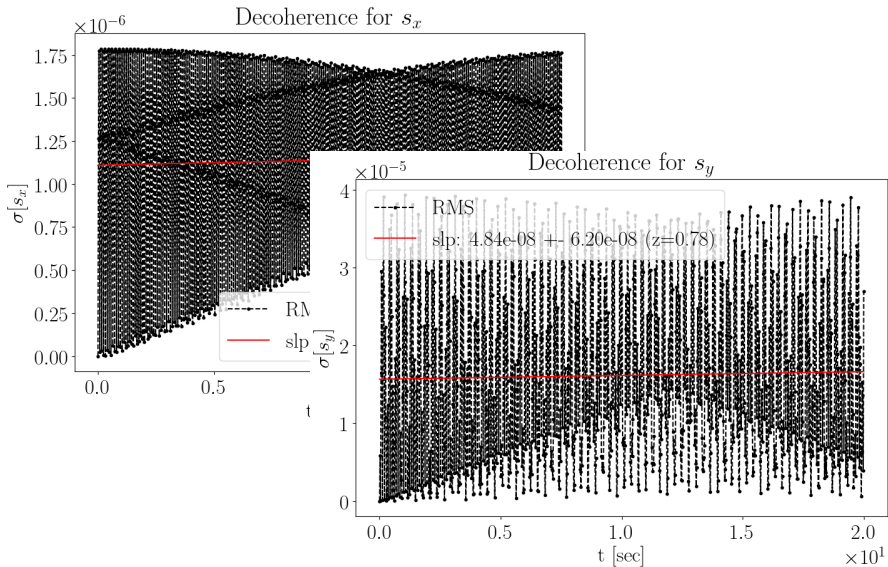
Декогеренция в неидеальной структуре



Включаем секступоли



Включаем секступоли



МДМ фальш-сигнал

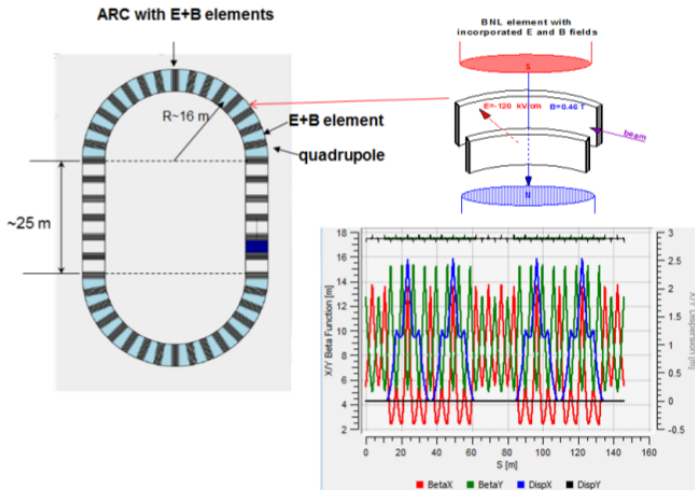
Величина

$$\sigma [\Omega_x^{MDM}] = \frac{q}{m\gamma} \frac{G+1}{\gamma} \frac{\sigma[B_x]}{\sqrt{n}}$$

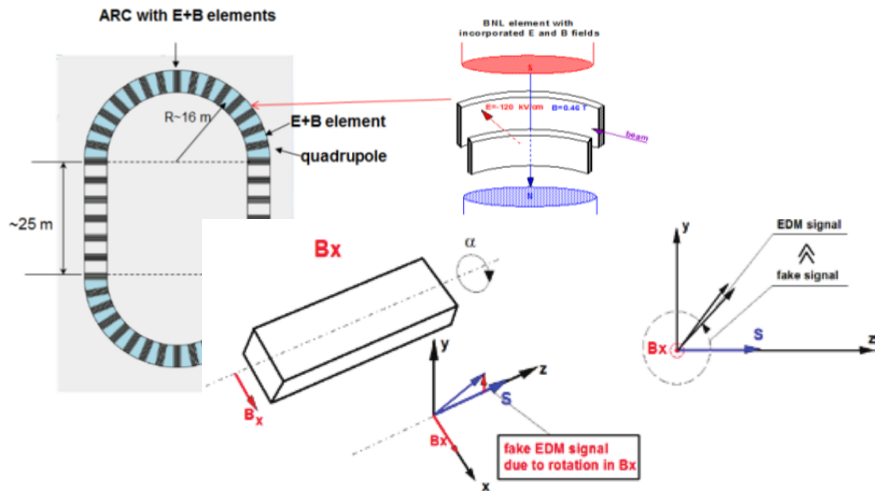
Вопросы, требующие рассмотрения

- Является ли ошибка линейной, т.е.
 $\Omega_x^{MDM} = f(\langle \Theta_{tilt} \rangle)$?
- Является ли ошибка симметричной, относительно обращения движения частицы, т.е.
 $|\Omega_x^{CW}| = |\Omega_x^{CCW}|$?

Рассматриваемая структура

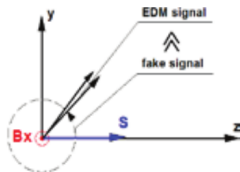
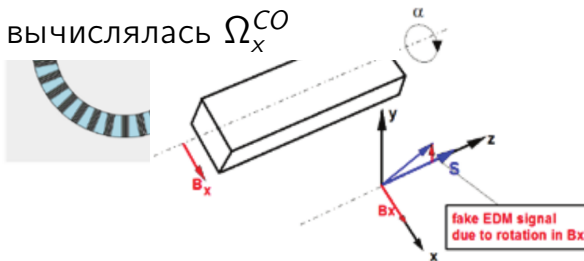
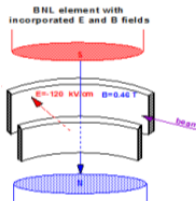


Рассматриваемая структура

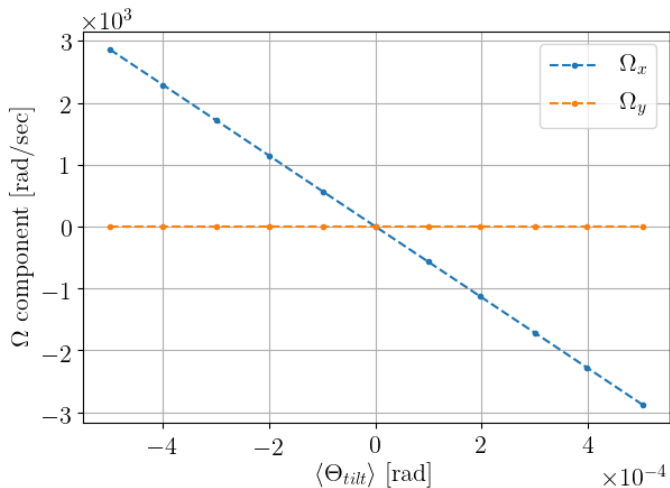


Рассматриваемая структура

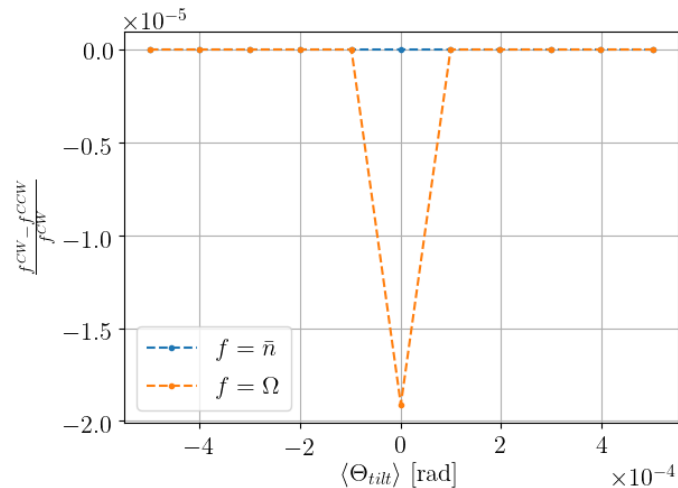
- 11 симуляций
- накоплял только спин-ротаторы
- $\alpha \sim N(\mu_0 \cdot (i - 5), \sigma_0)$
- $\mu_0 = 10 \cdot \sigma_0 = 10^{-4}$ рад
- ряды Тэйлора 3-го порядка
- вычислялась Ω_x^{CO}



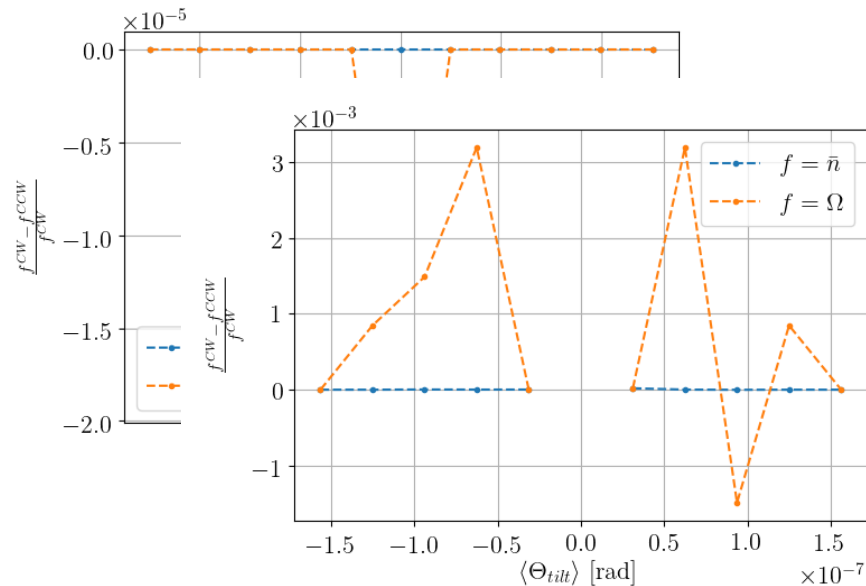
Линейность



Симметричность



Симметричность



Выводы

$\sigma_\theta = 10^{-4}$ рад, $n = 100$ элементов

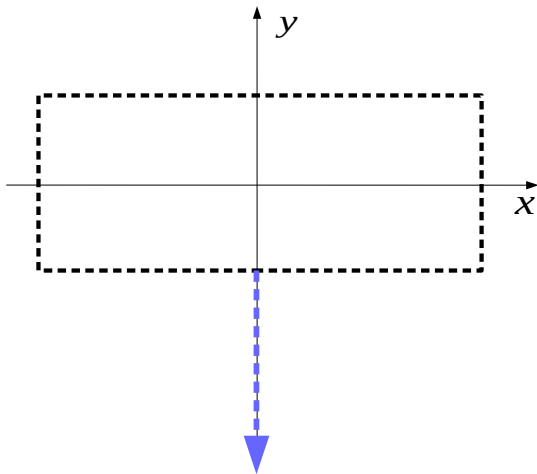
ω^{max} [рад/сек]	$P(\Omega_x^{MDM} < \omega^{max})$
50	67%
100	95%

Свойства

- 1 Линейность
- 2 Асимметричность, вероятно связанная с различием референсных орбит CW и CCW пучков
- 3 Асимметричность

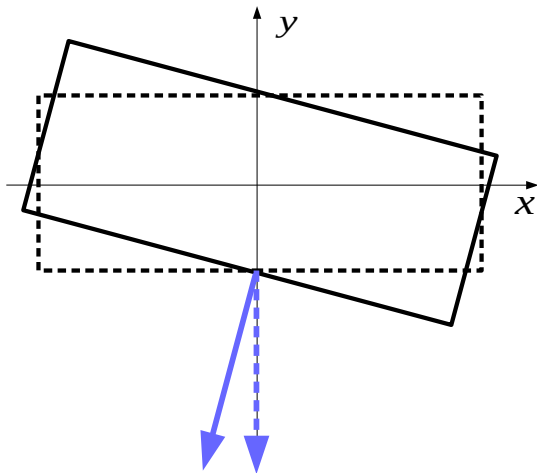
Смена полярности ведущего поля

Зачем?



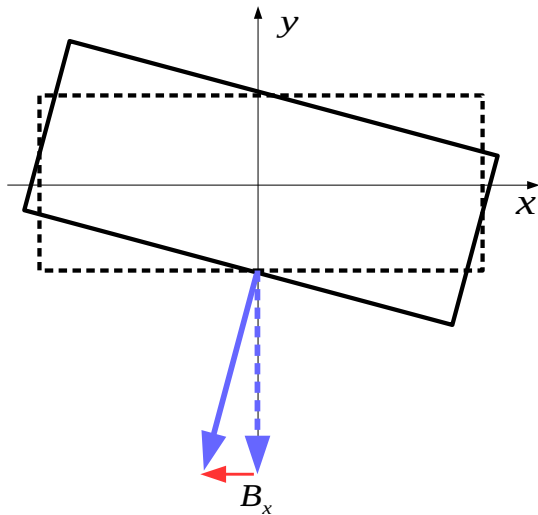
Смена полярности ведущего поля

Зачем?



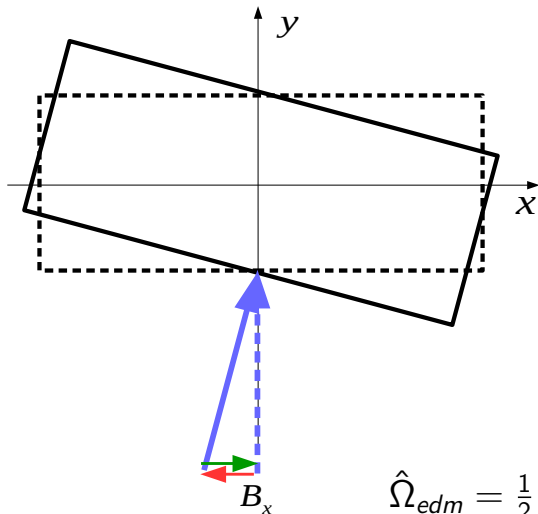
Смена полярности ведущего поля

Зачем?



Смена полярности ведущего поля

Зачем?



$$\hat{\Omega}_{edm} = \frac{1}{2} (\Omega_x^{CW} + \Omega_x^{CCW})$$

В чём проблема?

- $\Omega_x^{MDM} = \frac{q}{m} GB_x$

В чём проблема?

- $\Omega_x^{MDM} = \frac{q}{m} GB_x$
- На самом деле, нужно восстановить Ω_x^{MDM} , а не B_x

В чём проблема?

- $\Omega_x^{MDM} = \frac{q}{m} GB_x$
- На самом деле, нужно восстановить Ω_x^{MDM} , а не B_x
- Восстановление $B_x^{CW} = -B_x^{CCW}$ не достаточно, т.к. точка инъекции и ν_s меняются от цикла к циклу

В чём проблема?

- $\Omega_x^{MDM} = \frac{q}{m} GB_x$
- На самом деле, нужно восстановить Ω_x^{MDM} , а не B_x
- Восстановление $B_x^{CW} = -B_x^{CCW}$ не достаточно, т.к. точка инъекции и ν_s меняются от цикла к циклу
- К тому же, асимметрия структуры в отношении спин-динамики (см. выше)

В чём проблема?

- $\Omega_x^{MDM} = \frac{q}{m} GB_x$
 - На самом деле, нужно восстановить Ω_x^{MDM} , а не B_x
 - Восстановление $B_x^{CW} = -B_x^{CCW}$ не достаточно, т.к. точка инжекции и ν_s меняются от цикла к циклу
 - К тому же, асимметрия структуры в отношении спин-динамики (см. выше)
- ⇒ Нужно восстанавливать эффективный Лоренц-фактор пучка

Калибровка эффективного Л-фактора

- ν_s — инъективная функция γ_{eff} , значит
$$\Omega_y(\gamma_{eff}^1) = \Omega_y(\gamma_{eff}^2) \rightarrow \gamma_{eff}^1 = \gamma_{eff}^2$$

Калибровка эффективного Л-фактора

- ν_s — инъективная функция γ_{eff} , значит $\Omega_y(\gamma_{eff}^1) = \Omega_y(\gamma_{eff}^2) \rightarrow \gamma_{eff}^1 = \gamma_{eff}^2$
- Пространство траекторий частиц в ускорителе поделено на классы эквивалентности $[\gamma_{eff}]$

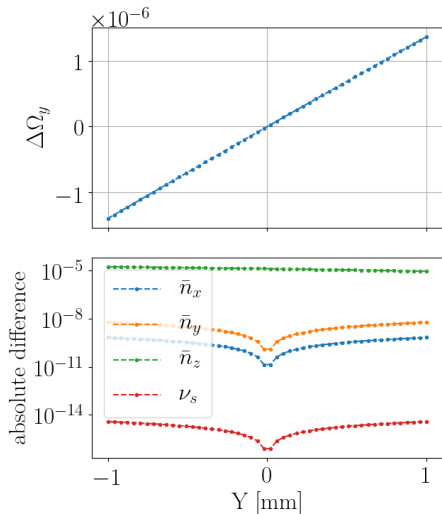
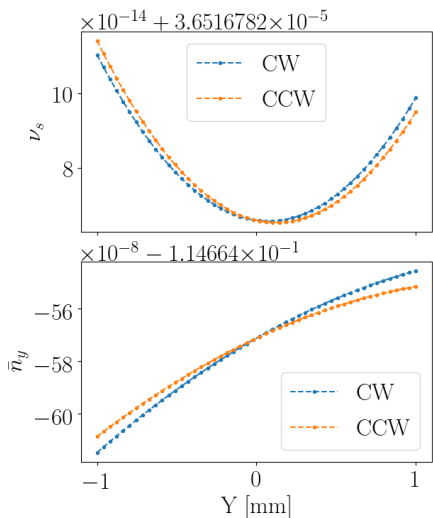
Калибровка эффективного Л-фактора

- ν_s — инъективная функция γ_{eff} , значит $\Omega_y(\gamma_{eff}^1) = \Omega_y(\gamma_{eff}^2) \rightarrow \gamma_{eff}^1 = \gamma_{eff}^2$
 - Пространство траекторий частиц в ускорителе поделено на классы эквивалентности $[\gamma_{eff}]$
- $\Rightarrow \exists! \gamma_{eff}^0: [\gamma_{eff}^0] = [\Omega_y = 0]$

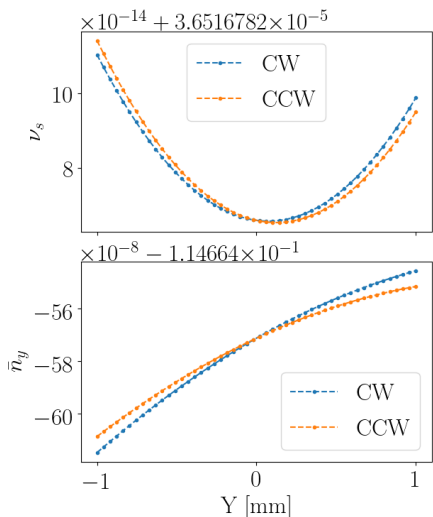
Калибровка эффективного Л-фактора

- ν_s — инъективная функция γ_{eff} , значит $\Omega_y(\gamma_{eff}^1) = \Omega_y(\gamma_{eff}^2) \rightarrow \gamma_{eff}^1 = \gamma_{eff}^2$
 - Пространство траекторий частиц в ускорителе поделено на классы эквивалентности $[\gamma_{eff}]$
- $\Rightarrow \exists! \gamma_{eff}^0: [\gamma_{eff}^0] = [\Omega_y = 0]$
- \Rightarrow если CW, CCW пучки оба заморожены в горизонтальной плоскости, то их γ_{eff} равны

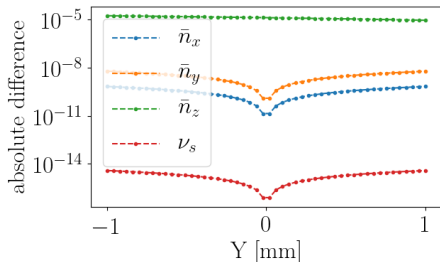
Симуляция



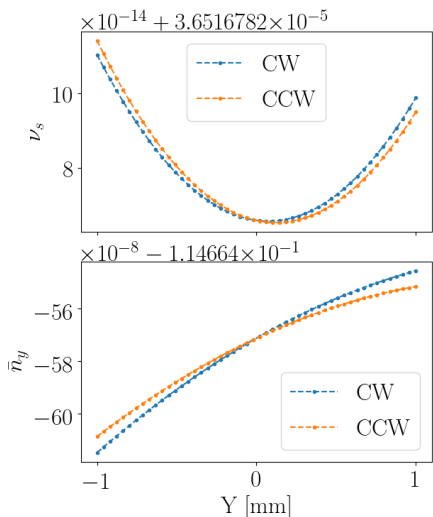
Симуляция



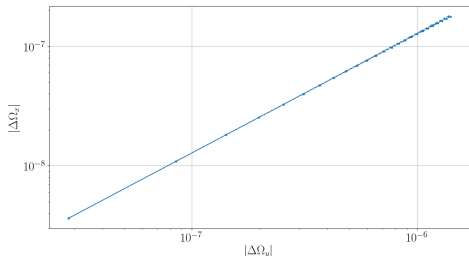
- Не нужна смена S_{sext} при обращении пучка
- $\nu_s^{\text{CW}} \approx \nu_s^{\text{CCW}} \Rightarrow |\Omega_x^{\text{CW}}| \approx |\Omega_x^{\text{CCW}}|$



Симуляция



- Не нужна смена S_{sext} при обращении пучка
- $\nu_s^{\text{CW}} \approx \nu_s^{\text{CCW}} \Rightarrow |\Omega_x^{\text{CW}}| \approx |\Omega_x^{\text{CCW}}|$



Перспективы развития проекта

- Поляризованная программа на ускорительном комплексе НИКА, ОИЯИ, Дубна

Результаты работы

- Изучены эффекты спиновой динамики, составляющие систематические ошибки эксперимента:
 - ▶ возмущения спиновой динамики, вызванные бетатронным движением
 - ▶ декогеренция спинов
 - ▶ МДМ прецессия, связанная с неидеальностью машины
- Описаны средства борьбы с каждым из эффектов, проведено численное моделирование

- Сформулированы понятия:
 - ▶ методов пространственной и частотной областей
 - ▶ двумерно-замороженного спина
 - ▶ необходимые условия успешного измерения ЭДМ в накопительном кольце
 - ▶ методология, удовлетворяющая этим условиям
- Описаны структуры с замороженным и квази-замороженным спином

Спасибо за внимание!